



ПЕТАР БОШЊАКОВИЋ

ОСНОВИ ЕЛЕКТРОНИКЕ



**ВЕТШ
БЕОГРАД**

др Петар Бошњаковић
Основи електронике

Рецензенти

Др Славица Маринковић,
Мр Борислав Хаџибабић

Цртежи, обрада и припрема текста
Петар Бошњаковић

Корице
Ненад Толић

Издавач
ВЕТШ, Београд

За издавача

Др Драгољуб Мартиновић, директор

CIP – каталогизација у публикацији
Народна библиотека Србије, Београд

631. 38(075.8)
004. 31(075.8)

БОШЊАКОВИЋ, Петар

Основи електронике / Петар Бошњаковић.
; [цртежи Петар Бошњаковић]. - Београд :
Виша електротехничка школа, 2006 (Београд
: МСТ Гајић). – 256 стр. : илустр. ; 24 cm

Тираж 300. – Напомене уз текст. –
Библиографија уз свако поглавље. –
Регистар.

ISBN 86-85081-60-2
а) Електроника
COBISS.SR-ID 130310668

ПРЕДГОВОР

Ова књига је, првенствено, намењена студентима електротехничке струке, али и онима који желе да се упознају са основама области која је обележила двадесети век. Ни једно подручје савремене науке није у толикој мери допринело развоју материјалне основе људског друштва, као што је то учинила електроника. Револуционарни развој електронике довео је до корених промена у сродним областима, као што су телекомуникације, рачунарство, индустрија производа широке потрошње, индустријска аутоматика и мерна техника, али и у областима трговине, медицине, спорта, уметности и образовања. Посматрана у целини, електроника, чији се годишњи промет исказује цифром са тринаест нула, је највећа индустријска грана савременог света, већа од аутомобилске и нафтне индустрије. Својеврсно признање електроници, као обележју епохе, посредно представља и Нобелова награда коју су у последњој години другог миленијума добили Жорес Алферов и Херберт Кремер, за развој полупроводничких структура које се користе у електроници и оптоелектроници, и Џек Килби, за допринос проналаску интегрисаних кола. Динамичан, непрекидни развој је основно својство електронике. Једино што је стално у овој области, то су промене.

Процеси који се одвијају у електронским елементима предмет су изучавања физике полупроводника. У овој књизи се разматрају само у сажетом облику, са циљем целовитости приказа, лакшег сагледавања и разумевања општих и посебних својстава електронских кола и система. У првом поглављу су дати основни математички изрази којима се описују електрична својства чврстих тела.

Основни појмови, који се при анализи и пројектовању електронских кола и система користе за описивање њихових својстава и појава које се у њима дешавају, обрађују се у другом поглављу ове књиге. Дате су дефиниције савршених (идеалних) елемената. Приказана је класификација и дат је систематизован опис својстава основних електронских елемената.

У трећем поглављу су обрађене полупроводничке диоде. Описана је подела диодних елемената према начину рада и према намени. Разматрају се специфична својства различитих врста полупроводничких диода. Приказан је поступак анализе диодних кола применом линеаризованих модела.

Биполарни транзистори, код којих у процесу преношења наелектрисања учествују слободни носиоци оба поларитета, обрађени су у четвртом поглављу. Описан је принцип рада и дефинисане су основне врсте спреге транзистора као појачавачког елемента. Приказане су статичке карактеристике и дефинисане области рада. Разматрана су ограничења у раду и својства биполарног транзистора. Приказани су поступци поларизације којима се транзистор доводи у стање у којем испољава појачавачка својства. Описана су еквивалентна кола и дати су општи елементи анализе кола са биполарним транзисторима.

У петом поглављу су обрађени униполарни транзистори, код којих процес преношења наелектрисања остварују слободни носиоци само једног поларитета, а појачавачки ефекат се постиже променом, посредством електричног поља, проводности средине (канала) кроз које слободни носиоци пролазе. Приказан је принцип рада, описане су статичке карактеристике и дефинисане области рада транзистора са ефектом поља чији принцип рада је заснован на постојању PN-споја између управљачке електроде (гејта) и канала. Обрађени су разноврсни начини поларизације транзистора, представљена су еквивалентна кола и дати су општи

елементи анализе електронских склопова у којима се ови транзистори користе. Описан је принцип рада транзистора са изолованим гејтом. Разматрају се разлике у начину рада транзистора са уграђеним и подстакнутим (индукованим) каналом. Приказане су статичке карактеристике, дефинисане области рада и описан начин поларизације.

Тиристор, полупроводнички елементи који имају само два стања - проводно (укључено, *on*) и непроводно (искључено, *off*), обрађени су у шестом поглављу. Објашњен је процес који доводи до постојања подручја са негативном динамичком отпорношћу најмање у једном квадранту статичке $U-I$ карактеристике вишеслојног полупроводничког елемента израђеног од силицијума. Описани су структура и основна својства тиристора са две, три и четири електроде.

Седмо поглавље посвећено је интегрисаној електроници. Приказане су две основне класификације интегрисаних електронских кола: са аспекта технологије производње и са аспекта примене. Дат је кратак преглед основних обележја интегрисаних аналогних, дигиталних и мешовитих кола.

За разумевање физичких основа процеса који се одвијају у електронским елементима неопходно је познавање општих поставки савремене физике о структури материје. У осмом поглављу су, у сажетом облику, представљени основи теорије атома и физике чврстог стања. Приказани су математички модели којима се описују преношење наелектрисања кроз PN-спој, као и процеси у биполарним транзисторима и транзисторима са ефектом поља.

Индекс појмова на крају књиге олакшаће читаоцу сналажење при упознавању са изложеном материјом и повезивање стечених знања. Читаоцима намерним да се дубље и детаљније упусте у истраживање тајни чудесног света електронике намењен је приказ одговарајуће литературе на крају сваког поглавља. Са циљем да се читаоцу олакша проширивање знања, коришћењем литературе на другим језицима, стране речи, односно изрази од којих потичу стручни називи у електроници који се употребљавају у нашем језику, дати су у заградама, косим словима.

При припреми књиге која се бави овом проблематиком неизбежне су тешкоће термилошке природе. У области која се тако динамично развија и шири, проблем налажења одговарајућих израза на нашем језику за називе различитих појава и кола, представља трајан и несумњиво сложен задатак. Захваљујем др Славици Маринковић и мр Бориславу Хаџибабићу на корисним напоменама у погледу садржаја и обима овог уџбеника који, заједно са одговарајућом збирком задатака, чини целину којом се настоји да се студентима електротехнике пружи заокружена основа за даље успешно праћење стручних предмета из електронике, као и за примену стеченог знања у инжењерској пракси. Посебно се захваљујем својим некадашњим студентима, инжењерима Ненаду Толићу, Милутину Нешићу и Радосаву Јекићу, сарадницима у Лабораторији за електронику, који су своје искуство у раду са студентима на лабораторијским вежбама, преточили у корисне сугестије како да се материја која се обрађује приближи читаоцима са различитим предзнањима.

Аутор

САДРЖАЈ

1. ФИЗИЧКИ ОСНОВИ ЕЛЕКТРОНИКЕ	1
1.1. ОСНОВНИ ПОЈМОВИ	1
1.1.1. СТРУЈА ПРОВОЂЕЊА	5
1.1.2. СТРУЈА ДИФУЗИЈЕ	9
1.2. ЕЛЕКТРИЧНА СВОЈСТВА ЧВРСТИХ ТЕЛА	10
1.3. PN-СПОЈ	15
1.3.1. ПРОБОЈ PN-СПОЈА	17
1.3.2. ЕЛЕКТРИЧНА СВОЈСТВА PN-СПОЈА	19
1.3.2.1. Отпорност PN-споја	19
1.3.2.2. Капацитивност PN-споја	19
1.3.2.3. Утицај температуре на карактеристике PN-споја	20
1.4. СПОЈ МЕТАЛА И ПОЛУПРОВОДНИКА	21
1.5. СУПЕРПРОВОДНОСТ	22
1.6. ЕМИСИЈА И АПСОРПЦИЈА СВЕЛОСТИ	23
1.7. ЛИТЕРАТУРА	25
2. ЕЛЕМЕНТИ ЕЛЕКТРОНСКИХ КОЛА И СИСТЕМА	27
2.1 ОСНОВНИ ПОЈМОВИ	27
2.2 ЕЛЕМЕНТИ СА ЈЕДНИМ ПРИСТУПОМ	33
2.2.1 АКТИВНИ ЕЛЕМЕНТИ	33
2.2.2 ПАСИВНИ ЕЛЕМЕНТИ	35
2.2.3 САВРШЕНИ ЕЛЕМЕНТИ СА ЈЕДНИМ ПРИСТУПОМ	41
2.3 ЕЛЕМЕНТИ СА ДВА И ВИШЕ ПРИСТУПА	43
2.3.1 КАРАКТЕРИСТИКА ПРЕНОСА	43
2.3.2 ЛИНЕАРНИ МОДЕЛИ ЕЛЕМЕНАТА СА ДВА ПРИСТУПА	44
2.3.3 ПОЈАЧАВАЧИ	48
2.3.4 НЕЛИНЕАРНИ ЕЛЕМЕНТИ	50
2.3.5 САВРШЕНИ ЕЛЕМЕНТИ СА ДВА ПРИСТУПА	52
2.4 ЕЛЕКТРОНСКЕ ЦЕВИ	53
2.5 ПОЛУПРОВОДНИЧКИ ЕЛЕМЕНТИ	55
2.5.1 ДИОДЕ	56
2.5.2 ТРАНЗИСТОРИ	57
2.5.2.1. Биполарни транзистори	57
2.5.2.2. Униполарни транзистори	59
2.5.3 ТИРИСТОРИ	62
2.5.4 ФОТОЕЛЕКТРИЧНИ И ОПТОЕЛЕКТРОНСКИ ЕЛЕМЕНТИ	62
2.6 ЛИТЕРАТУРА	64

3. ДИОДЕ	65
3.1. КЛАСИФИКАЦИЈА	65
3.2. КАРАКТЕРИСТИКЕ ПОЛУПРОВОДНИЧКИХ ДИОДА СА ЈЕДНИМ PN-СПОЈЕМ	67
3.2.1. ОТПОРНОСТ	70
3.2.2. КАПАЦИТИВНОСТ	71
3.2.3. ДИНАМИЧКЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ ПОЛУПРОВОДНИЧКИХ ДИОДА	72
3.2.3.1. Успостављање проводног стања	73
3.2.3.2. Успостављање непроводног стања	74
3.2.4. ТЕМПЕРАТУРСКА ЗАВИСНОСТ КАРАКТЕРИСТИКА	77
3.3. ДИОДЕ СА ПРОМЕНЉИВОМ КАПАЦИТИВНОШЋУ	78
3.4. PIN-ДИОДЕ	79
3.5. ЦЕНЕР-ДИОДЕ	80
3.6. ТУНЕЛ-ДИОДЕ	82
3.7. ШОТКИ-ДИОДЕ	83
3.8. ФОТООСЕТЉИВЕ ДИОДЕ	84
3.9. ФОТОЕМИТУЈУЋЕ ДИОДЕ	86
3.10. АНАЛИЗА ДИОДНИХ КОЛА	88
3.11. ЛИТЕРАТУРА	91
4. БИПОЛАРНИ ТРАНЗИСТОРИ	93
4.1. ПРИНЦИП РАДА	93
4.2. РАСПОДЕЛА СТРУЈА У БИПОЛАРНОМ ТРАНЗИСТОРУ	95
4.3. ПОЈАЧАВАЧКА СВОЈСТВА БИПОЛАРНИХ ТРАНЗИСТОРА	99
4.4. СТАТИЧКЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ	102
4.4.1. КАРАКТЕРИСТИКЕ УЛАЗА	103
4.4.2. КАРАКТЕРИСТИКЕ ИЗЛАЗА	105
4.4.3. КАРАКТЕРИСТИКЕ ПРЕНОСА	107
4.5. ОБЛАСТИ РАДА ТРАНЗИСТОРА	108
4.5.1. РАДНА ОБЛАСТ ТРАНЗИСТОРА КАО ПОЈАЧАВАЧА	109
4.5.2. ОБЛАСТ ЗАСИЋЕЊА	110
4.5.3. ОБЛАСТ ЗАКОЧЕЊА	111
4.6. ОГРАНИЧЕЊА У РАДУ ТРАНЗИСТОРА	113
4.7. ПОЛАРИЗАЦИЈА ТРАНЗИСТОРА	115
4.7.1. ОДРЕЂИВАЊЕ ПОЛОЖАЈА МИРНЕ РАДНЕ ТАЧКЕ	115
4.7.2. ТЕМПЕРАТУРСКА СТАБИЛНОСТ РАДНЕ ТАЧКЕ	117
4.8. АНАЛИЗА КОЛА СА БИПОЛАРНИМ ТРАНЗИСТОРИМА	120
4.8.1. ЕКВИВАЛЕНТНА КОЛА БИПОЛАРНИХ ТРАНЗИСТОРА	121
4.8.2. МАТЕМАТИЧКА АНАЛИЗА КОЛА СА БИПОЛАРНИМ ТРАНЗИСТОРИМА	126
4.9. ЛИТЕРАТУРА	131

5. ТРАНЗИСТОРИ СА ЕФЕКТОМ ПОЉА	133
5.1. ПРИНЦИП РАДА	133
5.2. СПОЈНИ ТРАНЗИСТОРИ СА ЕФЕКТОМ ПОЉА	135
5.2.1. СТАТИЧКЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ	140
5.2.1.1. Карактеристика излаза	140
5.2.1.2. Карактеристика преноса	142
5.2.2. ПОЛАРИЗАЦИЈА	144
5.2.2.1. Поларизација транзистора са два независна извора напона	144
5.2.2.2. Поларизација једним извором напона	147
5.2.3. ЕКВИВАЛЕНТНА КОЛА	148
5.2.4. АНАЛИЗА КОЛА СА СПОЈНИМ ТРАНЗИСТОРИМА СА ЕФЕКТОМ ПОЉА	151
5.3. MOS-ТРАНЗИСТОРИ	156
5.3.1. ПРИНЦИП РАДА	157
5.3.1.1. Транзистори са уграђеним каналом	157
5.3.1.2. Транзистори са индукованим каналом	159
5.3.2. СТАТИЧКЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ	162
5.3.2.1. Карактеристика излаза	162
5.3.2.2. Карактеристика преноса	163
5.3.3. ПОЛАРИЗАЦИЈА	164
5.3.4. ЕКВИВАЛЕНТНА КОЛА	164
5.4. ЛИТЕРАТУРА	165
 6. ТИРИСТОРИ	 167
6.1. ДИОДНИ ТИРИСТОР	168
6.1.1. СИМЕТРИЧНИ ДИОДНИ ТИРИСТОР	172
6.2. ТРИОДНИ ТИРИСТОР	173
6.2.1. СИМЕТРИЧНИ ТРИОДНИ ТИРИСТОР	177
6.3. ТИРИСТОРСКИ РРЕКИДАЧ СА ДВА ГЕЈТА	179
6.4. ФОТО-ТИРИСТОРИ	179
6.5. ЛИТЕРАТУРА	181
 7. ИНТЕГРИСАНА ЕЛЕКТРОНСКА КОЛА	 183
7.1. СИГНАЛИ У ЕЛЕКТРОНИЦИ	185
7.2. ТЕХНОЛОГИЈА	193
7.3. ИНТЕГРИСАНА КОЛА ЗА ОБРАДУ АНАЛОГНИХ СИГНАЛА	197
7.4. ИНТЕГРИСАНА КОЛА ЗА ОБРАДУ ДИГИТАЛНИХ СИГНАЛА	198
7.5. МЕШОВИТА ИНТЕГРИСАНА КОЛА	201
7.3. ЛИТЕРАТУРА	204

8. ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКА	205
8.1. МОДЕЛ АТОМА	206
8.2. ФИЗИКА ЧВРСТОГ СТАЊА	212
8.2.1. ЕНЕРГИЈСКИ ОПСЕЗИ АТОМА У ЧВРСТИМ ТЕЛИМА	213
8.2.2. ЕЛЕКТРИЧНА СТРУЈА У ЧВРСТИМ ТЕЛИМА	214
8.3. ПОЛУПРОВОДНИЦИ	218
8.3.1. ПОЛУПРОВОДНИЦИ СА ПРИМЕСАМА	222
8.4. ПОЛАРИЗАЦИЈА PN-СПОЈА	225
8.4.1. КАРАКТЕРИСТИКА PN-СПОЈА	228
8.4.2. ПРОБОЈ PN-СПОЈА	231
8.4.3. ОТПОРНОСТ PN-СПОЈА	233
8.4.4. КАПАЦИТИВНОСТ PN-СПОЈА	234
8.5. ФИЗИЧКИ МОДЕЛ БИПОЛАРНОГ ТРАНЗИСТОРА	236
8.6. ФИЗИЧКИ МОДЕЛ ТРАНЗИСТОРА СА ЕФЕКТОМ ПОЉА	242
8.6.1. СПОЈНИ ТРАНЗИСТОРИ	243
8.6.1.1. Линеарна област	243
8.6.1.2. Триодна област	245
8.6.1.3. Област засићења	248
8.6.2. MOS-ТРАНЗИСТОРИ	249
8.6.2.1. Транзистори са уграђеним каналом	249
8.6.2.2. Транзистори са индукованим каналом	250
8.7. ЛИТЕРАТУРА	251
ОЗНАКЕ	253
ИНДЕКС	255

1. ФИЗИЧКИ ОСНОВИ ЕЛЕКТРОНИКЕ

Електроника се у практичном смислу дефинише као “**подручје електротехнике** у којем се користи својство несиметричне проводности” [1]. У најопштијем смислу, електроника је “**област физике** која се бави емисијом, понашањем и деловањем електрона, и електронским уређајима” [2]. И без упуштања у анализу ових дефиниција, може се закључити да је познавање својстава средине у којој постоји кретање наелектрисања значајно за сагледавање процеса образовања електричне струје у њима, правилну употребу елемената заснованих на појавама електричне проводности у вакууму, гасовима и чврстим телима, развој и коришћење електронских елемената, компонената и склопова.

Полазећи од основних израза који описују односе електричних величина, у овом поглављу се разматрају појаве својствене процесима који се одвијају у електронским елементима и системима. Дати су најзначајнији математички изрази којима се описују електрична својства чврстих тела. Разматрају се у сажетом облику физичке појаве које се користе за остваривање елемената од којих се граде електронски уређаји. Описана су најопштија својства полупроводника и електричне карактеристике PN-споја. Детаљнији приказ атомске теорије и физике полупроводника дат је у осмом поглављу ове књиге.

1.1. ОСНОВНИ ПОЈМОВИ

Наелектрисање¹ је основна физичка величина, којом се описују електричне појаве у природи. Наелектрисано тело ствара у својој околини електрично поље² које делује силом на друга наелектрисана тела која се у

¹ Количина електрицитета, електрични набој, електрично оптерећење, електрични товар (*electric charge, elektrische Ladung, электрический заряд*).

² Под појмом физичко поље у ширем смислу подразумева се простор (домен) у којем је физичка величина расподељена. У ужем смислу, тим називом се означава и сама (физичка) величина која је дефинисана у свакој тачки једног домена.

том пољу налазе. Електрична сила $\vec{F}$ је једнака производу наелектрисања тела на које поље делује, q , и вектора електричног поља $\vec{E}$:

$$\vec{F} = q \vec{E} . \quad (1.1)$$

У општем случају интензитет, правац и смер вектора електричног поља се разликују у различитим тачкама простора. Када се наелектрисано тело креће под дејством неке спољашне силе у електричном пољу (насупротив деловању силе електричног поља), извршени рад прелази у електричну енергију.

Електрична потенцијална енергија наелектрисаног тела, које се налази у некој тачки М електричног поља $\vec{E}$, једнака је раду који сила електричног поља изврши при премештању посматраног тела из тачке М, у којој се тело налази, у референтну тачку R, у којој је електрична потенцијална енергија тела једнака нули:

$$W_M = \int_M^R \vec{F} d\vec{r} = q \int_M^R \vec{E} d\vec{r} . \quad (1.2)$$

Однос енергије W_M , коју посматрано наелектрисано тело има у некој тачки М електричног поља, и његовог наелектрисања q се назива електрични потенцијал:

$$V_M = \frac{W_M}{q} = \int_M^R \vec{E} d\vec{r} . \quad (1.3)$$

Промена електричне потенцијалне енергије наелектрисаног тела, при његовом премештању из једне у другу тачку електричног поља, W_{MN} , једнака је:

$$W_{MN} = q(V_M - V_N) . \quad (1.4)$$

Разлика потенцијала у двама тачкама, М и N, електричног поља $\vec{E}$ назива се електрични напон U_{MN} између ових тачака³. Према дефиницији важи [3]:

$$U_{MN} = V_M - V_N = \int_M^N \vec{E} d\vec{r} . \quad (1.5)$$

односно:

$$W_{MN} = q \cdot U_{MN} . \quad (1.6)$$

³ Према стандарду ЈУС Н.А0.121- Електромагнетизам, Термини и дефиниције, 1990 (који је усклађен са одговарајућим стандардом Међународне електротехничке комисије, IEC 500 (121)-1978), електрични напон се обележава словом U . У америчким стандардима и литератури се користи ознака V .

Наелектрисање је дискретна⁴ величина. Квант⁵ наелектрисања, q_e , једнак је наелектрисању елементарних честица протона односно електрона ($-q_e$). Укупно наелектрисање тела, Q , једнако је збиру елементарних наелектрисања честица које садржи. Потенцијал V наелектрисаног тела сразмеран је његовом наелектрисању:

$$V = \frac{Q}{C}. \quad (1.7)$$

Сачинитељ C , који представља показатељ односа између наелектрисања Q и потенцијала V тела, зависи од облика посматраног наелектрисаног тела и својстава околине, назива се **капацитивност** тела [4]:

$$C = \frac{Q}{V}. \quad (1.8)$$

Ако однос наелектрисања и потенцијала неког тела не зависи од количине сакупљеног наелектрисања, његова капацитивност је бројно једнака количини наелектрисања која је потребна да се потенцијал тела повећа за један волт.

Наелектрисање се може додиром преносити са једног тела на друго. У погледу овог својства материјали се могу поделити у две основне групе. **Проводник**⁶ је тело (супстанца) у којем постоје носиоци наелектрисања који се могу померати под дејством електричног поља. **Изолатор**⁷ је тело (супстанца) у којем не постоје слободни носиоци наелектрисања који се могу померати под дејством електричног поља. Да би неко тело задржало своје наелектрисање мора бити окружено непроводним телима која га одвајају од свих тела која добро преносе електрицитет.

Британски физичар Мајкл Фарадеј (*Michael Faraday*, 1791 - 1867) се бавио електростатиком и проучавањем својстава наелектрисаних тела. Увео је назив *диелектрик* за материјале који не проводе наелектрисање.

Син сиромашног ковача, Фарадеј је радећи као шегрт у књиговезници стицао основна знања читајући књиге које је повезивао. Када је тако у Британској енциклопедији прочитао поглавље о електрицитету решио је да се посвети науци. Такорећи самоук, генијални експериментатор је дао изузетан допринос науци о електрицитету. Његове описне формулације низа закона су касније преточене у математичке изразе који се данас користе. Јединица електричне капацитивности, **фарад** (F), је добила име по овом научнику.



⁴ У општем случају, дискретна величина је величина која има коначан или бесконачан пребројив скуп вредности (од лат. *discretus*, раздвојен, одвојен).

⁵ Квант (од лат. *quantum*, колико) је најмања количина физичке величине која се може придружити некој појави, када је посматрана величина представљена скупом дискретних вредности. Усвојена вредност је $q_e = 0,160219 \cdot 10^{-18}$ C. У новијим теоријским истраживањима разматра се постојање делова (фракција) елементарног наелектрисања.

⁶ Кондуктор (*conductor*, *Leiter*, *проводник*), од лат. *conductio*, провођење, простирање

⁷ Непроводник (*insulator*, *Isolator*, *изолятор*), од лат. *isolatio*, издвајање, одвајање. При дејству електричног поља долази до поларизације атома, односно молекула, али не и до усмереног кретања наелектрисаних честица.

Кретање наелектрисаних честица у некој средини (телу) се макроскопски описује помоћу две величине: електричне струје и густине електричне струје.

Електрична струја, i , је скаларна величина која описује брзину преношења наелектрисања кроз неку макроскопску површ:

$$i = \frac{dq}{dt}. \quad (1.9)$$

У општем случају, вредност струје је функција времена. Количина електрицитета $q[t_p, t_k]$, која кроз неку посматрану површ прође у временском интервалу од тренутка t_p до тренутка t_k , једнака је:

$$q[t_p, t_k] = \int_{t_p}^{t_k} i(t) dt. \quad (1.10)$$

Густина електричне струје, $\vec{J}$, је векторска величина која описује усмерено кретање наелектрисања у некој тачки средине у којој постоји електрична струја. Смер вектора $\vec{J}$ је у смеру кретања позитивног наелектрисања. У општем случају вектор $\vec{J}$ је функција положаја посматране тачке у простору. Струја I кроз произвољну површ је једнака⁸:

$$I = \int_S \vec{J} d\vec{S} \quad (1.11)$$



Слика 1.1. Дефиниција густине електричне струје

Протицањем електричне струје наелектрисање се преноси са једног места на друго. Примањем (предајом) наелектрисања мења се енергијско стање тела. Капацитивност тела одражава његово својство да прима (предаје) наелектрисање и на тај начин сакупља (одаје) енергију електричног поља. Електрични елемент (уређај) чија је основна карактеристика његова капацитивност назива се **кондензатор**⁹. Физички, кондензатор представља систем од две проводне плоче (облоге) раздвојене изолатором чија намена је сакупљање електростатичке енергије. Однос промене садржане количине наелектрисања и промене напона на његовим крајевима сразмеран је капацитивности кондензатора:

$$\frac{dq}{du} = C. \quad (1.12)$$

⁸ Математичким језиком речено: струја I једнака је флуксу вектора $\vec{J}$ кроз посматрану површину S .

⁹ Назив потиче од латинске речи *condensator*, згушњивач, скупљач.

На основу дефиниционих формула, 1.9 и 1.12, добија се израз који изражава зависност напона између крајева кондензатора од струје кроз кондензатор :

$$du = \frac{1}{C} dq, \quad (1.13)$$

односно:

$$u(t) = \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i(t) dt + U_0, \quad (1.14)$$

где је U_0 вредност напона на крајевима кондензатора у почетном тренутку t_0 .

1.1.1. СТРУЈА ПРОВОЂЕЊА

Електрична струја I и густина електричне струје J су макроскопске величине помоћу којих се са квантитативне стране описује појава усмереног кретања микроскопских честица за које се може сматрати да представљају слободне (покретљиве) носиоце наелектрисања у некој средини (телу). Када се тело налази у електричном пољу, слободни носиоци наелектрисања у том телу су изложени дејству електричне силе која усмерава њихово кретање. Притом се оне непрестано сударају са другим микрочестицама, услед чега се тренутни правац и и тренутна брзина кретања појединачних честица хаотично мењају¹⁰. Ово усмерено кретање слободних носилаца наелектрисања честица под дејством електричног поља се назива **струја провођења**¹¹.

Ако све честице имају једнако наелектрисање q , а средња (макроскопска) брзина њиховог кретања је једнака $\vec{v}$, вектор густине електричне струје $\vec{J}$ је једнак:

$$\vec{J} = nq\vec{v}. \quad (1.15)$$

где је n концентрација слободних носилаца наелектрисања у посматраној средини (телу).

У хомогеној средини (телу¹²) у којој постоји просторно и временски непроменљиво електрично поље $\vec{E}$, средња брзина усмереног кретања слободних носилаца наелектрисања је сразмерна интензитету тог поља:

$$\vec{v} = \mu \vec{E}, \quad (1.16)$$

¹⁰ У одсуству електричног поља, хаотично кретање микрочестица је утолико интензивније уколико је температура виша (термичко кретање).

¹¹ Кондукциона струја (*conduction current*). У литератури се употребљава и назив струја померања (*drift current*).

¹² Тело које у свим својим деловима има иста својства (од лат. *homogenēs*, истоврстан, једнородан).

Сачинилац сразмере, μ се назива **покретљивост слободних носилаца наелектрисања** у посматраној средини. Вредност μ зависи од врсте и концентрације покретљивих наелектрисаних честица у посматраној средини, температуре, као и од интензитета електричног поља¹³.

Вектор густине електричне струје провођења $\vec{J}$ је колинеаран са вектором електричног поља $\vec{E}$:

$$\vec{J} = \sigma \vec{E}. \quad (1.17)$$

Сачинилац σ се назива **специфична електрична проводност** средине. Зависи од концентрације n слободних носилаца наелектрисања и њихове покретљивости μ . Ако све посматране наелектрисане честице имају једнако наелектрисање q важи једначина:

$$\sigma = qn\mu. \quad (1.18)$$

Веза између вектора густине електричне струје провођења и вектора електричног поља може се представити и једначином:

$$\vec{E} = \rho \vec{J}, \quad (1.19)$$

Сачинилац ρ се назива **специфична електрична отпорност** материјала:

$$\rho = \frac{1}{\sigma}. \quad (1.20)$$

Слободни носиоци наелектрисања у неком телу се крећу усмерено када се то тело налази у електричном пољу. Ово усмерено кретање представља електричну струју чији је интензитет одређен брзином преношења наелектрисања. У хомогеном дугом правом проводнику¹⁴ сталног попречног пресека вектор електричног поља $\vec{E}$ је паралелан оси проводника (слика 1.2). Његов интензитет E у проводнику је сталан, па је сталан и интензитет вектора густине струје J . Електрична струја I је једнака:

$$I = J \cdot S, \quad (1.21)$$

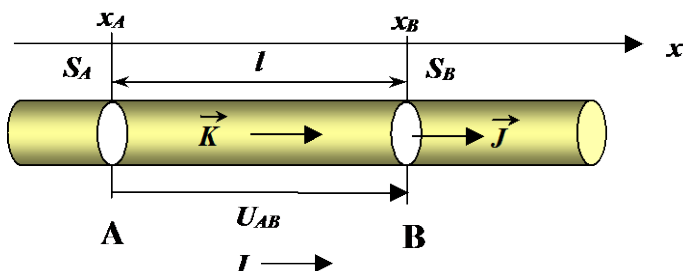
где је S површина попречног пресека проводника.

Све тачке на попречном пресеку проводника су на истом потенцијалу (еквипотенцијална површ). Разлика потенцијала између две такве површи, S_A и S_B , сразмерна је производу интензитета E вектора електричног поља и растојања l између њих:

¹³ При повећању концентрације носилаца, као и при повећању температуре, повећава се вероватноћа судара, па се покретљивост смањује. Са повећањем интензитета електричног поља покретљивост расте као последица већег убрзавања слободних носилаца наелектрисања између судара. Покретљивост слободних носилаца наелектрисања у металима је око $10 \text{ cm}^2/\text{Vs}$

¹⁴ У електричним уређајима, под називом проводник подразумева се компонента чија је намена да омогући провођење кондукционе електричне струје.

$$U_{AB} = \int_{x_A}^{x_B} E dx = El. \quad (1.22)$$



Слика 1.2. Електрична струја у хомогеном правом проводнику

На основу једначина 1.17 до 1.19 следи израз:

$$I = \sigma \frac{S}{l} U_{AB}, \quad (1.23)$$

чијим уопштавањем се добија једначина која представља **Омов закон**. Напон U_{AB} између било које две тачке, А и В, хомогеног проводника сталног попречног пресека, сразмеран је интензитету електричне струје I , која кроз њега протиче:

$$U_{AB} = R_{AB} I. \quad (1.24)$$

То значи да је вредност електричне струје I сразмерна вредности напона U између крајева отпорника:

$$I = G U = \frac{U}{R}. \quad (1.25)$$

Сачинилац сразмере R је физичка величина која се назива **електрична отпорност** (*resistance, Widerstandswert, сопротивление*), величина која је од изузетног значаја за анализу и развој електричних кола. Величина G , обрнуто сразмерна електричној отпорности, је **електрична проводност**. Њихове бројне вредности су одређене врстом материјала, али и обликом проводног тела: дуго узано проводно тело има много већу отпорност од кратког тела направљеног од исте количине истог материјала.

Георг Ом (*Georg Simon Ohm, 1789-1854*), наставник гимназије, је након двогодишњег стрпљивог експериментисања, открио један од основних закона електротехнике (1827). Иако жестоко оспораван од својих савременика, више од пола века касније, на првом Међународном електротехничком конгресу (1881) јединица за мерење електричне отпорности је добила назив ом (Ω).



На основу једначине 1.23 следи да је електрична отпорност дугог правог проводника, хомогеног састава и сталног пресека, сразмерна његовој дужини l , а обрнуто сразмерна попречном пресеку S :

$$R = \rho \frac{l}{S}. \quad (1.26)$$

Вредности специфичне електричне отпорности различитих материјала (супстанци) се налазе у врло широким границама. У начелу, код проводника је мања од $10^{-4} \Omega\text{m}$, а код изолатора већа од $10^5 \Omega\text{m}$ (табела 1.1).

материјал	специфична отпорност $\rho (\Omega\text{m})$	материјал	специфична отпорност $\rho (\Omega\text{m})$
сребро	$1,6 \cdot 10^{-8}$	германијум	0,4
бакар	$1,7 \cdot 10^{-8}$	силицијум	$2,3 \cdot 10^3$
злато	$2,3 \cdot 10^{-8}$	трансформаторско уље	10^{11}
алуминијум	$2,8 \cdot 10^{-8}$	стакло	од 10^9 до 10^{15}
платина	$10 \cdot 10^{-8}$	полиетилен	10^{15}
олово	$21 \cdot 10^{-8}$	ћилибар	10^{17}
угљеник	$4 \cdot 10^{-5}$	кварц	10^{17}

Табела 1.1. Приближне вредности специфичне отпорности неких материјала

Протицање електричне струје кроз произвољну средину праћено је ослобађањем топлоте. Ова појава се назива Џулов ефекат. Електрична енергија која се, услед протицања сталне електричне струје I кроз отпорник чија је отпорност R , претвори у топлотну енергију током временског интервала чије је трајање t , једнака је:

$$W = qU = UI t . \quad (1.27)$$

Енглески физичар Џул (*James Joule*, 1818-1889) је експерименталним путем пронашао формулу помоћу које може да се израчуна електрична енергија W која је у отпорнику, чија је отпорност R , претворена у топлоту при протицању сталне струје I током времена t :

$$W = RI^2 t .$$

Свој чланак “О топлоти ослобођеној у металним проводницима електрицитетом и у ћелијама батерија за време електролизе” Џул је објавио када му је било само 23. године. Јединица за рад и енергију (J) је добила име по овом научнику.



Брзина којом се у неком отпорнику¹⁵ електрична енергија W претвара у топлотну назива се електрична снага:

$$P = \frac{dW}{dt} = UI . \quad (1.28)$$

Омов закон је полазна тачка анализе електричних кола. Протицање електричне струје кроз неки отпорник је резултат разлике потенцијала између његових крајева. Напон између крајева посматраног отпорника сразмеран је интензитету електричне струје која кроз њега протиче. Овај однос важи и када је напон величина која се мења у времену:

$$u(t) = R i(t) . \quad (1.29)$$

У општем случају тренутна вредност временски променљиве електричне снаге једнака је производу тренутних вредности струје $i(t)$ и напона $u(t)$:

¹⁵ Отпорник је проводно тело чија је отпорност много већа од отпорности проводника који су спојени на то тело.

$$p(t) = u(t) \cdot i(t). \quad (1.30)$$

Електрична енергија, $W[t_p, t_k]$, претворена у топлоту током временског интервала од t_p до t_k , једнака је:

$$W[t_p, t_k] = \int_{t_p}^{t_k} p(t) dt. \quad (1.31)$$

Средња снага је, према дефиницији, једнака вредности сталне снаге при којој би се у посматраном временском интервалу ослободила једнака количина топлоте:

$$P = \frac{W[t_p, t_k]}{t_k - t_p} = \frac{1}{t_k - t_p} \int_{t_p}^{t_k} p(t) dt, \quad (1.32)$$

односно:

$$P = U_{ef} I_{ef} = R I_{ef}^2 = \frac{U_{ef}^2}{R}. \quad (1.33)$$

Величине U_{ef} и I_{ef} представљају ефективне вредности напона и струје у посматраном временском интервалу:

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{1}{t_k - t_p} \int_{t_p}^{t_k} i^2(t) dt}, U_{ef} = \sqrt{\frac{1}{t_k - t_p} \int_{t_p}^{t_k} u^2(t) dt}. \quad (1.34)$$

1.1.2. СТРУЈА ДИФУЗИЈЕ

Међусобно мешање различитих супстанци (гасова и течности) се назива **дифузија**¹⁶. Овај процес настаје увек када постоји разлика у концентрацији покретљивих честица. Дифузионо кретање честица тежи да доведе до изједначавања њихове концентрације у посматраној средини (слика 1.3).



Слика 1.3. Дифузија

Уколико су честице наелектрисане, њихово премештање услед дифузије се испољава као електрична струја. На основу Фиковог експерименталног закона дифузије, а у складу са кинетичком теоријом гасова, [5], густина дифузионе струје у одређеном правцу је сразмерна “брзини

¹⁶ Од лат. *diffusio*, ширење, распрострањање, разливање.

промене” концентрације наелектрисаних честица у том правцу¹⁷. За процес дифузије који се одвија у правцу x -осе координатног система важи диференцијална једначина:

$$J = -qD \frac{dn}{dx}, \quad (1.35)$$

у којој функција $n(x)$ описује зависност концентрација од положаја, q је наелектрисање посматраних честица, а D дифузиона константа која зависи од својстава средине. Знак минус последица је чињенице да се честице, независно од поларитета њиховог наелектрисања, крећу од области веће концентрације ка области мање концентрације.

Дифузија је транспортни процес којим се слободне (покретљиве) честице премештају из подручја веће концентрације у подручје мање концентрације. У основи ове појаве, као и појаве провођења топлоте, налази се хаотично кретање и сударање честица. Константа D , као и покретљивост μ , зависи од хаотичног термичког кретања носилаца наелектрисања, па између та два параметра постоји међусобна повезаност (Ајнштајнова једначина):

$$D = \mu U_T. \quad (1.36)$$

Величина U_T представља тзв. **термички напон**¹⁸:

$$U_T = \frac{kT}{q_e}, \quad (1.37)$$

где је k физичка константа¹⁹, а q_e елементарно наелектрисање. На температури 300 К ($\sim 27^\circ\text{C}$) је:

$$U_T (V) = \frac{T(K)}{11600} \approx 0.026 V \quad (1.38)$$

Једначине 1.17 и 1.34 чине теоријску основу за описивање и тумачење појава у електроници. Процес дифузије посебно је значајан у полупроводницима, чија су електрична својства, као последица појаве дифузије, омогућила образовање елемената чија проводност зависи од смера протикања електричне струје, као и елемената којима се остварује појачање електричних сигнала.

1.2. ЕЛЕКТРИЧНА СВОЈСТВА ЧВРСТИХ ТЕЛА

Супстанца се састоји од честица које се неким једноставним средствима не могу даље раставити, а међусобно се разликују по својој унутрашњој грађи и својствима. **Атом** је најмања честица која се може добити

¹⁷ Ова величина (“просторни” извод) се назива градијент скаларног (физичког) поља. Строго математички, дефинише се као векторска величина, нормална на површ сталне вредности скалара поља, оријентисана у смеру његовог пораста, а чија је величина једнака изводу овог скалара у посматраном смеру.

¹⁸ Величина U_T се понекад назива електричним еквивалентом температуре.

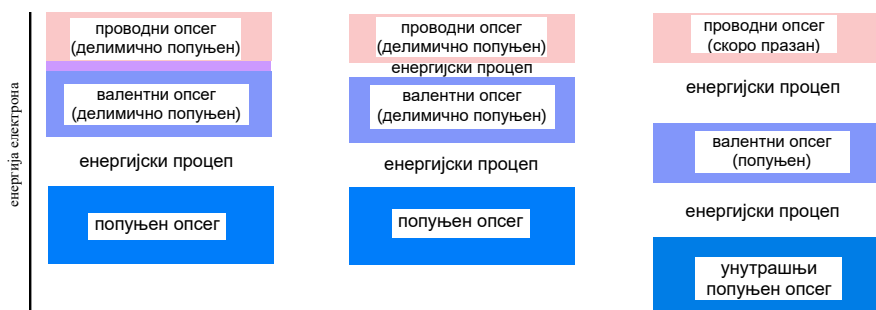
¹⁹ Болцманова константа $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$.

дељењем неког хемијског елемента која садржи његове хемијске особине. И сами атоми, међутим, имају своју унутрашњу структуру и састоје се од мањих, субатомских честица које могу бити наелектрисане или електрички неутралне. У најједноставнијем облику, атом се моделује као систем који се састоји од једне позитивно наелектрисане елементарне честице, која представља језгро (нуклеус) атома, и једне негативно наелектрисане честице, електрона, чија је маса многоструко мања, која се креће око тог језгра. То је модел атома водоника (хемијски симбол H). Наелектрисање језгра атома других елемената представља умножак елементарног наелектрисања q_e .

Укупно наелектрисање сваког атома, посматраног као целина у нормалном стању, једнако је нули. Атоми који имају све своје електроне су електрички неутрални и не делују једни на друге електричним силама осим на врло блиским растојањима. Тело чији су сви атоми електрично неутрални и само је електрички неутрално. Ово “нормално” стање атома може да се поремети утицајима споља. Ако електрон напусти атом удаљавањем изван утицаја језгра, атом постаје позитивни **јон** са онолико елементарних позитивних оптерећења колико је електрона изгубио. Наелектрисање тела је алгебарски збир наелектрисања у њему. Између наелектрисаних тела делују електричне силе које представљају збир свих електричних сила које делују између вишкова наелектрисаних честица на једном и другом телу.

Удаљеност електрона од језгра је одређена енергијом коју тај електрон поседује. Према теорији кванта²⁰, електрон не може да има било коју вредност енергије, већ само неке одвојене, дискретне вредности. Могуће вредности енергетских нивоа електрона одређене су са четири броја²¹. Групе електрона образују електронске слојеве. Притом, за сваки слој постоји највећи број електрона који се у њему може наћи.

Електрони који припадају спољашњем слоју су најслабије везани за језгро атома. То су **валентни електрони** помоћу којих обично атом ступа у хемијске реакције, а који учествују и у појавама проводности и светлосним појавама.



Слика 1.4. Енергијски опсези проводника, полупроводника и диелектрика

Када се велики број атома нађе у међусобној близини, као што је то случај када се атоми налазе у чворовима кристалне решетке, услед узајамног

²⁰ Основна теорија савремене физике. Види поглавље “Физика полупроводника”.

²¹ Квантни бројеви (означавају се латиничним словима n , l , j и s) одређују енергију електрона, облик и просторну оријентацију његове путање, као и смер сопственог обртања ($spin$).

деловања атома унутар тела, постоји мноштво, густо сабијених, енергијских нивоа који образују опсеге могућих вредности енергија електрона (слика 1.4). Код чврстих проводника, опсег који одговара основном (непобуђеном, нормалном) стању (нормални опсег) и опсег који одговара побуђеном стању атома (побуђени опсег) се додирују, а могу се и преклапати. Такав "комбинован", делимично попуњен опсег (виши нивои су празни) назива се проводни опсег. Лабаво везани електрони из проводног опсега једног атома лако могу да пређу у непопуњен проводни опсег суседног атома. Када је последњи опсег атома потпуно попуњен електронима овај процес није могућ.

Супстанца у којој су, у уобичајеним (нормалним) условима, електрони чврсто везани за свој атом или групу атома који образују молекул, представља **диелектрик**²² (изолатор). Под дејством спољашње електричне силе долази само до мале деформације атома, али не и до усмереног кретања покретљивих носилаца наелектрисања. Да би прешли из валентног у проводни опсег електрони треба да приме релативно велику енергију, што на обичној собној температури и при умереној јачини електричног поља није могуће. Стога код диелектрика у проводном опсегу у нормалним условима нема електрона који су лабаво везани за атоме и који могу, под дејством одговарајуће побуде (електричног поља или дифузије), да се крећу кроз супстанцу.

Између проводника и диелектрика се налазе материјали у којима је број наелектрисаних честица које могу да се крећу под дејством електричних сила много мањи него у случају проводника, али и много већи него код изолатора. Материјал са таквим својствима је полупроводник.

Чисти полупроводници (материјали састављени само од једне супстанце, без примеса) на ниским температурама имају сличне енергијске опсеге као диелектрици, али је енергијски процеп између валентног и проводног опсега знатно мањи. Због тога већ на собној температури неки од валентних електрона може да добије довољну енергију да пређе у проводни опсег. Након таквог преласка, валентни опсег остаје непопуњен, садржи мање електрона од највећег "дозвољеног" броја електрона у том опсегу. Ова празнина у валентном опсегу је као нека **шупљина**²³ која се "понаша" као носилац позитивног елементарног наелектрисања. Образовањем шупљина у валентном енергијском опсегу стварају се услови за размену електрона између суседних атома, јер валентни опсег у коме се налази шупљина није више попуњен.

Шупљина је празнина која се појављује у нормално попуњеном енергијском опсегу, која се понаша као носилац позитивног елементарног наелектрисања. Преласком електрона из валентног у проводни опсег настаје пар електрон-шупљина. Интензитет процеса генерисања слободних носилаца наелектрисања је утолико већи уколико је температура виша. У полупроводницима, дакле, постоје две врсте слободних носилаца наелектрисања чијим усмереним кретањем се може остварити премештање

²² Назив диелектрик увео је Мајкл Фарадеј, означавајући тим именом непроводну супстанцу између две плоче кондензатора.

²³ Јама (*hole*, *Loch*, *дырка*).

наелектрисања. Шупљине се, као и електрони, услед деловања електричног поља или дифузије премештају у кристалној решетки путем сталне измене места са суседним електронима. Овај процес је еквивалентан кретању позитивних наелектрисања у супротном смеру.

Крећући се кроз кристалну решетку, слободни електрони и шупљине се међусобно сусрећу, при чему се опет сједињују (рекомбинују, узајамно поништавају). У стању термичке равнотеже, број насталих парова електрон-шупљина једнак је броју рекомбинација. Ова вредност се назива **сопствена концентрација** и означава са n_i . Њена вредност зависи од врсте материјала и температуре. Уобичајено је да се концентрација шупљина у посматраној средини (материјалу) означава малим латиничним словом p док се мало латинично слово n користи за означавање концентрације електрона. Дакле, у чистом полупроводнику, у стању термодинамичке равнотеже, концентрације електрона и шупљина једнаке су сопственој концентрацији посматраног полупроводника на датој температури:

$$n = p = n_i. \quad (1.39)$$

Сопствена концентрација²⁴ је једнака је броју разграђених парова електрон-шупљина у јединици запремине.

Полупроводници су неки елементи, као што су германијум (Ge) и силицијум (Si), и једињења, као што су галијум арсенид (GaAs), оксид бакра (CuO) и оксид цинка (ZnO). Концентрација атома који на собној температури имају у проводном опсегу један електрон је веома мала, па се чисти полупроводници не користе као проводни материјали. Да би се полупроводницима повећала специфична проводност додају се погодно изабране примесе. Са становишта примене најзначајнији полупроводници су германијум и силицијум, који припадају четвртој групи периодног система елемената. Њихови атоми имају четири електрона у последњем слоју (валентном опсегу). Управо таква структура даје посебна својства телима која су од њих изграђена.

С обзиром на начин на који настају слободни носиоци наелектрисања, концентрација електрона и концентрација шупљина у чистом полупроводнику међусобно су једнаке и једнаке концентрацији разграђених валентних веза (сопствена концентрација) n_i . Специфична проводност полупроводника без примеса (сопствена проводност полупроводника) једнака је:

$$\sigma_i = q_e n_i (\mu_n + \mu_p). \quad (1.40)$$

Уколико је ширина енергијског процепа већа, сопствена концентрација n_i је мања, па је и сопствена проводност σ_i материјала мања. Са повећањем температуре повећава се сопствена концентрација слободних носилаца наелектрисања n_i па специфична проводност σ_i расте (специфична отпорност опада). Покретљивост слободних носилаца наелектрисања, μ_p односно μ_n , такође зависи од температуре (приближно опада са квадратом температуре).

Специфична електрична проводност полупроводника може значајно да се повећа додавањем примеса. Атоми других елемената уносе

²⁴ Својствена (*intrinsic*).

несавршености у структуру кристалне решетке, што доприноси повећању концентрације слободних носилаца наелектрисања. Полупроводник са примесама има енергијски процеп између нормалног опсега и суседног побуђеног опсега упоредив са оним код природног полупроводника, па чак и знатно већи, али има и уметнуте нивое који потичу од примеса.

Број атома примеса је много мањи од броја атома основног материјала тако да је сваки атом примесе окружен атомима полупроводника. Атом тровалентне примесе уграђен у кристалну решетку коју образују четворовалентни атоми доспева у стање да му недостаје један електрон да попуни валентну везу са суседним четворовалентним атомом. Атом петовалентног елемента садржи, са становишта валентних веза, један прекобројни електрон.

Материјали примеса се бирају тако да на уобичајеној радној температури сви атоми примеса буду јонизовани. То значи да су тровалентни атоми примеса попунили четврту валентну везу у структури кристала валентним електроном преузетим од неког суседног атома основног материјала, а петовалентни атоми "отпустили" своје електроне. Наиме, код неких примеса, као што су фосфор (Ph) и арсен (As), енергијски ниво петог електрона атома примесе је у подручју које одговара забрањеном опсегу чистог полупроводника, али је врло близу проводног опсега, па је потребно врло мало енергије да постане слободан.

Уношењем примеса које представљају атоме петовалентних елемената у структури кристала појављује се један електрон "вишка". Овај, пети електрон атома примесе се већ на собној температури налази у проводном опсегу и може суделовати у образовању струје под дејством електричног поља. Атом примесе понаша се као "давалац" слободног електрона, **донор**. У материјалу који садржи примесе атома донорских елемената постоји више слободних електрона него шупљина па се такав материјал назива полупроводник N-типа.

Уношењем примеса које представљају атоме тровалентних елемената, једно место (валентна веза) у валентном опсегу (љусци) је непопуњено. Атом примесе понаша се као "прималац" електрона (акцептор). Преузимањем електрона атом примесе који је примио електрон, прималац, постаје негативно наелектрисан јон, а атом основног материјала који је изгубио валентни електрон садржи шупљину. Дакле, додавањем тровалентних примеса повећава се концентрација шупљина као слободних носилаца наелектрисања, па се такав материјал назива примесни полупроводник P-типа.

Концентрација атома примеса у полупроводним материјалима који се користе у електроници је у широким границама. Типично је један атом примесе на 10^6 до 10^8 атома полупроводника. Поред ових слободних носилаца, насталих услед присуства примеса, постоје и електрони и шупљине који спонтано настају у полупроводнику, али је њихов број знатно мањи (на собној температури приближно један пар електрон-шупљина на 10^{10} атома). Дакле, концентрација атома примеса је од сто до десет хиљада пута већа од концентрације термички разграђених веза на собној температури,

због чега њихово присуство има преовлађујући утицај на електрична својства материјала.

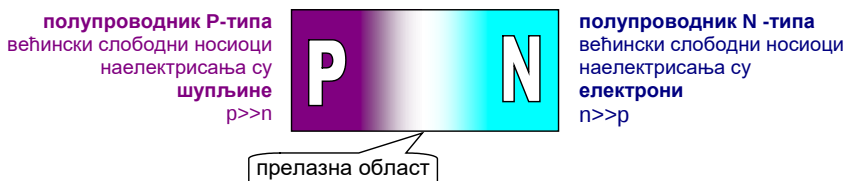
У зависности од тога која врста слободних носилаца наелектрисања преовлађује, постоје две врсте полупроводника (P-тип и N-тип). У полупроводницима N-типа **већински слободни носиоци наелектрисања** су електрони, поред којих у малом броју постоје и шупљине као **мањински слободни носиоци наелектрисања**.

Полупроводник N-типа је полупроводник са примесама у којем је концентрација проводних електрона већа од концентрације покретних шупљина ($n_N \gg p_N$). Полупроводник P-типа је полупроводник у којем је концентрација шупљина већа од концентрације проводних електрона ($p_P \gg n_P$).

Додавањем примесе се значајно мења специфична отпорност кристала. Само један атом примесе на 10^8 атома германијума смањује специфичну отпорност за више од 11 пута [6]. Уношењем примесе донора и акцептора могуће је образовање полупроводника различитог типа у једном комаду кристала који се, у електричном погледу, понаша као елемент са новим својствима. Област у којој је концентрација електрона већа од концентрације шупљина обележава се великим латиничним словом N. Област у којој је концентрација шупљина већа од концентрације електрона обележава се великим латиничним словом P.

1.3. PN-СПОЈ

Физички, PN-спој је јединствено тело од полупроводничког материјала (слика 1.5) које у једном делу запремине претежно садржи примесе атома акцептора, тако да представља полупроводник P-типа, а у другом претежно примесе атома донора (N-тип полупроводника). У ужем смислу, PN-спој представља подручје између полупроводника P- и N-типа.



Слика 1.5. PN-спој

У P-делу PN-споја постоји велика концентрација шупљина, које су већински слободни носиоци наелектрисања у тој области, док у N-делу постоји велика концентрација електрона као већинских носилаца наелектрисања. Неравномерна расподела покретљивих носилаца наелектрисања доводи до појаве дифузије. Међутим, процес дифузије покретљивих носилаца наелектрисања је самоограничавајући. Премештањем наелектрисаних честица са места веће концентрације ка месту мање концентрације ремети се електрична равнотежа, услед чега се ствара

електрично поље које је усмерено од N-области ка P-области и делује тако да спречи дифузионо кретање већинских носилаца. Уколико не постоји страни електрично поље, преношење наелектрисања се зауставља након успостављања равнотеже, струја кроз спој једнака је нули.

Између две области образује се веома узано прелазно подручје у којем постоје некомпензовани јони примеса. Концентрација покретљивих носилаца у овој области није довољна да неутралише деловање наелектрисања непокретних јона донора и акцептора у чворовима кристалне решетке. Ако се може сматрати да изван прелазне области нема некомпензованих наелектрисања, електрично поље у осталом делу кристала је једнако нули. Прелазна област, у којој се налазе некомпензована наелектрисања²⁵ донорских и акцепторских јона, делује као препрека²⁶ чије електрично поље спречава дифузионо кретање већинских носилаца наелектрисања кроз спој (шупљина из P-области у N-област, односно електрона из N-области у P-област).

Разлика потенцијала која се успоставља на месту додира два различита материјала²⁷ зависи од температуре и концентрације примеса. На собној температури је реда величине неколико десетих делова волта.

Услед несиметрије расподеле наелектрисања у прелазној области, **полупроводник са PN-спојем се понаша несиметрично када се на њега прикључи напон**. Ако се слободни крајеви области које образују PN-спој прикључе на извор напона, тако да се прикључак за P-област споја налази на вишем потенцијалу од прикључка N-области, долази до смањивања потенцијалне препреке и смањивања интензитета електричног поља у прелазној области. То омогућује дифузију већинских носилаца наелектрисања кроз прелазну област. Електрони из N-области продиру у P-област, повећавајући концентрацију мањинских носилаца наелектрисања у подручју на граници прелазне области, n_{P0} , изнад "нормалне" концентрације електрона у P-области која одговара термичкој равнотежи, n_P . Каже се да је PN-спој поларисан у директном, пропусном смеру.

Када је напон поларизације једнак нули, концентрација n_{P0} једнака је равнотежној концентрацији мањинских носилаца (електрона) n_P . Када је прикључени напон U_{PN} позитиван, гранична вредност концентрације електрона у P-области, уз само прелазно подручје расте са порастом напона, а висина потенцијалне препреке се смањује.

Када је знак прикљученог напона супротан ($U_{PN} < 0$), PN-спој је **инверзно поларисан**, висина потенцијалне препреке се повећава. На граници прелазне области концентрација мањинских носилаца наелектрисања је мања од оне која постоји у равнотежном стању у одсуству поларизације.

²⁵ Област просторног наелектрисања (*space-charge region*).

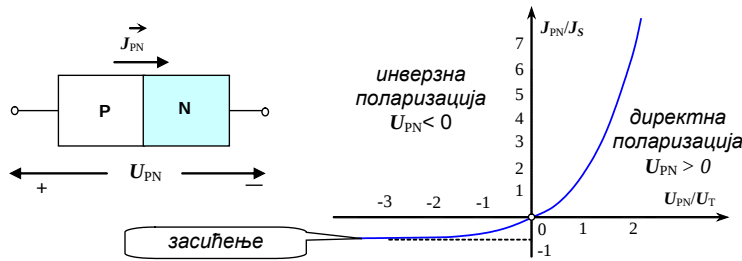
²⁶ Потенцијални праг (брег), потенцијална баријера (*potential barrier*, *Potentialberg*, *потенциальный барьер*) се дефинише у најопштијем смислу као крива потенцијалне енергије која раздваја две области енергијског дијаграма.

²⁷ Контактна разлика потенцијала (*contact potential difference*).

Због тога што се при поларизацији позитивним напонам у граничном слоју успоставља повећана концентрација мањинских носилаца наелектрисања, долази до њиховог дифузионог кретања. Укупна струја кроз спој једнака је збиру дифузионе струје шупљина и дифузионе струје електрона, чије су вредности одређене законом дифузије (1.34). Густина укупне струје J_{PN} , рачунате у смеру од Р-области ка N-области, одређена је напонам поларизације U_{PN} :

$$J_{PN} = J_s \left(e^{\frac{U_{PN}}{U_T}} - 1 \right). \quad (1.41)$$

Константа J_s зависи од врсте материјала (полупроводника) и концентрације примеса у полупроводнику²⁸. Густина струје споја достиже засићење већ при врло малим вредностима негативног напона U_{PN} и постаје једнака J_s (слика 1.6). Због тога се величина J_s назива **површинска густина инверзне струја засићења споја**.



Слика 1.6. Карактеристика PN-споја

На основу једначине 1.41 се изводи општи израз који описује везу између вредности струје кроз PN-спој и напона на његовим крајевима:

$$I_{PN} = I_s \left(e^{\frac{U_{PN}}{U_T}} - 1 \right). \quad (1.42)$$

I_s је инверзна струја засићења PN-споја, чија је вредност одређена густином инверзне струје засићења J_s :

$$I_s = \int_S J_s dS, \quad (1.43)$$

где је S површина споја. Ако се може сматрати да J_s има сталну вредност на целој површини споја, важи:

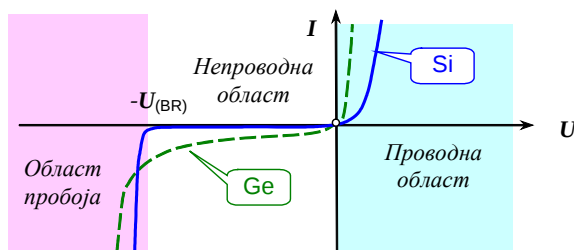
$$I_s = J_s S. \quad (1.44)$$

1.3.1. ПРОБОЈ PN-СПОЈА

Једначина 1.42 којом се моделује процес преношења наелектрисања кроз PN-спој важи само у некој околини координатног почетка U - I равни. При

²⁸ Видети поглавље 8.

довољно великим вредностима инверзног напона настаје нагло повећање нагиба U - I карактеристике (слика 1.7). Ова појава се назива пробој²⁹.



Слика 1.7. U - I карактеристике PN-споја германијума и силицијума

Настанак пробоја може бити заснован на лавинском или Ценеровом ефекту. **Пробој лавинским ефектом**³⁰ је проузрокован повећавањем броја слободних носилаца под дејством јаког спољашњег електричног поља када, при судару електрона са атомима полупроводника у кристалној решетки унутар прелазне области, долази до стварања парова електрон-шупљина као нових слободних носиоца наелектрисања (**ударна јонизација**). При довољно јаком електричном пољу новоослобођени електрони могу да добију довољно велику енергију да ударном јонизацијом ослободе нове парове електрон-шупљина тако да се број слободних носилаца наелектрисања вишеструко повећава.

Ценеров пробој настаје при великој концентрацији примеса, када се већ при малим напонима поларизације у прелазној области успоставља јако електрично поље које може да доведе до разградње валентних веза и стварања нових слободних носилаца наелектрисања, што доводи до повећања инверзне струје кроз спој³¹. При великој концентрацији потребна јачина поља се постиже при напонима мањим од 6 V (Ценеров напон). При малим концентрацијама Ценеров напон је виши, па је лавински ефект преовлађујући.

Вредност напон пробоја $U_{(BR)}$ зависи од својстава материјала који образује PN-спој, а може бити од неколико волти (Ценеров ефекат) до неколико стотина волти (лавински ефекат).

Посматрано у U - I равни, прелазак из области велике отпорности у област пробоја може бити веома оштар, а сама карактеристика врло стрма. То значи да у таквим условима рада напон U веома мало зависи од величине струје I кроз спој. Ово својство користи се за стабилизацију једносмерног напона у електронским колима.

Повећана дисипација при раду у области пробоја може да доведе до деструктивних промена у карактеристикама PN-споја

²⁹ Назив "пробој" (*breakdown*) се овде користи да означи прелазак из стања високе динамичке отпорности у стање знатно ниже динамичке отпорности (услед повећања величине инверзне струје) који, сам по себи, не представља разарање структуре PN-споја.

³⁰ Кумулативно умножавање (*avalanche multiplication*).

³¹ Пробој је проузрокован преласком електрона из валентног опсега у проводни опсег тунелским ефектом.

1.3.2. ЕЛЕКТРИЧНА СВОЈСТВА PN-СПОЈА

PN-спој представља елемент са два прикључка који се одликује изразитом несиметријом електричне проводности у зависности од предзнака (поларитета) напона на његовим крајевима. Такав елемент се назива диода и користи се за усмеравање тока преношења енергије односно сигнала³². Познавање основних својстава PN-споја је значајно, како за разумевање начина рада полупроводничких диода, тако и за разумевање процеса који се одвијају у сложеним елементима који садрже више PN-спојева.

1.3.2.1. Отпорност PN-споја

Када је PN-спој поларисан у пропусном (директном) смеру ($U > U_T$), еквивалентна унутрашња отпорност споја веома много зависи од вредности напона U односно струје I . Због тога ова величина не представља подесан параметар за описивање појава везаних за процесе који се одвијају у колима која садрже PN-спој. При анализи се користи однос малих промена напона и промена струје унутар посматраног опсега. Врло мале промене неке величине се у граничном случају математички представљају диференцијалом те величине. Отпорност r , дефинисана односом малих промена (диференцијала) напона и струје:

$$r = \frac{dU}{dI}, \quad (1.45)$$

се назива **динамичка отпорност**. Она представља својство споја у одређеној радној тачки.

При собној температури, за струју од 26 mA динамичка отпорност PN-споја поларисаног у пропусном смеру је приближно 1 Ω . Са повећањем струје кроз спој, вредност динамичке отпорности се смањује. У области пробоја, динамичка отпорност PN-споја је такође веома мала, реда величине ома. Динамичка отпорност PN-споја поларисаног у проводном смеру је увек мања од његове статичке отпорности.

1.3.2.2. Капацитивност PN -споја

Капацитивна својства PN-споја су повезана са процесом нагомилавања везаног наелектрисања у прелазној области и процесом дифузије вишка слободних носилаца при директној поларизацији.

Прелазна област PN-споја може да се посматра као плочасти кондензатор чија је површина једнака површини споја, а растојање између њих једнако ширини прелазног подручја. Капацитивност прелазне области³³, C_T , зависи од својстава материјала, али и од односа спољашњег напона U и висине потенцијалне препреке неполарисаног PN-споја, U_0 . Са повећањем

³² У првим деценијама развоја електронике, за елемент са таквим својствима коришћен је назив: електрични вентил (*valve*, *вентиль*).

³³ Капацитивност прелаза (*transition capacitance*).

напона инверзне поларизације капацитивност C_T се смањује. Типичне вредности су у опсегу од један до неколико десетина пикофарада.

Дифузиона капацитивност, C_D , одражава процес успостављања равнотежне концентрације споредних носиоца наелектрисања која одговара одређеном напону поларизације. Овај процес захтева неко време, па се моделује као деловање капацитивности C_D . Типичне вредности су неколико нанофарада при струји од неколико милиампера. Дифузиона капацитивност расте са повећањем напона поларизације U приближно по експоненцијалном закону.

При директној поларизацији статичка и динамичка отпорност PN-споја су мале, а капацитивност C_T је занемарљиво мала у поређењу са дифузионом капацитивношћу C_D . При инверзној поларизацији статичка отпорност је врло велика, а дифузиона капацитивност C_D је занемарљиво мала у поређењу са капацитивношћу прелаза C_T .

1.3.2.3. Утицај температуре на карактеристике PN -споја

Карактеристичне величине I_s и $U_{(BR)}$ зависе од температуре. У начелу, са повећањем температуре повећава се проводност, па струја кроз спој расте и при сталном напону на његовим крајевима.

Инверзна струја засићења PN-споја зависи од карактеристика полупроводничког материјала. Према теоријском прорачуну, струја I_s се повећава са порастом температуре око 7,5 %/K за силицијум, а 10 %/K за германијум.

При сталној струји I напон директно поларисаног PN-споја смањује се са порастом температуре, што омогућује мерење промене температуре мерењем промене напона PN-споја. Температурска осетљивост PN-споја је приближно³⁴:

$$\frac{dU}{dT} \approx -2,2 \frac{mV}{^{\circ}C}. \quad (1.46)$$

Ценеров напон U_z се такође мења са температуром. Са повећањем температуре смањује се ширина прелазне области, па је јачина поља потребна за остваривање пробоја мања. При лавинском ефекту температурски коефицијент напона пробоја U_B је позитиван. Са порастом температуре се смањује дужина слободног пута између два узастопна судара, па је потребно јаче електрично поље да би слободни носилац наелектрисања добио кинетичку енергију довољну за извршење јонизације.

Поред тога што поједина својства PN-споја зависе од температуре, излагање високим температурама може да доведе до неповратних деформација у структури полупроводника, што значи и до трајних промена у његовим карактеристикама, па и разарања самог споја. Највећа дозвољена температура PN-споја је од 150 °C до 200 °C за елементе израђене од

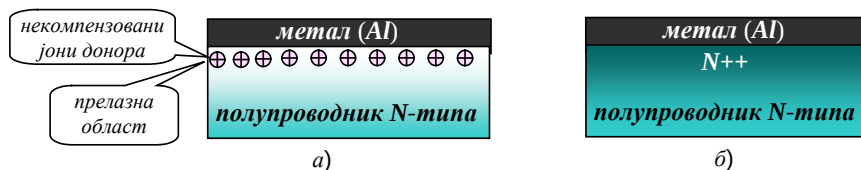
³⁴ Теоријски прорачун даје $-2,1 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ за германијум, односно $-2,3 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ за силицијум.

силицијума, односно од 75 °C до 120 °C за елементе израђене од германијума.

Пробој PN-споја може бити проузрокован и генерисањем слободних носилаца услед кумулативне интеракције између повећања снаге дисипације на инверзно поларисаном споју и повећања температуре споја. Ова појава се назива **термички пробој** (*thermal breakdown*).

1.4. СПОЈ МЕТАЛА И ПОЛУПРОВОДНИКА

Основно својство PN-споја је изразита несиметрија електричне проводности односно *I-U* карактеристике. Спој метал-полупроводник такође може да испољава усмерачко својство³⁵. Принцип дејства приказан је на слици 1.8.а. Алуминијумска електрода у споју са кристалом силицијума делује као примеса Р-типа. Енергија слободних електрона у полупроводнику је већа него у металу, па проводни електрони прелазе из полупроводника у метал. Услед тога долази до повећања концентрације некомпензованих позитивних донорских јона у близини контакта са металом, и образовања потенцијалне препреке која спречава даљи прелазак електрона из полупроводника у метал. Разлика потенцијала на додирној површини двеју средина у одсуству струје се назива **контактни напон** [7].



Слика 1.8. Спој метала и полупроводника

При директној поларизацији потенцијална препрека се смањује, што омогућује да електрони прелазе из полупроводника у метал. При инверзној поларизацији потенцијална препрека се повећава и електрони не могу да прелазе из полупроводника у метал. У оба случаја само електрони учествују у процесу провођења. То значи да нема ефеката нагомилавања споредних носилаца слободног наелектрисања, па је трајање прелазних појава при промени смера поларизације веома кратко.

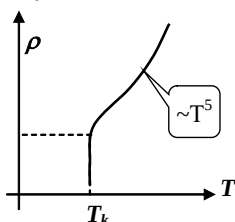
Да би се кристал који садржи PN-спој укључио у електрично коло, непоходно је остварити контакте за повезивање металних проводника са деловима кристала који припадају Р- односно N-области. Да на споју метала и полупроводника не би дошло до успостављања прелазне области у којој постоје некомпензована наелектрисања, неопходно је да на месту спајања концентрација примеса у полупроводнику буде толико велика да се кристал понаша као метал (слика 1.8.б). На тај начин образује се неусмерачки спој

³⁵ Ова је појава била позната и примењена много пре развоја технологије полупроводника. Још почетком двадесетог века тачкасти спој еластичног металног шилјка и кристала галенита (сулфид олова) коришћен је у радио-пријемницима.

метала и полупроводника, који се у литератури понекад назива и “омски” спој.

1.5. СУПЕРПРОВОДНОСТ

Специфична електрична отпорност ρ (односно њена реципрочна вредност σ) представља фундаментални параметар супстанце и предмет је научног истраживања. При врло ниским температурама, у близини апсолутне нуле, специфична отпорност неких материјала једнака је нули (суперпроводљивост) (слика 1.9).



Слика 1.9. Суперпроводност

Суперпроводник је супстанца чија је специфична отпорност једнака нули за довољно ниске температуре³⁶ и довољно слаба магнетска поља.

До сада је откривено да својство суперпорводности показује више од двадесет елемената и преко хиљаду легура и хемијских једињења.

материјал	критична температура T_k (K)
жива (Hg)	4,12
олово (Pb)	7,26
алуминијум (Al)	1,14
ниобијум	9,22
нитрат ниобијума	23
$\text{BiSr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$	110
$\text{Hg}_2\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_8$	110

Табела 1.2. Карактеристичне температуре неких суперпроводника

За откриће појаве суперпроводности, 1911, холандски физичар Камерлинг Онс (*Kamerlingh Onnes*, 1853-1926) је, две године касније, добио Нобелову награду (1913). Ова појава даје теоријску могућност да се кретање слободних носиоца наелектрисања у затвореном електричном колу, након што је на неки начин успостављено, настави и без деловања електричног извора који би то кретање одржавао. У прстену од суперпроводног материјала, охлађеном испод одређене температуре, индукцијом изазавана електрична струја може се одржавати веома дуго.



Први откривени материјали са својствима суперпроводности одликовали су се веома ниским карактеристичним температурама (табела 1.2). Каснија истраживања показала су да неки материјали постају суперпроводници (*superconductor*, *Suppraleiter*) на знатно вишим температурама (*high- T_c superconductor*), чиме је отворена могућност за ширу

³⁶ У лабораторијским условима остварене су, у микроразмерама, температуре испод 1 нК.

употребу ове појаве. Сагледава се да ће технологија заснована на суперпроводности у будућности омогућити производњу рачунара у којима ће се поједине операције обављати брзином која је недостижна за "класичну" технологију засновану на дифузионим процесима у полупроводницима.

Џон Бардин, један од проналазача транзистора, добио је своју другу Нобелову награду (1972) управо за допринос развоју науке у области суперпроводности³⁷. Гдину дана касније награду је добио Брајан Џозефсон (*B. Josephson*) за откриће ефекта који данас носи његово име³⁸. Развој и примена кола са суперпроводницима представљају посебну област у савременој електроници. Рачунари су једно од подручја примене суперпроводника. Још 1980. године фирма *IBM* је извршила експерименте који су показали да се помоћу суперпроводника могу постићи брзине обраде које су за два реда величине веће од брзина које се постижу "класичним" полупроводницима. Милер (*K.A. Müller*) и Беднорц (*J.G. Bednorz*), који су пронашли керамичке материјале који показују својство суперпроводности на знатно вишим температурама (130 K), добили су Нобелову награду 1987 године. Иако појава суперпроводности још увек припада егзотичним областима савремене науке и технологије, очекује се да ће у будућности имати све шири употребу.

1.6. ЕМИСИЈА И АПСОРПЦИЈА СВЕТЛОСТИ

Сва тела, загрејана до одређене температуре емитују³⁹ електромагнетско зрачење. Спектар зрачења (расподела интензитета зрачења по таласним дужинама, односно учестаностима) зависи од температуре. На нижим температурама се емитује зрачење у инфрацрвеној области (топлотно зрачење), док се на вишим температурама емитује и зрачење у подручју видљивог дела спектра.

При протицању струје кроз PN-спој, услед рекомбинације носилаца, такође може бити емитована светлост. Електронски елементи у којима се оптичке појаве производе апсорпцијом⁴⁰ носилаца наелектрисања означавају се термином "оптоелектронски" [8]. Уобичајено је, међутим, да се под називом "**оптоелектроника**" подразумева област у којој се проучавају и користе појаве претварања електричне енергије у светлосну (емисија светлости), и обратно (апсорпција светлости).

Процес емисије електрона са површине неких материјала (метала и њихових оксида) под дејством светлости одговарајуће учестаности је назван (спољашни) **фотоелектрични ефекат** (*photo-electric effect*, *фотоелектрический эффект*). У најопштијем смислу, под фотоелектричним ефектом се подразумева појава узајамног деловања

³⁷ Бардин је награду добио заједно са Купером (*L. Cooper*) и Шриффером (*R. Schrieffer*) за развој теорије суперпроводљивости (која се обично назива BSC теоријом).

³⁸ Џозефсонов ефекат је квантна макроскопска појава која се састоји у преласку, без губитака енергије, електронских парова између два слабо спрегнута суперпроводника.

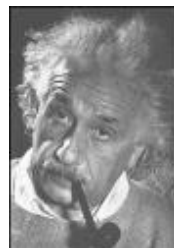
³⁹ Од лат. речи *emissio*, одашиљање, одавање, избацивање.

⁴⁰ Од лат. речи *absorptio*, усисавање, упијање, примање у себе.

између електромагнетског зрачења и материје у којој се апсорбује квант енергије зрачења (фотон⁴¹) и генеришу покретни носиоци наелектрисања [9]. Код алкалних метала (литијум, натријум, калијум, цезијум), под утицајем светлости, са површине у околни простор се емитују ослобођени електрони⁴². Код полупроводника се ова појава манифестује као унутрашњи фотоелектрични ефекат⁴³.

Научно објашњење ове појаве (1905) је дао Алберт Ајнштајн, (*Albert Einstein*, 1879-1955) физичар-теоретичар, један од најистакнутијих стваралаца модерне физике, творац теорије релативности. У низу чланака које је објавио у својој 26 години, млади Ајнштајн је, уносећи нове погледе и указујући на нове путеве истраживања, покренуо револуционарне промене у стварању физичке "слике света" у којем живимо.

За допринос физици, а посебно за откриће закона фотоелектричног ефекта, Ајнштајн је награђен Нобеловом наградом 1921. године.



Енергија коју фотон предаје електрону се претвара у топлотну (топлотни ефекат светлости) или, ако је енергија већа од величине енергијског процепа између валентног и проводног опсега, валентни електрон, коме је фотон предао енергију, прелази у проводни опсег, тако да се генерише пар покретних носилаца наелектрисања електрон-шупљина.

Повећање концентрације слободних носилаца наелектрисања у полупроводнику, обасјаном светлошћу одговарајуће таласне дужине, смањује његову специфичну отпорност. Промена електричне проводности услед зрачења се назива **фотопроводност**, а супстанца (тело) чија проводност расте са апсорпцијом фотона назива се фотопроводник (односно фотоотпорник).

У начелу, ова појава се дешава у свим материјалима, па и металима, али је у том случају релативан допринос светлости концентрацији електрона занемарљив, јер их већ има много. Код полупроводника који садрже PN-спој, долази до усмереног кретања електрона и шупљина и, уколико су крајеви спојени, образовање фотострује која има смер од извода N-област споја ка изводу P-области.

Фото-осетљив PN-спој се може посматрати као отпорник чија се отпорност мења у зависности од интензитета светлости, али се процес знатно разликује. Електрони и шупљине који се генеришу далеко од области просторног наелектрисања се брзо рекомбинују због велике концентрације слободних носилаца наелектрисања у њиховој околини. Међутим, електрони и шупљине који се ослобађају у прелазној области, у којој постоји електрично поље, бивају усмерени у супротним смеровима - електрони ка N-области, а шупљине ка P-области. Пошто је концентрација слободних носилаца у прелазној области мала, рекомбинација је занемарљива и, ако је електрично коло затворено, протиче фотоструја која у спољашњем колу има смер од N-области ка P-области.

⁴¹ Од грчке речи *phōs*, светлост.

⁴² Фотоемисија (*foto-electric emission*) је емисија електрона искључиво услед упадајућег зрачења.

⁴³ Фотопроводни ефекат (*photo conductive effect, innerer lichtelektrischer Effekt*).

Емисија светлости из полупроводника настаје при рекомбинацији парова електрон-шупљина. Електрон у валентном опсегу има мању енергију од (слободног) електрона у проводном опсегу. При преласку слободног електрона из проводног опсега у валентни опсег емитије се светлост чија је таласна дужина одређена разликом два енергијска нивоа. Овим процесом се електрична енергија директно претвара у светлосну.

Рекомбинација се подстиче директном поларизацијом PN-споја, тако да се оствари кретање већинских носилаца наелектрисања кроз PN-спој, чиме се повећава вероватноћа попуњавања валентних веза. Слободни електрони из N-области прелазе у P-област у којој је концентрација шупљина велика, па је интензитет процеса рекомбинације већи.

Зависно од употребљеног материјала (односно од ширине забрањеног опсега енергије полупроводника) емитије се светлост различитих таласних дужина, односно различитих боја. Једињење галијума и арсена (галијум-арсенид, GaAs) емитије инфрацрвену светлост која је невидљива за људско око, а трокомпонентно једињење галијум-арсенид-фосфид (GaAsP, $W_G = 2 \text{ eV}$), видљиву светлост која представља нијансу црвене боје. Галијум-фосфор (GaP, $W_G = 2,3 \text{ eV}$) емитије зелену светлост. Због већег енергијског процепа у односу на силицијум, фотоемитијући PN-спој има већи пад напона при директној поларизацији од "обичног" PN-споја.

Помоћу полупроводника се остварују оптички квантни генератори, извори монохроматске⁴⁴ светлости великог интензитета, усмерености и кохеренције⁴⁵ – ласери⁴⁶.

1.7. ЛИТЕРАТУРА

- 1 Међународни електротехнички речник, Савезни завод за стандардизацију, 1996.
- 2 Electronics, Encyclopedia Britannica, www.britannica.com
- 3 Electromagnetism, Terms and definitions, IEC 50(121)-1978, Elektromagnetizam, JUS N.A0.121, 1990, 01-19
- 4 B. Popović, Elektromagnetizam, Грађевинска knjiga, 1986, стр 81
- 5 V. Vučić, D. Ivanović, *Fizika 1*, Научна knjiga, 1990, стр 357.
- 6 J. Millman, C. Halkias, *Integrated electronics: analog and digital circuits and systems*, McGraw-Hill, 1972, стр. 30.

⁴⁴ Која има само једну боју, једнобојна (од грч. *monós*, сам, један, једини и *chróma*, боја).

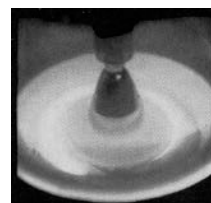
⁴⁵ Кохерентни су таласи који имају исту таласну дужину и непроменљиву разлику фаза (од лат. *cohaerens*, повезаност, спојеност).

⁴⁶ Први ласер (*light amplification by stimulated emission by radiation*) са чврстом активном средином (*solid-state laser*) конструисан је 1960. године коришћењем кристала рубина (Al_2O_3) са примесама атома хрома. Побуђивање (стимулација) атома врши се пражњењем кондензатора кроз ксенонску лампу. Једновремена деекситација свих атома у побуђеном кристалу доводи до емитовања светлости (стимулисана светлост) таласне дужине 693 nm, велике снаге.

-
- 7 Реф. 3, 02-53
 - 8 Реф. 3, 02-62.
 - 9 Terms and definitions for semiconductor devices, general, IEC 470-0, 1969, Poluprovodničke komponente, Opšti deo, Termini i definicije, JUS N.R1.320, 1979, 2.1.25

ПИТАЊА

1. Шта је покретљивост слободних носилаца наелектрисања, како је дефинисана и од чега зависи?
2. Како се дефинише специфична електрична отпорност и од чега зависи?
3. Шта је специфична електрична проводност? Како се дефинише? Како се специфична електрична проводност мења са температуром: а) у металима, б) у полупроводницима?
4. Шта је термички напон, како је дефинисан и колика је његова вредност на температури 300 K?
5. Шта је шупљина? Како се наелектрисање преноси шупљинама? У каквом односу су покретљивост електрона и шупљина у истом материјалу?
6. Написати израз који описује зависност густине струје од напона поларизације PN-споја. У чему се разликују U-I карактеристике германијумског и силицијумског PN-споја?
7. Шта је лавински пробој? Како се напон пробоја лавинским ефектом мења са температуром?
8. Шта је пробој тунелским ефектом? Како се напон пробоја тунелским ефектом мења са температуром?
9. Шта је капацитивност прелазне области PN-споја, C_T , и од чега зависи? Који је ред величине капацитивности C_T ?
10. Шта је дифузиона капацитивност PN-споја, C_D , и од чега зависи? Који је ред величине капацитивности C_D ?
11. Шта је температурска осетљивост напона директне поларизације PN-споја при сталној струји, у којим јединицама се изражава, и колика је њена приближна вредност?
12. Шта је инверзна струја засићења PN-споја и како се мења у зависности од температуре?
13. Шта је динамичка отпорност? Како се динамичка отпорност PN-споја мења у зависности од вредности струје?
14. Одредити вредност динамичке отпорности силицијумског PN-споја, на собној температури, при струји од 2 mA.
15. Шта је фотоелектрични ефекат?



2. ЕЛЕМЕНТИ ЕЛЕКТРОНСКИХ КОЛА И СИСТЕМА

У овом поглављу се разматрају основни појмови који се користе при описивању својстава електронских уређаја и појава у њима. Дате су дефиниције савршених (идеалних) елемената. Приказана је класификација и дат је систематизован опис својства основних елемената који се користе у савременој електроници, са циљем постављања заједничке основе за разумевање рада кола и система у разним областима електронике.

2.1 ОСНОВНИ ПОЈМОВИ

Електронски уређај је скуп међусобно повезаних елемената у којем се електромагнетска енергија користи да би се обавила одређена функција. Елемент електронског уређаја је његов саставни део који се не може поделити на мање делове, а да се не изгубе карактеристична (електрична) својства односно функције¹.

Елемент има извучене крајеве намењене за спајање са другим елементима². Крајева има најмање два, а може их бити и више. Два извучена краја могу да представљају **приступ**³ преко којег се у електричном погледу приступа елементу. Елемент не може имати везе са другим елементима осим преко својих приступа.

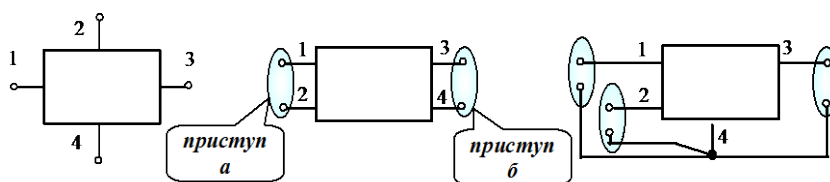
Елемент са више од два краја се може повезати са другим елементима на више начина. Вишекрајни елементи са истим бројем прикључака могу имати различити број приступа, зависно од функционалних карактеристика елемента. На пример, четворокрајни елемент (слика 2.1.а) може бити елемент са два (2.1.б) или три приступа (2.1.в). Елемент са два приступа може имати три или четири краја⁴.

¹ У ширем смислу, и електронски уређај (*electronic device*), посматран као целина, може се сматрати елементом једног сложенијег скупа (система).

² Прикључак (пол) елемента (*terminal, Pol, зажим*) је тачка одређена за прикључивање (везу са другим елементима).

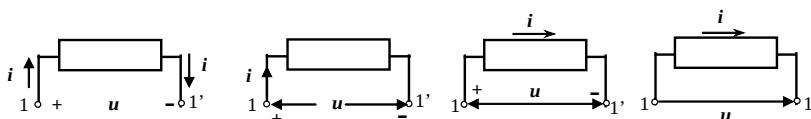
³ Пар крајева такав да су струје у њима једнаке по интензитету а супротног смера (*port, Tor, вход*).

⁴ Групи трополних елемената са два приступа припадају електронска цев са три електроде (триода), транзистори и триодни тиристори.



Слика 2.1. Елемент са четири краја

Електромагнетски процеси у електронским елементима и уређајима описују се помоћу појмова "напон" и "струја". У општем случају елемент са једним приступом (двокрајни елемент, двопол) се графички представља правоугаоником (слика 2.2). На приступу се посматрају две величине: електрична струја i и напон u . Струја i описује кретање (проток) наелектрисања кроз елемент. Струја на једном крају једнака је по интензитету, а супротна по смеру струји на другом крају⁵.



Слика 2.2. Елемент са једним приступом

Уобичајено је да се за референтни (позитивни) смер узима смер струје кроз елемент од краја 1 ка крају 1'. Струја i је позитивна ако позитивно наелектрисање улази у прикључак 1, а излази из прикључка 1'.

Напон u представља разлику потенцијала крајева елемента:

$$u = u_{11'} = V_1 - V_{1'}. \quad (2.1)$$

Прикључак на вишем потенцијалу обележава се са "+", или се назначавача оријентацијом стрелице, која је у стандардима Међународне електротехничке комисије⁶ усмерена ка тачки нижег потенцијала. Неки од начина обележавања коришћених у литератури⁷ су приказани на слици 2.3.

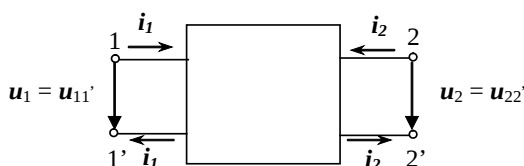
Елемент са два приступа има два пара крајева преко којих су остварене све његове везе са другим елементима (колима). Графички приказ елемента са два приступа, са назначеним референтним смеровима за напоне и струје

⁵ Сматра се да нема ни повећања ни смањења укупног наелектрисања елемента. Количина електрицитета која преко једног краја уђе у елемент једнака је количини електрицитета која преко другог краја истог приступа изађе из елемента.

⁶ Међународна електротехничка комисија (*International Electrotechnical Commission - IEC*), основана је 1906. године са циљем остваривања међународне сарадње на питањима стандардизације у области електротехнике и електронике. *IEC* је организација која се бави стандардизацијом, а коју сачињавају Национални комитети појединих земаља чланица. Задатак ове организације, чији је први председник био лорд Келвин (*William Thomson*), је да иницира или унапређује међународну сарадњу по свим питањима која се односе на стандардизацију у области електротехнике и електронике. Одлуке које *IEC* доноси о одређеним техничким питањима у облику стандарда, техничких извештаја и упутстава, изражавају, у што је могуће већој мери, међународни консензус мишљења у тој области и имају природу препорука за међународно коришћење које поједине земље прихватају у оквирима које одређују поједини конкретни услови.

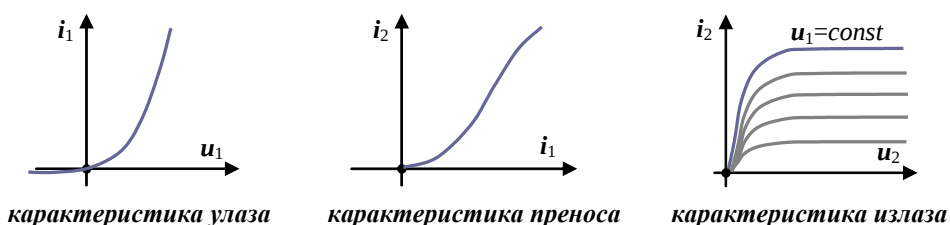
⁷ У англо-америчкој литератури је уобичајено да је смер стрелице за напон окренут ка тачки на вишем потенцијалу, тако да стрелице напона и струје имају супротне смерове.

према IEC препорукама, дат је на слици 2.3. Струје у оба краја једног приступа су једнаке по интензитету, а супротног смера.



Слика 2.3. Елемент са два приступа

Графички приказ односа између две величине којима се описује стање елемента се назива **карактеристика елемента**⁸. Притом, једна од две преостале величине може представљати параметар (слика 2.4.в).



Слика 2.4. Основне карактеристике елемента са два приступа

Елемент у којем су напони између крајева и струје у крајевима описани линеарним диференцијалним једначинама са константним коефицијентима назива се **линеарни елемент**. Линеарни модели електронских елемената и система су само приближна представа (апроксимација) процеса који се одвијају у стварним физичким елементима односно системима. На пример, зависност капацитивности од напона код “обичних” капацитивних елемената (кондензатора) се у највећем броју примена може занемарити у радном опсегу (назначеном од стране произвођача). Међутим, капацитивност инверзно поларисаног PN-споја веома много зависи од напона, а управо то својство се користи за добијање контролисане капацитивности за електронско подешавање учестаности осцилаторног кола.

За усвојене референтне смерове улазна електрична снага $p(t)$ елемента са једним приступом одређена је формулом:

$$p(t) = u(t) \cdot i(t). \quad (2.2)$$

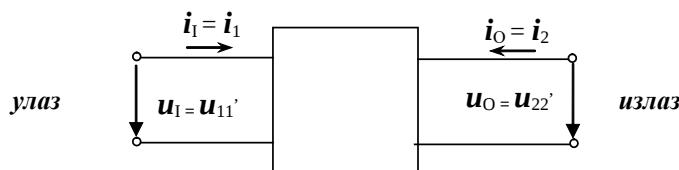
Када је снага $p(t)$ позитивна, елемент прима енергију. Када је снага $p(t)$ негативна, елемент одаје енергију.

Улазна снага елемента са више приступа посматраног као целина једнака је збиру снага на његовим приступима. За елемент са два приступа (слика 2.5), према усвојеним референтним смеровима, важи:

$$p = u_1 i_1 + u_2 i_2. \quad (2.3)$$

⁸ Од грчке речи *character* - ознака, обележје, особина, оно чиме се нека ствар или човек нарочито одликују, разликују од других ствари или људи. У литератури се често под називом “карактеристика елемента” подразумева и аналитички израз којим је приказан однос две величине.

Ако се елемент са два приступа користи за пренос енергије или сигнала, на њему се разликују улазни⁹ и излазни приступ¹⁰. Уобичајено је да се величине на улазном приступу означавају индексом I или i (од енглеске речи *input*, улаз), а величине на излазном приступу индексом O или o (од енглеске речи *output*, излаз)



Слика 2.5. Елемент типа улаз-излаз

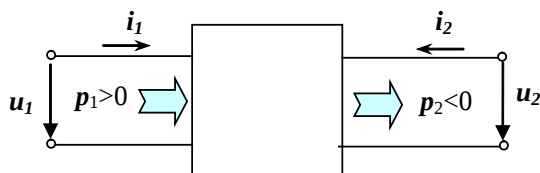
Неки елементи имају способност да електричну енергију, која се у њих улаже, сакупљају у виду енергије електричног и/или магнетског поља (елементи са меморијом). Ако се сва уложена електрична енергија нагомилава у елементу, у произвољном тренутку посматрања t његова укупна акумулисана¹¹ енергија је једнака:

$$W(t) = \int_{-\infty}^t p(t) dt = \int_0^t p(t) dt + W(0). \quad (2.4)$$

Са становишта енергијског биланса, елементи који се користе у електроници се деле у две основне групе:

- ♦ **активни елемент** је елемент који може да приведе енергију систему у којем се користи (са којим је повезан).
- ♦ **пасивни елемент** је елемент у којем уложена енергија може бити само позитивна или нула (слика 2.7).

Елемент који има способност да дуже време производи и предаје електричну енергију другим елементима назива се **извор** (генератор¹²). У изворима се спољашња енергија (хемијска, топлотна, механичка или енергија неког другог облика¹³) претвара у електричну енергију која се преноси (предаје) другим елементима са којима је извор повезан.



Слика 2.6. Активни елемент типа улаз-излаз

У пасивном елементу, за било који почетни тренутак t_p и за било који интервал посматрања $[t_p, t_k]$, збир акумулисане енергије, чија је вредност у

⁹ Улаз (*input*, *Eingang*, *вход*).

¹⁰ Излаз (*output*, *Ausgang*, *выход*).

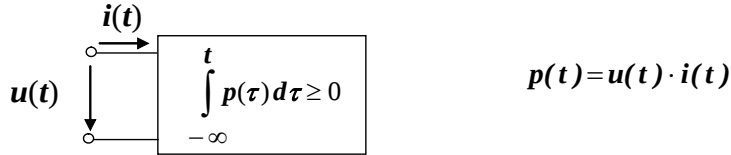
¹¹ Од лат. *accumulatio*, нагомилавање.

¹² Од лат. *generator*, родилац, произвођач, стваралац, правилац.

¹³ У изворе се могу убрајати и пријемне антене у којима, за разлику од набројаних извора, нема измене вида енергије.

почетном тренутку t_p једнака $W(t_p)$, и електричне енергије уложене (унете) током интервала посматрања, $W[t_p, t]$, може бити само позитиван или нула:

$$W(t_p) + W[t_p, t] \geq 0; \forall t \geq t_p. \quad (2.5)$$



Слика 2.7. Пасивни елемент са једним приступом

Енергија сакупљена у једном временском интервалу се може ослободити (претворити у други облик) у неком другом временском интервалу. Пасивни елементи са таквим својством се називају реактивни елементи.

Елемент са више приступа је пасиван ако у било ком тренутку t улазна снага $p(t)$ елемента као целине, рачуната као збир снага на сваком приступу, није негативна:

$$p(t) = \sum_i u_i(t) i_i(t) \geq 0. \quad (2.6)$$

Пасивни елементи са једним приступом су, на пример, отпорник, који изражава појаву претварања електричне енергије у топлотну (Џулов ефект), кондензатор, који изражава појаву поларизације диелектрика и има особину акумулисања електростатичке енергије, и калем, који изражава појаву самоиндукције и има особину акумулисања електромагнетске енергије. Пасивни елементи са два приступа (четворополи) су трансформатор и двожицни вод. **У пасивном елементу се врши претварање једног облика енергије у други.** Пасивни елементи не могу систем (коло) са којим су електрично повезани да трајно “снабдевају” енергијом.

Елемент који врши одређену функцију може бити прост (отпорник, кондензатор, калем) или сложен, али такав да се не може разложити без губитка функције (трансформатор, кристал полупроводника са више прикључака).

Савршени (идеални) електронски елементи су апстрактна представа елемената чија је карактеристика само један електрични параметар [1]. Сматра се да се у савршеним елементима дешава само један од процеса трансформације енергије: претварање енергије из електричног у неки други облик (топлотни или светлосни), или обратно; нагомилавање магнетске енергије и стварање магнетског поља; односно нагомилавање електростатичке енергије и стварање електричног поља. Основни савршени елементи (отпорник, кондензатор и калем) описани су линеарним операторима¹⁴.

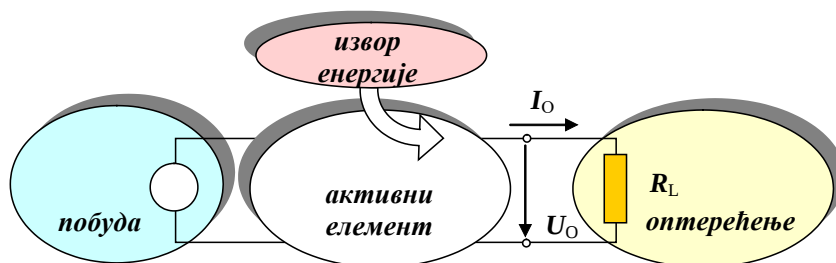
¹⁴ Оператор $\hat{O}$ је линеаран ако има својства адитивности и хомогености:

$\hat{O}(y_1 + y_2) = \hat{O}(y_1) + \hat{O}(y_2)$, $\hat{O}(c \cdot y) = c \cdot \hat{O}(y)$, $c = \text{const}$.

Оператори множења константом, диференцирања и интегралирања су линеарни оператори. Елементи (системи) који се могу описати линеарним операторима називају се линеарни

Скуп повезаних електронских елемената у којима могу да постоје електричне струје образује **електронско коло**¹⁵. **Еквивалентно коло** је модел којим се описује понашање електронског елемента или система коришћењем савршених елемената [2].

Пасивно коло је коло које садржи само пасивне елементе. У теоријској анализи електричних кола, активни елемент је елемент чије еквивалентно коло садржи извор енергије [3]. Међутим, **у електроници, нису сви активни елементи извори енергије сами по себи**, већ се тим називом означавају и елементи који могу да преносе енергију коју даје неки спољашњи извор електричне енергије (на пример: соларна ћелија, батерија или акумулатор) са којим су повезани. Групи активних електронских елемената припадају транзистори и електронске цеви. Снагу на излазу активног електронског елемента обезбеђује спољашњи извор енергије (слика 2.8).



Слика 2.8. Активни електронски елемент

У електротехници, као и у теоријској анализи електричних кола, као активни елементи се дефинишу делови уређаја (система) у којима се спољашња енергија претвара у електричну енергију, која се потом преноси (предаје) другим елементима са којима су повезани. Пасивни елементи “захтевају” постојање помоћних извора енергије. Еквивалентно коло извора електричне енергије садржи извор напона (или струје) и пасивне елементе који одређују “сопствену” унутрашњу отпорност¹⁶ извора. У електроници, међутим, под називом активни елементи не подразумевају се само делови уређаја у којима се хемијска, молекуларно-кинетичка, механичка или енергија неког другог облика претвара у електричну енергију, већ се тим именом означавају и елементи који електричну енергију, коју даје неки спољашњи извор¹⁷ са којим су повезани, могу да преносе другим елементима, који у односу на посматрани активни елемент представљају оптерећење¹⁸. Сходно томе, осим прикључака (приступа) преко којих се повезују са осталим елементима у колу (мрежи), активни електронски елементи имају и прикључке којима су повезани са извором који их “снабдева” електричном енергијом

елементи (системи).

¹⁵ У (теоријској) анализи електричних кола, под појмом “електрично коло” (*electric circuit*, *elektrischer Stromkreis*, *електрическа цель*) подразумева се изолован затворен систем који нема никакве везе са околином, образован међусобним везивањем елемената између којих се врши размена енергије [1].

¹⁶ У општем случају: унутрашњу импедансу, коју карактеришу отпорност, капацитивност и индуктивност.

¹⁷ Извор за напајање (*power supply*).

¹⁸ Терет, потрошач којем се енергија преноси (*load*, *Last*, *нагрузка*), пријемник сигнала.

неопходном за одвијање процеса који дефинишу њихова својства у функционалном погледу.

Основне функције, које електронски елементи обављају могу се груписати у неколико категорија:

- појачање,
- усмеравање (исправљање),
- ограничавање,
- поређење,
- осциловање и
- прекидање.

2.2 ЕЛЕМЕНТИ СА ЈЕДНИМ ПРИСТУПОМ

У анализи електричних кола, **мрежа** је скуп повезаних елемената посматран као целина која се може представити гранама и чворовима¹⁹ [4], [5]. **Грана** је део мреже, састављен од једног или више елемената, посматран као мрежа са два краја. **Чвор** је крајња тачка мреже или тачка спајања две или више грана. Крај мреже је чвор мреже који допушта везивање друге мреже.

Улазни крајеви мреже су везани за спољашње електрично коло или уређај који може да даје енергију или електрични сигнал. Излазни крајеви мреже су везани за спољашње коло или уређај који може да прима електричну енергију или електрични сигнал. **Приступ** је скуп од два краја мреже, такав да су струје у њима једнаке по интензитету, а супротних смерова. Елементи са једним приступом су основни елементи помоћу којих се елементи (системи) са више приступа могу представити као одговарајуће мреже.

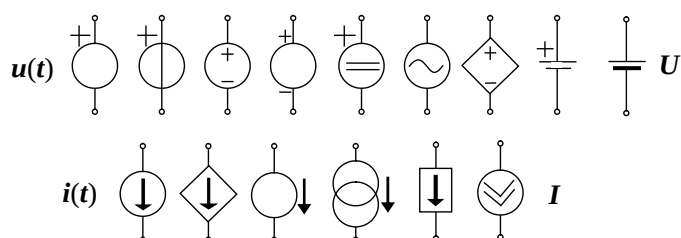
2.2.1 АКТИВНИ ЕЛЕМЕНТИ

Извор напона²⁰ је активни елемент са једним приступом код којег разлика потенцијала његових крајева представља карактеристичну величину (параметар) чија вредност у општем случају може да представља функцију времена. **Извор струје**²¹ је елемент код којег електрична струја представља карактеристичну величину, чија вредност може да представља функцију времена. Графички симболи којима се представљају извори напона и струје приказани су на слици 2.9.

¹⁹ У теоријској анализи електричних кола, под називом електрична мрежа (*network, Netzwerk, схема*) у ужем смислу се подразумева скуп тако повезаних елемената да се не може образовати затворени пут дуж елемената. Струја у елементима се не може успоставити уколико се не изврши повезивање крајева мреже. Таква веза елемената се не сматра електричним колом. Скуп електричних елемената повезаних тако да образују затворене путеве (петље, контуре), при чему постоје извучени крајеви преко којих се може остварити повезивање са другим елементима или мрежама је електрична мрежа у ширем смислу [5].

²⁰ Генератор напона (*voltage source, Spannungsquelle, источник напряжения*).

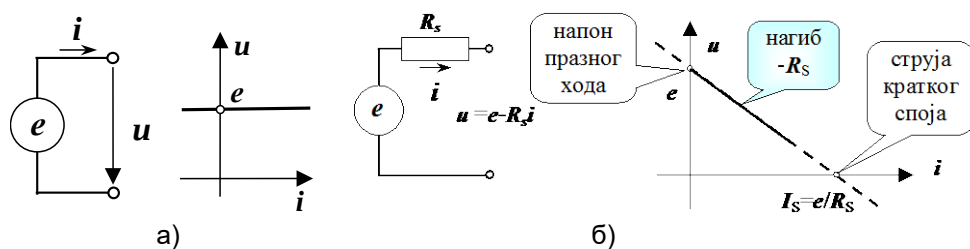
²¹ Генератор струје (*current source, Stromquelle, источник тока*).



Слика 2.9. Графички симболи извора напона и извора струје

Савршени **извор напона** (слика 2.10.а) је активни елемент који може да даје енергију осталим елементима у колу са којима је повезан, чији напон u између крајева (излазних прикључака) не зависи од струје i [6].

Независни извор напона је активни елемент који може да се представи редном везом савреног извора напона e , независног од свих струја и напона у колу, са једним пасивним елементом (слика 2.10.б). За позитиван (референтни) смер струје у извору напона усваја се физички смер, као што је назначено на слици. Вредност u напона на крајевима извора зависи од односа сопствене (унутрашње) отпорности извора R_s и отпорности R_L прикљученог оптерећења²². Уколико је струја i која тече кроз грану у којој се извор налази (“коју извор даје”) већа, утолико је веће одступање разлике потенцијала излазних прикључака извора од “идеалне” вредности e , која одговара стању када је извор неоптерећен (у “празном ходу”).



Слика 2.10. Савршени и независни извор напона

Сопствена (унутрашња) отпорност независног извора напона, R_s , одређује највећу струју коју извор може да даје (струја кратког споја).

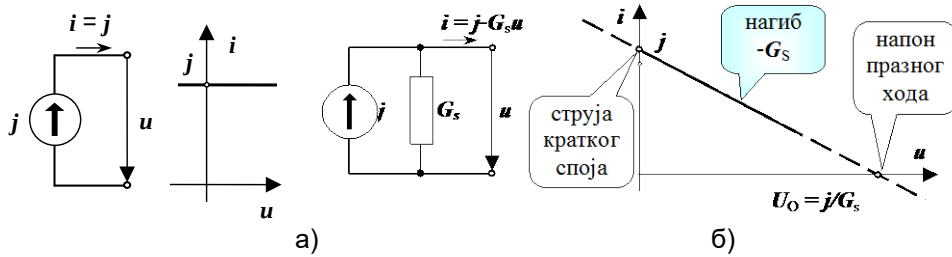
Савршени **извор струје** је активни елемент чија је струја i независна од напона u између његових крајева (слика 2.11.а).

Независни извор струје је активни елемент који може да се представи паралелном везом савреног извора струје j , независног од свих струја и напона у колу, са једним пасивним елементом (слика 2.11.б).

Карактеристика извора струје, односно напона, се налази у првом квадранту $u-i$ равни. У начелу, карактеристика може продрити у други и четврти квадрант, што значи да у одређеним условима рада извор може да прима енергију²³.

²² У општем случају, “унутрашњи” пасивни елемент извора и оптерећење представљају импедансе, Z_s и Z_L .

²³ Тада се у њему остварује повратно (реверзибилно) претварање електричне енергије у неки



Слика 2.11. Савршени и независни извор струје

Карактеристични параметар извора може, у општем случају да представља временски променљиву величину, као што је то, на пример случај, код извора наизменичног напона односно струје.

У електронским колима извори се не користе само да би снабдевали енергијом остале елементе кола, већ и да дефинишу вредност напона између две тачке електричне мреже (односно струје у некој њеној грани) независно од вредности осталих величина у колу у којем се налазе²⁴. Такви елементи представљају **изворе сигнала**, код којих енергијска способност, која се исказује кроз највећу дозвољену снагу оптерећења, има, у начелу, мањи значај од својстава као што су тачност, стабилност, сопствени шум односно изобличења таласног облика.

2.2.2 ПАСИВНИ ЕЛЕМЕНТИ

Пасивни елементи се могу представити помоћу три карактеристична параметра:

- **отпорност** симболизује процес неповратног претварања електричне енергије у неки други облик.
- **индуктивност** симболизује процес нагомилавања магнетске енергије.
- **капацитивност** симболизује нагомилавање електростатичке енергије.

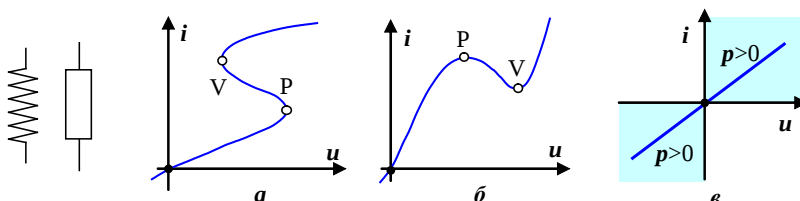
Отпорник²⁵ је пасиван елемент са једним приступом који се може описати алгебарском једначином која приказује однос између струје $i(t)$ и напона $u(t)$ на његовим крајевима. Приказана у u - i равни, карактеристика отпорника налази се у првом и трећем квадранту (слика 2.12.в). Отпорници немају способност сакупљања енергије. Уложена електрична енергија неповратно се претвара у неку другу врсту енергије (топлотну, светлосну). У најопштијем облику отпорник је описан алгебарском једначином [7]:

$$F[u(t), i(t), t] = 0. \quad (2.7)$$

други облик. Треба имати у виду да се у инверзним условим рада у изворима могу да одвијају процеси који доведе до њиховог трајног оштећења.

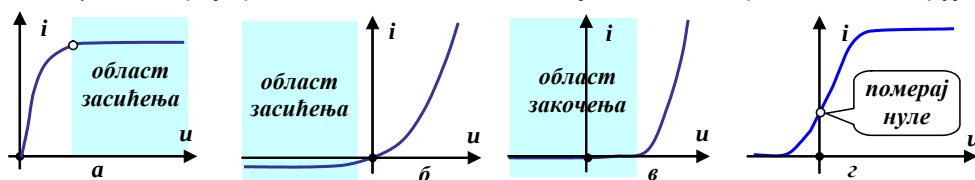
²⁴ У еквивалентним колима активних елемената користе се зависни извори напона односно струје (controlled voltage/current source).

²⁵ У општем случају отпорник (resistor, Widerstand, *резистор*) се дефинише као уређај (device) чија је основна карактеристика отпорност, у којем се електрична енергија претвара у топлотну (ЈУС Н.А0.151-01-30).



Слика 2.12. Графички симбол и типичне карактеристике отпорника

У анализи електричних мрежа, једначином 2.7 се дефинише **резистиван елемент**, који у општем случају може бити и активан (слика 2.13.в). Категорија резистивних елемената обухвата и изворе напона и струје.



Слика 2.13. Нелинеарни резистивни елементи

Елемент чија се карактеристика може изразити у облику:

$$u(t) = F_u[i(t)], \quad (2.8)$$

назива се **отпорник контролисан струјом**. Свакој вредности струје $i(t)$ одговара само једна вредност напона $u(t)$. Елемент чија карактеристика приказана на $u-i$ дијаграму има облик латиничног слова S (слика 2.12.а), представља отпорник контролисан струјом.

Елемент чија се карактеристика може изразити у облику:

$$i(t) = F_i[u(t)], \quad (2.9)$$

назива се **отпорник контролисан напонам**. Свакој вредности напона $u(t)$ одговара јединствена вредност струје $i(t)$. Елемент чија карактеристика приказана на $u-i$ дијаграму има облик латиничног слова N (слика 2.12.б), представља отпорник контролисан напонам.

Отпорник се назива линеарним, ако је функција F_u линеарна и пролази кроз координатни почетак (слика 2.12.в). Омов закон важи и када отпорност зависи од времена:

$$u(t) = R(t) i(t). \quad (2.10)$$

Линеаран отпорник је отпорник контролисан струјом, али и отпорник контролисан напонам. Отпорност R временски непроменљивог линеарног отпорника једнака је:

$$R = \frac{u(t)}{i(t)}. \quad (2.11)$$

У општем случају $u-i$ карактеристика временски непроменљивог отпорника је нелинеарна. Карактеристика елемента приказана на слици

2.13.а показује ефекат засићења. PN-спој се понаша као пасивни елемент са нелинеарном u - i карактеристиком (слика 2.13.б)

Величина дефинисана једначином 2.11 не представља подесан параметар за описивање појава везаних за процесе који се одвијају у колима у којима се отпорност мења при промени вредности напона односно струје. Однос малих промена напона и струје се назива диференцијална (инкрементална) отпорност:

$$r_{\Delta} = \frac{\Delta U}{\Delta I}. \quad (2.12)$$

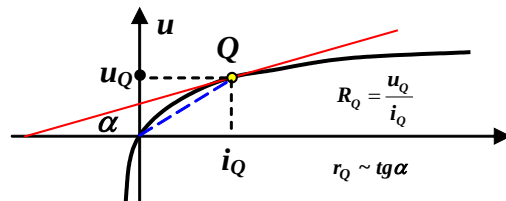
Ова величина представља примеренији параметар за анализу електронских кола када се карактеристичне величине налазе унутар изабраног (посматраног) радног опсега. На пример, код PN-спојева са врло великом концентрацијом примеса, у једном делу u - i карактеристике диференцијална отпорност r_{Δ} је негативна (што је веома значајно за неке области примене), иако је отпорност R споја у целини позитивна.

Динамичка отпорност r временски непроменљивог отпорника се дефинише изводом²⁶:

$$r = \frac{du}{di}, \quad (2.13)$$

а представља коефицијент правца тангенте у одговарајућој тачки струјно-напонске карактеристике (слика 2.14). У појединим деловима u - i карактеристике динамичка отпорност може бити негативна (локално активни отпорник), као што је то случај код отпорника чија је карактеристика приказана на слици 2.12.а, у опадајућем делу између врха (темена), Р, и дола (дна), V.

Отпорник је линеаран ако су динамичка r и статичка отпорност R међусобно једнаке у сваком тренутку и у свакој тачки карактеристике.



Слика 2.14. Статичка и динамичка отпорност нелинеарног отпорника

Начин израде отпорника зависи од својстава резистивног материјала који се користи. Мотани отпорници на носачу од керамике или стакленог влакна су некада по својим карактеристикама представљали најквалитетније отпорнике. Жичани отпорници имају боље карактеристике у погледу шума, израђују се за велике снаге и могу имати веома мале вредности. Данас у примени преовлађују слојни (*film*), отпорници код којих се као проводни материјал користи угљеник, односно угљени прах, метали (хром, никал), племенити метали (злато, платина) и оксиди метала (SnO_2).

²⁶ У општем случају, динамичка отпорност се дефинише парцијалним изводом $r = \partial u / \partial i$.

Најзначајнији показатељ квалитета отпорника је сачинилац промене отпорности са температуром (температурски коефицијент отпорника), TC , дефинисан је формулом:

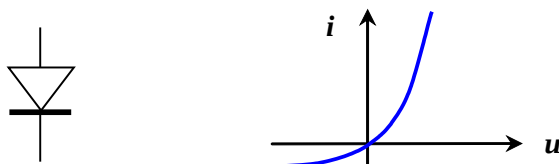
$$TC = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT} . \quad (2.14)$$

Обично се изражава у процентима по степену ($\%/^{\circ}\text{C}$) или у милионитим деловима²⁷ по степену ($\text{ppm}/^{\circ}\text{C}$). Вредност TC зависи од својстава материјала од којег је отпорник израђен (табела 2.1).

параметар	жичани	угљени	металослојни	прецизни металослојни
опсег вредности називне отпорности (Ω)	0,01 до 10 k	2,7 до 22 M	10 до 100 M	1 до 1 M
толеранције (%)	± 0.005 до ± 10	± 1 до ± 20	± 0.1 до ± 5	± 0.005 до ± 1
температурски коефицијент TC ($\text{ppm}/^{\circ}\text{C}$)	± 2 до $+250$	-200	± 15 до ± 100	± 1 до ± 5
највећа дисипација (W)	0,25 до 1 k	0,25 до 1	0,1 до 10	0,05 до 0,25
дуговремена стабилност ($\text{ppm}/\text{год}$)	200 до 3000	5 000 до 20 000	1 000 до 5 000	5 до 25

Табела 2.1. Типичне карактеристике отпорника

Пасивни елемент који се одликује веома различитом отпорношћу (проводношћу) за различите смерове струје се назива **диодa**²⁸.



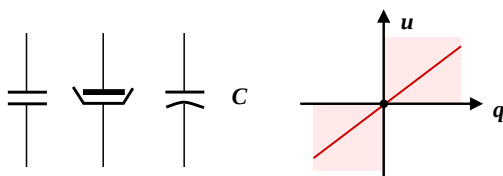
Слика 2.15. Графички симбол и карактеристика диодног елемента

Капацитивни елемент је елемент у којем се врши нагомилавање електростатичке енергије. **Кондензатор**²⁹ је пасивни елемент са једним приступом чија је карактеристика дата функционалном везом између напона $u(t)$ и количине електрицитета $q(t)$. У најопштијем облику кондензатор је описан једначином:

$$F[u(t), q(t), t] = 0 , \quad (2.15)$$

при чему је, према дефиницији наелектрисања:

$$q(t) = \int_{-\infty}^t i(t) dt . \quad (2.16)$$



Слика 2.16. Графички симболи и карактеристика кондензатора

²⁷ 1 ppm = 10^{-6} , од лат. *pars per millionem*.

²⁸ Симбол диодe одговара симболу вентила (valve) који допушта проток само у једном смеру.

²⁹ Елемент у којем се сакупља наелектрисање (*Kondensator*, *кондензатор*, од лат. *condensatio*, згушњавање, скупљање, гомилање).

Капацитивност C кондензатора се у општем случају дефинише парцијалним изводом:

$$C(u, q, t) = \frac{\partial q}{\partial u}. \quad (2.17)$$

За линеарни временски непроменљиви кондензатор важи (слика 2.16):

$$q = C u, \quad (2.18)$$

на основу чега следи формула за вредност струје i_C која протиче кроз кондензатор:

$$i_C(t) = \frac{dq}{dt} = C \frac{du}{dt}. \quad (2.19)$$

Промена напона Δu на крајевима кондензатора настала услед промене Δq наелектрисања његових плоча остварене током временског интервала Δt , у току којег се може сматрати да струја i има сталан интензитет, одређена је изразом:

$$\Delta u = \frac{1}{C} \Delta q = \frac{i}{C} \Delta t, \quad (2.20)$$

на основу којег се може закључити да се у стварним условима рада (при ограниченој вредности струје i_C која протиче кроз кондензатор), напон на његовим крајевима не може да се тренутно промени (**теорема о непрекидности напона кондензатора**).

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \Delta u = 0. \quad (2.21)$$

Капацитивност кондензатора зависи од температуре што се описује температурским коефицијентом TC :

$$TC = \frac{1}{C} \frac{dC}{dT}, \quad (2.22)$$

који се, као и код отпорника, изражава у $\%/^{\circ}\text{C}$ или у $\text{ppm}/^{\circ}\text{C}$.

Према врсти материјала који се користи као диелектрик савремени кондензатори се могу сврстати у три основне групе:

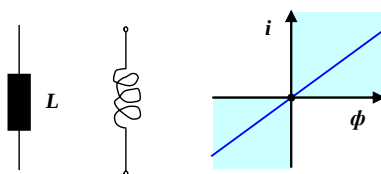
- ✦ керамички кондензатори,
- ✦ метализовани пластични кондензатори и
- ✦ електролитски кондензатори.

Осим наведених, у употреби су још увек и кондензатори са ваздухом, папиром, порцеланом, тефлоном или стаклом као диелектриком.

Индуктивни елемент је елемент у којем се електрична енергија сакупља у облику магнетске енергије. **Калем**³⁰ је индуктивни елемент са једним приступом чија је карактеристика дата функционалном везом између струје $i(t)$ и **флукса** $\phi(t)$ електромагнетског поља (слика 2.17). У најопштијем облику калем је описан једначином:

$$F[i(t), \phi(t), t] = 0, \quad (2.23)$$

³⁰ У општем случају калем (*inductor*, *Spule*, *katuška*) се дефинише као уређај (*device*) чија је основна карактеристика индуктивност, у којем се електрична енергија сакупља у облику магнетске енергије (ЈУС Н.А0.151-01-33).



Слика 2.17. Графички симболи и карактеристика калема

Према Фарадејевом закону, напон на приступу калема одређен изразом:

$$u(t) = \frac{d\phi}{dt} . \quad (2.24)$$

односно:

$$\phi(t) = \int_{-\infty}^t u(t) dt . \quad (2.25)$$

Индуктивност L калема се у општем случају дефинише парцијалним изводом:

$$L(i, \phi, t) = \frac{\partial \phi}{\partial i} , \quad (2.26)$$

У линеарном, временски непроменљивом калему, величина флукса је сразмерна интензитету струје:

$$\phi = Li , \quad (2.27)$$

односно:

$$u(t) = L \frac{di}{dt} . \quad (2.28)$$

Промена струје Δi кроз калем током временског интервала Δt је једнака:

$$\Delta i = \frac{u}{L} \Delta t . \quad (2.29)$$

У стварним условима рада, при ограниченој вредности напона у колу, важи:

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \Delta i = 0 . \quad (2.30)$$

Дакле, струја кроз идеалан калем не може тренутно да се промени (**теорема о непрекидности струје калема**).

У општем случају, за линеарни, временски непроменљив калем важи:

$$i(t) = \frac{1}{L} \int_{t_0}^t u(\tau) d\tau + i(t_0) , \quad (2.31)$$

где је $i(t_0)$ почетна вредност струје $i(t)$.

Кондензатор и калем представљају реактивне елементе, који имају способност нагомилавања електричне енергије. Веза између струје и напона на приступу ових елемената се описује диференцијалном једначином (2.19 односно 2.27). У кондензатору се електрична енергија сакупља у облику електростатичке енергије. У калему се електрична енергија сакупља у облику магнетске енергије. У електронским колима ови елементи се користе за

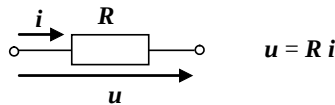
остваривање операција диференцирања и интеграције временских функција (када обрада сигнала то захтева).

2.2.3 САВРШЕНИ ЕЛЕМЕНТИ СА ЈЕДНИМ ПРИСТУПОМ

Напон и струја елемента са једним приступом су повезани једначином која зависи од његове природе. Модел савршеног (идеализованог) елемента се одређује на основу његових основних функција док се остале, узгредне, појаве занемарују. Дефиниције основних савршених (идеалних) елемената су стандардизоване од стране Међународне електротехничке комисије. Савршени отпорник, кондензатор и калем су линеарни елементи. Савршена диода је нелинеарни резистивни елемент.

Савршени отпорник је пасивни елемент са два краја у коме је тренутна вредност напона између његових крајева u сразмерна тренутној вредности струје i . Карактеристични параметар савршеног отпорника, је електрична отпорност R , дефинисана количником напона и струје:

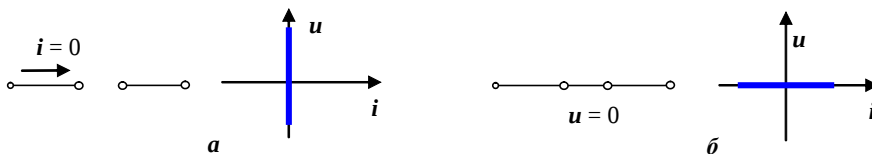
$$R = \frac{u}{i}. \quad (2.32)$$



Слика 2.18. Савршени отпорник

Отворена веза (прекид) је елемент са једним приступом, чија струја има вредност једнаку нули за сваку вредност напона (слика 2.19.а). Карактеристика отворене везе се поклапа са осом напона. Отпорност отворене везе је бесконачно велика, а улазна снага у сваком тренутку је једнака нули.

Кратка веза (кратак спој) је елемент са једним приступом чији напон има вредност једнаку нули за сваку вредност струје (слика 2.19.б). Карактеристика кратке везе се поклапа са осом струје. Отпорност кратке везе је једнака нули, и улазна снага у сваком тренутку је једнака нули.



Слика 2.19. Отворена и кратка веза

Савршени кондензатор је пасивни елемент са два краја у којем је струја $i(t)$ која кроз њега протиче сразмерна изводу по времену напона $u(t)$ између његових крајева. Капацитивност C савршеног кондензатора је количник струје и извода напона по времену:

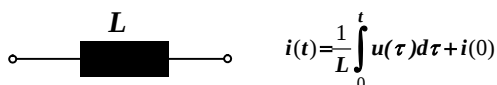
$$C = \frac{i(t)}{\frac{du}{dt}}. \quad (2.33)$$



Слика 2.20. Савршени кондензатор

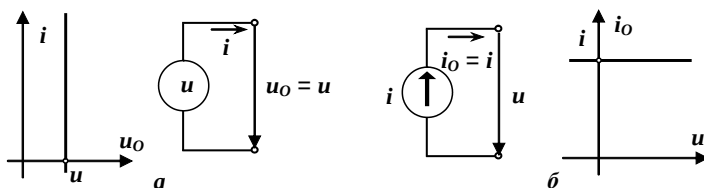
Савршени калем је пасивни елемент са два краја у којем је напон сразмеран изводу струје по времену. Индуктивност L савршеног калема је количник напона и извода струје по времену:

$$L = \frac{u(t)}{\frac{di}{dt}}. \quad (2.34)$$



Слика 2.21. Савршени калем

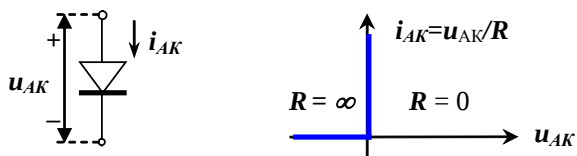
Савршени извор напона је активни елемент чији напон u између крајева не зависи од струје i у њему (слика 2.22.а). **Савршени извор струје** је активни елемент чија је струја i независна од напона u између његових крајева (слика 2.22.б).



Слика 2.22. Савршени извори

Савршена диода је пасивни елемент са два краја који има нулту отпорност за један смер струје, и бесконачну отпорност за супротан смер преношења позитивног наелектрисања (слика 2.23).

$$R = \begin{cases} 0; i_{AK} \geq 0 \\ \infty; i_{AK} < 0 \end{cases}. \quad (2.35)$$



Слика 2.23. Савршена диода

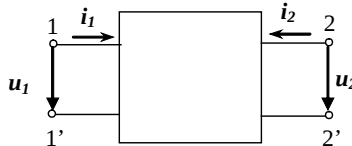
Савршена диода је **бинарни**³¹ елемент, постоје два јасно разграничена стања: у једном од њих диода се понаша као кратак спој, а у другом као отворена веза.

³¹ Од лат. *binarius*, који садржи два, од два дела.

2.3 ЕЛЕМЕНТИ СА ДВА И ВИШЕ ПРИСТУПА

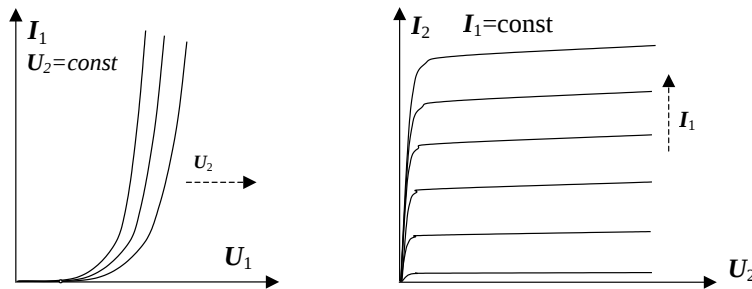
У општем случају, елемент са два приступа је описан изразима који се могу свести на две једначине:

$$\begin{aligned} F_1(u_1, i_1, u_2, i_2, t) &= 0; \\ F_2(u_1, i_1, u_2, i_2, t) &= 0; \end{aligned} \quad (2.36)$$



Слика 2.24. Елемент са два приступа

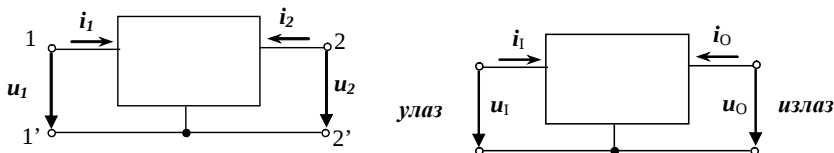
Карактеристика елемента са два приступа представља приказ односа између две изабране променљиве, при чему се остале две узимају као константе или параметри. Код елемената типа улаз-излаз, под називом “статичка карактеристика” подразумева се дводимензионални графички приказ зависности између улазних и излазних струја и напона.



Слика 2.25. Улазна и излазна карактеристика нелинеарног елемента са два приступа

2.3.1 КАРАКТЕРИСТИКА ПРЕНОСА

У највећем броју случајева улазни и излазни напон су дефинисани (или се могу дефинисати) у односу на заједничку референтну тачку.



Слика 2.26. Елемент са два приступа

Појачање у ужем смислу је однос вредности излазне и улазне величине исте природе. Коришћење овако дефинисаног појма појачања као параметра који описује елемент има смисла само ако овај однос не зависи од вредности улазне величине, односно представља константу преноса.

Значајна својства елемената типа улаз-излаз представљају улазна и излазна отпорност (импеданса). С обзиром да ове величине зависе од одговарајућих параметара елемената (кола) са којима је посматрани елемент повезан, неопходно је да буду дефинисани и услови рада при којима се вредност ових величина одређује. На пример, улазна отпорност може бити дефинисана када су излазни крајеви отворени (*open*):

$$R_{IO} = \left. \frac{u_I}{i_I} \right|_{i_O = 0} , \quad (2.37)$$

или краткоспојени (*shorted*):

$$R_{IS} = \left. \frac{u_I}{i_I} \right|_{u_O = 0} . \quad (2.38)$$

Елементи (системи) чији се математички модел може представити линеарном диференцијалном једначином са константним коефицијентима се називају **линеарни елементи** (системи). Значајно својство ових елемената је исказано принципом суперпозиције: одзив на побуду која се може представити као алгебарски збир неких сигнала једнак је алгебарском збиру одзива посматраног елемента (кола, система) на побуду појединачним сигнаlima.

Формално, математички, елемент са једним приступом се може посматрати као елемент са два приступа типа улаз-излаз, ако се, на пример, усвоји да напон представља улазни сигнал (побуду), а струја излазни сигнал (одзив).

2.3.2 ЛИНЕАРНИ МОДЕЛИ ЕЛЕМЕНАТА СА ДВА ПРИСТУПА

У анализи електронских кола се користе различити математички модели линеарних елемената са више приступа. Један од могућих начина представљања елемента је приказивање зависности напона између крајева сваког од приступа, од вредности струја у свим приступима:

$$\begin{aligned} u_I &= F_1(i_I, i_O); \\ u_O &= F_2(i_I, i_O). \end{aligned} \quad (2.39)$$

При анализи понашања нелинеарних система користе се методе линеаризације: посматрају се мале промене напона и струје у околини изабране радне тачке³². Применом Тајлорове формуле, нелинеарне карактеристике елемената се приближно представљају (апроксимирају) полиномима, чији ред представља компромис захтева у погледу тачности, ширине радног опсега и једноставности поступка анализе. Уместо вредности карактеристичних величина анализирају се односи који постоје између њихових (малих) промена. Математички модел елемента са два приступа

³² Тачка на карактеристици која представља стање елемента при одређеној сталној вредности улазних величина.

(2.39) се може са жељеном тачношћу, у довољно малој околини мирне радне тачке³³, представити линеарним моделом:

$$\Delta u_1 = \frac{\partial F_1}{\partial i_1} \Delta i_1 + \frac{\partial F_1}{\partial i_o} \Delta i_o, \quad (2.40)$$

$$\Delta u_o = \frac{\partial F_2}{\partial i_1} \Delta i_1 + \frac{\partial F_2}{\partial i_o} \Delta i_o$$

Сменом:

$$\Delta u_1 \rightarrow u_i; \Delta u_o \rightarrow u_o; \Delta i_1 \rightarrow i_i; \Delta i_o \rightarrow i_o \quad (2.41)$$

математички модел линеаризованог елемента са два приступа добија облик (*r* - *систем једначина*):

$$u_i = r_i i_i + r_r i_o, \quad (2.42)$$

$$u_o = r_f i_i + r_o i_o,$$

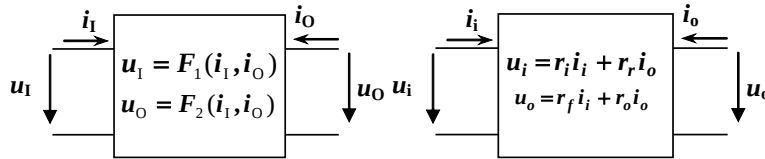
при чему су *r*-параметри дефинисани изразима:

$$r_i = \left. \frac{\partial F_1}{\partial i_1} \right|_{i_o = \text{const}} = \left. \frac{u_i}{i_i} \right|_{i_o = 0}. \quad (2.43)$$

$$r_r = \left. \frac{\partial F_1}{\partial i_o} \right|_{i_1 = \text{const}} = \left. \frac{u_i}{i_o} \right|_{i_i = 0}. \quad (2.44)$$

$$r_f = \left. \frac{\partial F_2}{\partial i_1} \right|_{i_o = \text{const}} = \left. \frac{u_o}{i_i} \right|_{i_o = 0}. \quad (2.45)$$

$$r_o = \left. \frac{\partial F_2}{\partial i_o} \right|_{i_1 = \text{const}} = \left. \frac{u_o}{i_o} \right|_{i_i = 0}. \quad (2.46)$$



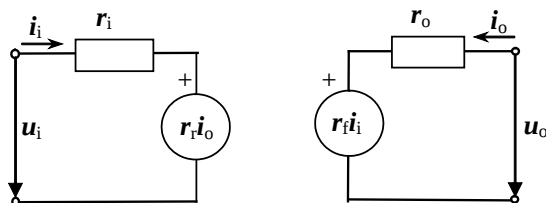
Слика 2.27. Линеаризација елемента са два приступа

Линеаризација модела (слика 2.27) важи само за мале промене напона и струје у околини мирне радне тачке. Управо ове промене представљају сигнал који треба појачати, обрадити односно проследити. Каже се да овакав модел важи за "мале сигнале". Математички модел линеаризованог елемента са два приступа (2.42) се може представити у матричном облику:

$$U = R \cdot I, \quad U = \begin{bmatrix} u_i \\ u_o \end{bmatrix}, \quad I = \begin{bmatrix} i_i \\ i_o \end{bmatrix}, \quad R = \begin{bmatrix} r_i & r_r \\ r_f & r_o \end{bmatrix}. \quad (2.47)$$

³³ Тачка на карактеристици која представља услове када нема улазног сигнала (*quiescent point* Q).

Еквивалентно коло које одговара оваком моделу је приказано на слици 2.28. У улазном (управљачком) колу на које се прикључује извор напона u_i , односно струје i_i , налазе се отпорност r_i и струјно контролисани извор напона $r_f i_o$. У излазном (радном) колу на које се прикључује потрошач, налази се отпорност r_o и струјно контролисани извор напона $r_f i_i$.



Слика 2.28. Еквивалентно коло елемента са два приступа – r модел

Вредности појединих параметара одређују се на основу једначина 2.42 при услову да је други члан израза са десне стране знака једнакости једнак нули. На пример, r_i је улазна отпорност при отвореним излазним крајевима ($i_o = 0$), r_o је излазна отпорност при отвореним улазним крајевима ($i_i = 0$).

У анализи електронских кола се користе различити математички модели елемената са више приступа. Широку примену има **g -систем једначина**, чији параметри имају димензију проводности:

$$\begin{bmatrix} i_i \\ i_o \end{bmatrix} = g \cdot \begin{bmatrix} u_i \\ u_o \end{bmatrix}; \quad g = \begin{bmatrix} g_i & g_r \\ g_f & g_o \end{bmatrix}. \quad (2.48)$$

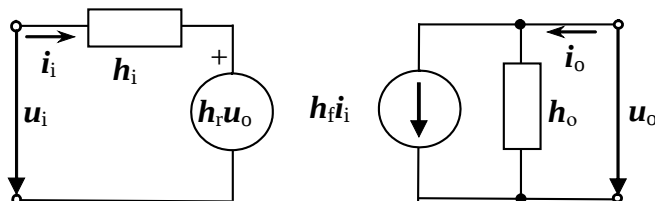
У електроници се често примењује **h -систем једначина**:

$$\begin{aligned} u_i &= h_i i_i + h_r u_o, \\ i_o &= h_f i_i + h_o u_o, \end{aligned} \quad (2.49)$$

односно, у матричном облику:

$$\begin{bmatrix} u_i \\ i_o \end{bmatrix} = H \cdot \begin{bmatrix} i_i \\ u_o \end{bmatrix}; \quad H = \begin{bmatrix} h_i & h_r \\ h_f & h_o \end{bmatrix}. \quad (2.50)$$

За разлику од r -параметара, који сви имају димензију отпорности, h -параметри имају различиту физичку природу, од чега потиче њихов назив (хибридни параметри). Према дефиниционим једначинама 2.46, h_r и h_f су бездимензионе величине, h_i има димензију отпорности, а h_o представља проводност (слика 2.29).



Слика 2.29. Хибридно еквивалентно коло елемента са два приступа – h модел

Параметар h_f се назива појачање струје при краткоспојеним излазним крајевима.

$$h_f = \left. \frac{i_o}{i_i} \right|_{i_o=0} . \quad (2.51)$$

Параметар h_i представља улазну отпорност при краткоспојеним излазним крајевима:

$$r_{is} = \left. \frac{u_i}{i_i} \right|_{i_o=0} = h_i . \quad (2.52)$$

Параметар h_o представља излазну проводност при отвореним улазним крајевима:

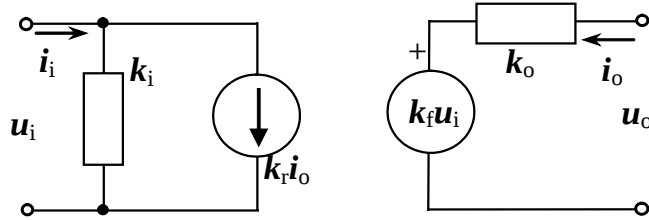
$$r_{oo} = \left. \frac{u_o}{i_o} \right|_{i_i=0} = \frac{1}{h_o} . \quad (2.53)$$

Параметар h_r описује повратно дејство излаза на улаз.

За описивање појачавача напона користи се **k-систем једначина**:

$$\begin{bmatrix} i_i \\ u_o \end{bmatrix} = k \cdot \begin{bmatrix} u_i \\ i_o \end{bmatrix}, \quad k = \begin{bmatrix} k_i & k_r \\ k_f & k_o \end{bmatrix} = h^{-1} . \quad (2.54)$$

којима одговара еквивалентно коло приказано на слици 2.30.



Слика 2.30. Хибридно еквивалентно коло елемента са два приступа – k модел

Параметар k_f се назива појачање напона при отвореним излазним крајевима.

$$k_f = \left. \frac{u_o}{u_i} \right|_{i_o=0_f} . \quad (2.55)$$

Параметар k_i представља улазну проводност при отвореним излазним крајевима:

$$g_{io} = \left. \frac{u_i}{i_i} \right|_{i_o=0} = k_i , \quad (2.56)$$

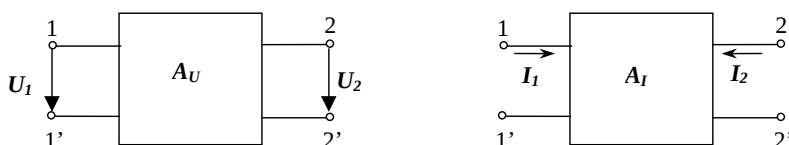
док параметар k_o представља излазну отпорност при отвореним улазним крајевима:

$$r_{oo} = \left. \frac{u_o}{i_o} \right|_{i_i=0} = k_o . \quad (2.57)$$

2.3.3 ПОЈАЧАВАЧИ

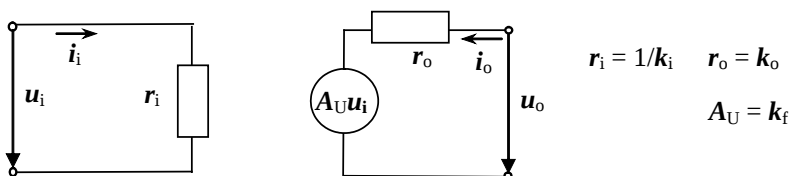
Елемент са два приступа је **појачавач**³⁴ ако узима снагу из спољашњег извора, другачијег од извора (генератора) улазног сигнала, и производи излазни сигнал који представља “слику” улаза.

Уобичајено је да се под називом “**појачавач напона**” подразумева активни елемент који на свом излазу даје напон U_2 чија је вредност већа од вредности улазног напона U_1 . Појачавач напона (*voltage amplifier*) може да се посматра као извор напона управљан напоном (*voltage controlled voltage source* - VCVS).



Слика 2.31. Појачавач напона и појачавач струје

На слици 2.32 је приказано еквивалентно коло које се најчешће користи као основни модел појачавача напона при анализи сложених електронских структура, када се повратно дејство излаза на улаз, које се описује параметром k_r , може занемарити. На аналоган начин се представља и еквивалентно коло појачавача струје.



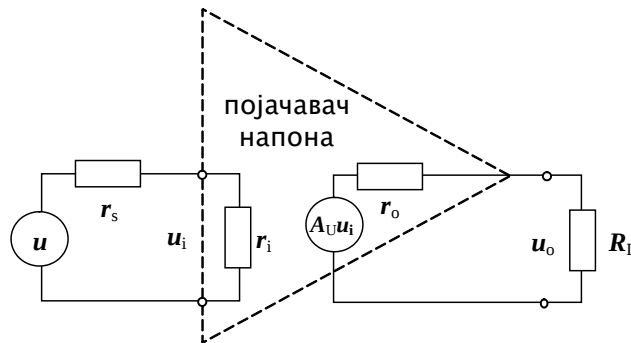
Слика 2.32. Еквивалентно коло појачавача напона

Улазна и излазна отпорност представљају веома значајне параметре појачавача напона. Њихово се дејство одражава, зависно од вредности унутрашње отпорности извора сигнала, r_s , и отпорности оптерећења (односно улазне отпорности следећег кола у ланцу обраде сигнала), R_L , на вредност укупног појачања напона, G_U (слика 2.33).

$$G_U = \frac{u_o}{u} = \frac{u_o}{u_i} \frac{u_i}{u} = A_U \frac{r_i}{r_s + r_i} \frac{R_L}{r_o + R_L}. \quad (2.58)$$

Да би овај утицај био што је могуће мањи, пожељно је да улазна отпорност r_i самог појачавача напона буде што је могуће већа, а излазна отпорност r_o што је могуће мања.

³⁴ Појачавач (*amplifier*, *Verstärker*, *усилитељ*), у најопштијем смислу, је активни елемент (компонента, уређај) који појачава вредност неке величине помоћу енергије узете из спољашњег извора. У анализи електричних кола, савршени појачавач се дефинише као активни елемент са два приступа чија је излазна снага већа од улазне снаге, и за који је однос вредности напона или струја на излазу и улазу сталан.

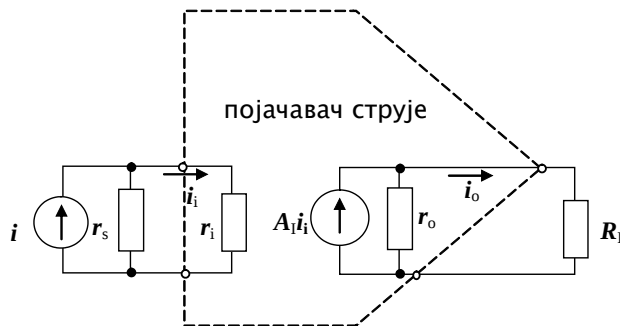


Слика 2.33. Утицај улазне и излазне отпорности на појачање напона

Појачавач струје је елемент који на свом излазу даје струју i_o сразмерну улазној струји i_i , али по интензитету већу од ње. У најопштијем смислу, појачавач струје (*current amplifier*) се може посматрати као извор струје управљан струјом (*current controlled current source - CCCS*).

Као и код појачавача напона, улазна и излазна отпорност појачавача струје утичу, зависно од вредности унутрашње отпорности извора сигнала, и отпорности оптерећења на вредност укупног појачања струје, G_I (слика 2.34):

$$G_I = \frac{i_o}{i} = \frac{i_o}{i_i} \frac{i_i}{i} = A_I \frac{r_i}{r_s + r_i} \frac{R_L}{r_o + R_L}. \quad (2.59)$$



Слика 2.34. Утицај улазне и излазне отпорности на појачање струје

Да би овај утицај био што је могуће мањи, пожељно је да улазна отпорност r_i самог појачавача струје буде што је могуће мања, а излазна отпорност r_o што је могуће већа.

Константа преноса појачавача³⁵ напона, A_U , односно струје, A_I , у општем случају може бити већа, мања³⁶ или једнака³⁷ један, позитивна или

³⁵ Појачање (*amplification, gain, Verstärkung, усиление*).

³⁶ Уобичајено је да се за елементе (кола) код којих је излазна величина мања од улазне користе посебни називи као што су: ослабљивач (атенуатор), редуктор, делитељ напона, разделник струје.

³⁷ У стручној литератури користе се и посебни називи: јединични појачавач (*unity gain amplifier*), пратећи појачавач (*follower*).

негативна³⁸. Улога појачавача може бити да повећа интензитет сигнала или да раздвоји извора сигнала од пријемника (потрошача) који представља велико оптерећење. Уобичајено је да се овакав појачавач назива “појачавач снаге” (*power amplifier*), иако у суштини обезбеђује пресликавање улазног на излазни напон, а однос излазне и улазне снаге зависи и од отпорности (импедансе) оптерећења.

Транскондуктансни појачавач је активни елемент са два приступа код којег је излазна струја i_o сразмерна вредности u_i улазног напона (слика 2.35.а):

$$i_o = A_G \cdot u_i. \quad (2.60)$$

Може се посматрати као звор струје управљан напонам (*voltage controlled current source* - VCCS). Константа преноса A_G има димензију електричне проводности. Ова “привидна” проводност се у литератури назива **проводност преноса**³⁹ и означава са G_m или g_m .



Слика 2.35. Транскондуктансни и трансрезистансни појачавач

Трансрезистансни појачавач је елемент са два приступа код којег је излазни напон u_o сразмеран вредности i_i улазне струје (слика 2.35.б):

$$u_o = A_R \cdot i_i. \quad (2.61)$$

Може се посматрати као звор напона управљан струјом (*current controlled voltage source* - CCVS). Константа преноса A_R има димензију електричне отпорности. Ова “привидна” отпорност се у литератури назива **отпорност преноса**⁴⁰ и означава са R_m или r_m .

2.3.4 НЕЛИНЕАРНИ ЕЛЕМЕНТИ

Зависност између излазне и улазне величине може бити нелинеарна. При обради сигнала користе се елементи чија се карактеристика преноса описује, на пример, квадратном функцијом:

$$u_o(t) = \frac{u_i^2(t)}{U_{REF}}. \quad (2.62)$$

где је U_{REF} константа која има димензију напона, или логаритамском функцијом (логаритамски појачавач):

$$u_o(t) = U_{REF} \ln \frac{u(t)}{U_K}. \quad (2.63)$$

³⁸ Инвертујући појачавач, инвертор (*inverter*).

³⁹ Привидна (*mutual*) транскондуктанса (*transconductance*).

⁴⁰ Привидна (*mutual*) трансрезистанса (*transresistance*).

U_{REF} и U_K су константе која има димензију напона.

У ову групу спадају и ограничавачи, који “не дозвољавају” да вредност сигнала буде изван задатих граница (слика 2.36.а):

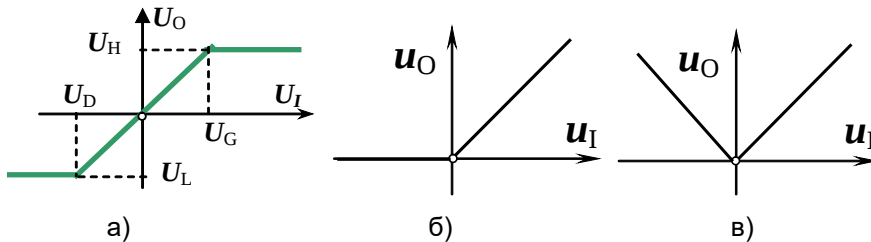
$$u_O = \begin{cases} U_H; u_I \geq U_G \\ ku_I; U_D < u_I < U_G \\ U_L; u_I \leq U_D \end{cases} \quad (2.64)$$

као и усмерачи, који на излаз прослеђују само сигнал одређеног поларитета (слика 2.36.б):

$$u(t) = \begin{cases} u_I(t); u_I(t) \geq 0 \\ 0; u_I(t) < 0 \end{cases} \quad (2.65)$$

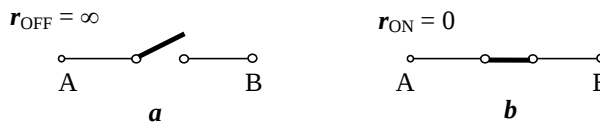
или (слика 2.36.в)

$$u(t) = |u_I(t)|. \quad (2.66)$$



Слика 2.36. Нелинеарни елементи

У нелинеарне електронске елементе се могу сврстати и прекидачи помоћу којих се мења структура неке електричне мреже, начин рада, односно стање одређеног кола. Савршени електрични прекидач (*switch*) је елемент чија отпорност између улазних прикључака може да буде једнака нули или бесконачна.

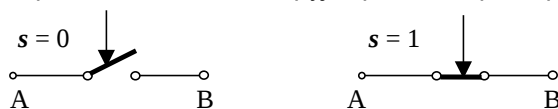


Слика 2.37. Електрични прекидач

Диодни прекидачки елементи су елементи са два прикључка (једним приступом). Такав прекидач се укључује када напон између прикључака отвореног прекидача достигне граничну вредност при којој започиње кумулативан процес који елемент преводи у проводно стање којем одговара мала унутрашња отпорност. Прекидач се искључује када струја кроз њега опадне испод вредности при којој се проводно стање одржава.

Многоструко ширу примену имају прекидачи код којих је стање укључен/искључен одређено вредношћу бинарне управљачке променљиве s (слика 2.38). Трополни појачавачки елементи представљају електронске прекидаче, ако је деловање управљачког сигнала такво да радну тачку

елемента “држи” у одређеној области U - I равни, независно од напона између крајева отвореног прекидача односно струје кроз затворен прекидач.

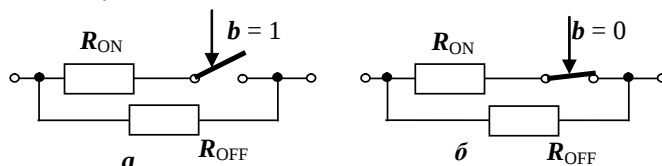


Слика 2.38. Аналогни прекидач

Када је прекидач искључен (*off*), струјно коло је прекинуто (отворено, *open*). Струја у грани кола у којем се прекидач налази једнака је нули, а напон U_{AB} између крајева А и В прекидача има вредност одређену стањем кола у којем се прекидач налази. Када је прекидач укључен (*on*) струјно коло је затворено, а напон између крајева прекидача је једнак нули.

$$R_{AB} = \begin{cases} 0; s = 1 \\ \infty; s = 0 \end{cases} \quad (2.67)$$

Унутрашња отпорност стварног прекидача је веома мала, реда величине ома, када је прекидач укључен, односно веома велика, већа од $M\Omega$, када је прекидач искључен. При анализи, електронски прекидач се може моделовати колом приказаним на слици 2.39.



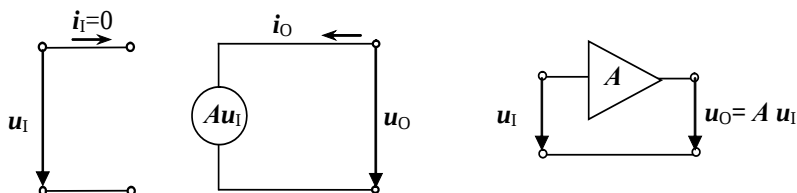
Слика 2.39. Еквивалентно коло електронског прекидача

2.3.5 САВРШЕНИ ЕЛЕМЕНТИ СА ДВА ПРИСТУПА

Својства стварних, сложених елемената и система се приказују помоћу еквивалентних кола образованих од савршених елемената.

Савршени појачавач напона је активни елемент са два приступа за који је однос вредности напона на излазу и улазу сталан:

$$u_O = A u_I ; i_I = 0 . \quad (2.68)$$



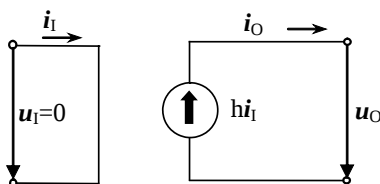
Слика 2.40. Савршени појачавач напона

Савршени појачавач напона може да се посматра као савршени извор напона управљан напоном. Улазна отпорност је бесконачно велика, а излазна отпорност једнака нули. Улазна струја је једнака нули (слика 2.40) без обзира на вредност улазног напона. Излазна струја одређена је вредношћу

отпорности (импедансе) оптерећења. Када су улазни крајеви краткоспојени, излазни напон је једнак нули. При побуди хармонијским сигналом, амплитуда и фаза излазног сигнала не зависе од учестаности. Пропусни опсег протеже се од нуле до бесконачности.

Савршени појачавач струје је активни елемент са два приступа за који је однос тренутних вредности струја на излазу и улазу сталан.

Савршени појачавач струје се може посматрати као савршени извор струје управљан струјом. Улазна отпорност је једнака нули, а излазна отпорност бесконачно велика. Улазни напон је једнак нули, без обзира на вредност побудне струје (слика 2.41). Када су улазни крајеви отворени, излазна струја је једнака нули. Гранична учестаност пропусног опсега је бесконачна.



Слика 2.41. Еквивалентно коло савршеног појачавача струје

Савршени ослабљивач (атенуатор) напона (струје) се дефинише као пасивна мрежа са два приступа код које је снага на излазу мања од снаге на улазу и за коју је однос тренутних вредности напона (струја) на излазу и улазу сталан.

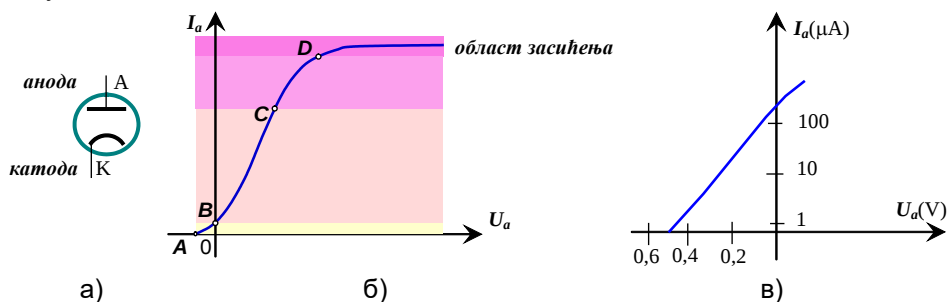
2.4 ЕЛЕКТРОНСКЕ ЦЕВИ

Електронске цеви су први електронски елементи. Савремене полупроводничке компоненте замениле су електронске цеви у највећем броју примена, али се многе специјализоване електронске цеви, развијене и усањене за војне потребе током другог светског рата и данас користе. Још увек постоје неке специјализоване функције у којима класична технологија има предност. Овде спадају емисиони уређаји екстремних снага, уређаји који се користе у микроталасној техници и сателитским комуникацијама на веома високим фреквенцијама (преко 1 GHz). Вакуумске цеви се још увек примењују у осцилоскопима, TV пријемницима и видео уређајима (рачунарски монитори), али се и ту, захваљујући унапређењу технологије “течних кристала”, дешавају значајне промене.

Код електронских цеви са вакуумом, за емисију електрона се употребљавају металне катодe. Да би се ослободили електрони потребно је привести одређену количину енергије. Побуђивање може да буде остварено загревањем (термоелектронска емисија), светлосним зрачењем (фотоелектрични ефект), бомбардовањем електронима из неког другог извора (секундарна емисија) или дејством јаког електричног поља. У термоелектронској емисији учествују слободни електрони који образују “електронски гас” у металу од којег је сачињена једна електрода. У

нормалним условима (на собној температури) они не располажу довољном енергијом да изађу кроз површину метала.

Најједноставнија електронска цев, диода, садржи само две електроде, аноду и катоду. Катода емитује електроне који се крећу према аноди уколико је ова на вишем потенцијалу од катоде. Графички симбол диоде приказан је на слици 2.42.а. Прикључак за катоду је означен словом **К**, а прикључак за аноду словом **А**.



Слика 2.42. Вакуумска диода

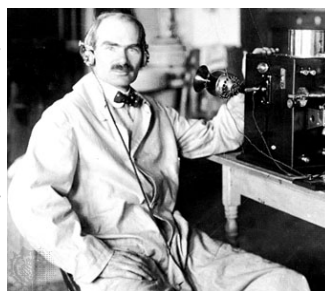
Емисија електрона, која је неопходна за протичање струје кроз цев, постиже се загревањем катоде. Густина емисионе струје катоде одређена је формулом Ричардсон -Дашман (*Richardson, Dushman*):

$$J = aT^2 e^{-\frac{b}{T}}; b = \frac{W_r}{k} = \frac{U_r}{U_T} T; U_T = \frac{T}{11600} (V) \quad (2.69)$$

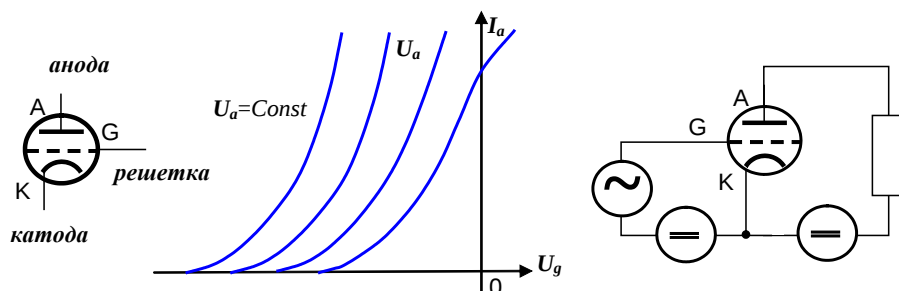
где је a константа, чија вредност зависи од врсте материјала [8], T је апсолутна температура (K), а k Болцманова константа ($k=1,379 \cdot 10^{23}$ Ws/K). Електрони у цеви могу да се крећу само од катоде ка аноди, па струја може да тече само у једном смеру, од аноде ка катоде. На слици 2.42.б је графички приказана зависност струје I_a кроз диоду од разлике потенцијала аноде и катоде (напона U_a).



Прву вакуумску електронску цев са три електроде је 1906. године конструисао американац Ли де Форест (*Lee de Forest, 1873-1961*) Његов проналазак (*audion*) је омогућио појачање радио сигнала, ширење и процват радиотехнике.



Појачање сигнала омогућује електронска цев са три електроде: триода (слика 2.43). Помоћу електроде од танке жице у облику решетке (G - *gate*) контролише се "проток" електрона. С обзиром да се налази у непосредној близини катоде, утицај решетке на промене анодне струје знатно је већи од утицаја анодног напона. Малим променама напона решетке могу се изазвати велике промене струје између аноде и катоде у чему је основ примене триоде за појачање слабих наизменичних напона.



Слика 2.43. Симбол и карактеристика преноса триоде

Зависност анодне струје I_a од напона U_{ak} и U_{gk} је врло нелинеарна

$$I = aS(U_g + DU_a)^{\frac{3}{2}}; U_g < 0 \quad (2.70)$$

па се електронска цев може употребити као линеарни појачаваач сигнала који доводе до малих промена напона решетке, када се радна тачка само мало помера у околини изабране мирне радне тачке (појачаваач за мале сигнале) ⁴¹.

2.5 ПОЛУПРОВОДНИЧКИ ЕЛЕМЕНТИ

Елементи чији је принцип рада заснован на кретању слободних носилаца наелектрисања у полупроводнику заузимају посебно место у савременој електроници. Пресудан утицај на развој читаве ове области имали су елементи засновани на спојевима полупроводника који садрже примесе атома различитог типа и концентрација.

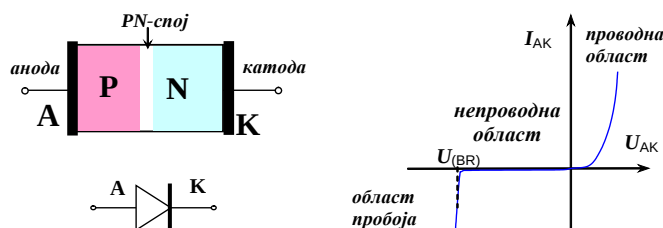
Физички, PN-спој је јединствено тело (кристал) које у једном делу запремине претежно садржи примесе тровалентних атома (акцептора), а у другом примесе петовалентних атома (донора). Проводност PN-споја зависи од смера прикљученог напона. При директној поларизацији, када је потенцијал прикључка (електроде) који се налази на страни P-споја (анода) виши у односу на потенцијал прикључка на страни N-споја (катода), отпорност је мала. При инверзној поларизацији, када је катода на вишем потенцијалу у односу на аноду, отпорност је веома велика. Однос отпорности PN-споја при инверзној и директној поларизацији већа је од 10^6 .

Основни полупроводнички електронски елементи су диоде, транзистори и тиристори. Њиховом применом остварује се појачање, генерисање и обрада електричних сигнала у великом броју уређаја разноврсне намене. С циљем добијања начелног, уводног сагледавања материје која се обрађује у оквирима књиге, на овом месту су описана најопштија обележја основних полупроводничких елемената, чија се својства детаљније разматрају у поглављима која следе.

⁴¹ Детаљан опис електронских кола заснованих на електронским цевима је дат у "класичном" уџбенику електронике на нашем језику: В.Раковић, *Elektronika 1*, Научна књига, 1963

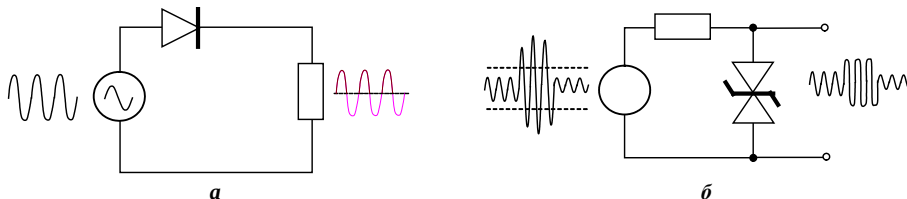
2.5.1 ДИОДЕ

Елемент који садржи један PN-спој са по једним прикључком за повезивање у свакој области кристала (слика 2.44.а) представља основни облик полупроводничке диоде. U - I карактеристика диоде је у основи карактеристика PN-споја (слика 2.44.б). У ширем смислу, полупроводничка диода је пасивни нелинеарни елемент са једним приступом који се одликује изразито нелинеарним односом између струје и напона, исказаним као несиметрична проводност за различите смерове струје. Може садржати, један, више, али и ниједан PN-спој.



Слика 2.44. Структура, графички приказ и карактеристика полупроводничке диоде са једним PN-спојем

Диода пропушта струју у смеру од прикључка који назива се **анода** (област полупроводника P-типа код полупроводничке диоде са једним спојем) ка прикључку који се назива **катода** (полупроводник N-типа). Ова особина користи се за напајање електронских кола једносмерном струјом из извора наизменичног напона (слика 2.45.а), за прекидање (укључивање и искључивање) и уобличавање електричних сигнала. Рад у области пробоја (Ценер-диоде) се користи за уобличавање, ограничавање (слика 2.45.б), као и за израду извора стабилног једносмерног напона (диоде за стабилизацију и диоде референтног напона).

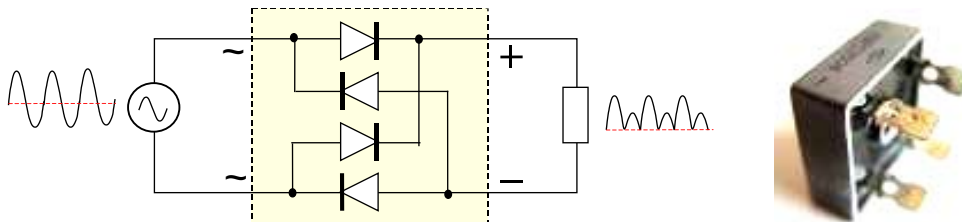


Слика 2.45. Диода као усмерач и ограничавач сигнала

Са повећањем концентрација примеса напон пробоја тунелским ефектом се смањује. Код врло великих концентрација постаје једнак нули, при чему се мења и облик карактеристике у пропусној области рада диоде, појавом подручја са негативном динамичком отпорношћу. Полупроводничке диоде ове врсте се називају тунел-диоде. Примењују се у појачавачима и осцилаторима.

Спој метал-полупроводник испољава усмерачко својство као и PN-спој. Елемент образован на тај начин (Шотки-диоде) има боља динамичка својства (већу брзину одзива) од диода са PN-спојем.

Посебна категорија диодних елемената су сложени елементи образовани од више диода, као што је на пример диодни мост, приказан на слици 2.46, који представља елемент са два приступа чијом применом се остварује двострано усмеравање наизменичних сигнала.



Слика 2.46. Диодни мост

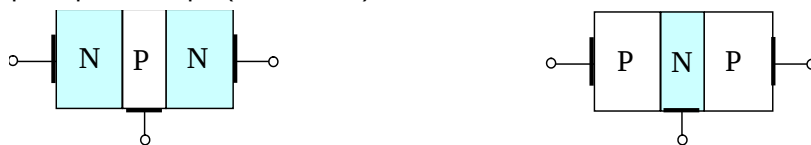
2.5.2 ТРАНЗИСТОРИ

Под транзистором се у ужем смислу подразумева полупроводнички елемент са три прикључка (полупроводничка триода, кристална триода). Посредством трећег прикључка остварује се контролисање процеса провођења струје између друга два краја⁴². Примењују се као појачавачи електричних сигнала или као прекидачи. Уобичајена подела транзистора према конструкцији и начину рада је на две основне групе:

- биполарни транзистори,
- униполарни транзистори.

2.5.2.1. БИПОЛАРНИ ТРАНЗИСТОРИ

Код биполарних транзистора у процесу провођења суделују носиоци наелектрисања оба поларитета (електрони и шупљине), одакле потиче и њихов назив⁴³. Према саставу, односно према врсти полупроводника у средишњем подручју, које се назива **база**⁴⁴, разликују се PNP и NPN биполарни транзистори (слика 2.47).



Слика 2.47. Биполарни транзистори

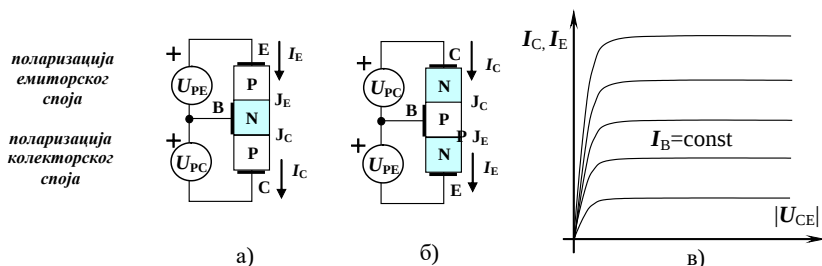
При различитој поларизацији PN-спојева (слика 2.48.а), између спољашњих електрода протиче струја коју образују слободни носиоци

⁴² У ширем смислу, транзистор може да има више прикључака.

⁴³ Потпун назив указује и на структуру појачавачког елемента који садржи PN-спој: биполарни спојни транзистор (*bipolar junction transistor-BJT*).

⁴⁴ Од грч. *basis*, основа, подлога.

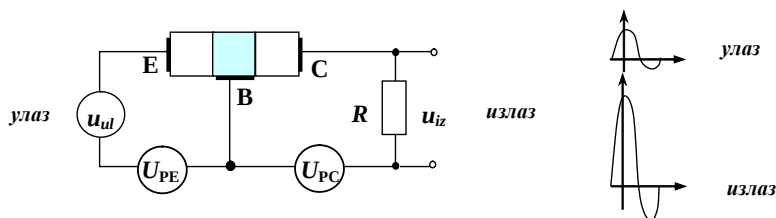
наелектрисања који се емитују из спољашње области која припада директно поларисаном PN-споју, пролазе кроз подручје базе и сакупљају у спољашњој области која припада инверзно поларисаном PN-споју. PN-спој транзистора који је, помоћу извора U_{PE} , поларисан у пропусном смеру назива се емиторским⁴⁵ спојем, а спољно подручје, које са базом образује емиторски спој, назива се **емитор**. PN-спој транзистора који је, помоћу извора U_{PC} , поларисан у непропусном смеру назива се колекторски спој⁴⁶, а одговарајуће спољно подручје, у коме се сакупљају слободни носиоци наелектрисања који су из емитора доспели у базу, **колектор**.



Слика 2.48. Карактеристика биполарних транзистора

У условима различите поларизације спојева, интензитет струје кроз спољашње електроде сразмеран је интензитету струје која протиче кроз электроду средишње области (слика 2.48.в) што омогућује појачавачко својство транзистора: мале промене струје базе проузрокују велике промене струје колектора. Ако се напон између базе и емитора мења, мењаће се потенцијална препрека директно поларисаног PN-споја, а тиме и струја емитора односно колектора. Колекторска струја не зависи од колекторског напона. Отпорност инверзно поларисаног споја база-колектор (J_C) је веома велика, посматран са стране колектора транзистор се понаша као извор струје.

Ако се на ред са колектором постави отпорник велике отпорности (слика 2.49), одговарајуће промене напона на њему (које настају услед промене струје колектора) много су веће од промена напона емитор - база којим се транзистор побуђује. Тиме се постиже појачање сигнала.



Слика 2.49. Биполарни транзистор као појачавач напона

⁴⁵ Од лат. *emissio*, одавање, испуштање.

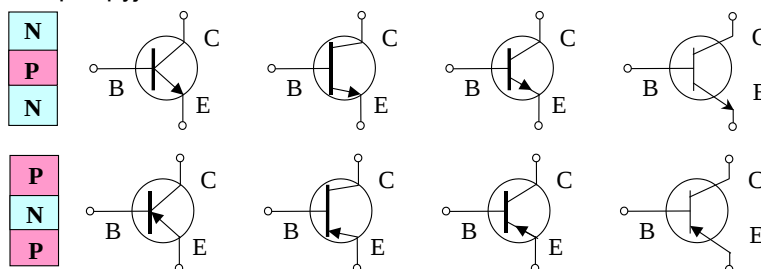
⁴⁶ Од лат. *collector*, сакупљач, сабирач.



Након десетогодишњег безуспешног експериментисања, истраживачи Белових лабораторија (*Bell Laboratories*) су развили полупроводнички појачавачки елемент - кристалну триоду (1947). Експериментална истраживања су обавили Бардин (*J.Bardeen*) и Бретен (*W.H.Brattain*). Темеље физичке електронике поставио је Шокли (*W.Shockley*), објаснивши појачавачко својство процесима који се одвијају у самој унутрашњости кристала. Назив транзистор је настао, на предлог Џона Пирса (*J.R. Pierce*, 1910-2002), сажимањем речи на енглеском језику: *TRANSfer-resISTOR*.

За истраживање полупроводника и откриће транзисторског ефекта Бардин, Бретен и Шокли су добили Нобелову награду 1956. године.

Биполарни транзистори имају најширу примену у савременој електроници. Користе се као линеарни и нелинеарни појачавачи сигнала у аналогним електронским колима, у осцилаторима, као и у брзим дигиталним и прекидачким колима. Графички симболи који се користе за представљање NPN и PNP транзистора су приказани на слици 2.50. Стрелица показује физички смер струје⁴⁷.



Слика 2.50. Графички симболи биполарних транзистора

2.5.2.2. УНИПОЛАРНИ ТРАНЗИСТОРИ

Код униполарних транзистора у нормалном процесу провођења електричне струје учествују носиоци слободног наелектрисања само једног поларитета (електрони или шупљине). Постоје две врсте униполарних транзистора:

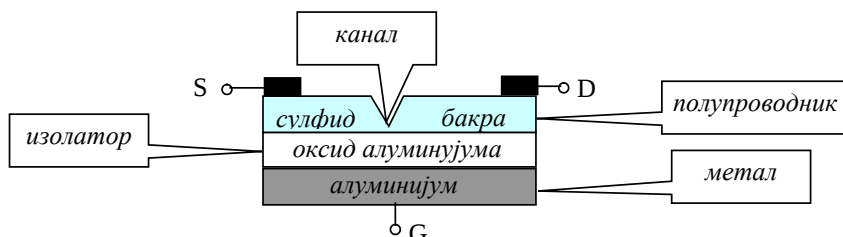
- ▽ **транзистори са ефектом поља, и**
- ▽ **једноспојни транзистори.**

У транзисторима са ефектом поља (*field-effect transistors*, *Feldefekt-Transistoren*, *полевие транзистори*) протицање електричне струје контролише се помоћу електричног поља. Појаву је открио још 1925. године немачки физичар Лилиенфелд који је своје откриће патентирао⁴⁸ описујући апарат и метод који омогућује контролу електричне струје (слика 2.51) [9]. Управљачка електрода, G, је танким слојем изолационог материјала (оксид алимунујума) одвојена од полупроводничке плочице (сулфид бабра). када се управљачка електрода G прикључи на напон долази до повећања концентрације слободних носиоци наелектрисања у делу полупроводника који

⁴⁷ Графички симбол транзистора не мора да садржи кружић.

⁴⁸ Развој полупроводничке електронике је започео у Европи. После Лилиенфелда (*Julius Edgar Lilienfeld*, 1881-1963) и други немачки физичар Хајл (*Oskar Heil*) је патентирао решење транзистора са ефектом поља (1934). Њихова примена је омогућена знатно касније, када су остварени услови за комерцијалну производњу.

се налази наспрам управљачке електроде, што доводи до повећања електричне проводности између доводне, S, и одводне електроде, D. Ове електроде означавају се као **сорс**⁴⁹ и **дрејн**⁵⁰, а управљачка електрода као **ејт**⁵¹. Да би се остварила велика промена проводности потребно је да полупроводнички слој буде веома танак⁵².



Слика 2.51. Принцип контроле проводности полупроводника електричним пољем

Према саставу, односно према типу полупроводника у средишњем подручју, које се назива **канал** (*channel, Kanal*), разликују се N- и P-канални транзистори. Рад транзистора са ефектом поља може бити заснован на структури PN-споја (спојни транзистор са ефектом поља, *Junction Field-Effect Transistor* - **JFET**) или на структури изолованог гејта који је слојем изолатора одвојен од канала (*insulated gate fieleffect transistor* - **IGFET**). На слици 2.52 су приказани основни типови транзистора са ефектом поља, као и њихови графички симболи.

Код транзистора са PN-спојем, променом напона поларизације мења се ширина области⁵³ у којој су некомпензована наелектрисања донорских, односно акцепторских јона. Тиме се мења ефективни попречни пресек, а услед тога и проводност канала. Струју образују само главни носиоци наелектрисања у материјалу канала - електрони у N-каналном, односно шупљине у P-каналном транзистору.

Код транзистора са изолованим гејтом, проводност се мења променом концентрације слободних носилаца наелектрисања под дејством електричног поља у кондензатору који образују метална електрода гејта и полупроводник у коме се формира канал са слојем диоксида као диелектриком. Према конструкцији разликују се две групе:

⁴⁹ Извор из којег истичу слободни носиоци наелектрисања (*source, Zuleitungselektrode - Quelle, изток*).

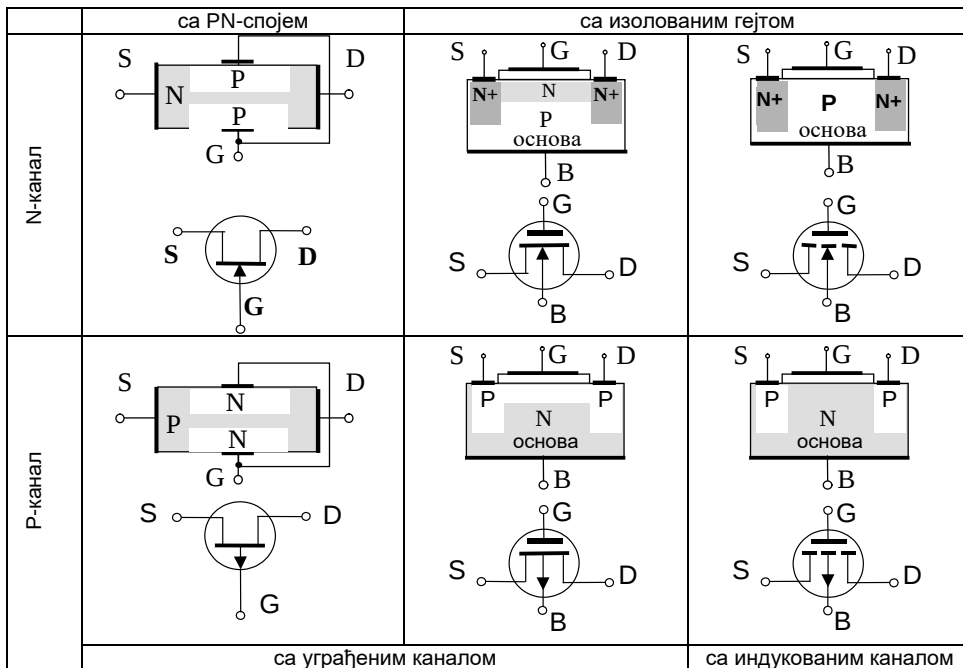
⁵⁰ Понор, одвод у који утичу слободни носиоци наелектрисања (*drain, Ableitungselektrode* -*Senke, сток*).

⁵¹ Капија (gate, *Steuerelektrode - Gitter*, замвор).

⁵² Теоријске основе за израду “униполарног аналогног транзистора” чији је начин рада био сличан раду електронске цеви, дао је Шокли 1952. године. Већ 1953. године извршени су први експерименти, а аналитичку разраду проблема дали су Дис и Рос 1955. године. Први комерцијални транзистори са ефектом поља били су од германијума. Усавршавање технологије омогућило је производњу силицијумских униполарних транзистора са бољим карактеристикама.

⁵³ Испразњена област, осиромашена у погледу концентрације слободних носилаца наелектрисања (*depletion layer*).

- ♦ **транзистори са уграђеним каналом** (самопроводни), код којих проводни канал постоји, па струја може кроз њега да тече и када је напон између управљачке електроде и канала једнак нули⁵⁴,
- ♦ **транзистори са индукованим каналом** (самонепропусни), код којих је могуће протицање струје између дрејна и сорса тек након довођења напона одговарајућег поларитета на управљачку электроду кола чиме се подстиче успостављање канала.



Слика 2.52. Транзистори са ефектом поља

У првом случају принцип рада транзистора заснован је на промени ширине осиромашене области PN-споја (*depletion mode*), чиме се мења геометрија, а тиме и проводност канала. У другом случају, деловањем електричног поља се успоставља (подстиче, уводи) проводни канал у одређеној области (*enhancement mode*)

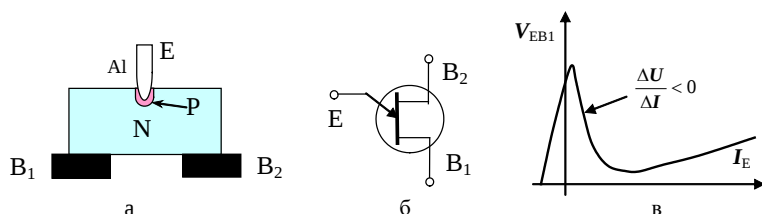
Транзистори са ефектом поља имају веома широку примену у аналогним, прекидачким и дигиталним електронским колима.

Једноспојни транзистор је елемент са три прикључка који има само један PN-спој (*unijunction transistor - UJT*), а карактеристика овог елемента се значајно разликује од карактеристике конвенционалног транзистора⁵⁵. Слика 2.53.а приказује структуру једноспојног транзистора и његов графички симбол. PN-спој се образује легирањем алуминијумског проводника са плочицом од полупроводника N-типа велике специфичне отпорности. На месту спајања образује се PN-спој. Основно обележје овог елемента је

⁵⁴ Спојни фет (*JFET*) се такође може сврстати у категорију самопроводних фетова.

⁵⁵ Првобитни назив овог елемента је био диода са две базе (*double-base diode*),

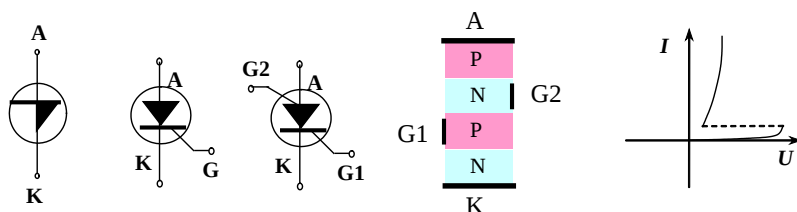
постојање подручја са негативном динамичком отпорности у статичкој I - U карактеристици (слика 2.53.в). Једноспојни транзистори имају релативно уско, специфично подручје примене у осцилаторним и прекидачким колима.



Слика 2.53. Једноспојни униполарни транзистор

2.5.3 ТИРИСТОРИ

Тиристор је вишеспојни полупроводнички елемент који има само два стања - проводно (укључено, *on*), које карактерише веома мала унутрашња отпорност, и непроводно (искључено, *off*), у којем је унутрашња отпорност веома велика [10]. Може имати две, три или четири електроде (слика 2.54).



Слика 2.54. Тиристори

Основно обележје тиристора је постојање подручја, најмање у једном квадранту статичке U - I карактеристике, у коме је динамичка отпорност негативна⁵⁶. Примењују се у импулсној техници, као прекидачи. У непроводном стању прободни напон може бити веома велик, што омогућује примену тиристорских прекидача за управљање потрошачима велике снаге на високом напону.

2.5.4 ФОТОЕЛЕКТРИЧНИ И ОПТОЕЛЕКТРОНСКИ ЕЛЕМЕНТИ

Сваки полупроводнички елемент има особине фотоосетљивости уколико се омогући да светлост допре до полупроводника. Претварање светлосне енергије у електричну засновано је на фотоелектричном ефекту. Полупроводнички фотоосетљиви елементи без PN-споја представљају фотоотпорнике. Концентрација слободних носилаца наелектрисања у фотоотпорнику се повећава, а проводност расте, ако је обасјан светлошћу одговарајуће таласне дужине. Код елемената чије је деловање засновано на постојању PN-споја (диоде, транзистори и тиристори) услед деловања

⁵⁶ Назив потиче од речи тиратрон (*thyatron*), која означава електронску цев чија карактеристика садржи подручје са негативном динамичком отпорношћу.

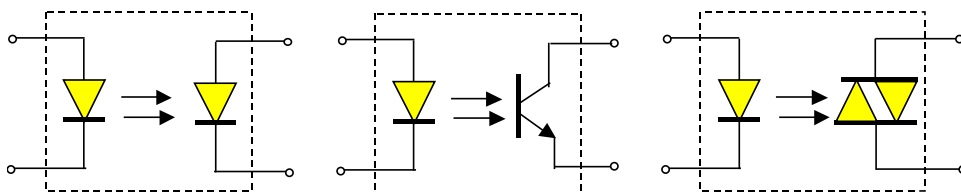
светлости настаје повећање инверзне струје PN-споја и промена висине потенцијалне препреке. Проводност инверзно поларисане диоде се може смањити излагањем светлости. Струја је приближно сразмерна осветљености. Фото-диода се одликује релативно малом осетљивошћу, али и веома кратким временом одзива. Фото-транзистор ради на истом принципу као и фото-диода али је, захваљујући ефекту појачања струје, осетљивост повећана у одговарајућој мери. Излагањем светлости може да се оствари промена стања тиристора из непроводног у проводно (фото-тиристор).

Као и биполарни транзистори, транзистори са ефектом поља су осетљиви на светлосно зрачење. Ово својство користи се у фотометрији [1], као и за израду оптоелектронских елемената који омогућују пренос сигнала са галванским раздвајањем улазних и излазних прикључака.

Полупроводнички елементи на бази фотоелектричног ефекта се користе као сензори (детектори) светлости, или као извори електричне енергије из (сунчеве) светлости. Фото-генератор је активни елемент који ствара електромоторну силу под утицајем светлости. I - U карактеристика неосветљеног полупроводничког генератора је у ствари диодна карактеристика. Електрони створени осветљавањем у прелазној и P-области прелазе, као мањински носиоци наелектрисања, кроз спој у N-област. На исти начин, шупљине створене у прелазној и N-области прелазе у P-област. Услед премештања слободних носилаца наелектрисања анода се наелектрише позитивно, а катода негативно. Струја која протиче кроз затворено коло сразмерна је светлосном флуксу.

При протицању струје кроз PN-спој, услед рекомбинације носилаца, може бити емитована светлост. Уобичајено је да се електронски елементи у којима се оптичке појаве производе апсорпцијом носилаца наелектрисања означавају термином "оптоелектронски" [11]. Оптоелектронски елементи претварају електричну енергију у светлосну. Фотоемитујуће диоде имају широку примену као елементи преко којих се остварује спрега електронских уређаја и човека као пријемника (корисника) информације⁵⁷. Примењују се и за даљински пренос података оптичким путем (*fiber optic data transmission*) као и за остваривање извора кохерентне светлости – полупроводничких ласера.

Посебну групу чине елементи са светлосном спрегом који представљају комбинацију фотоемитујуће диоде и фотоосетљивог елемента као што су диода, транзистор или тиристор (слика 2.55).



Слика 2.55. Елементи са светлосном спрегом

⁵⁷ Интерфејс човек-машина (*man-machine interface- MMI*)

2.6 ЛИТЕРАТУРА

- 1 Electric and magnetic circuits, Terms and definitions, IEC 50(131), Električna i magnetska kola, JUS N.A0.131, 1990, 01-11.
- 2 Реф. 1, 01-33.
- 3 Реф. 1, 01-34.
- 4 Реф. 1, 02-02.
- 5 В. Reljin, *Teorija električnih kola 1*, rešavanje kola u vremenskom domenu, Nauka, 1992, стр 3.
- 6 Реф. 1, 01-36.
- 7 Реф. 5, стр. 70.
- 8 В.Ракović, *Elektronika 1*, Naučna knjiga, 1963
- 9 G. Klein, J.J. Zaalberg van Zeist, *Präzisions Elektronik*, Philips , 1972.
- 10 J. Millman, H. Taub, *Pulse digital and switching waveforms*, Mc Graw-Hill, 1965.
- 11 Electromagnetism, Terms and definitions, IEC 50(121), Elektromagnetika, JUS N.A0.121, 1990, 02-62.

ПИТАЊА

1. Шта је елемент електронског уређаја? Шта је савршени (идеални) елемент?
2. Која су својства:
 - а) пасивних електронских елемената,
 - б) активних електронских елемената?
3. Која су својства савршене диоде? Нацртати $U-I$ карактеристику савршене диоде.
4. Која су својства савршених извора напона и струје? Нацртати еквивалентно коло независног извора напона (струје).
5. Која су основна својства униполарних, а која биполарних транзистора?
6. Шта је оптоелектронски елемент и где се примењује?
7. Нацртати хибридно еквивалентно коло елемента са два приступа и написати једначине које представљају одговарајући математички модел.
8. Написати опште изразе којима су дефинисани појачање напона, појачање струје, улазна отпорност и излазна отпорност појачавача.
9. Шта је негативна динамичка отпорност? Који електронски елементи се одликују својством негативне динамичке отпорности?
10. Шта је транскондуктансни појачавач?
11. Нацртати еквивалентно коло појачавача напона и одредити утицај који на вредност појачања имају улазна и излазна отпорност појачавачког елемента.



Прве комерцијалне диоде

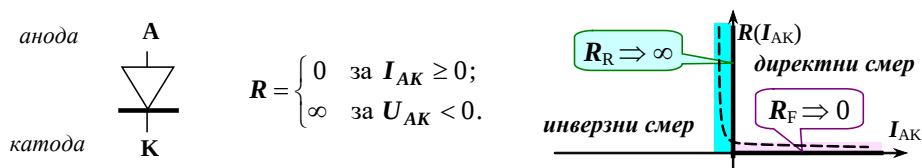
3. ДИОДЕ

Диода је најједноставнији полупроводнички елемент чије је подручје примене изванредно широко. Има само два прикључка (један приступ), а одликује се изразитом несиметријом U - I карактеристике. У овом поглављу описана је подела диодних елемената према начину рада и према намени. Разматрају се специфична својства различитих врста полупроводничких диода. Приказан је поступак анализе диодних кола применом линеаризованих модела.

3.1. КЛАСИФИКАЦИЈА

Савршена диода представља кратак спој за ток струје у смеру од прикључка P-области, који се назива анода (A), ка прикључку N-области, који се назива катода (K), а отворено коло (бесконечно велику отпорност) када је поларитет напона такав да је потенцијал катоде виши од потенцијала аноде:

$$\begin{aligned} U_{AK} &= 0 \quad \text{за } I_{AK} \geq 0; \\ I_{AK} &= 0 \quad \text{за } U_{AK} < 0. \end{aligned} \quad (3.1)$$



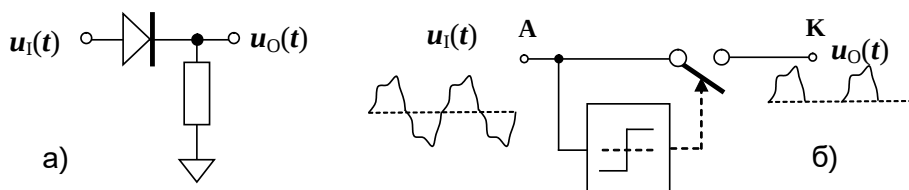
Слика 3.1. Савршена диода

Смер једносмерне струје у којем диода има најмању отпорност назива се **директни смер**, а смер у коме је отпорност највећа, **инверзни смер**. Уобичајено је да се величине које се односе на рад при поларизацији у директном (пропусном) смеру означавају индексом **F** (*forward*), а величине које одговарају поларизацији у инверзном (непропусном) смеру индексом **R** (*reverse*) [1].

У колу приказаном на слици 3.2.а. диода делује као електрични вентил који допушта кретање слободних носилаца наелектрисања у једном смеру, а спречава у другом. Функционално, савршена диода може да се представи као напонски-контролисан прекидач, који је затворен када је улазни напон већи од

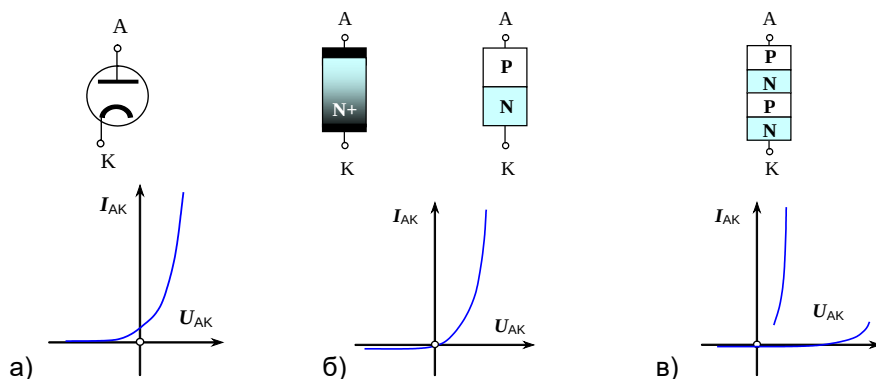
нуле (слика 3.2.б). Сигнал $u_o(t)$ на излазу овог кола може бити само позитиван и представља “усмерен” (исправљен) улазни сигнал $u_i(t)$:

$$u_o(t) = \begin{cases} u_i(t) & \text{за } u_i(t) \geq 0 \\ 0 & \text{за } u_i(t) < 0 \end{cases} \quad (3.2)$$



Слика 3.2. Функционална шема диодног усмерача

Усмерачко својство поседују електронска цев са две електроде (слика 3.3.а), спој два полупроводника различитог типа (PN-спој), као и спој метала и полупроводника N-типа. Полупроводничка (кристална) диода у ужем смислу је елемент који садржи један PN-спој, са по једним прикључком за повезивање у свакој области кристала. U - I карактеристика полупроводничке диоде је у основи карактеристика PN-споја (слика 3.3.б). У ширем смислу, полупроводничка диода је нелинеаран елемент са једним приступом, који може да не садржи ни један (Шотки-диоде), или да садржи више PN-спојева (диодни тиристор - четворослојна диода).



Слика 3.3. U - I карактеристике диода

Према намени, полупроводничке диоде се обично деле¹ на:

- сигналне диоде,
- исправљачке диоде,
- прекидачке диоде,
- диоде за стабилизацију напона,
- диоде референтног напона.

Посебну групу чине диоде чија је примена заснована на интеракцији светлосних и електричних појава у полупроводницима:

¹ Детаљнија класификација диода обухвата и неке посебне намене (диоде за мешање сигнала, диоде за стабилизацију струје, микроталасне диоде...) или конструкције које предодређују основну намену (тунел-диоде, капацитивне диоде...).

- фотоемитирујуће диоде и
- фотоосетљиве диоде.

Сигналне диоде (*signal diode*) се користе за издвајање или обраду информација представљених у облику електричног сигнала који се мења са временом [2]. У начелу, сигналне диоде су малих димензија и мале снаге. При директној поларизацији и напону од око 1 V могу да проводе струју до стотинак милиампера, а при инверзном напону до 100 V на собној температури силицијумске сигналне диоде пропуштају струју мању од микроампера.

Исправљачке диоде (*rectifier diode*), које се користе у изворима за напајање електронских уређаја и других потрошача електричне енергије, раде са великом густином струје, тако да имају знатно већу називну вредност струје при директној поларизацији, али и нешто већи напон вођења. Полупроводничке исправљачке диоде за индустријску примену могу да проводе струју већу од 10 kA. Највећи допуштени инверзни напон може да буде и неколико хиљада волти. Производе се и као полупроводнички исправљачки слогови који представљају комбинације више исправљачких диода.

Прекидачке диоде (*switching diode*) су намењене за рад у колима којим се укључују или искључују друга електрична кола, односно њихови делови (мреже). Њихова конструкција прилагођена је захтевима постизања својстава савршеног прекидача: веома мала унутрашња отпорност у проводном стању, веома мала капацитивност и врло велика отпорност у непроводном стању. По својим осталим особинама могу припадати категорији сигналних или исправљачких диода.

Диоде за стабилизацију напона (*voltage regulator diode*) при одговарајућој поларизацији имају између својих крајева напон који се може сматрати сталним у назначеном опсегу струје.

Диоде референтног напона (*voltage reference diode*), када су поларисане тако да раде у декларисаном опсегу струје, “одржавају” на својим прикључцима напон прописане тачности.

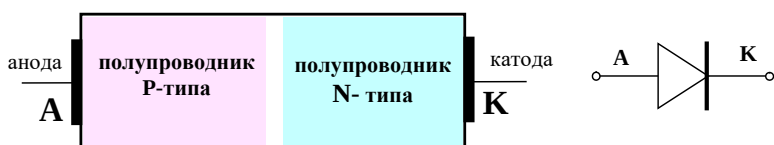
Фотоемитирујуће диоде (*light-emitting diode, LED*) се користе као извори светлости у светлосним приказивачима, у електрооптичким мерним инструментима и уређајима за пренос података.

Фотоосетљиве диоде (*light-sensing, photo-diode*), у којима се одвија фотоелектрични ефекат, користе се као пријемници (детектори) светлости у уређајима за заштиту, електрооптичким мерним инструментима и уређајима за пренос података.

3.2. КАРАКТЕРИСТИКЕ ПОЛУПРОВОДНИЧКИХ ДИОДА СА ЈЕДНИМ PN-СПОЈЕМ

Под полупроводничком диодом у ужем смислу се подразумева PN-спој са прикључцима за повезивање (слика 3.4). Проводност PN-споја зависи од

смера прикљученог напона. При директној поларизацији, када је потенцијал прикључка који се налази на страни области Р-типа (анода) виши у односу на потенцијал прикључка на страни области N-типа (катода), електрична проводност је релативно велика (отпорност је веома мала). При инверзној поларизацији, када је катода на вишем потенцијалу у односу на аноду, проводност је веома мала (отпорност је веома велика). Однос отпорности PN-споја при инверзној и директној поларизацији је већи од 10^6 .



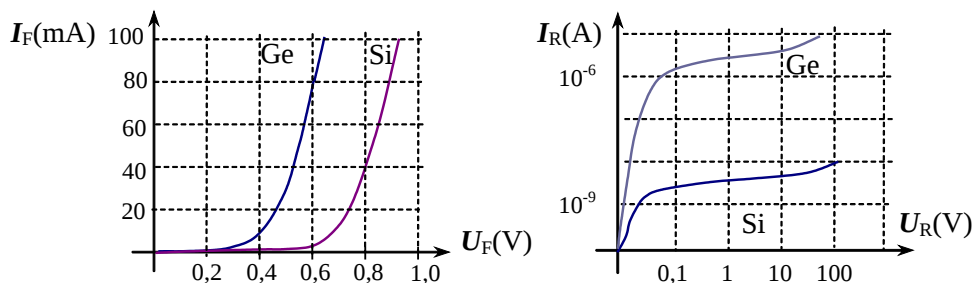
Слика 3.4. Диода са једним PN-спојем

Зависност струје I_{AK} која протиче кроз диоду од напона U_{AK} на њеним крајевима описује се изразом:

$$I_{AK} = I_s (e^{\frac{U_{AK}}{\eta U_T}} - 1), U_T = \frac{kT}{q_e} \quad (3.3)$$

Величина означена са I_s се назива **инверзна струја засићења** диоде (*inverse saturation current*). Њена вредност зависи од површине споја и карактеристика полупроводника, односно површинске густине инверзне струје засићења споја. Напон U_T је "електрични еквивалент температуре", а константа η представља поправку теоријски изведене формуле 1.41. Вредност ове константе зависи од својстава материјала. За германијум, као и за силицијум при великим струјама, је $\eta = 1$, док се за силицијум при малим вредностима струје усваја $\eta \approx 2$ [3]. За мале вредности напона U_{AK} , односно струје I_{AK} ,

карактеристика PN-споја германијума има облик функције $e^{\frac{U_{AK}}{U_T}}$, а силицијума $e^{\frac{U_{AK}}{2U_T}}$. Због тога постоји значајна разлика у почетном делу U - I карактеристике германијумске и силицијумске диоде (слика 3.5).



Слика 3.5. Карактеристике германијумске и силицијумске диоде при директној и инверзној поларизацији

Напон до којег струја кроз директно поларисану диоду може да се занемари (на пример, мања је од 1% декларисане највеће допуштене

вредности струје диоде), означава се као напон прекида² карактеристике. Може се усвојити да је вредност овог напона приближно 0,2 V за германијумске, односно 0,6 V или 0,7 V за силицијумске диоде [4].

Вредност струје I_S у изразу 3.3 једнака је вредности струје кроз диоду када је катода довољно позитивна према аноди (за $U_{AK} \ll -U_T$ је $I_{AK} = -I_S$). Да би струја I_S била мала, потребно је да густина инверзне струје засићења PN-споја, J_S , буде што мања, што се постиже великом концентрацијом примеса. Код германијумских диода инверзна струја засићења је више од хиљаду пута већа од струје силицијумске диоде еквивалентне конструкције. При приближном прорачуну се обично усваја да је на собној температури она реда величине микроампера (10^{-6} A) за германијумске, односно, реда величине наноампера (10^{-9} A) за силицијумске сигналне диоде.

Параметар	симбол	јед.	1N4148	1N4007	SSiE44	RD65FV
Највећа средња вредност директне струје	$I_{F(AV)}$	A	0,15	1	35	11745
Директни напон	U_F	V	1 @ 10 mA	1,1 @ 1 A	1,2 @ 50 A	0,75 @ 6,8 kA
Највећа вршна вредност периодичног напона	U_{RRM}	V	100	1 000	1 500	600
Инверзна струја	$I_R @ U_{RRM}$	mA	0,005 max	0,01 max	4	150 max
Највиша дозвољена температура споја	T_J	°C	200	175	175	225
Димензије	$\varnothing \times L$	mm	1,8 × 4	3,5 × 7	16 × 15,2	112,5 × 25

Табела 3.1. Карактеристични параметри диода

Као карактеристика диоде у непроводном режиму рада у спецификацијама произвођача се наводи вредност сталне инверзне струје I_R (*reverse continuous current* [5]) при одређеном напону U_R . Код снажних исправљачких диода, које у пропусном смеру могу да проводе струје реда величине 1000 A, инверзна струја при напону од 1000 V може бити и већа од 100 mA. Основне карактеристике неких карактеристичних типова диода су дате у табели 3.1.

При моделовању исправљачких диода, као основни параметри при директној поларизацији се користе **напон прага**³, $U_{(TO)}$, и **отпорност нагиба**⁴ U - I карактеристике, r_T , чије је значење приказано на слици 3.6 [6]. Отпорност нагиба r_T је динамичка отпорност која одговара асимптоти напонско-струјне карактеристике диоде при великим струјама⁵. Напон $U_{(TO)}$ одговара тачки пресека асимптоте и напонске осе U - I дијаграма.

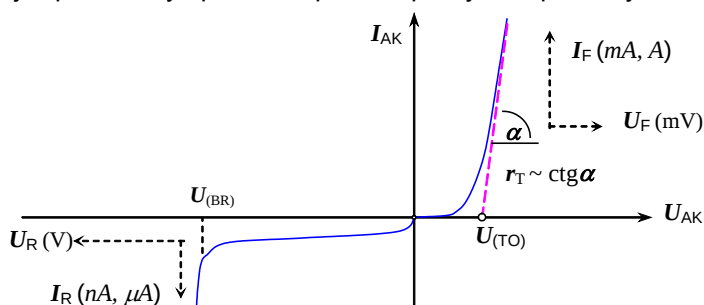
² У литератури се ова величина различито назива (напон колена, напон укључења, напон прага, односно *cutin*, *break-point voltage*, *offset*, *threshold voltage*) и различито означава (V_{γ} , V_{DT}).

³ У литератури се за напон прага (*threshold voltage*, *Schleusenspannung*) користе и називи: праг вођења (*cutin*), преломна тачка U - I карактеристике (*break-point*), напон помераја линеаризоване U - I карактеристике (*offset voltage*). У англоамеричкој литератури се користи ознака V_{γ} .

⁴ Динамичка отпорност асимптоте проводног дела карактеристике (*slope resistance*).

⁵ Понекад се отпорност нагиба r_T означава називом "диференцијална отпорност".

У уобичајеним условима рада, струја I_F , која протиче кроз диоду поларисану у пропусном смеру⁶, за више од три реда величине је већа од струје I_R , која кроз диоду протиче при инверзној поларизацији.



Слика 3.6. U - I карактеристика полупроводничке диоде

Инверзни напон U_R је у уобичајеним условима рада знатно већи од напона U_F на диоди која је поларисана у директном (проводном) смеру. Због тога се U - I карактеристика диода приказује са различитим размерама за област директне и инверзне поларизације (слика 3.6). При довољно великим вредностима инверзног напона U_R долази до наглог повећања струје услед ефекта пробоја који је описан у одељку 1.3.1. Инверзни напон при којем струја постаје већа од назначене вредности (преломна тачка напонско-струјне карактеристике) се назива **напон пробоја**⁷ $U_{(BR)}$. Његова вредност зависи од карактеристика полупроводника који образује PN-спој, а може бити од неколико волти (Ценеров пробој) до неколико стотина волти (лавински пробој). U - I карактеристика у области пробоја може бити веома строма, што значи да, у таквим условима рада, напон на диоди веома мало зависи од струје I_R која кроз њу протиче. Ова особина користи се за стабилизацију једносмерног напона у електронским колима.

3.2.1. ОТПОРНОСТ

Статичка отпорност диоде, R , дефинисана је Омовим законом:

$$R = \frac{U_{AK}}{I_{AK}}, \quad (3.4)$$

С обзиром на једначину 3.3, вредност отпорности R зависи од вредности напона U_{AK} на крајевима диоде. На собној температури, просечне вредности за сигналне силицијумске диоде типа 1N4148, на пример, су:

- ♦ при директној поларизацији ($U_F = 0,7 \text{ V}$; $I_F = 10 \text{ mA}$), $R_F = 70 \Omega$;
- ♦ при инверзној поларизацији ($U_R = 20 \text{ V}$; $I_R = 25 \text{ nA}$), $R_R = 800 \text{ M}\Omega$.

Отпорност R_F диоде поларисане у пропусном смеру веома много зависи од вредности напона U_F односно струје I_F (положаја радне тачке на U - I карактеристици) и стога не представља погодан параметар за анализу и

⁶ Директна (пропусна) струја (*forward current*).

⁷ Пробојни напон (*breakdown voltage*).

пројектовање електронских кола. Инкрементална отпорност сигналне диоде 1N4148, на пример, у опсегу од 5 mA до 15 mA (10 mA±5 mA) једнака је $r_{\Delta} \approx 5,5 \, \Omega$, што је за више од реда величине мање од вредности статичке отпорности на средини посматраног опсега струје. За исправљачке диоде 1N4007, чија је називна вредност струје 1 A, инкрементална отпорност је приближно $1 \, \Omega$, у опсегу од 30 mA до 60 mA, односно, око $0,1 \, \Omega$ у опсегу од 0,4 A до 1 A).

Динамичка отпорност r представља карактеристику диоде у одређеној радној тачки $Q(I_Q, U_Q)$. На основу једначине 3.3 следи:

$$r = \frac{dU_{AK}}{dI_{AK}} = \frac{\eta U_T}{I_{AK} + I_s} \quad (3.5)$$

При директној поларизацији, када је $U_{AK} = U_F \gg U_T$, може се применити приближна формула:

$$r \approx \frac{\eta U_T}{I_F} \quad (3.6)$$

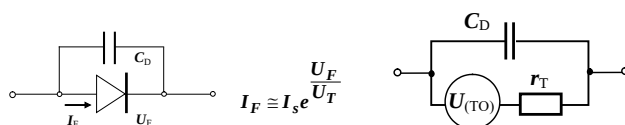
Динамичка отпорност PN-споја и отпорност преосталог дела тела диоде (који чине делови области P- и N-типа и спојеви са спољашњим прикључцима) одређују отпорност нагиба r_T . Код усмерачких диода отпорност нагиба r_T је знатно мања од једног ома, али код сигналних диода може бити и неколико ома. Према декларацији произвођача, вредност отпорности r_T снажне исправљачке диоде SSiE44 (*Siemens*), на пример, је $9,7 \, m\Omega$.

3.2.2. КАПАЦИТИВНОСТ

Капацитивна својства полупроводничких диода повезана су са процесима нагомилавања наелектрисања у прелазној области PN-споја (који карактерише капацитивност прелазне области C_T), и успостављања расподеле вишка слободних носилаца при директној поларизацији (који карактерише дифузиона капацитивност C_D).

Капацитивност прелазне области, C_T , испољава се при инверзној поларизацији PN-споја, када је висина потенцијалне препреке повећана, а дифузија већинских слободних носилаца наелектрисања кроз спој отежана. Типична вредност капацитивности C_T је од један до десет пикофарада, зависно од концентрације примеса, површине споја и напона поларизације.

Дифузиона капацитивност, C_D , се испољава при директној поларизацији PN-споја, када је висина потенцијалне препреке смањена, чиме је олакшана дифузија већинских слободних носилаца наелектрисања из једне области у другу. Вредност ове величине је сразмерна вредности директне струје I_F . Типичне вредности су неколико нанофарада при струји од неколико милиампера. При инверзној поларизацији дифузиона капацитивност C_D је занемарљива у поређењу са капацитивношћу прелазне области C_T .



Слика 3.7. Еквивалентно коло диоде при директној поларизацији

При поларизацији у проводном смеру, за мале промене напона U_{AK} може се сматрати да диода представља паралелну везу капацитивности PN-споја и динамичке отпорности r_T (слика 3.7). У таквим условима рада преовлађује дифузиона капацитивност C_D , а временска константа T_F :

$$T_F = C_D r_T \quad (3.7)$$

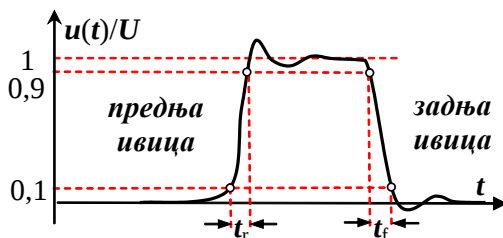
не зависи од вредности струје кроз диоду.

3.2.3. ДИНАМИЧКЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ ПОЛУПРОВОДНИЧКИХ ДИОДА

У импулсним и дигиталним електронским колима диоде се користе у тзв. прекидачком начину рада којем су својствене веома брзе, условно речено, “тренутне” промене интензитета или знака (смера) побудног сигнала. Успостављање равнотежног стања у процесима настајања и рекомбинације слободних носилаца наелектрисања захтева неко време. Понашање диоде у прекидачком режиму рада описује се помоћу два параметра:

- **време укључивања**⁸, које протекне од тренутка успостављања (укључења) побуде која одговара директној поларизацији диоде, до успостављања равнотежног стања које одговара проводном режиму рада при датим условима, и
- **време искључивања**⁹, које протекне од тренутка прикључења побуде која одговара инверзној поларизацији диоде до успостављања стања које представља непроводни режим рада.

Оба ова времена зависе од капацитивности и отпорности диоде, али и од спољашњег електричног кола у коме се диода налази. У начелу, време укључења диоде је краће од времена потребног за њено искључење.



Слика 3.8. Дефиниција времена успостављања и опадања

⁸ Време успостављања проводног стања (*forward recovery time*).

⁹ Време потребно за успостављање непроводног стања, тачније: преласка из проводног у непроводно стање, назива се и време инверзног опоравка (*reverse recovery time*) [8].

При описивању одзива електронских елемената, кола и система на побуду правоугаоним импулсима као показатељи прелазних стања сигнала користе се време успона (t_r , *rise time*), односно време опадања (t_f , *fall time*), која се дефинишу као временски интервали у коме се сигнал промени између вредности које одговарају 10% и 90% вредности у устаљеним стањима (слика 3.8).

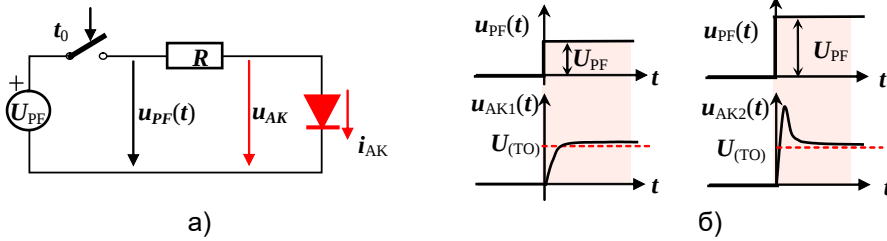
3.2.3.1. Успостављање проводног стања

Процес успостављања проводног стања је најједноставније сагледати ако се анализирају појаве у колу приказаном на слици 3.9. Скоковита промена напона на крајевима гране која садржи диоду и отпорник се може представити изразом:

$$u_{PF}(t) = U_{PF} h(t - t_0), \quad (3.8)$$

где је U_{PF} вредност (интензитет) напона којим се врши директна поларизација, а $h(t)$ означава јединичну одскочну (Хевисајдову) функцију:

$$h(t - t_0) = \begin{cases} 0; & t < t_0 \\ 1; & t \geq t_0 \end{cases}. \quad (3.9)$$



Слика 3.9. Прелазне појаве при поларизацији диоде у пропусном смеру

Након скоковитог успостављања побуде која одговара директној поларизацији диоде, започиње процес успостављања повећане концентрације слободних носилаца наелектрисања, који се симболизује дифузионом капацитивношћу C_D . Ако је напон U_{PF} много већи од напона на крајевима диоде, U_{AK} , може се сматрати да струја која протиче кроз диоду не зависи од напона између њених крајева:

$$i_{AK} = \frac{u_{PF} - u_{AK}}{R} \approx \frac{U_{PF}}{R} h(t - t_0) = I_F h(t - t_0). \quad (3.10)$$

Напон U_{AK} на крајевима диоде у устаљеном стању, при директној поларизацији сталним напонем U_{PF} , једнак је:

$$U_{AK} = U_F = U_{(TO)} + r_T I_F, \quad (3.11)$$

где је $U_{(TO)}$ напон прага, а r_T отпорност нагиба асимптоте U - I карактеристике диоде поларисане у проводном смеру.

Таласни облици напона у колу при скоковитој промени побуде приказани су на слици 3.9.б. Време укључивања, t_{tr} , се дефинише као временски интервал од тренутка деловања директне побуде до постизања проводног стања у којем важи формула 3.3.

У случају побуде малом струјом, одзив кола има експоненцијални облик (дијаграм $u_{AK1}(t)$). При нагом успостављању директне поларизације, којој у устаљеном стању одговара директна струја великог интензитета, непосредно након успостављања струје диода се не понаша као PN-спој, већ као отпорник [7]. Ако је утицај паралелних паразитних капацитивности у колу занемарљиво мали, напон на диоди при импулсној пубуди великом струјом има облик приказан сигналом $u_{AK2}(t)$. Појава се тумачи као последица пада напона на релативно великој отпорности кристала у почетном тренутку, пре успостављања одговарајуће расподеле носилаца наелектрисања. До “активирања” дифузионог механизма премештања слободних носилаца наелектрисања, протицање струје i_{AK} се остварује само услед деловања електричног поља, због чега је пад напона на диоди већи него у равнотежном стању, када се струја кроз диоду претежно остварује дифузијом мањинских носилаца наелектрисања. Трајање премашаја зависи од карактеристика диоде, али и од величине и брзине успостављања побуде.

Према декларацији произвођача, време успостављања проводног стања усмерачке диоде 1N4007 је 300 ns при струји од 0,1 А односно 500 ns при струји од 1 А. Начин мерења временских параметара процеса укључења диода дефинисан је међународним стандардом [8].

3.2.3.2. Успостављање непроводног стања

Прелазак из проводног у непроводно стање представља сложенији процес који се одвија у два корака. При директној поларизацији успостављено је стање у којем важи једначина 3.11 (слика 3.10.а). Нагла промена поларитета побудног напона $u_P(t)$ се може представити затварањем прекидача на слици 3.10.б. На улазу кола које сачињавају диода и отпорник R делује напон:

$$u_P(t) = U_{PF} - (U_{PR} + U_{PF}) \cdot h(t - t_1), \quad (3.12)$$

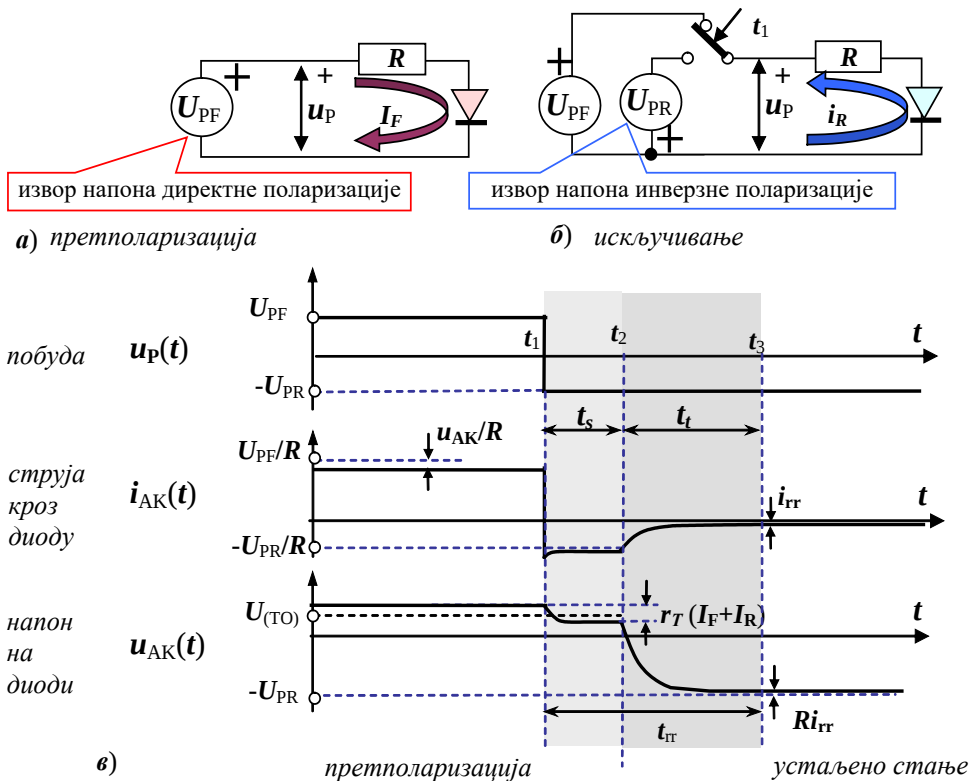
где је U_{PF} , напон побуде у проводном, U_{PR} напон побуде у непроводном смеру, а t_1 тренутак промене смера поларизације. Нагла (тренутна) промена побудног напона не може да изазове наглу промену напона на крајевима диоде, u_{AK} , због постојања нагомиланих мањинских слободних носилаца наелектрисања. Ако је напон инверзне поларизације (побуде у непроводном смеру), U_{PR} , много већи од напона на крајевима диоде у проводном стању, (3.11), може се сматрати да, одмах након измене смера побуде, вредност струје кроз диоду не зависи од напона u_{AK} :

$$I_R = i_R(0) = \frac{U_{PR} + u_{AK}}{R} \approx \frac{U_{PR}}{R}. \quad (3.13)$$

Иако у тренутку t_1 струја кроз диоду мења смер, напон u_{AK} остаје приближно непромењен:

$$u_{AK}(t) = U_{(TO)} - r_T i_R(t), \quad (3.14)$$

све док концентрација мањинских носилаца наелектрисања непосредно уз спој не опадне до вредности која, на датој температури, одговара равнотежном стању P- односно N-области. Током растеређивања струја кроз диоду је приближно стална, а напон на њеним крајевима је нешто мало мањи од напона при директној поларизацији.



Слика 3.10. Прелазне појаве при поларизацији диоде у непропусном смеру

Трајање интервала растеређивања¹⁰, t_s , зависи од радних услова у условима директне и инверзне поларизације. Уклањање вишка мањинских носилаца наелектрисања је утолико брже уколико је струја растеређивања I_R већа, а струја директне поларизације I_F била мања, тако да је у тренутку промене смера побуде број споредних слободних носилаца наелектрисања био мањи.

Други део процеса искључења представља интервал опадања струје и успостављање прелазне области просторног наелектрисања која одговара инверзној поларизацији PN-споја. Прелазни процес има експоненцијални

¹⁰ Овај меморијски (*storage*) ефекат се описује помоћу времена памћења (*storage time*), t_s , које представља временски интервал од тренутка промене поларитета побудног напона до тренутка када напон на крајевима диоде падне на нулу.

карактер, а његово трајање представља **време прелаза**¹¹, t_t . Укупно трајање процеса искључења¹², t_{rr} , од тренутка t_1 у којем је дошло до промене смера напона поларизације до тренутка t_3 када се може сматрати да је успостављено непроводно стање (у којем је струја кроз диоду мања од одређене вредности), једнако је збиру времена растеређивања t_s и времена прелаза t_t ,

$$t_{rr} = t_3 - t_1 = t_s + t_t. \quad (3.15)$$

Да би се прелазни процес што брже одвијао, потребно је обезбедити што већу струју растеређивања. При спецификацији времена t_{rr} наводе се и услови његовог одређивања (мерења). Поред вредности сталне струје директне поларизације, I_F , и струје којом је дефинисан услов завршетка прелазног режима, i_{rr} (*reverse recovery current*), назначује се и почетна вредност струје растеређивања I_R или параметри кола искључивања (напон побуде U_R и отпорност R). На пример, за брзу (прекидачку) сигналну диоду BAY95, чија је називна струја 150 mA, произвођач је навео следеће вредности:

- ♦ $I_F = 10 \text{ mA}$, $I_R = 10 \text{ mA}$; $i_{rr} = 1 \text{ mA}$: $t_{rr} = 4 \text{ ns}$;
- ♦ $I_F = 10 \text{ mA}$, $U_R = 6 \text{ V}$; $R = 100 \Omega$; $i_{rr} = 1 \text{ mA}$: $t_{rr} = 2 \text{ ns}$.

По правилу, диоде веће снаге имају спорији одзив. Време (инверзног) опоравка брзе исправљачке диоде BA 160, чија је називна струја 1 A, при преласку из проводног стања при струји од $I_F = 10 \text{ mA}$, у непроводно стање од $I_R = 10 \text{ mA}$ до $i_{rr} = 1 \text{ mA}$, једнако је $t_{rr} = 300 \text{ ns}$. За исправљачку диоду 1N4007, време опоравка је око $5 \mu\text{s}$ @ $I_R / I_F = 1$, за $0,1 \text{ A} < I_F < 1 \text{ A}$.

Време успостављања непроводног стања посебно је значајно за рад прекидачких кола велике снаге. Квалитет рада снажних прекидачких транзистора зависи од понашања диода које су са њима спрегнуте. За ту сврху развијена је посебна врста диода које омогућују рад на високим учестаностима, при врло великим струјама и високим напонима (*fast recovery diode* - *FRD*). У табели 3.2. дате су основне карактеристике два типа ових диода (*IXYS*).

параметар	јед.	DSEI	DSEK
највећа вршна вредност периодичног инверзног напона U_{RRM}	V	1 200	600
највећа ефективна вредност директне струје, I_{FRMS}	A	100	50
највећа вршна вредност директне струје, I_{FSM}	A	500	300
директни напон, U_F	V	1,8 @ 60 A	1,4 @ 20 A
време инверзног опоравка t_{rr}	ns	35	35
највиша дозвољена снага дисипације	W	180	125
димензије $h \times l \times d$	mm	26 × 15 × 5	15 × 10 × 4,5

Табела 3.2. Карактеристични параметри FRD-диода

¹¹ Трајање прелазног процеса (*transition interval*) одређено је временском константом коју чине капацитивност C_T и еквивалентна отпорност која делује паралелно са њом.

¹² Време инверзног опоравка (*reverse recovery time*).

3.2.4. ТЕМПЕРАТУРСКА ЗАВИСНОСТ КАРАКТЕРИСТИКА

Параметри који карактеришу својства полупроводничких диода (I_s , $U_{(TO)}$, и $U_{(BR)}$) зависе од температуре. У начелу, са повећањем температуре повећава се проводност диоде, па струја кроз диоду расте и при сталном напону на њеним крајевима. На U - I дијаграму, крива $I_{AK}(U_{AK})$ која одговара директној поларизацији се “помера” улево (слика 3.11).

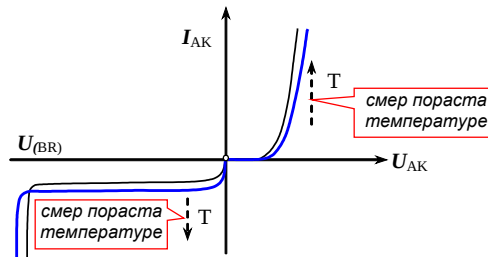
Вредност инверзне струје засићења I_s одређена је површином PN-споја, S , и густином струје засићења PN-споја, J_s :

$$I_s = J_s S. \quad (3.16)$$

Густина инверзне струје засићења J_s зависи од својстава полупроводника и температуре. За температурски сачинилац промене инверзне струје засићења са температуром полупроводничких диода са PN-спојем, TC_{I_s} , обично се усађа вредност:

$$TC_{I_s} = \frac{1}{I_s} \frac{dI_s}{dT} \approx 7 \frac{\%}{^{\circ}C}, \quad (3.17)$$

што значи да се вредност струје I_s приближно удвостручава при повећању температуре од $10^{\circ}C$.



Слика 3.11. Температурска зависност U - I карактеристике диоде

При сталној струји, напон диоде поларисане у проводном смеру, U_F , смањује се са порастом температуре, приближно:

$$\frac{dU_F}{dT} \approx -2,5 \frac{mV}{^{\circ}C}. \quad (3.18)$$

Пробој при малим вредностима инверзног напона, до којег долази услед Ценеровог ефекта, јавља се код PN-спојева образованих од полупроводника са веома великом концентрацијом примеса. Ширина области прелазне области је у том случају веома мала, реда величине $10^{-8} m$, што омогућује пролазак електрона кроз потенцијалну препреку тунеловањем. Напон пробоја, U_z , и инверзна струја засићења су мали, али је повећана капацитивност споја (од $10 pF$ до $10 nF$), што се одражава на динамичке карактеристике диоде. Температурски коефицијент напона пробоја тунел-ефектом (Ценеров напон) је негативан.

Пробој лавинским ефектом настаје при већим напонима, а одликује се позитивним температурским коефицијентом напона пробоја $U_{(BR)}$.

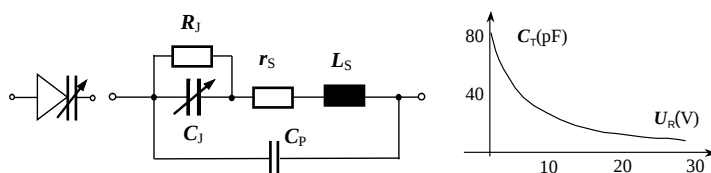
3.3. ДИОДЕ СА ПРОМЕНЉИВОМ КАПАЦИТИВНОШЋУ

У начелу, све полупроводничке диоде са PN-спојем представљају диоде са променљивом капацитивношћу, јер капацитивност инверзно поларисаног PN-споја зависи од напона на споју:

$$C_T \approx \frac{\lambda}{U^n}. \quad (3.19)$$

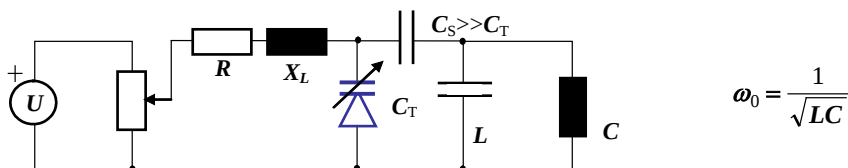
Ово својство је искоришћено за израду диода које се употребљавају као елементи са променљивом капацитивношћу¹³. Њихову капацитивност сачињавају капацитивност PN-споја (капацитивност прелазне области C_T) и капацитивност веза. Да би се смањио утицај паразитних капацитивности физичке димензије ових диода су врло мале.

Симбол и еквивалентно коло диода са променљивом капацитивношћу, приказано је на слици 3.12 [9]. Поред кондензатора C_J који представља капацитивност PN-споја, коло садржи и елементе који симболизују укупну редну еквивалентну отпорност материјала и контаката, r_s , и еквивалентну отпорност инверзно поларисаног PN-споја, R_J . Потпуно еквивалентно коло садржи и паралелну расипну капацитивност C_p и редну еквивалентну индуктивност L_s . Типичне вредности су, на пример: $C_J = 20 \text{ pF}@ U_R = 4 \text{ V}$, $r_s = 8,5 \Omega$ и $R_J > 1 \text{ M}\Omega$.



Слика 3.12. Симбол, еквивалентно коло и карактеристика капацитивне диода

Диода се користи као кондензатор са контролисаном капацитивношћу¹⁴ у фреквенцијски селективним колима која раде на врло високим учестаностима. На слици 3.13 приказан је хармонијски осцилатор у коме је, коришћењем варикап-диода, омогућено подешавање резонантне учестаности LC-кола ($\sim 20 \text{ GHz}$) помоћу извора једносмерног напона U .



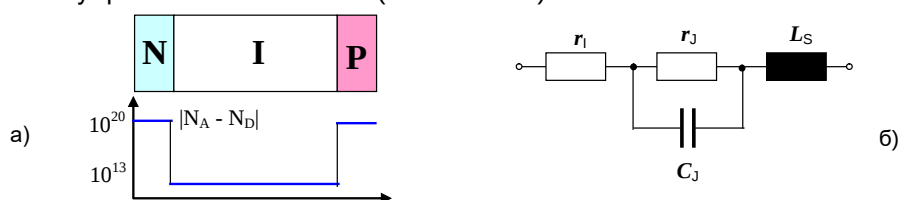
Слика 3.13. Примена диода са променљивом капацитивношћу за подешавање резонантне учестаности LC-кола

¹³ Капацитивне диоде, варикап-диоде (*variable capacitance diodes*).

¹⁴ Напонски управљан кондензатор (*variable-voltage capacitor - varicap, varactor*).

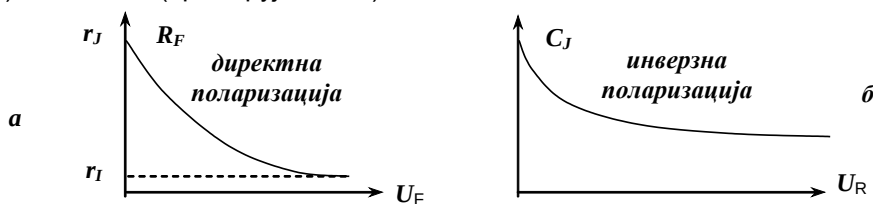
3.4. PIN-ДИОДЕ

PIN-диоде представљају посебну врсту прекидачких диода намењених за рад у саставу осцилаторних кола на врло високим учестаностима. Посебном конструкцијом постигнута су мала унутрашња отпорност у проводном стању и мала паразитна капацитивност у непроводном стању. Структура PIN-диоде приказана је на слици 3.14. Између области P- и N-типа, које представљају аноду и катоду диоде, налази се област у којој су концентрације примеса донора и акцептора врло мале и приближно једнаке (полупроводник I-типа¹⁵). Средњи слој не мора бити сасвим чист, већ може представљати област P- или N-типа, али са врло малом количином примеса, чија је концентрација за неколико редова величине мања од концентрације примеса у граничним областима (слика 3.14.а).



Слика 3.14. Конструкција и еквивалентно коло PIN-диоде

Еквивалентно коло PIN-диоде приказано је на слици 3.14.б. Отпорност r_j симболизује струјно-напонску карактеристику PN-споја описану једначином 3.3, док отпорност r_i симболизује отпорност средишње области. Капацитивност C_j представља капацитивност PN-споја. Поред тога, потпуно еквивалентно коло садржи и серијску еквивалентну индуктивност L_s . При директној поларизацији малим напонам отпорност r_j је много већа од отпорности r_i . Међутим, вредност r_j опада са струјом (као што то показује формула 3.6) и при великим струјама постаје занемарљива у односу на r_i (слика 3.15.а). Као напонски контролисани отпорници PIN-диоде се користе у радио- и микроталасној техници. При промени једносмерне струје поларизације може се постићи промена отпорности од $0,1 \Omega$ (при струји од $1 \mu A$) до $10 k \Omega$ (при струји од $1 A$).



Слика 3.15. Карактеристике PIN-диоде

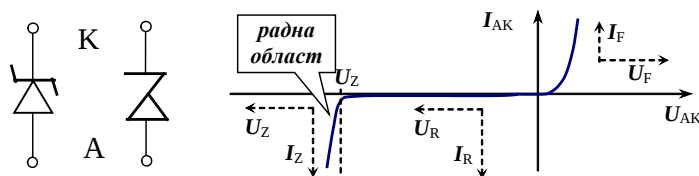
При инверзној поларизацији, због мале концентрације примеса у средишњој области, прелазна област се прошири преко читаве средишње области већ при врло малим инверзним напонима, реда величине волта. Даљи пораст напона не утиче на ширину прелазне области. Гранични слојеви

¹⁵ Назив диоде симболизује њену структуру (Positive-Intrinsic-Negative diode).

са врло великом концентрацијом примеса понашају се као металне облоге равнoг (плочастог) кондензатора чији диелектрик је средишња I-област. Капацитивност овог кондензатора једнака је капацитивности запречног слоја. Међутим, у овим условима ширина прелазне области је стална, па капацитивност диоде не зависи од вредности прикљученог напона (слика 3.15.б). С обзиром на димензије прелазне области, капацитивност C_J је веома мала.

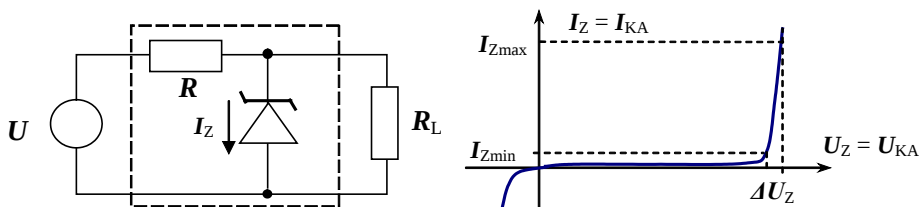
3.5. ЦЕНЕР-ДИОДЕ

Уобичајено је да се диоде намењене за рад у условима пробоја (*breakdown diodes*) називају “Ценер-диоде”, независно од принципа њиховог рада. Пројектоване су тако да могу да издрже појачану дисипацију која је својствена раду у области пробоја. Производе се диоде код којих је напон пробоја од неколико волти до неколико стотина волти, а највећа дозвољена снага дисипације ($\max P$) већа од 50 W.



Слика 3.16. Графички симболи, ознаке и U - I карактеристика Ценер-диоде

У области пробоја напон између катоде и аноде веома мало зависи од вредности струје, па се Ценер-диоде користе за стабилизацију једносмерног напона тако да, на пример, напон којим се неко коло побуђује не зависи од напона напајања односно струје оптерећења. На слици 3.17 приказано је основно коло за стабилизацију напона помоћу Ценер-диоде.

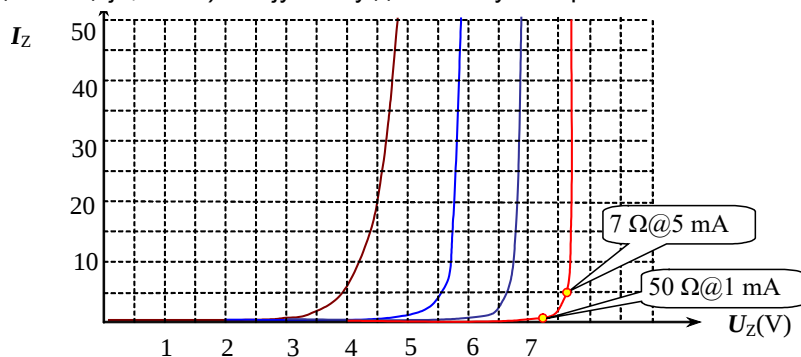


Слика 3.17. Стабилизација једносмерног напона помоћу Ценер-диоде

Промене напона U , односно отпорности оптерећења R_L , услед којих се струја I_Z кроз Ценер-диоду мења у релативно широким границама, од I_{Zmin} до I_{Zmax} , доводе само до малих промена радног напона U_Z . Да би стабилност била већа, диференцијална отпорност r_z , која одређује нагиб U - I карактеристике у радном опсегу, треба да буде што мања.

У начелу, најмању диференцијалну отпорност имају диоде чији је називни радни напон у опсегу од 6 V до 10 V. На пример, диода ZPD 7,5 (Еи), чији се радни напон при струји од $I_{ZT} = 5$ mA налази у опсегу од 7,0 V до 7,9 V, има динамичку отпорност у области пробоја од 7 Ω при струји од 5 mA (50 Ω при струји од 1 mA), док диода истог типа, са називним (номиналним) радним

напоном од 30 V, има динамичку отпорност у области пробоја приближно једнаку 80 Ω . По правилу, при истом називном радном напону, диоде које имају већу називну радну струју, $\max I_Z$, (односно већу највећу дозвољену снагу дисипације, $\max P$) имају мању динамичку отпорност.



Слика 3.18. Типичне U - I карактеристике Ценер-диода

Значајну карактеристику Ценер-диода представља стабилност радног напона у односу на промене температуре околине. За напоне мање од 5,6 V температурски коефицијент радног напона Ценер-диода (TC_{U_Z}) је негативан, док је за напоне изнад 6,2 V позитиван.

Ценер-диоде намењене да раде као диоде референтног напона у електронским мерним инструментима и системима одликују се великом температурском стабилношћу радног напона. За диоду 1N829, на пример, декларисане су следеће карактеристике: $U_Z = 6,2 \text{ V} \pm 5\%$; $I_{ZT} = 7,5 \text{ mA}$; $r_Z = 10 \Omega$; $\max P = 400 \text{ mW}$; $TC = 5 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$. При сталној струји $I_{ZT} = 7,5 \text{ mA}$, промене радног напона U_Z услед промена температуре у опсегу од -55°C до 100°C су мање од 5 mV.

параметар	јед.	ZPD 5,6	ZY 5,6	ZX 5,6	1N5339
$\max P$	W	0,5	1,3	1,56	5
I_{ZT}	mA	5	100	100	220
$U_Z @ I_{ZT}$	V	од 5,2 до 6,0			$5,6\text{V} \pm 5\%$
$\max r_Z @ I_{ZT}$	Ω	40	2	2	1
$\max r_Z @ 1 \text{ mA}$	Ω	400			400
$\text{typ } \Delta U_Z / \Delta T @ I_{ZT}$	mV/ $^\circ\text{C}$	0,2	1,6	1,6	
$\max I_Z @ 25^\circ\text{C}$	mA	70			865
$\max I_Z @ 45^\circ\text{C}$	mA	59	169	180(1350)	
$\min U_Z @ I_Z$	V	1 @ 0,1 μA	1,5 @ 1 μA	1,5 @ 1 μA	2 @ 1 μA
$\max U_F @ I_F$	V	1 @ 0,1 A	1 @ 0,1 A	1,5 @ 1 A	

Табела 3.3. Карактеристични параметри Ценер-диода

3.6. ТУНЕЛ-ДИОДЕ

Са повећањем концентрације примеса прелазна област PN-споја се сужава, због чега се напон при коме долази до појаве пробоја смањује. При врло великим концентрацијама, пролазак електрона кроз потенцијалну

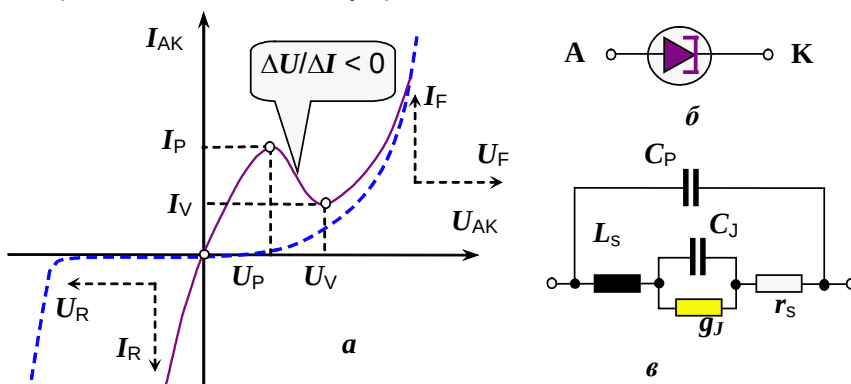
препреку тунел-ефектом омогућује настанак пробоја при врло малом инверзном напону, при чему је измењен облик зависности $I_{AK}(U_{AK})$ у проводној области рада диоде¹⁶, појавом подручја у којем је динамичка отпорност негативна.

Теоријско објашњење ове појаве, засновано на квантној механици, дао је јапански физичар Лео Есаки (Leo Esaki), па се тунел-диода понекад назива Есакијева диода.

1973. године Есаки је добио Нобелову награду за допринос у проучавању тунел-ефекта у полупроводницима



Изглед U - I карактеристике, стандардизоване ознаке карактеристичних параметара и њихови симболи су приказани на слици 3.19.



Слика 3.19. U - I карактеристика, симбол и еквивалентно коло тунел-диоде

При поларизацији у инверзном смеру, као и при малим позитивним вредностима напона U_{AK} , тунел-диода има малу унутрашњу отпорност. При већим позитивним напонима U - I карактеристика се поклапа са карактеристиком обичне диоде. Између ове две области постоји подручје негативне динамичке отпорности које ограничавају две тачке екстремума, један максимум (врх) и један минимум (дол, седло).

Концентрација примеса код тунел-диоде је за више од три реда величине већа од концентрације код обичних диода па је Ценеров напон практично једнак нули. Напон тачке врха U_P је од 50 mV, код германијумских диода, до 0,5 V код тунел-диоде од галијум-арсенида. Напон тачке дола (U_V) је од 300 mV (Ge) до 1.1 V (GaAs). Зависно од конструкције, струја тачке врха I_P може бити од 10 μ A до 10 A. Обично се настоји да однос струје I_P и струје тачке дола I_V буде што је могуће већи. Посебну врсту тунел-диоде представља противсмерна (инверзна) диода (*unitunnel diode*, *backward diode*), код које тунел-ефект настаје при инверзној поларизацији. Такве диоде се одликују оштријим коленом карактеристике у проводној области него што је то случај код обичних диода.

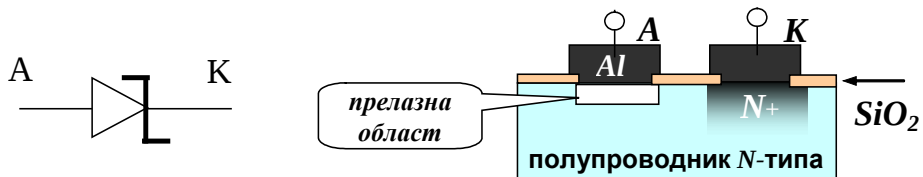
¹⁶ Карактеристика тунел-диоде одговара карактеристици отпорника контролисаног напонем.

Еквивалентно коло тунел-диоде садржи пет елемената (слика 3.19.в). Калем L_S представља еквивалентну редну индуктивност која се мора узети у обзир при високим учестаностима. Отпорник r_s представља укупну еквивалентну редну отпорност полупроводничког материјала и контаката, а кондензатор C_J капацитивност PN-споја. Негативна проводност g_J делује паралелно са капацитивношћу споја, а одређена је нагибом тангенте на карактеристику тунел-диоде у области између екстремума. Поред тога постоји и расипна (паралелна) капацитивност C_P . Типичне вредности су $L_S = 3 \text{ nH}$, $r_s = 2 \text{ } \Omega$, $C_J = 10 \text{ pF}$ и $-g_J = 30 \text{ mS}$.

Својство негативне отпорности користи се за остваривање осцилаторних кола, појачавача и брзих прекидача. Предности тунел-диода у односу на транзисторе су: велика брзина рада (пролаз електрона кроз потенцијалну баријеру процесом тунеловања одвија се брзином светлости), низак ниво шума, способност рада на вишим температурама, отпорност на нуклеарна зрачења, мале димензије.

3.7. ШОТКИ-ДИОДЕ

Усмерачко својство споја метала и полупроводника N-типа користи се за израду диода које се одликују великом брзином рада у прекидачком режиму. Објашњење саме појаве је дао немачки физичар Шотки (*Walter Schottky*, 1938), по коме је и ова врста диода добила назив. На слици 3.20 приказани су графички симбол и структура Шотки-диода. Метална катода је у споју са силицијумским полупроводником N-типа са веома великом концентрацијом примеса (N^+). Подручје високе концентрације примеса, која се одликује великом проводношћу, прелази у област са малом концентрацијом примеса која је у контакту са другом металном електродом (Al) која представља аноду. На месту додира алуминијумске електроде и кристала N-типа образује се прелазна област (потенцијална препрека) као код PN-споја. Да би се постигло да други спој (катода) нема усмерачко дејство, концентрација примеса у кристалу на том месту је веома велика.

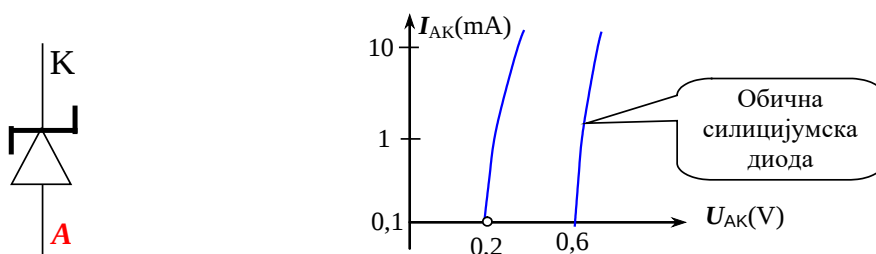


Слика 3.20. Симбол и конструкција Шотки-диода

При директној поларизацији диода (када се анода налази на вишем потенцијалу од катоде), висина потенцијалне препреке се смањује и електрони прелазе из полупроводника у метал. При инверзној поларизацији потенцијална препрека расте и електрони не могу да прелазе из полупроводника у метал. У оба случаја само електрони учествују у процесу провођења. То значи да при раду у прекидачком режиму нема ефеката нагомилавања споредних носилаца слободног наелектрисања па је време растеређивања t_s једнако нули. Време искључивања се своди на време опоравка t_r , чије трајање зависи од капацитивности прелазне области

(просторног наелектрисања), које је у овом случају веће него код диоде са PN-спојем, са постепеним профилем промене концентрација донорских и акцепторских примеса. Време укључивања је мало, јер је и дифузиона капацитивност мала. У целини посматрано, диода са површинском баријером је као елемент само нешто бржа од диода на бази PN-споја. Међутим, дигитална (логичка кола) са транзисторима у спрези са Шотки-диодама знатно су бржа од одговарајућих кола за обичним транзисторима.

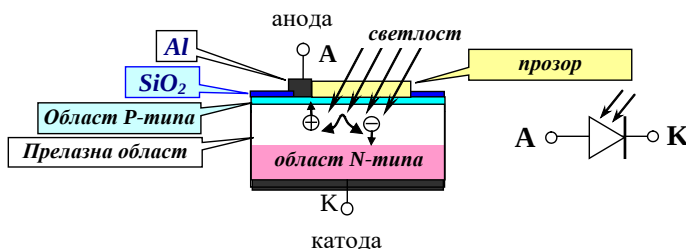
У начелу, израда Шотки-диоде је једноставнија, јер не захтева формирање P-области. Пад напона на директно поларисаној диоди је мањи, а инверзна струја засићења већа него у случају диоде са PN-спојем. При струји од 100 А напон директно поларисане снажне Шотки-диоде је око 0,6 V (што је 2,5 пута мање од напона одговарајуће диоде са PN-спојем).



Слика 3.21. Карактеристика Шотки-диоде

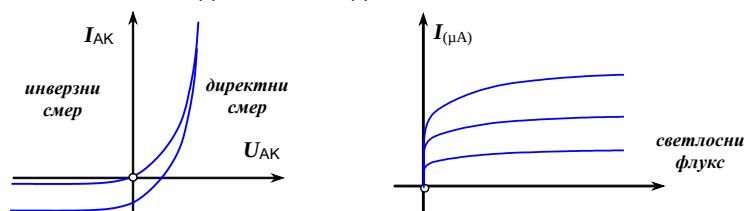
3.8. ФОТООСЕТЉИВЕ ДИОДЕ

Фото-диода (фотоосетљива диода) је електронски елемент који светлосну енергију претвара у електричну. Слободни носиоци наелектрисања, који се фотоелектричним ефектом, при деловању светлости (зрачења) на валентне електроне атома кристалне решетке полупроводника, стварају у прелазној области PN-споја, подвргнути су деловању јаког електричног поља које потиче од некомпензованих наелектрисања донорских и акцепторских атома (јона), тако да шупљине прелазе у подручје полупроводника P-типа, а електрони у подручје полупроводника N-типа. Уколико је електрично коло затворено, вишак шупљина и електрона образоваће струју (односно компоненту струје) која кроз диоду има смер од катоде ка аноди.



Слика 3.22. Структура и графички симбол фотоосетљиве диоде

При директној поларизацији фото-диоде, промена струје је слабо приметна у поређењу са струјом I_F . Међутим, када је диода поларисана у инверзном смеру, релативна промена струје I_R може бити веома значајна. Однос отпорности инверзно поларисане фото-диоде када је она у мраку и када је осветљена може да износи и до 10^6 .



Слика 3.23. U - I карактеристика фото-диоде

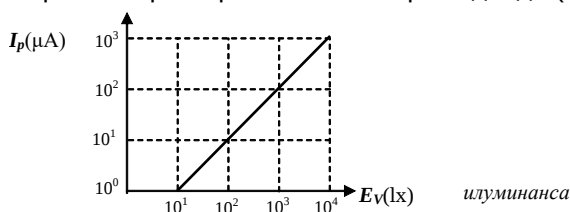
Да би се смањила вероватноћа рекомбиновања електрона и шупљина, полупроводник који се излаже зрачењу израђује се као веома танак слој (слика 3.22). При изради фото-диода се настоји да инверзна струја засићења, која представља “струју мрака”, буде што је могуће мања, да би се одговарајућа компонента у струји фото -диоде смањила.

$$I_{AK} = -I_f + I_s \left(e^{\frac{U_{AK}}{U_T}} - 1 \right) . \quad (3.20)$$

Код фотоосетљивих PIN-диода фотоелектрични ефекат се одвија првенствено у прелазној области, која је у “сендвичу” између P^+ и N^+ области. Капацитивност споја је у овом случају занемарљива па се на овај начин постижу изванредна динамичка својства. Време одзива је краће од једне наносекунде.



Зависност фото-струје од јачине светлости је линеарна, али је њен интензитет веома мали, мањи од милиампера. Повећањем површине споја повећава се и фото-струја, али се повећава и капацитивност. У табели 3.4 су дате основне електричне карактеристике неких фото-диода (*Siemens*).

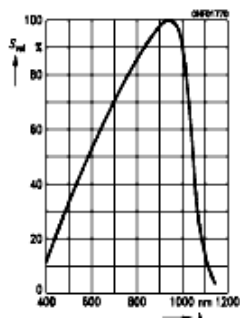


Слика 3.24. Карактеристика фотоосетљиве диоде BPY12

Тип		BPX 65	BPY12	BPW32
Осетљивост	nA/lx	≥ 7	≥ 100	≥ 7
Доминантна таласна дужина	λ (nm)	850	850	800
Време успона	t_r (ns)	1	2 000	1 300
Струја мрака ($U_R = 20$ V)	I_F (nA)	$1(\leq 5)$	$100(\leq 1\,000)$	$0.005(\leq 0.020)$
Капацитивност ($U_R = 0$ V)	C_0 (pF)	15	140	120

Табела 3.4. Карактеристични параметри фото-диода

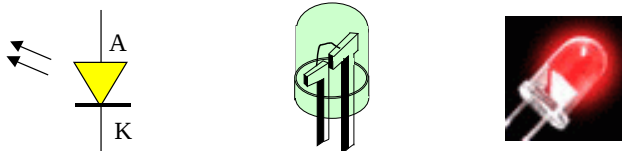
Осетљивост фотодиоде зависи од таласне дужине светлости. Спектрална карактеристика фото-диоде, која приказује зависност фото-струје од таласне дужине светлости при сталном интензитету, зависи од врсте материјала. Поједине диоде могу реаговати на инфрацрвену светлост (детекција топлих објеката) или на видљиву светлост.



Слика 3.25. Спектрална карактеристика фотоосетљиве диоде ВРУ12

3.9. ФОТОЕМИТУЈУЋЕ ДИОДЕ

Приликом рекомбинације електрона и шупљине у полупроводнику “вишак” енергије се ослобађа у виду зрачења¹⁷. Фотолуминисцентна¹⁸ диода емитује светлост¹⁹ када кроз њу пролази струја у директном смеру. Таласна дужина емитоване светлости зависи од вредности енергијског процепа полупроводничког материјала, док је интензитет светлосног зрачења²⁰ сразмеран интензитету струје кроз диоду.



Слика 3.26. Фотоемитирујућа диода

Зависно од употребљеног материјала емитује се светлост различитих таласних дужина, односно различитих боја (плава, зелена, жута, наранџаста, јарко црвена и црвена). Првенствено се користе једињења на бази галијума са различитим додацима. Због већег енергијског процепа у односу на силицијум, овакве диоде имају већи пад напона при директној поларизацији од “обичних” диода (у границама од 1,2 V до 3,0 V при струји од 20 mA). Ефикасност претварања електричне енергије у светлосну која се преноси у

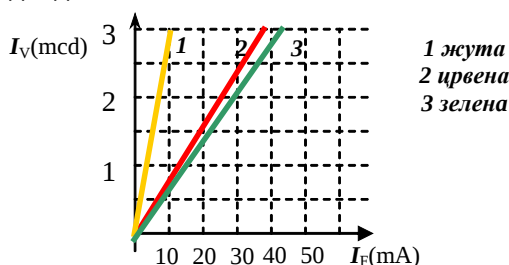
¹⁷ Принудна емисија светлости, електролуминисценција.

¹⁸ Фотолуминисценција је појава луминисценције изазвана електромагнетским зрачењем које припада оптичком спектру (инфрацрвено, видљиво и ултраљубичасто зрачење).

¹⁹ Светлећа диода, диода која зрачи светлост (*light-emitting diode* - LED, *Luminiszenz-Dioden*).

²⁰ Светлосна јачина, *luminous intensity*.

околни простор зависи од врсте материјала (односно боје, слика 3.27) и конструкције саме диоде.



Слика 3.27. Емисионе карактеристике фотоемитијућих диода

Најширу примену имају извори који дају зрачење различитих таласних дужина, фаза и правца простирања у неком опсегу (некохерентно зрачење). Користе се као извори светлости у својству светлосних показивача (*LED lamp*), јер имају знатно дужи век трајања него класичне сијалице са ужареним влакном, или као предајници светлости при преносу података кроз оптичке каблове. Посебну категорију претстављају диоде које се примењују као извори кохерентног²¹ зрачења у полупроводничким ласерима.

Опште карактеристике фотоемитијућих диода су:

- ◆ највећа стална директна струја, I_F (mA);
- ◆ јачина светлости при одређеној јачини директне струје, I_V (mcd);
- ◆ таласна дужина светлости при максималном зрачењу, λ_p (nm);
- ◆ спектрална ширина зрачења $\Delta\lambda$ (nm);
- ◆ угаона расподела зрачења;
- ◆ напон при одређеној јачини директне струје, U_F (V);
- ◆ највећи инверзни напон, U_R (V), и одговарајућа инверзна струја I_R (μ A).

У табели 3.5 су дате основне електричне карактеристике типичних индикаторских диода.

боја		црвена	јаркоцрвена	жута	зелена
материјал		GaAsP	GaAsP	GaAsP	GaP
доминантна таласна дужина	λ (nm)	665 ± 15	645 ± 15	590 ± 10	560 ± 15
највећа директна струја	I_F (mA)	75	45	45	45
напон ($I_F = 20$ mA)	U_F (V)	1,6	2,4	2,4	2,4
светлосна јачина ($I_F = 20$ mA)	I_V (mcd)	0,3 до 8	0,3 до 125	0,6 до 80	0,6 до 200

Табела 3.5. Карактеристични параметри фотоемитијућих диода

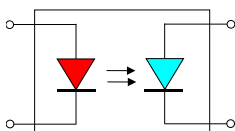
За диоде које се примењују за пренос података кроз оптичке каблове, значајне параметре представљају времена одзива при укључењу (t_r) и искључењу (t_f). По правилу, извори зрачења већих таласних дужина имају

²¹ (лат. *cohaerentia*, повезаност, спојеност).

бржи одзив. Времена одзива инфрацрвених диода ($\lambda_p \approx 800 \text{ nm}$) намењених за ову сврху су реда величине једне наносекунде.

Већа светлосна снага се постиже импулсном побудом. На пример, побудом инфрацрвене диоде ME7021 импулсима струје јачине 6 А, ширине 1 μs , при односу сигнал/пауза од 0,1 % добија се излазна снага зрачења која је 25 пута већа од снаге која се може добити побудом највећом дозвољеном сталном струјом за ту диоду, од 100 mA.

Фотоемитијућа и фотоосетљива диода у заједничком кућишту образују оптоелектронски спрежни елемент (*optoelectronic coupler*) који омогућује повезивање електронских кола без непосредне електричне (галванске) спреге (оптоизолатор). На овај начин преносе се сигнали, али и остварује напајање једноставних кола мале потрошње на секундарној страни (*photovoltaic coupler*).



Слика 3.28. Елемент са оптичком спрегом

3.10. АНАЛИЗА ДИОДНИХ КОЛА

Зависност између струје I_{AK} кроз диоду и напона анода-катода, U_{AK} , је експоненцијалног карактера²²:

$$I_{AK} \approx I_s e^{\frac{U_{AK}}{U_T}}; U \gg U_T, \quad (3.21)$$

па проблем њиховог одређивања у колу, у којем су познате вредности осталих параметара, није могуће егзактно решити аналитички. Због тога се при прорачуну диодних кола прибегава примени графичке или приближне аналитичке методе.

Графички метод анализе је једноставан али, због велике стрмине $I(U)$ карактеристике, недовољно прецизан. Мала одступања при цртању радне праве доводе до релативно великих одступања вредности струје I , а самим тим и промене положаја радне тачке на дијаграму.

Са становишта једноставности анализе, најпогодније је ако се диода може сматрати савршеном. У том случају је напон на диоди поларисаној у проводном смеру једнак нули (занемарљиво мали), а сама диода представља кратак спој и не утиче на вредности струја у колу у којем се налази. Када је напон на крајевима диоде негативан (катода је на вишем потенцијалу у

²² За референтни смер, уколико није другачије назначено, усваја се смер којем одговара кретање позитивног наелектрисања од аноде, кроз PN-спој, ка катоди ($I=I_{AK}$, $U=U_{AK}$).

односу на аноду) струја кроз диоду је једнака нули (занемарљиво мала). Стање у колу се може представити једначинама:

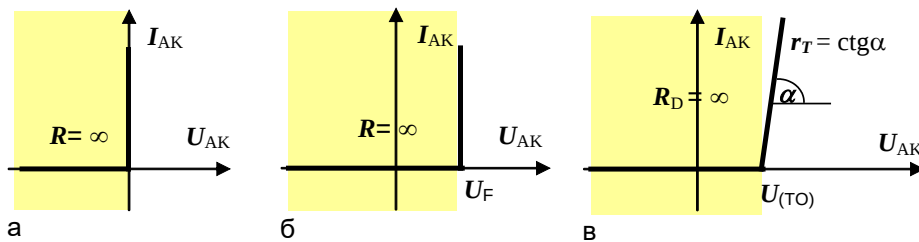
$$U_{AK} = 0 \text{ за } I_{AK} > 0; \quad I_{AK} = 0 \text{ за } U_{AK} \leq 0, \quad (3.22)$$

којима одговара графички приказ на слици 3.29.а. Графички метод анализе се у том случају може заменити аналитичким.

С обзиром да струја кроз директно поларисану диоду може да се занемари када је напон на њеним крајевима мањи од напона прага вођења (приближно 0,2 V за германијумске, односно 0,6 V за силицијумске диоде), диода се може тачније описати једначинама:

$$U_{AK} = U_F \text{ за } I_{AK} > 0; \quad I_{AK} = 0 \text{ за } U_{AK} \leq U_F, \quad (3.23)$$

у којима U_F представља усвојени напон између крајева директно поларисане диоде (слика 3.29.б).

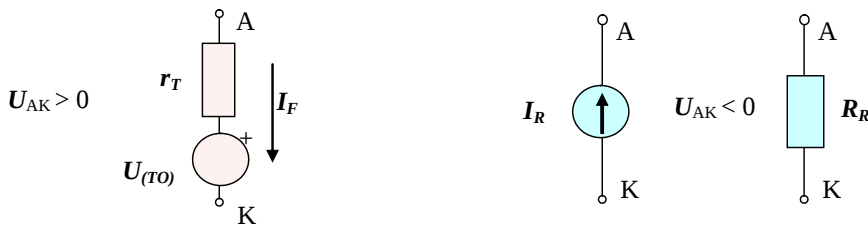


Слика 3.29. Линеаризоване статичке карактеристике диоде

Следећи корак ка повећању тачности прорачуна остварује се узимањем у обзир динамичке проводности диоде при директној поларизацији. Математички модел диоде у том случају има облик:

$$U_{AK} = U_{(TO)} + r_T I_{AK} \text{ за } I_{AK} > 0; \quad I_{AK} = 0 \text{ за } U_{AK} \leq U_{(TO)}, \quad (3.24)$$

где је r_T отпорност нагиба струјно-напонске карактеристике (слика 3.29. в), а $U_{(TO)}$ напон прага.



Слика 3.30. Еквивалентна кола диоде

У случајевима када се струја кроз диоду поларисану у непропусном смеру, I_R , не може да занемари у односу на остале струје у посматраном колу, диода се може моделовати генератором инверзне струје I_R , или инверзном отпорношћу R_R . Еквивалентна кола диоде у проводном и непроводном стању приказана су на слици 3.30. Коришћење оваквих линеаризованих модела омогућује аналитичко решавање једначина које описују посматрано коло. При динамичкој анализи узимају се у обзир и капацитивности диоде при директној, односно инверзној поларизацији.

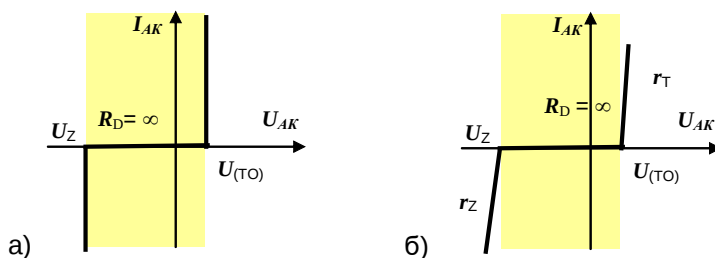
Истоветан приступ примењује се при анализи кола за Ценер-диодима. Инверзно поларисана Ценер-диода у области пробоја се представља еквивалентним колом као и директно поларисана диода, узимајући у обзир и напон прага вођења. У једноставнијем облику, Ценер-диода се моделује једначинама (слика 3.31.а):

$$U_{AK} = \begin{cases} U_{(TO)} & \text{за } I_{AK} > 0 \\ -U_Z & \text{за } I_{AK} < 0 \end{cases} \quad (3.25)$$

Потпунији приказ Ценер-диоде даје статички модел који има облик (слика 3.31.б):

$$U_{AK} = \begin{cases} U_{(TO)} + r_T I_{AK} & \text{за } I_{AK} > 0 \\ -U_Z + r_Z I_{AK} & \text{за } I_{AK} < 0 \end{cases} \quad (3.26)$$

$$I_{AK} = 0 \quad \text{за} \quad -U_Z \leq U_{AK} \leq U_{(TO)} \quad (3.27)$$

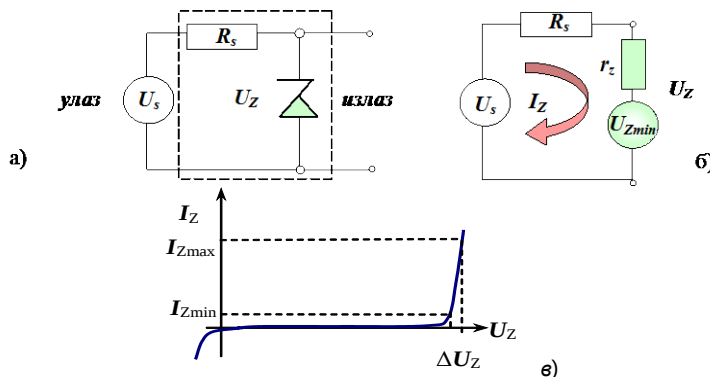


Слика 3.31. Линеаризоване карактеристике Ценер-диоде

На пример, у колу приказаном на слици 3.32.а, вредност излазног напона је једнака радном напону Ценер-диоде, U_Z , за који важи:

$$U_Z = U_{Z0} + r_Z (I_Z - I_{Zmin}), \quad (3.28)$$

где је U_{Z0} напон на крајевима диоде када улазни напон, U_S , има најмању вредност (U_{Smin}), r_Z је инкрементална отпорност диоде у радној области, I_Z струја кроз диоду (радна струја), а I_{Zmin} њена вредност при $U_S = U_{Smin}$.



Слика 3.32. Стабилизација једносмерног напона помоћу Ценер-диоде

Промена излазног напона, ΔU_Z је мања од промене улазног напона ΔU_S , која ју је изазвала, сразмерно односу отпорности r_Z и R_S :

$$\Delta U_Z \cong \frac{r_Z}{r_Z + R_S} \Delta U_S. \quad (3.29)$$

На избор вредности I_{Zmin} утиче заобљеност статичке карактеристике Ценер-диоде при прелазу из области велике унутрашње отпорности у област пробоја. При прорачуну кола обично су на располагању само бројчани подаци које даје произвођач (табела 3.3):

- U_{ZT} , вредност радног напона U_Z при назначеној вредности струје I_{ZT} ;
- r_{ZT} , вредност динамичке отпорности диоде при назначеној вредности струје I_{ZT} .

Усвајањем вредности I_{ZT} за I_{Zmin} омогућује се прорачун кола. Стварна вредност промене напона U_Z мања је од израчунате, јер је инкрементална отпорност диоде, r_Z , у радној области мања од динамичке отпорности диоде на њеном почетку (слика 3.18).

3.11.ЛИТЕРАТУРА

- 1 Словни симболи за полупроводничке компоненте, Општи симболи, Letter symbols for semiconductor devices and integrated microcircuits, Chapter 1: General, IEC-148, 1969.
- 2 Полупроводничке компоненте, Општи део, Термини и дефиниције, Terms and definitions for semiconductor devices, general, IEC 470-0, 1969, JUS N.R1.320, 1979.
- 3 J. Millman, C.Halkias, *Integrated electronics: analog and digital circuits and systems*, McGraw-Hill, 1972, p. 58.
- 4 Ref 3., str. 60.
- 5 Словни симболи за полупроводничке компоненте, Диоде, Letter symbols for semiconductor devices and integrated microcircuits, Chapter III, Low-power signal diodes, IEC 148, 1969, JUS N.R1.351, 1979, 2.3.2.
- 6 Ref. 5, 6.3.1.
- 7 J. Millman, H. Taub, *Pulse, digital and switching waveforms*, McGraw-Hill, 1965, str. 747.
- 8 Standard for Measuring Forward Switching Characteristics of Semiconductor Diodes, JESD286-B, EIA, JEDEC, 2000.
- 9 Ref. 5, 5.3.1.

ПИТАЊА

1. Која је основна подела диода према намени?
2. Нацртати $U-I$ карактеристику и назначити основне параметре полупроводничке диоде. У чему се разликују статичка и динамичка отпорност диоде?
3. Нацртати на истом дијаграму $U-I$ карактеристике германијумске и силицијумске диоде. У чему се разликују карактеристике германијумских и силицијумских диода?
4. Шта је време инверзног опоравка диоде?
5. Који су основни параметри диоде и како зависе од температуре?
6. У којој области статичке $U-I$ карактеристике ради Ценер-диоде у уобичајеним условима?
7. Која су основна својства Шотки-диоде? Нацртати графички симбол Шотки-диоде.
8. Шта је варикап-диоде и где се користи? Нацртати $U-I$ карактеристику и графички симбол варикап-диоде.
9. Шта је тунел-диоде? Нацртати $U-I$ карактеристику, графички симбол и еквивалентно коло тунел-диоде у области негативне отпорности.
10. Нацртати линеаризовану статичку карактеристику диоде ако су познате вредности напона прага $U_{(TO)}$ и отпорности нагиба r_T . Колика је приближна вредност напона прага за силицијумске, а колика за германијумске диоде?
11. Нацртати еквивалентна кола савршене диоде поларисане у проводном и непроводном смеру.
12. Која су основна својства PIN-диоде?
13. Како је дефинисан сачинилац промене напона диоде поларисане у пропусном смеру у зависности од температуре и колика је његова приближна вредност?
14. Како је дефинисан сачинилац промене инверзне струје засићења диоде у зависности од температуре и колика је његова приближна вредност?
15. Нацртати линеаризовану $U-I$ карактеристику и еквивалентна кола Ценер-диоде поларисане у проводном и непроводном смеру.



*Први комерцијални
транзистори*

4.

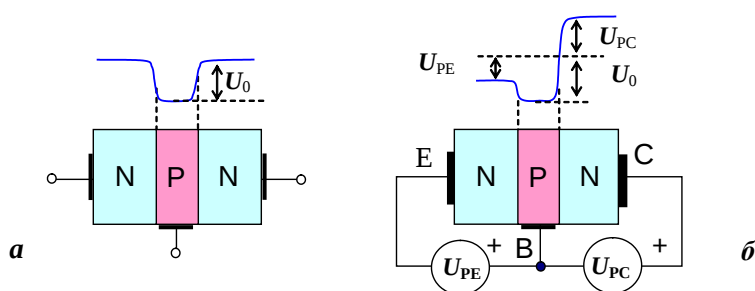
БИПОЛАРНИ ТРАНЗИСТОРИ

Описан је принцип рада транзистора код којих у процесу провођења суделују слободни носиоци наелектрисања оба поларитета. Детаљнији приказ физичког модела транзистора дат је у осмом поглављу.

Дефинисане су основне врсте спреге транзистора као појачавачког елемента. Приказане су статичке карактеристике и дефинисане области рада. Разматрана су ограничења у раду и својства биполарног транзистора. Приказани су поступци поларизације. Описана са еквивалентна кола и дати су општи елементи анализе транзисторских кола.

4.1. ПРИНЦИП РАДА

Структурно, биполарни транзистор је кристал полупроводника у коме су садржана најмање два PN-споја, а на коме су израђена најмање три прикључка за повезивање са другим електронским елементима. Основна својства PN-споја, описана у претходним поглављима, задржана су и у овом случају, при чему постојање заједничке (средишне) области два споја и међусобна близина прелазних подручја са просторним наелектрисањем даје посебна обележја елемента у целини. Могућа су два основна типа биполарних транзистора, зависно од типа полупроводника у средишњој области: NPN и PNP. Ако спољашњи слојеви имају једнака својства у погледу геометрије и концентрације примеса (симетричан спој), када спољашњи прикључци транзистора нису повезани висина потенцијалне препреке, U_0 , једнака је на оба споја. У одсуству поларизације PN-спојева, расподела потенцијала у NPN транзистору има облик приказан на слици 4.1.а [1].



Слика 4.1. Расдела потенцијала у транзистору NPN тип

Ако су, повезивањем са спољашним изворима напона, оба PN-споја поларисана у непропусном (инверзном) смеру, кроз њих протичу само одговарајуће инверзне струје, чији је интензитет мали – транзистор је у непроводном стању (“закочен”).

Ако су извори напона прикључени тако да је један од спојева поларисан у пропусном (директном), а други у непропусном смеру (као што је то приказано на слици 4.1.б, на примеру NPN транзистора), кроз директно поларисани PN-спој успоставља се струја која потиче од дифузије већинских носилаца наелектрисања¹. Директном поларизацијом PN-споја NPN транзистора постиже се “избацивање” (емитовање) електрона из спољашње N-области, односно њихово преношење у средишњу област, која се назива **база** транзистора и обележава латиничним словом **В**. Директно поларисани спој се назива **емиторски спој** (*emitter junction* – J_E), а спољно подручје кристала, које са базом образује PN-спој поларисан у пропусном смеру, назива се **емитор (Е)**.

Слободни носиоци наелектрисања који су из емитора дифузијом доспели у средишњу област, крећу се ка другом PN-споју, рекомбинујући се на том путу са већинским слободним носиоцима наелектрисања у бази. Као мањински слободни носиоци наелектрисања, они пролазе кроз инверзно поларисан PN-спој². При оваквим условима транзистор се, посматран као целина, налази у проводном стању. PN-спој који је поларисан у непропусном смеру назива се колекторски спој (*collector junction* – J_C), а одговарајуће спољно подручје, у коме се сакупљају слободни носиоци наелектрисања који су из емитора доспели у базу, **колектор (С)**.

Струја кроз спољашњи прикључак базе надокнађује “губитак” већинских слободних носилаца наелектрисања у подручју базе, оних који из базе прелазе у емитор, као и оних који се рекомбинују са слободним носиоцима наелектрисања који су у подручје базе доспели из емитора. Ако је дебљина (ширина) слоја базе w_B (најкраће растојање између емиторског и колекторског споја) довољно мала у поређењу са средњом дужином путање коју мањински носиоци наелектрисања у бази пређу пре рекомбинације, највећи део слободних носилаца наелектрисања који су у базу доспели из

¹ Директна поларизација PN-споја смањује висину потенцијалне препреке у прелазном подручју што омогућује дифузију већинских слободних носилаца наелектрисања кроз спој.

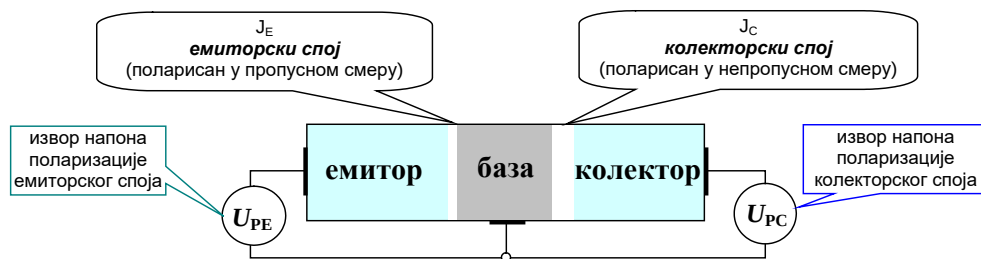
² Електрично поље инверзно поларисаног PN-споја има такав смер да помаже кретање мањинских носилаца кроз спој.

емитора, прелази у колектор. Притом, да би струја која протиче кроз транзистор (између емитора и колектора) била што већа потребно је да буде:

- А** концентрација примеса највећа у области из које се “емитују” слободни носиоци наелектрисања чијим дифузионим кретањем се образује струја кроз транзистор, а најмања у средишњој области;
- Б** ширина w_B средишне области довољно мала³, тако да се само незнатан део слободних носилаца наелектрисања губи услед рекомбинације.

Уколико су ови услови испуњени, може да се занемари део струје кроз директно поларисан спој база-емитор који потиче од дифузионог кретања слободних носилаца наелектрисања који у подручју базе представљају већинске носиоце. С обзиром да је и инверзна струја споја база-колектор врло мала, струја колектора је у том случају незнатно мања од струје емитора. Струја базе, која је једнака разлици струја емитора и колектора, знатно је мања од струје емитора.

Рад PNP транзистора у потпуности је аналоган раду NPN транзистора, осим што је предзнак напона поларизације супротан, већински носиоци наелектрисања у појединим областима су супротног знака у односу на NPN транзистор (носиоци емиторске струје су шупљине уместо електрона). У оба случаја смер струје кроз транзистор одређен је смером деловања извора напона којима се врши поларизација емиторског, U_{PE} , и колекторског споја, U_{PC} (слика 4.2)



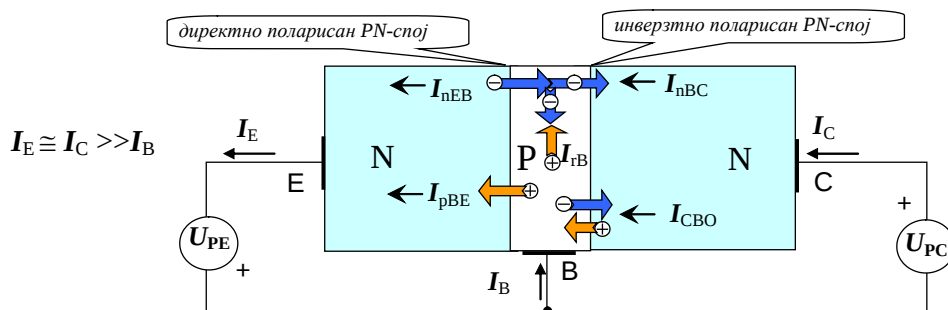
Слика 4.2. Биполарни транзистор

4.2. РАСПОДЕЛА СТРУЈА У БИПОЛАРНОМ ТРАНЗИСТОРУ

При уобичајеном начину рада, спој емитор-база J_E биполарног транзистора поларисан је у пропусном смеру (директно), док је спој колектор-база J_C поларисан у непропусном смеру (инверзно). У NPN транзистору (слика 4.3), кроз директно поларисан спој база-емитор дифузијом пролазе већински носиоци наелектрисања: електрони из емитора (N-тип

³ Ред величине (дебљине) слојева полупроводника је, зависно од примене, реда величине од 0,1 μm до 10 μm .

полупроводника) и шупљине из базе (P-тип полупроводника) образујући струју емитора I_E .



Слика 4.3. Расподела струја у транзистору NPN типа

Пошто је спој база-колектор поларисан инверзно, електрони који су из емитора прошли кроз базу, као мањински носиоци наелектрисања, бивају “провучени” кроз спој база-колектор дејством прикљученог спољашњег извора напона U_{CB} . Осим тога, кроз инверзно поларисан спој колектор-база J_C пролазе, и када је емиторско коло отворено, мањински носиоци наелектрисања - електрони из базе, као и шупљине из колектора, образујући инверзну струју⁴ колекторског споја I_{CBO} ⁵.

Према назначеним физичким смеровима, емиторска струја I_E је једнака збиру струје базе I_B и струје колектора I_C :

$$I_E = I_C + I_B, \quad (4.1)$$

Струју емитора I_E образују већински слободни носиоци наелектрисања у области базе и емитора који пролазе кроз директно поларисан спој база-емитор: електрони који из емитора прелазе у базу, и шупљине које из базе прелазе у емитор.

Струју колектора I_C образују:

- електрони који су из емитора прошли кроз базу и као мањински носиоци наелектрисања пролазе кроз инверзно поларисан спој база-колектор, и
- мањински носиоци наелектрисања у области базе, односно колектора, који кроз инверзно поларисан спој колектор-база пролазе и када је емиторско коло отворено (интензитет ове струје веома мало зависи од вредности колекторског напона, јер се може сматрати да при инверзној поларизацији јачина поља у прелазној области просторног наелектрисања споја незнатно утиче на интензитет струје кроз спој).

⁴ Инверзна струја засићења (reverse leakage current).

⁵ Индекси “CB” означавају да ова струја тече кроз колектор и базу, а индекс “O” означава да је трећа електрода (емитор) отворена (open). Струја кроз емитор једнака је нули ($I_E=0$). Ознака I_{CBO} прихваћена је међународним стандардом IEC 148 (1969). У литератури старијег датума користиле су се ознаке I_{CO} и I_{C0} .

Струју базе I_B образују три компоненте: струја шупљина које из базе прелазе у емитор, струја рекомбинације шупљина у бази са електронима приспелим из емитора, и инверзна струја колекторског споја.

Струја базе I_B је утолико мања уколико је струја колектора I_C по вредности ближа струји емитора I_E . То значи да део емиторске струје која потиче од кретања шупљина из базе у емитор, треба да буде што мањи у поређењу са делом који потиче од кретања електрона, односно, као што је већ истакнуто, да концентрација примеса у емитору буде много већа него у бази (услов **A**). Да би утицај рекомбинације електрона у бази био што мањи потребно је да време боравка слободних носилаца наелектрисања у бази (на њиховом путу од емиторског до колекторског споја) буде што краће, како би се смањила вероватноћа рекомбинације. Другим речима, потребно је да дебљина слоја базе, w_B , буде што је могуће мања (услов **B**).

Однос струја у биполарном транзистору се може описати једначином:

$$I_C = \alpha I_E + I_{CBO}, \quad (4.2)$$

у којој сачинилац α представља својство конкретног транзистора. Овај параметар показује однос струје колектора и струје емитора када се занемари инверзна струја засићења колекторског споја I_{CBO} , и назива се **појачање струје од емитора до колектора**⁶:

$$\alpha = \frac{I_C - I_{CBO}}{I_E} \cong \frac{I_C}{I_E}. \quad (4.3)$$

Вредност појачања α је мања од јединице, а обично је у опсегу од 0,95 до 0,995.

Зависност струје колектора I_C од струје базе I_B је одређена изразом:

$$I_C = \beta I_B + (\beta + 1)I_{CBO}. \quad (4.4)$$

Сачиниоци β и α повезани су једначином:

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}, \quad (4.5)$$

Величина β , која показује однос струје колектора и струје базе када се занемари инверзна струја засићења колекторског споја I_{CBO} , назива се **појачање струје од базе до колектора** транзистора:

$$\beta = \frac{I_C - I_{CBO}}{I_B + I_{CBO}} \cong \frac{I_C}{I_B}, \quad (4.6)$$

Са становишта примене, параметар β је најзначајнија карактеристика транзистора као електронског елемента. Уобичајене вредности су у опсегу од 20 до 600.

Струја емитора I_E је једнака:

⁶ У литератури се користе и називи: статички коефицијент појачања струје (*large-signal current gain*) транзистора, односно фактор струјног појачања (*current amplification factor*).

$$I_E = (\beta + 1)(I_B + I_{CBO}). \quad (4.7)$$

Израз за струју колектора се може представити у облику:

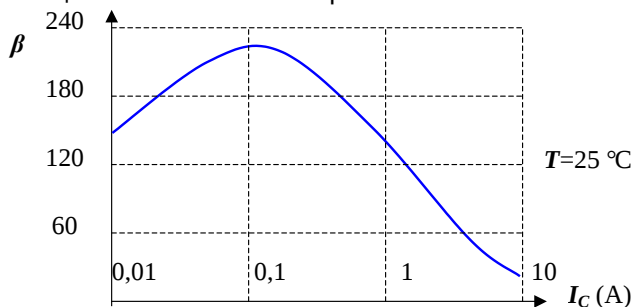
$$I_C = \beta I_B + I_{CEO}. \quad (4.8)$$

где је I_{CEO} струја кроз транзистор када је база отворена⁷:

$$I_{CEO} = (\beta + 1)I_{CBO}, \quad (4.9)$$

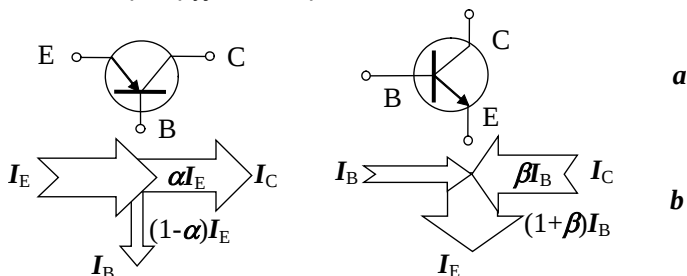
На слици 4.4 приказан је дијаграм вредности појачања струје β силицијумског NPN транзистора 2N3055 (Еи) у зависности од вредности струје колектора [2]. Вредност β расте са повећањем температуре.

Процес провођења струје кроз биполарни транзистор се заснива на кретању већинских носилаца наелектрисања из подручја емитора, који их “одашилге”, кроз подручје базе, до колектора, који их “сакупља”. Посматран споља, као “црна кутија”, биполарни транзистор се, при одговарајућој поларизацији спојева, одликује својством појачања струје. Сам процес провођења струје се одвија као да сваки (већински) слободни носилац наелектрисања који прође кроз спој база-емитор “повлачи” за собом β слободних носилаца из области колектора



Слика 4.4. Зависност појачања струје β од струје I_C

Графички симбол и односи између струја PNP и NPN транзистора су приказани на слици 4.5. Стрелица на графичком симболу транзистора показује физички смер струје емитора.



Слика 4.5. Физички смерови струја биполарних транзистора

⁷ Индекси “CE” означавају да струја тече кроз колектор и емитор, а индекс “O” означава да је трећа електрода (база) отворена (тј. $I_B=0$).

Електрична својства транзистора се описују на три начина:

- ♦ графички, **дијаграмима** који као променљиве приказују однос две изабране величине, при чему друге две величине представљају константе или параметре;
- ♦ графички, **еквивалентном шемом** која приказује транзистор као четворопол;
- ♦ **аналитички**, математичком представом помоћу система једначина.

У начелу, први метод се користи за анализу рада транзистора при сразмерно великим улазним сигналимa (*large-signal response*), други за анализу рада транзисторских кола када се величине напона и струја мало мењају у односу на неке унапред одређене (задате) вредности (*small-signal response*), а трећи као математичка основа за тумачење еквивалентних шема и показатеља који из њих проистичу.

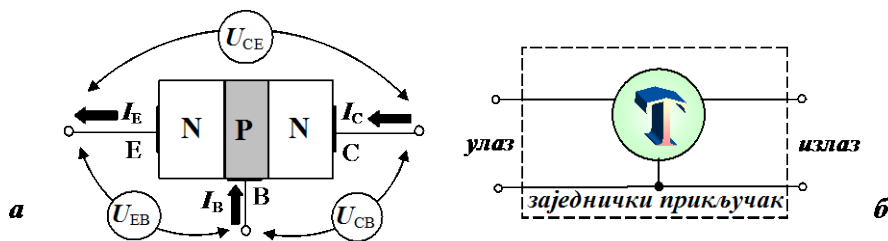
4.3. ПОЈАЧАВАЧКА СВОЈСТВА БИПОЛАРНИХ ТРАНЗИСТОРА

Транзистор као елемент са три прикључка (емитор, колектор и база) описују три струје и три напона (слика 4.6.а). Из услова равнотеже напона и струја у колу:

$$I_E = I_C + I_B, \quad (4.10)$$

$$U_{EB} + U_{CE} - U_{CB} = 0, \quad (4.11)$$

слиеди да само четири од ових шест величина могу да представљају независне променљиве у математичком моделу транзистора.

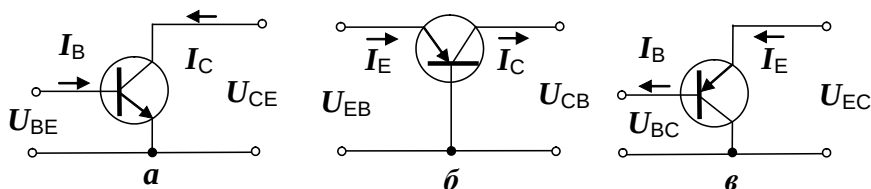


Слика 4.6. Биполарни транзистор као елемент са три прикључка и два приступа

Транзистор се повезује тако да једна од електрода представља улазни, друга излазни прикључак, а трећа је заједничка улазном и излазном колу (слика 4.6.б). У односу на заједнички прикључак, као референтну тачку, одређују се сви напони. Према томе који је прикључак заједнички (референтни) разликују се три спреге (споја) транзистора (слика 4.7):

- заједнички емитор (*common emitter - CE*),
- заједничка база (*common base - CB*) и

в) заједнички колектор (*common collector - CC*).

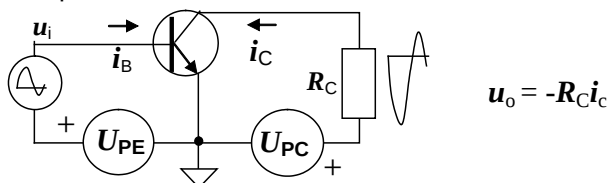


Слика 4.7. Спојеви транзистора

За сваки од три облика спреге транзистора потребно је познавати везу између напона и струја у улазном и излазном колу. Транзистор у споју са заједничким емитором, на пример (слика 4.7.а), описан је математичким моделом који се у општем случају може представити једначином:

$$f(I_B, I_C, U_{BE}, U_{CE}) = 0. \quad (4.12)$$

Овај спој има најширу примену у појачавачким колима. Улазна (управљачка) величина⁸ је струја базе, а излазна (управљана) величина⁹ струја колектора. На основу једначине 4.8 следи да мале промене улазне доводе до много већих сразмерних промена излазне величине. Вредност излазне струје I_C не зависи од вредности излазног напона U_{CE} . Ако се струја I_{CBO} занемари, величина дефинисана као појачање струје од базе до емитора, β , представља појачање струје појачавача са транзистором у споју са заједничким емитором.



Слика 4.8. Појачавач са транзистором у споју са заједничким емитором

На слици 4.8 је приказано основно коло појачавача у споју са заједничким емитором. Извори сталног (једносмерног) напона U_{PE} и U_{PC} обезбеђују одговарајуће напоне поларизације PN-спојева којима се транзистор доводи у стање у којем је однос струје базе и струје емитора одређен једначином 4.8. Сигнал који треба појачати, представљен напонем u_i , сабира се са сталним (једносмерним) напонем поларизације емиторског споја U_{PE} . Напон споја база емитор једнак је:

$$u_{BE} = U_{PE} + u_i. \quad (4.13)$$

Промене напона база-емитор доводе до промена струје базе i_B , које се одражавају на вредност струје колектора i_C . Струја колектора састоји се од сталне (једносмерне) компоненте, I_C , која је одређена вредностима напона

⁸ Побуда (*stimulus*).

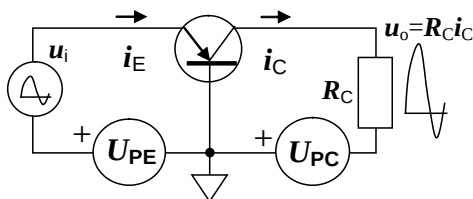
⁹ Одзив (*response*).

поларизације и отпорности R_C у колу колектора, и променљивог дела, i_c , који зависи од вредности напона u_i

$$i_C = I_C + i_c. \quad (4.14)$$

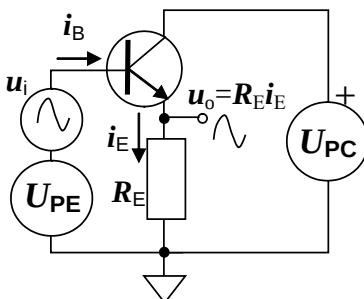
Изазни сигнал u_o представља напон који на отпорнику R_C ствара променљива компонента струје колектора i_c .

$$u_o = -R_C i_c. \quad (4.15)$$



Слика 4.9. Појачавач са транзистором у споју са заједничком базом

Основно коло појачавача у споју са заједничком базом је приказано на слици 4.9. Однос излазне и улазне струје (појачање струје) у овом споју је мањи од један. Међутим, мале промене улазног напона u_{EB} доводе до сразмерно великих промена улазне, а тиме и излазне струје. Вредност излазне струје i_c не зависи од вредности излазног напона u_{CB} - транзистор делује као напонски управљан извор струје (транскондуктансни појачавач) чија је унутрашња отпорност веома велика, што омогућује остваривање појачања напона.



Слика 4.10. Појачавач са транзистором у споју са заједничким колектором

За транзистор у споју са заједничким¹⁰ колектором улазна величина је напон базе, а излазна напон емитора (слика 4.10).

$$u_O = u_E = u_B - u_{BE} = U_{PE} + u_i - u_{BE}. \quad (4.16)$$

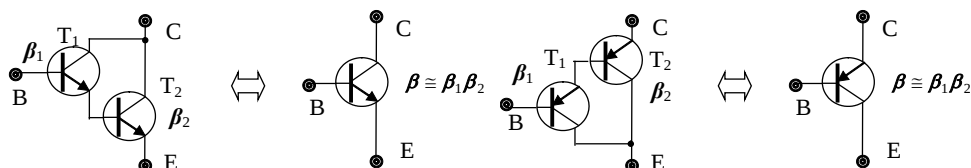
Промене напона база-емитор у зависности од промена струје базе (односно емитора) су мале. Ако се као излазни сигнал u_o узима променљива компонента напона емитора, биће:

$$u_o = u_e = u_b = u_i. \quad (4.17)$$

¹⁰ Назив "заједнички" се у овом случају односи на прикључак транзистора чији се потенцијал не мења у зависности од улазног сигнала.

Излазни напон прати улазни (*emitter follower*), при чему струју кроз потошач (отпорник R_E) обезбеђује извор U_{PC} којим је остварена поларизација колекторског споја. Појачање струје транзистора у споју са заједничким колектором је практично једнако појачању струје од базе до емитора транзистора.

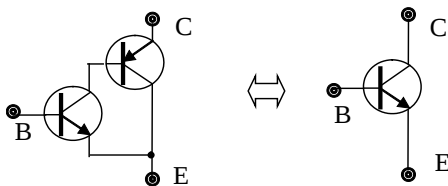
Повезивањем (спрезањем) више транзистора превазилазе се нека ограничења која постоје у колу са једним транзистором. Тако, на пример, одговарајућим повезивањем два транзистора истог типа на начин приказан на слици 4.11, добија се еквивалентни транзистор чије је појачање струје одређено производом појачања струје појединачних транзистора.



Слика 4.11. Дарлингтонов спој транзистора

$$\beta \cong \beta_1 \beta_2 \quad (4.18)$$

Оваква спрега два транзистора истог типа се назива Дарлингтонов (*Darlington*) пар транзистора [3]. Еквивалентан транзистор великог појачања може се образовати и коришћењем два транзистора различитог типа (*Sziklai*-ев спој [4]).



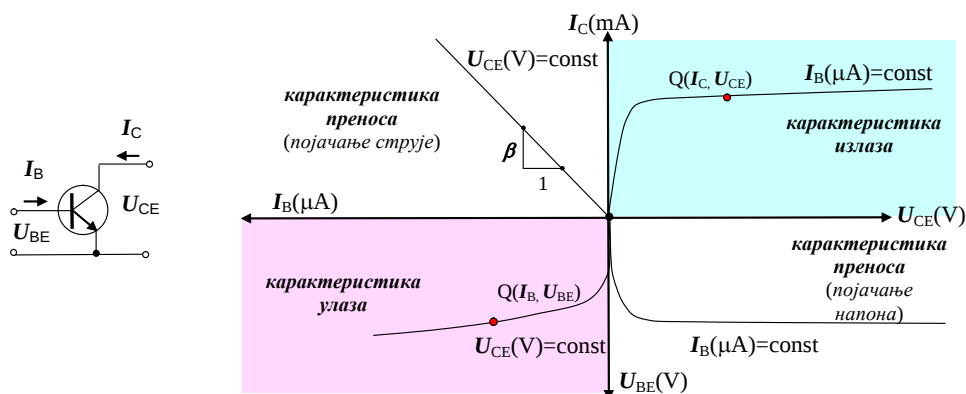
Слика 4.12. Комплементарни пар транзистора

4.4. СТАТИЧКЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ

У графичком облику, модел транзистора представља дводимензионални приказ односа између две изабране променљиве при чему се остале две узимају као константе (параметри). Под називом “статичке карактеристике транзистора” подразумева се графички приказ зависности између улазних и излазних струја и напона транзистора у одговарајућем споју. Стање система у одређеним условима представљено је мирном радном тачком Q (*quiescent point*). Постоји више могућности избора две променљиве величине чији се однос приказује са трећом величином као сталним или променљивим параметром у том приказу. У начелу, за параметар се узима она величина коју је лако задати и одржавати сталном приликом мерења. У пракси се првенствено користе фамилије карактеристика

које омогућују лако сагледавање понашања транзистора у уобичајеним условима рада.

На слици 4.13 су приказане основне статичке карактеристике транзистора у споју заједничког емитора. Дијаграм $I_B=f(U_{BE})[U_{CE}=\text{const}]$ представља карактеристику улаза, а дијаграм $I_C=f(U_{CE})[I_B=\text{const}]$ представља карактеристику излаза. Односи између улазних и излазних величина приказани су карактеристиком преноса напона, $U_C=f(U_{BE}) [I_B=\text{const}]$, и карактеристиком преноса струје, $I_C=f(I_B) [U_{CE}=\text{const}]$.



Слика 4.13. Статичке карактеристике транзистора у споју заједничког емитора

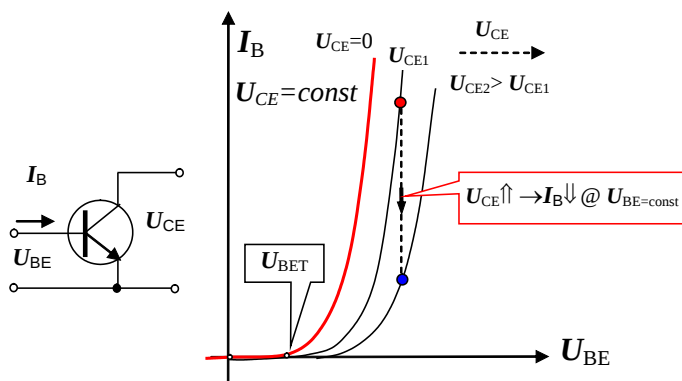
Статичке карактеристике одражавају својства транзистора одређене његовом конструкцијом, односно начином израде, концентрацијама примеса и геометријом појединих области. Оне представљају спољна обележја која целовито описују својства транзистора посматраног као “црна кутија”. За анализу одзива транзистора на побудни сигнал у одређеном споју довољно је познавати две фамилије карактеристика које обухватају све четири улазне и излазне величине транзистора. У спецификацијама произвођача обично се наводе карактеристике транзистора са спој са заједничким емитором: улазна I - U карактеристика, са излазним напонем U_{CE} као параметром. Карактеристика са улазном струјом I_B као параметром. Карактеристике за спрегу са заједничким колектором се обично не приказују, а често ни карактеристике споја са заједничком базом. Из статичких карактеристика за спој са заједничким емитором се могу извести карактеристике за остале две спрегу, па се карактеристике $I_B(U_{BE})$ и $I_C(U_{CE})$ могу сматрати основним.

4.4.1. Карактеристике улаза

У начелу, за сваки облик спрегу транзистора могу да се нацртају две фамилије улазних карактеристика, у зависности од тога која се излазна величина (напон или струја) посматра као параметар. У свим облицима спрегу транзистора база представља један од улазних прикључака, па је, са становишта примене, карактеристика емиторског споја од највеће важности.

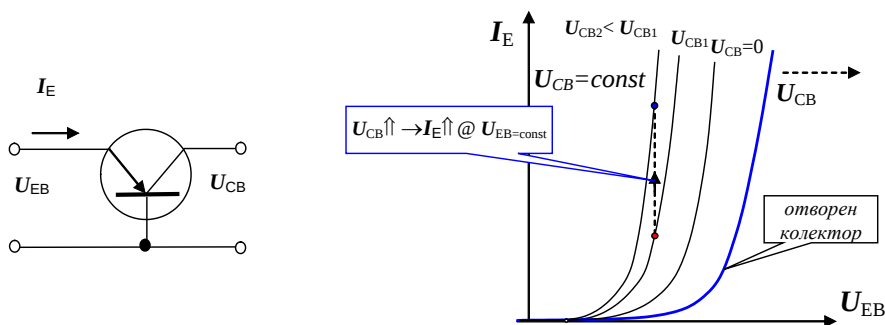
На слици 4.14. је приказана фамилија улазних карактеристика PNP транзистора у споју са заједничким емитором, за различите вредности напона колектора. При $U_{CE} > 0$, услед протицања инверзне струје засићења колекторског споја I_{CBO} , напон $U_{BE}(0)$ је већи од нуле [5]. Улазна

карактеристика транзистора при краткоспојеном излазу ($U_{CE}=0$) представља карактеристику диоде поларисане у пропусном смеру. Вредност улазног напона испод које је струја занемарљиво мала је **напон прага**¹¹, U_{BET} . Обично се усваја да је код германијумских транзистора у оваком споју напон прага од 0,1 V до 0,2 V, а код силицијумских од 0,5 V до 0,6 V [6].



Слика 4.14. Улазне карактеристике транзистора у споју са заједничким емитором

На слици 4.15 је приказана улазна карактеристика PNP транзистора у споју са заједничком базом, при поларизацији емиторског споја у пропусном смеру, за различите вредности напона колектора [7]. При отвореном колектору крива $I_E(U_{EB})$ представља карактеристику директно поларисане диоде. Код германијумских транзистора у оваком споју напон прага је око 0,1 V, а код силицијумских око 0,5 V [8].



Слика 4.15. Улазне карактеристике транзистора

У оба случаја је уочљиво померање карактеристичне криве са променом вредности напона U_{CE} и при сталној вредности напона између базе и емитора. Транзистор се као елемент са два приступа понаша билатерално, промене које се дешавају са његове излазне стране у знатној мери утичу на улазне величине¹².

¹¹ У литератури се ова величина назива и **напон колена** (threshold, cutin, offset voltage, V_T).

¹² Овај ефекат је мање изражен код електронских цеви.

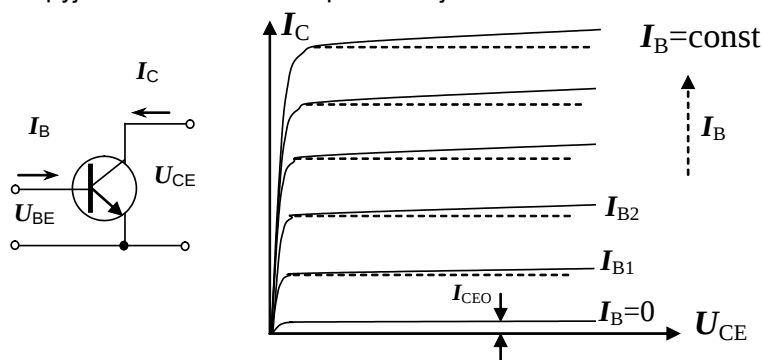
При повећању напона инверзне поларизације колекторског споја шири се прелазна област у којој нису компензована наелектрисања донорских, односно акцепторских јона (област просторног наелектрисања). С обзиром на то да је концентрација примеса у бази значајно мања него у колектору, ширење прелазне области је знатно више изражено у подручју базе него у подручју колектора. Оно доводи до смањења ефективне ширине базе w_B и смањења струје рекомбинације у бази, односно смањења струје базе I_B и при сталној вредности напона база-емитор.

Услед смањења ефективне ширине базе долази и до повећања градијента концентрације мањинских носилаца наелектрисања у области базе, што доводи до повећања емиторске струје I_E и при сталној вредности напона база-емитор. Утицај напона колектора на вредност улазне струје, посредством модулације ширине базе (*base-width modulation*), назива се **реакција колектора** или Ерлијев (*Early*) ефекат.

4.4.2. Карактеристике излаза

Излазна карактеристика показује међусобни однос излазних величина при сталној вредности улазне (управљачке) величине. Као параметар се обично узима улазна струја¹³. У декларацијама произвођача се најчешће приказује излазна карактеристика транзистора у споју са заједничким емитором (слика 4.16), која је најпогоднија за графичку анализу кола са транзисторима. Према једначини 4.8, када је емиторски спој поларисан директно, а колекторски спој инверзно, струја колектора не зависи од напона U_{CE} . У тим условима, функција $I_C(U_{CE})$ [$I_B = \text{const}$] представљена је фамилијом правих (приказаних на слици испрекиданим линијама) паралелних са напонском осом. При константном прираштају параметра I_B ове праве су еквидистантне.

Када је база отворена кроз транзистор тече инверзна струја за спој са заједничким емитором I_{CEO} , која је, према једначини 4.9 знатно већа од инверзне струје засићења колекторског споја I_{CBO} .



Слика 4.16. Излазна карактеристика транзистора у споју са заједничким емитором

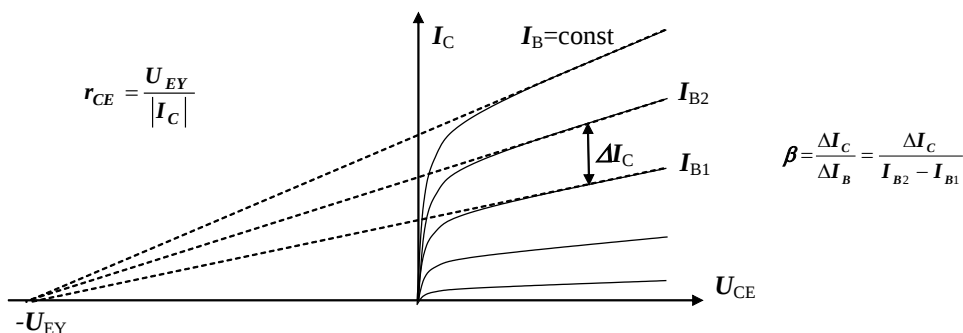
¹³ Параметар излазне карактеристике може да буде и напон, али се такав начин приказивања ретко користи, јер се код транзистора, с обзиром на својства диоде база-емитор, лакше контролише (задаје) величина улазне струје.

Као што је већ истакнуто, једначином 4.2 нису обухваћени ефекти свих појава у транзистору. Услед смањења ефективне ширине базе w_B при повећању напона колектора долази до повећања сачиниоца појачања струје α , односно до повећања струје колектора I_C . Осим тога, колекторска струја се повећава и услед повећања емиторске струје, које такође представља последицу модулације ширине базе. Промена струје базе услед смањења интензитета рекомбинације је много мања, па се утицај напона колектора U_{CE} (реакција колектора) испољава као нагиб карактеристике транзистора - струја колектора зависи од напона колектора што се моделује једначином:

$$I_C(U_{CE}) \cong I_C(I_B)(1 + \frac{U_{CE}}{U_{EY}}), \quad (4.19)$$

где U_{EY} означава **Ерлијев напон**, којим се описује повратно дејство напона колектора U_{CE} на вредност струје I_C . Ова појава је значајна при побуди транзистора променљивим (наизменичним) сигналом. Динамичка отпорност колекторског споја, која делује као излазна отпорност за наизменичну струју није бесконачно велика, већ има коначну, иако врло велику вредност.

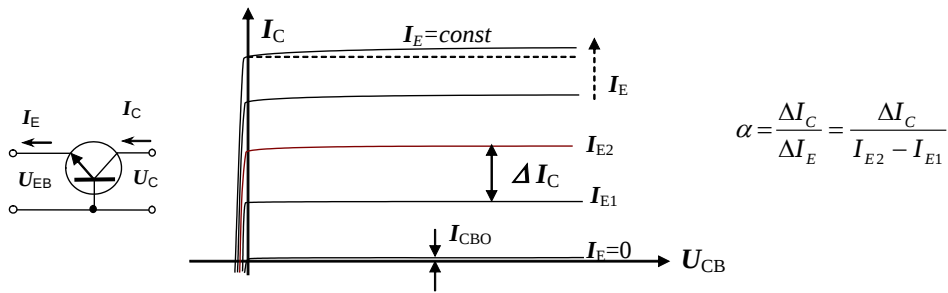
На основу дијаграма који приказују излазне карактеристике $I_C(U_{CE})$ [$I_B = \text{const}$] могу да се одреде Ерлијев напон¹⁴, U_{EY} , [9], и појачање струје од базе до колектора β (слика 4.17).



Слика 4.17. Одређивање параметара транзистора на основу његових статичких карактеристика

Излазна статичка карактеристика транзистора у споју са заједничком базом је приказана на слици 4.18. Ако се утицај напона колектора занемари, криве $I_C(U_{CB})$ [$I_E = \text{const}$] су паралелне са напонском осом и еквилифантне. Ефекат промене ширине базе услед промене напона колектора се манифестује нагибом карактеристике према напонској оси, који је, у поређењу са карактеристиком транзистора у споју са заједничким емитором, мање изражен.

¹⁴ U_{EY} је напон који одговара тачки у којој екстраполисана карактеристика $I_C(U_{CE})$ [$I_B = \text{const}$] сече напонску осу.

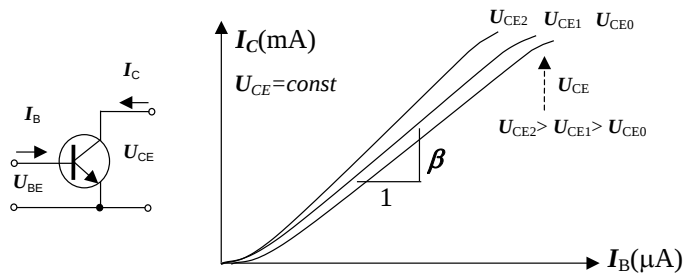


Слика 4.18. Излазна карактеристика транзистора у споју са заједничком базом

Када је струја I_E једнака нули, кроз транзистор тече инверзна струја засићења колекторског споја. На основу излазне карактеристике $I_C(U_{CB})$ [$I_E = \text{const}$] може да се одреди појачање струје од емитора до колектора, α .

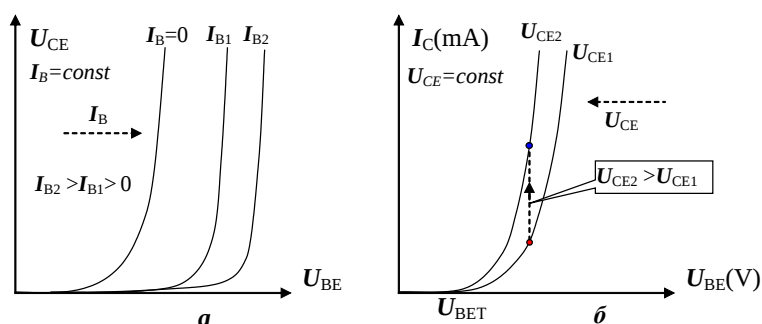
4.4.3. Карактеристике преноса

У начелу, постоји осам могућности за графички приказ односа једне од улазних и једне од излазних величина транзистора у одређеном споју, са једном од преостале две величине као параметром, али се само неке од ових карактеристика дају у декларацијама произвођача и користе при анализи рада транзисторских кола. У складу са једначинама 4.2 и 4.4, карактеристика преноса која приказује однос струја у излазном и улазном колу транзистора може да се приближно прикаже правом чији је нагиб одређен сачиниоцем појачања струје од улазног до излазног прикључка транзистора у одговарајућем споју (слика 4.19).



Слика 4.19. Карактеристика преноса струје транзистора у споју са заједничким емитором

Код транзистора у споју са заједничким емитором нагиб функције $I_C(I_B)$ [$U_{CE} = \text{const}$] представља појачање струје од базе до емитора, β . Као што слика 4.19 показује, ова величина зависи од напона колектора, због Ерлијевог ефекта, као и од вредности струје колектора. Ефикасност емитора, а самим тим и сачинилац појачања струје, смањује се за мале струје колектора, јер долази до изражаја ефекат рекомбинације слободних носилаца наелектрисања у области просторног наелектрисања колекторског споја. При великим струјама повећава се концентрација већинских носилаца наелектрисања у бази непосредно уз емиторски спој, што такође смањује ефикасност емитора [10].



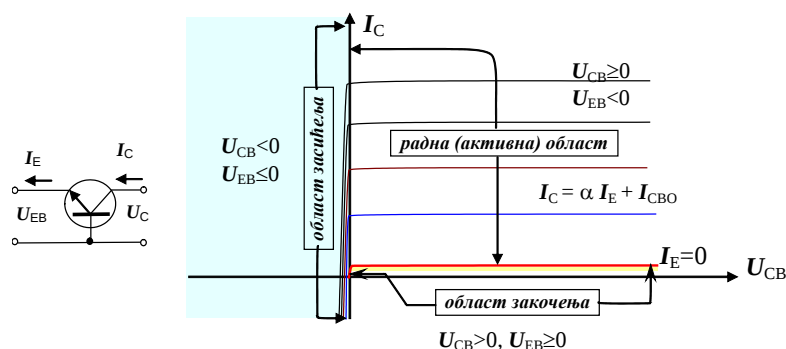
Слика 4.20. Карактеристике преноса транзистора у споју са заједничким емитором

На слици 4.20.a је приказана карактеристика преноса напона $U_{CE}(U_{BE})$ [$I_B = \text{const}$] [11]. Зависност струје колектора I_C од напона база-емитор U_{BE} јасно одражава експоненцијални карактер зависности $I_B(U_{BE})$. На дијаграму $I_C(U_{BE})$ [$U_{CE} = \text{const}$] (слика 4.20.b) је приказано како се Ерлијев ефекат одражава на карактеристику преноса транзистора као транскондуктансног појачавача: са повећањем напона U_{CE} , струја I_C се повећава и при сталном напону U_{BE} .

4.5. ОБЛАСТИ РАДА ТРАНЗИСТОРА

Стање у коме се транзистор налази одређено је вредностима напона између његових прикључака и струја кроз те прикључке. На дијаграму који приказује излазну карактеристику транзистора у споју са заједничком базом, $I_C(U_{CB})$ [$I_E = \text{const}$], могу се уочити три области које одговарају различитим стањима транзистора зависно од смера и величине напона поларизације (слика 4.21):

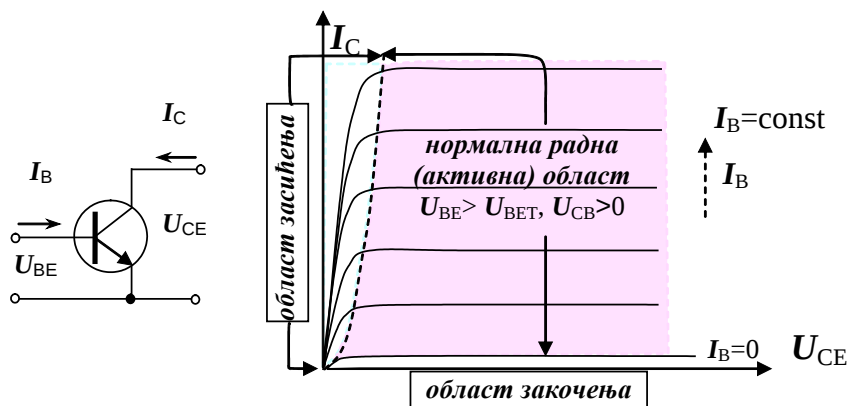
- ♦ **радна (активна) област** (*normal area, active region*), средишње подручје у коме је спој база-емитор J_E поларисан директно, спој база-колектор J_C инверзно, а струја колектора I_C сразмерна струји емитора I_E (једначина 4.2);
- ♦ **област засићења** (*saturation region*), у којој је спој база-емитор J_E директно поларисан, али је вредност струје колектора I_C мања од вредности која према једначини 4.2 одговара струји емитора I_E ; и
- ♦ **област закочења** (*cutoff region*), у којој је струја колектора I_C мања од инверзне струје засићења колекторског споја I_{CBO} која одговара стању када је струја емитора једнака нули ($I_E = 0$).



Слика 4.21. Области рада NPN транзистора у споју са заједничком базом

4.5.1. Радна област транзистора као појачавача

Када је емиторски спој J_E поларисан у пропусном, а колекторски спој J_C у непропусном смеру, тако да је однос између улазне и излазне струје одређен једначином 4.2, односно 4.4, транзистор се налази у радним условима који омогућују линеарно појачање сигнала (промене излазне струје I_C сразмерне су променама улазне струје I_B).



Слика 4.22. Радна област транзистора у споју са заједничким емитором

Области емитора и колектора су израђене од полупроводника истог типа. Ако се поларизација изврши тако да колекторски и емиторски прикључак замене улоге, транзистор је у тзв. инверзном радном режиму, који се од нормалног режима рада разликује у погледу вредности коефицијената појачања струје. У споју са заједничком базом, у инверзном режиму рада појачање струје, α_R , је мање¹⁵ од појачања у нормалном радном режиму, α_F . Њихов однос дефинисан је једначином [12]:

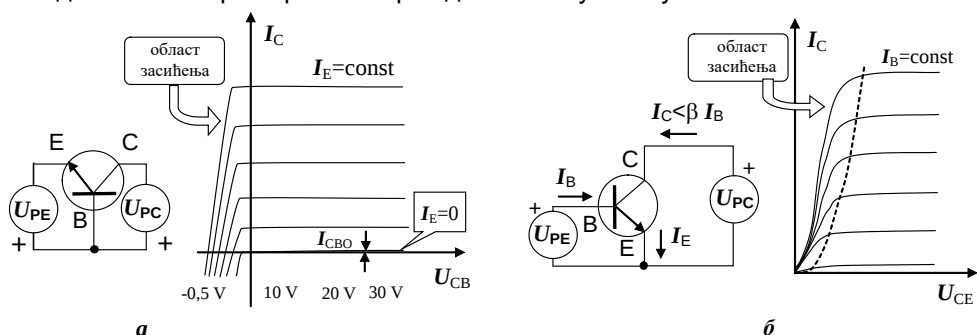
¹⁵ Због мање концентрације примеса у области колектора, ефикасност колектора је знатно мања.

$$\alpha_F I_{EBO} = \alpha_R I_{CBO}, \quad (4.20)$$

где је I_{EBO} инверзна струја емиторског споја при отвореном колектору. У инверзном режиму рада појачање струје β_R је много мање од појачања β_F .

4.5.2. Област засићења

На дијаграмима који приказују излазну карактеристику транзистора у споју заједничког емитора (слика 4.16), односно заједничке базе (слика 4.18), уочавају се области у којима је излазни напон мали, па су и његове промене веома мале, чак и у случају сразмерно великих промена излазне струје. Када је вредност излазне струје првенствено одређена елементима спољашњег кола, а веома мало зависи од вредности пада напона на транзистору каже се¹⁶ да се биполарни транзистор тада налази у стању “засићења”.



Слика 4.23. Излазна карактеристика транзистора у области засићења

За транзистор у споју са заједничком базом засићење настаје када при смањењу напона колектора U_{CE} струја I_C постане мања од вредности која према једначини 4.4 одговара улазnoj струји I_E .

$$I_C < \alpha I_E + I_{CBO}. \quad (4.21)$$

Са дијаграма који приказује излазну карактеристику (слика 4.23.a), уочава се да је потребан услов да NPN транзистор у споју са заједничком базом доспе у засићење при задатој вредности улазне струје I_E , да, при одговарајућој поларизацији ($U_{BE} > 0$), напон U_{CB} постане мањи од нуле, што значи да је колекторски спој директно поларисан. Обично се део карактеристике транзистора који се односи на област засићења, ради боље прегледности, приказује са већом резолуцијом.

У споју са заједничким емитором (слика 4.23.b), транзистор се налази у засићењу када је испуњен услов:

¹⁶ Назив није у сагласности са појмом “засићења”. Када се радна тачка налази у области која се назива област засићења транзистор је, “у настојању” да оствари пресликавање $I_B \rightarrow I_C$ дефинисано једначином 4.2, практично изједначио потенцијале колектора и емитора. Струја I_C је мања од вредности која одговара једначини 4.2 због ограничења које намеће спољашно коло, којем припада грана у којој се колектор и емитор налазе.

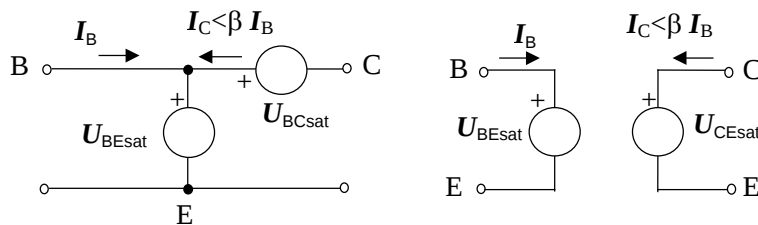
$$I_C < \beta I_B + (1 + \beta) I_{CBO} \quad (4.22)$$

У оба случаја, величина струје колектора I_C одређена је превасходно вредностима параметара у спољашњем колу. Да би NPN транзистор доспео у засићење при задатој вредности улазне струје I_B , потребно је да напон U_{CB} постане мањи од нуле:

$$U_{CB} < 0. \quad (4.23)$$

Транзистор је у засићењу када су оба PN-споја поларисана у пропусном смеру.

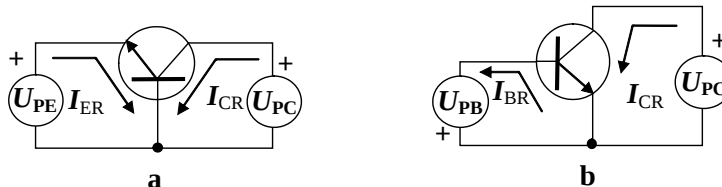
На слици 4.24 приказан је квалитативни модел транзистора у стању засићења. U_{BEsat} означава напон на директно поларисаном емиторском споју JE. При анализи се обично усваја да је напон база-емитор у стању засићења (сатурације¹⁷), U_{BEsat} , око 0,8 V, за силицијумске транзисторе, односно 0,3 V за германијумске. Ова вредност, међутим, зависи од вредности струје која протиче кроз спој база-емитор. Типична вредност напона на директно поларисаном колекторском споју транзистора у засићењу, U_{BCsat} , је око 0,5 V.



Слика 4.24. Модел транзистора у засићењу

4.5.3. Област закочења

Када су оба PN-споја биполарног транзистора поларисана у непропусном смеру, при чему су инверзни напони између електрода мањи од напона пробоја одговарајућег споја, транзистор се налази у непроводном стању. Излазна струја је веома мала. У првој апроксимацији, одводне струје (*leakage current*), које “цуре” кроз инверзно поларисане спојеве, могу да се занемаре, транзистор је “закочен”.



Слика 4.25. Транзистор у непроводном стању

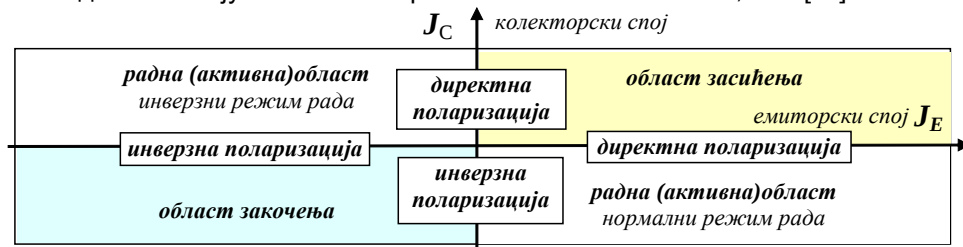
¹⁷ Од лат. речи *saturatio*, засићење.

За транзистор у споју са заједничком базом (слика 4.25.а) у стању закочења за колекторску струју I_C важи:

$$I_{CR} \leq I_{CBO}, \quad (4.24)$$

где је I_{CBO} инверзна струја засићења колекторског споја при отвореном емитору. За транзистор у споју са заједничким емитором (слика 4.25.б) граничну вредност непроводне области на излазној карактеристици представља струја колектора при отвореној бази (*collector-emitter cut-off current*), I_{CEO} , (инверзна струја за спој са заједничким емитором, једначина 4.9). Да би струја цурења у колекторском колу била што мања, потребно је да спој емитор-база буде инверзно поларисан.

Инверзна струја зависи од конструкције транзистора, радног напона, температуре споја и концентрације примеса. Због тога се при специфицирању вредности инверзне струје обавезно наводе и услови при којима је одређена. На пример, осим, а понекад и уместо вредности I_{CEO} , у каталозима произвођача се дају и вредности струје при назначеној отпорности R између базе и емитора, I_{CER} , инверзна струја када је база спојена са емитором, I_{CES} , или струја при назначеном (инверзном) напону U између базе и емитора, I_{CEV} , или када се између базе и емитора налази назначено коло, I_{CEX} [13].



спој	J_E	J_C	карактеристични параметар
област закочења	R	R	I_{CBO}
радна (активна) област	F	R	β_N
	R	F	β
област засићења	F	F	U_{CESat}

R = инверзна поларизација

F = директна поларизација

Слика 4.26.Области рада транзистора

У начелу, област рада транзистора одређена је поларизацијом његових PN-спојева (слика 4.26). Када су оба споја поларисана у непропусном смеру, транзистор је закочен. Када су оба споја поларисана у пропусном смеру, транзистор је засићен. У активној (радној) области PN-спојеви су различито поларисани.

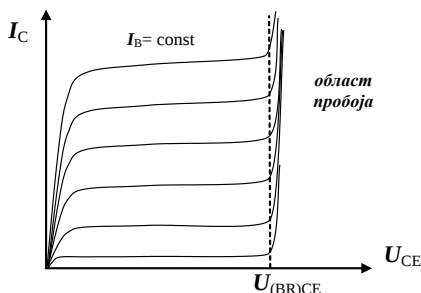
Инверзна струја колектора када је база спојена са емитором ($U_{BE} = 0$), I_{CES} , зависи од напона колектор-емитор, U_{CE} , али се може сматрати да је приближно једнака инверзној струји засићења I_{CBO} . Потенцијал отворене базе ($I_E = I_C$) је око 0,06 V [14]. Струја I_{CEO} , која представља струју колектора при отвореној бази ($I_B = 0$), је већа од струје I_{CBO} (4.9). Напон директне

поларизације споја база-емитор испод којег се струја базе, I_B , а тиме и струја колектора, I_C , може занемарити, U_{BE} , је око 0,1 V код германијумских, односно око 0,5 V код силицијумских транзистора. Напон засићења између базе и емитора, U_{BEsat} је приближно 0,3 V код германијумских, односно око 0,8 V код силицијумских транзистора.

4.6. ОГРАНИЧЕЊА У РАДУ ТРАНЗИСТОРА

Највећа дозвољена вредност сталног напона инверзно поларисаног споја представља параметар који се обавезно наводи као обележје транзистора. Најчешће се наводи највећа дозвољена вредност напона колектор-емитор при отвореној бази, U_{CEO} , али се понекад податак о напону пробоја односи на случај када је база краткоспојена са емитором, U_{CES} , или је потенцијал базе дефинисан на неки други, назначени, начин. У каталозима произвођача наводе се и највећа дозвољена вредност напона U_{CBO} (која може бити и нешто већа од $\max U_{CEO}$) и напона U_{EBO} , која је знатно мања, типично око 6 V.

Највећа дозвољена струја PN-споја I_{CM} , која може бити од неколико десетина милиампера до неколико десетина ампера, представља такође један од параметара који одређује подручје примене транзистора.



Слика 4.27. Пробој транзистора

При кретању наелектрисаних честица кроз проводну средину под дејством електричног поља, један део уложене електричне енергије се неизбежно губи претварањем у топлоту (Џулов ефекат). Кристалу може да се приведе толика снага да његова температура, односно температура PN-спојева (T_J), која се повећава услед сопственог загревања или загревања околине, не пређе назначену највећу дозвољену вредност. Дисипација услед струје базе може да се занемари, због мале вредности I_B , као и мале вредности напона база-емитор U_{BE} . Практично, претварање електричне енергије у топлоту услед Џулових губитака у транзистору се врши у петљи (контури) колектор-емитор. Дозвољена вредност снаге дисипације P_D зависи од температуре околине, топлотног капацитета транзистора и времена у току којег се ова снага приводи. Зависно од конструкције транзистора, највећа дозвољена вредност снаге дисипације P_{DM} може да буде од неколико десетина миливати до неколико стотина вати. Ограничење представља највећа дозвољена температура колекторског споја, која се за силицијумске транзисторе налази у опсегу од 150 °C до 225 °C.

Повећање температуре колекторског споја T_J у односу на температуру околине T_A , сразмерно је снази P_D дисипације на споју:

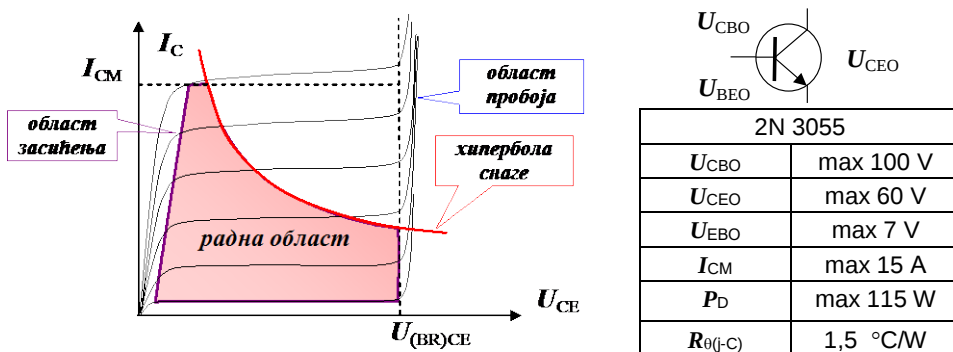
$$T_J - T_A = R_{\theta} P_D, \quad (4.25)$$

где је R_{θ} термичка отпорност, чија вредност зависи од величине транзистора и ефикасности одвођења топлоте. Типичне вредности су од $0,2 \text{ }^{\circ}\text{C/W}$, за транзисторе снаге са ефикасним хлађењем, до $1000 \text{ }^{\circ}\text{C/W}$, за транзисторе мале снаге без додатних мера за одвођење топлоте.

На слици 4.28 је приказана излазна карактеристика транзистора са уцртаном кривом која одговара највећој дозвољеној дисипацији P_{DM} :

$$U_{CE} I_C = P_{DM}. \quad (4.26)$$

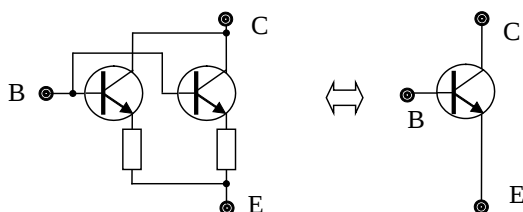
Ово је једначина хиперболе, па се крива која одређује максималну допуштену дисипацију назива **хипербола снаге**. Једносмерни напон колектора U_{CE} и средња вредност колекторске струје I_C морају бити тако подешени да одговарајућа радна тачка увек буде испод хиперболе снаге.



Слика 4.28. Границе области рада транзистора као појачавача

При порасту температуре струја I_B се повећава и при константном побудном напону U_{BE} што доводи до повећања колекторске струје I_C , односно до повећане дисипације, а самим тим и до даљег повећања температуре транзистора (термичко бежање, *thermal runaway*) што и може да проузрокује трајно оштећење транзистора [15]. На слици 4.28 су приказани и основни подаци за силицијумски снажни транзистор 2N 3055 (Еи) у металном кућишту.

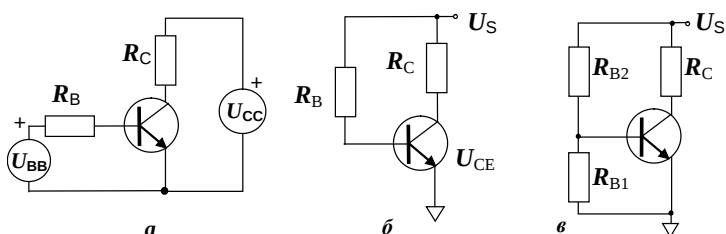
Паралелним везивањем транзистора може се остварити расподела дисипације на два елемента. Ако имају идентичне карактеристике, паралелно везани транзистори једнако доприносе излазној (колекторској) струји и једнако дисипирају. Да би се обезбедило једнако термичко оптерећење и у случају када се параметри транзистора разликују, у коло емитора се постављају отпорници малих вредности (слика 4.29) тако да сваки транзистор једнако доприноси провођењу укупне струје.



Слика 4.29. Паралелни спој транзистора

4.7. ПОЛАРИЗАЦИЈА ТРАНЗИСТОРА

Да би се транзистор довео у жељено стање потребно је да његови спојеви буду поларисани на одговарајући начин (слика 4.30). С обзиром да параметри транзистора зависе од вредности струја и напона, одређивање оптималних радних услова у складу са специфичним условима намене, а то значи и одређивање положаја који на статичкој карактеристици заузима мирна радна тачка (*quiescent point*), Q , која дефинише стање транзистора у одсуству променљивог улазног сигнала, има велики значај при пројектовању електронских кола са транзисторима.



Слика 4.30. Поларизација транзистора са заједничким емитором

Поларизација NPN транзистора у споју са заједничким емитором, коришћењем независних извора сталног напона, U_{BB} и U_{CC} , приказана је на слици 4.30.а. У практичним решењима, поларизација се најчешће остварује помоћу једног извора напона, као што је то приказано на слици 4.30.б. Делитељ напона у колу базе (слика 4.30.в) олакшава задавање жељене вредности мирне радне струје I_B . Применом Тевененове теореме, ово коло се своди на коло са два независна извора напона поларизације.

4.7.1. Одређивање положаја мирне радне тачке

С обзиром да се кола са једним извором напона поларизације могу представити еквивалентним колом са два извора, са становишта анализе оправдано је разматрати коло са слике 4.30.а. као општи случај поларизације транзистора у споју са заједничким емитором. У нормалном радном (активном) режиму за ово коло важе следеће једначине:

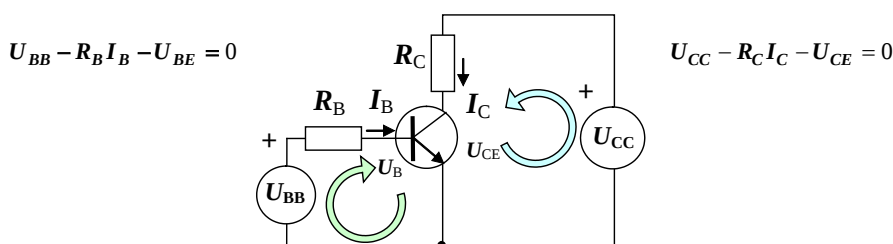
$$U_{BB} = R_B I_B + U_{BE}, \quad (4.27)$$

$$U_{CC} = R_C I_C + U_{CE}, \quad (4.28)$$

$$I_C = \beta I_B + (\beta + 1) I_{CBO}, \quad (4.29)$$

На основу једначина 4.27 и 4.29 добија се општи израз за струју колектора, I_C , која одговара мирној радној тачки транзистора. Вредност ове струје зависи од параметара у петљи база-емитор посматраног кола (напона поларизације емиторског споја, U_{BB} , и отпорности у колу базе, R_B) као и од својстава самог транзистора (U_{BE} , β и I_{CBO}):

$$I_C = \beta \frac{U_{BB} - U_{BE}}{R_B} + (1 + \beta) I_{CBO}. \quad (4.30)$$



Слика 4.31. Анализа кола са заједничким емитором

Када је вредност струје која одговара мирној радној тачки позната, одговарајућа вредност напона U_{CE} , одређује се на основу једначине 4.28:

$$U_{CE} = U_{CC} - R_C I_C. \quad (4.31)$$

Обично се мирна радна тачка транзистора поставља на средину опсега могућих вредности напона колектор-емитор:

$$U_{CE} = \frac{U_{CC}}{2}, \quad (4.32)$$

чиме је једнозначно одређен однос отпорности R_C и мирне радне струје колектора I_C :

$$I_C R_C = \frac{U_{CC}}{2}. \quad (4.33)$$

Вредност струје базе I_B , којом се постиже задата вредност струје I_{CQ} једнака је:

$$I_B = \frac{I_C - (1 + \beta) I_{CBO}}{\beta}, \quad (4.34)$$

а одговарајућа вредност отпорности R_B :

$$R_B = \frac{U_{BB} - U_{BE}}{I_B} = \beta \frac{U_{BB} - U_{BE}}{I_C - (1 + \beta) I_{CBO}}. \quad (4.35)$$

Зависност између струје базе I_B (односно I_C) и напона база-емитор U_{BE} је експоненцијалног карактера (слика 4.14 и 4.20), због чега проблем одређивања положаја мирне радне тачке није могуће егзактно решити

аналитички. Графички поступак одређивања положаја мирне радне тачке је једноставан, али и недовољно прецизан. Због велике стрмине $I_B(U_{BE})$ карактеристике, мала одступања при цртању доводе до релативно великих одступања вредности струје I_B , а самим тим и промене положаја радне тачке на $I_C(U_{CE})$ дијаграму. Због тога се прорачун најчешће врши применом приближне аналитичке методе, засноване на чињеници да је напон база-емитор транзистора при раду у нормалној (активној) области на собној температури приближно једнак $U_{BE} = 0,6 \text{ V}$ код силицијумских, односно $0,2 \text{ V}$ код германијумских транзистора [16]. Бројна вредност струје I_C , у зависности од вредности од напона U_{BB} , отпорности R_B , појачања струје β и инверзне струје засићења I_{CBO} , одређује се на основу једначине 4.30.

При пројектовању кола обично је мирна радна струја позната (задата, изабрана у складу са постављеним циљем). На основу познатих вредности расположивих извора једносмерног напона и просечних вредности параметара транзистора одређују се одговарајуће вредности отпорности R_B и R_C .

4.7.2. Температурска стабилност радне тачке

Мирна радна струја транзистора, I_C , одређена је вредностима елемената спољашњег кола (напонима поларизације и отпорностима у колу), али и карактеристикама самог транзистора: напоном U_{BE} , појачањем β и инверзном струјом засићења колекторског споја I_{CBO} .

$$I_C = I_C(\beta, I_{CBO}, U_{BE}), \quad (4.36)$$

Ове три величине, међутим, у значајној мери зависе од температуре (табела 4.1). Као што је већ истакнуто, инверзна струја засићења PN-споја се удвостручава на сваких десет степени повећања температуре и стога представља температурно најосетљивију величину у колу. Осим тога, при порасту температуре, струја базе I_B се повећава и при сталном напону база-емитор U_{BE} . Ово "термичко бежање" представља додатно ограничење при обезбеђивању потребних радних услова транзистора. Температурска осетљивост напона база-емитор при директној поларизацији, $|U_{BE}|$, је у опсегу од $-1,5 \text{ mV/}^\circ\text{C}$ до $-2,0 \text{ mV/}^\circ\text{C}$ [17], а промене појачања струје за силицијумске транзисторе су око $0,5 \text{ \%/}^\circ\text{C}$ [18].

Si				Ge			
$T(^{\circ}\text{C})$	-65	25	175	$T(^{\circ}\text{C})$	-65	25	75
$I_{CBO} \text{ (nA)}$	$2 \cdot 10^{-3}$	1	33 000	$I_{CBO} \text{ (}\mu\text{A)}$	$2 \cdot 10^{-3}$	1	33
β	25	55	100	β	20	55	90
$U_{BE} \text{ (V)}$	0,78	0,60	0,225	$U_{BE} \text{ (V)}$	0,38	0,20	0,10

Табела 4.1. Температурска зависност карактеристика транзистора

Са становишта дефинисања мирне радне тачке, посебну важност има појачање струје од базе до колектора, β . Ако се, ради једноставности разматрања, а практично без утицаја на валидност изведених закључака, струја I_{CBO} занемари при анализи утицаја промена величине β на положај

мирне радне тачке, релативна промена струје I_C у колу при сталном напону U_{BE} једнака је релативној промени вредности појачања β :

$$\frac{dI_C}{I_C} = \frac{d\beta}{\beta}. \quad (4.37)$$

Промене β услед промена температуре у ширем температурском опсегу могу да буду и веће од 100 %, па услед померања радне тачке при загревању транзистор може доспети у област засићења. Однос могућих вредности појачања струје за транзисторе истог типа може бити већи од три. Због тога, након замене транзистора у колима са слике 4.31, може бити неопходна измена (преподешавање) отпорности.

Промена струје колектора услед промене појединих утицајних величина једнака је:

$$dI_C = \frac{\partial I_C}{\partial \beta} d\beta + \frac{\partial I_C}{\partial I_{CBO}} dI_{CBO} + \frac{\partial I_C}{\partial U_{BE}} dU_{BE}, \quad (4.38)$$

односно:

$$dI_C = K_\beta d\beta + K_{I_{CBO}} dI_{CBO} + K_{U_{BE}} dU_{BE}. \quad (4.39)$$

Коефицијенти K_β , $K_{U_{BE}}$ и $K_{I_{CBO}}$ представљају показатеље нестабилности који одређују осетљивост радне тачке (струје I_C , једначина 4.30) у односу на промене одговарајућег параметра¹⁸:

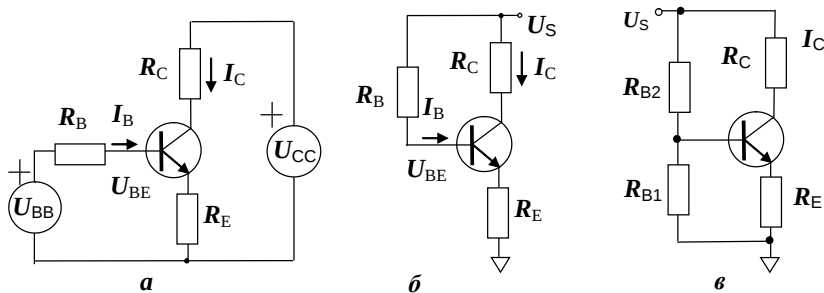
$$K_{I_{CBO}} = \left. \frac{\partial I_C}{\partial I_{CBO}} \right|_{\beta, U_{BE}=\text{const}} = \beta + 1, \quad (4.40)$$

$$K_{U_{BE}} = \left. \frac{\partial I_C}{\partial U_{BE}} \right|_{\beta, I_{CBO}=\text{const}} = -\frac{\beta}{R_B}, \quad (4.41)$$

$$K_\beta = \left. \frac{\partial I_C}{\partial \beta} \right|_{I_{CBO}, U_{BE}=\text{const}} = \frac{U_{BB} - U_{BE}}{R_B} + I_{CBO} = \frac{I_C - I_{CBO}}{\beta} \approx \frac{I_C}{\beta}, \quad (4.42)$$

Кола приказана на слици 4.32 имају, у погледу стабилности радне тачке транзистора, боље карактеристике од описаних основних кола.

¹⁸ У литератури се ови показатељи обично називају коефицијенти (фактори) стабилности (*stabilization factor*) и обележавају симболом S . Треба имати у виду да уколико је вредност ове величине већа, утолико је **нестабилност** мирне радне тачке већа, односно, утолико је већа **осетљивост** вредности струје I_C на промене вредности утицајних величина β , I_{CBO} , и U_{BE} .



Слика 4.32. Стабилизација мирне радне тачке

Структура представљена на слици 4.32.а може да се посматра као општи случај на који се друге две своде одговарајућом сменом¹⁹. На основу једначина које следе из другог Кирхофовог правила:

$$U_{BB} = R_B I_B + U_{BE} + R_E I_E, \quad (4.43)$$

$$U_{CC} = R_C I_C + U_{CE} + R_E I_E, \quad (4.44)$$

и једначине за вредност струје емитора:

$$I_E = I_C + I_B = (1 + \beta)(I_B + I_{CBO}), \quad (4.45)$$

добива се израз који описује зависност струје колектора од вредности елемената у колу (U_{BB} , U_{CC} , R_B , R_E) и карактеристичних параметара транзистора (β , U_{BE} и I_{CBO}):

$$I_C = \beta \frac{U_{BB} - U_{BE}}{R_B + (1 + \beta)R_E} + (1 + \beta) \frac{R_B + R_E}{R_B + (1 + \beta)R_E} I_{CBO}, \quad (4.46)$$

Показатељи нестабилности мирне радне тачке у посматраном колу одређени су једначинама:

$$K_{I_{CBO}} = \frac{\partial I_C}{\partial I_{CBO}} = (1 + \beta) \frac{R_B + R_E}{R_B + (1 + \beta)R_E} \cong 1 + \frac{R_B}{R_E} \Big|_{R_E \neq 0}, \quad (4.47)$$

$$K_{U_{BE}} = \frac{\partial I_C}{\partial U_{BE}} = - \frac{\beta}{R_B + (1 + \beta)R_E} \cong - \frac{1}{R_E}, \quad (4.48)$$

$$K_\beta = \frac{\partial I_C}{\partial \beta} \cong \frac{I_C}{\beta} \frac{R_B + R_E}{R_B + (1 + \beta)R_E}. \quad (4.49)$$

Показатељ нестабилности мирне радне тачке (струје колектора) у односу на промене појачања струје транзистора зависи од вредности β , па се за израчунавање K_β у задатом опсегу од β_1 до β_2 користи израз [19]:

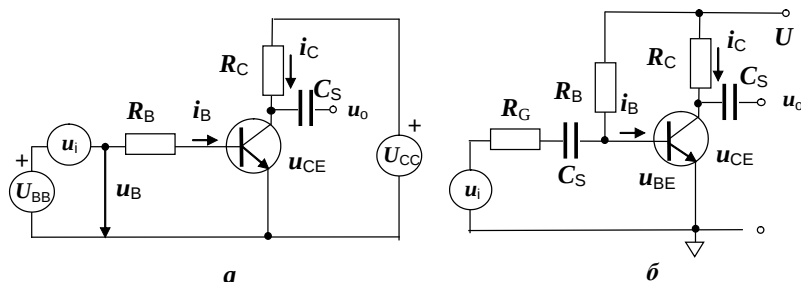
$$K_\beta = \frac{I_C(\beta_1)}{\beta_1} \frac{R_E}{R_B + (1 + \beta_2)R_E}. \quad (4.50)$$

¹⁹ Коло приказано на слици 4.32.в се понекад назива универзалном шемом за поларизацију транзистора у споју са заједничким емитором.

4.8. АНАЛИЗА КОЛА СА БИПОЛАРНИМ ТРАНЗИСТОРИМА

Поларизацијом се транзистор доводи у радни режим који омогућује одговарајући одзив на побуду која представља улазни (управљачки) сигнал који треба појачати или проследити другим колама. Улазни променљиви (наизменични) сигнал се прикључује тако да се његово деловање сабира (суперпонира) са деловањем извора сталног (једносмерног) напона (односно струје) којим се врши поларизација споја база-емитор транзистора. У колу транзистора у споју са заједничким емитором, када извор улазног сигнала на свом излазу даје лебдећи²⁰ напон $u_i(t)$, прикључивање се остварује редним везивањем са извором сталног напона U_{BB} , којим се врши поларизација споја база-емитор (слика 4.33.а). Укупна вредност променљивог напона $u_B(t)$ који делује на улазу кола је

$$u_B(t) = U_{BB} + u_i(t). \quad (4.51)$$



Слика 4.33. Транзисторски појачавачи

Укупна струја базе i_B у овом колу једнака је:

$$i_B(t) = I_B + i_b(t), \quad (4.52)$$

где је I_B једносмерна струја поларизације споја база-емитор:

$$I_B = \frac{U_{BB} - U_{BE}}{R_B}, \quad (4.53)$$

а $i_b(t)$ представља променљиву компоненту одређену вредношћу улазног напона $u_i(t)$:

$$i_b(t) = \frac{u_i(t)}{R_B}, \quad (4.54)$$

Оваквој побуди одговара струја одзива, коју представља струја колектора i_C која се такође састоји из две компоненте:

$$i_C(t) = I_C + i_c(t). \quad (4.55)$$

²⁰ Пливајући (floating).

Излазни сигнал, напон $u_o(t)$ "скинут" са колектора транзистора, представља променљиви део (наизменичну компоненту) напона колектор-емитор:

$$u_{CE}(t) = U_{CE} + u_o(t), \quad (4.56)$$

при чему се стална (једносмерна) компонента напона u_{CE} (напон U_{CE} , који је одређен положајем мирне радне тачке) одстрањује помоћу кондензатора за спрегу C_S , чија је капацитивност довољно велика да се његов утицај на учестаности ω улазног сигнала може да занемари. Другим речима, у односу на наизменични излазни сигнал, може се сматрати да је реактанса кондензатора приближно једнака нули:

$$X_C = \frac{1}{\omega C_S} \approx 0. \quad (4.57)$$

Када је референтна тачка извора сигнала спојена са референтном тачком извора напона којима се врши поларизација транзистора (нулта тачка, маса), суперпозиција редним везивањем није могућа. Тада се и улазни сигнал доводи преко кондензатора за спрегу C_S , као што је то приказано на слици 4.33.б.

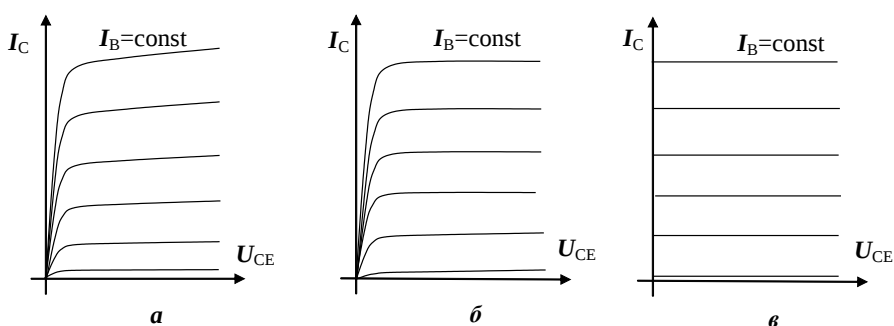
4.8.1. Еквивалентна кола биполарних транзистора

Транзистор у споју са заједничким емитором се најчешће описује једначинама у којима су експлицитно представљени напон u_{BE} као улазна и струја i_C као излазна величина:

$$\begin{aligned} u_{BE} &= F_1(i_B, u_{CE}), \\ i_C &= F_2(i_B, u_{CE}). \end{aligned} \quad (4.58)$$

Графички, ове једначине се представљају фамилијама кривих које одговарају сталним вредностима напона U_{CE} (улазна карактеристика, слика 4.14.) односно струје I_B (излазна карактеристика, слика 4.16). Да би се олакшало аналитичко решавање овог система једначина, при пројектовању се поједини ефекти често занемарују, како би се брже дошло до приближног решења које омогућује сагледавање стања у посматраном колу. Тако се, на пример, у првом кораку поједностављења занемарује Ерлијев ефекат и претпоставља да су излазне карактеристике паралелне напонској оси (слика 4.34.б), а у следећој апроксимацији занемарује се и нелинеарност у области засићења (слика 4.34.в).

При раду са малим сигнаlima, када се радна тачка само мало помера у односу на мирну радну тачку Q, транзистор се посматра као линеарни елемент.

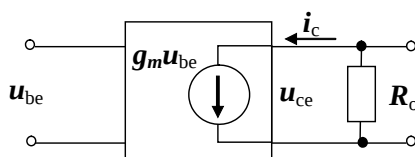


Слика 4.34. Стварна и апроксимативне карактеристике преноса транзистора у споју са заједничким емитором

У довољно малој околини мирне радне тачке експоненцијална карактеристика преноса (слика 4.20) се може заменити линеарним моделом:

$$i_c = g_m u_{be} , \quad (4.59)$$

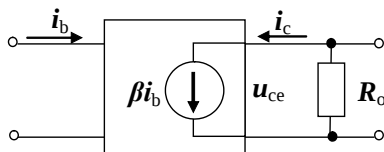
који транзистор описује као савршени транскондуктансни појачавач чије је еквивалентно коло приказано на слици 4.35.



Слика 4.35. Модел савршеног биполарног транзистора као транскондуктансног појачавача

Ако се пође од једначине 4.4, транзистор се може представити као савршени појачавач струје (слика 4.36):

$$i_c = \beta i_b . \quad (4.60)$$



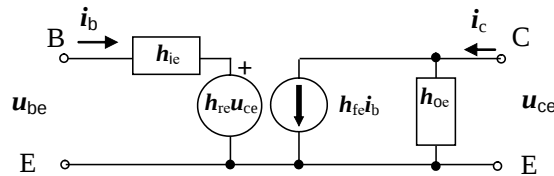
Слика 4.36. Модел савршеног биполарног транзистора као појачавача струје

При математичкој анализи кола са биполарним транзисторима највише се користи линеаризован модел заснован на h -параметрима који, за транзистор у споју са заједничким емитором, има облик:

$$u_{be} = h_{ie} i_b + h_{re} u_{ce} \quad (4.61)$$

$$i_c = h_{fe} i_b + h_{oe} u_{ce} ,$$

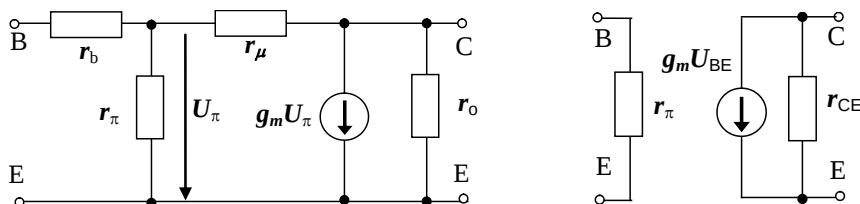
у којем h -параметри представљају реалне бројеве, а величине u_{be} , u_{ce} , i_b и i_c су функције времена.



Слика 4.37. h -модел транзистора са заједничким емитором

Коефицијенти у овом једначинама су **параметри транзистора за мале сигнале** који се специфицирају при назначеним вредностима поларизације и учестаности улазног сигнала. Тако, коефицијент h_f представља **појачање струје** за мале сигнале при краткоспојеном излазу²¹, односно, при сталном излазном напону. Параметар h_r представља **напонски повратни сачинилац** за мале сигнале при отвореном улазу. Параметар h_i симболизује **улазну отпорност** за мале сигнале при краткоспојеном излазу, а параметар h_o **излазну проводност** за мале сигнале при отвореном улазу.

У хибридном π -моделу, слика 4.38, r_b симболизује унутрашњу отпорност базе. Типичне вредности су од неколико десетина ома до неколико стотина ома. Отпорност диоде емитор-база представљена је отпорношћу r_π чија је вредност у опсегу од неколико стотина до неколико хиљада ома. Параметар r_μ представља еквивалентну отпорност која је последица Ерлијевог ефекта и одређује нагиб излазних карактеристика (слика 4.17). Ова отпорност је врло велика и обично се њен утицај занемарује. Вредности излазне отпорности су од десетак килоома до стотинак килоома. Параметар g_m приказује зависност излазне струје од улазног напона (проводност преноса, транскондуктанса).



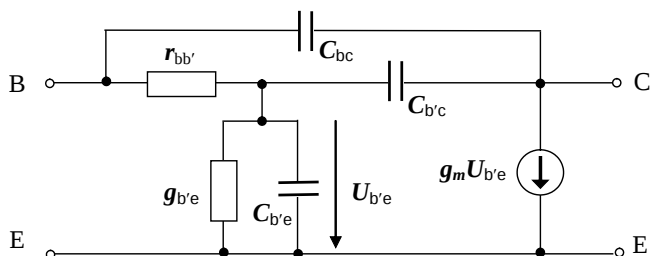
Слика 4.38. Хибридно еквивалентно π -коло транзистора са заједничким емитором

Описани модели се примењују само у случају када се може сматрати да еквивалентно коло не садржи реактивне елементе (кондензаторе и калемове). За сагледавање динамичких карактеристика транзистора, процеси који се симболизују реактивним елементима се морају узети у обзир. У том случају се претпоставља да побуда представља синусну функцију времена, променљиве представљају одговарајуће ефективне вредности одговарајућих

²¹ Под кратким спојем за мале сигнале подразумева се занемарљива импеданса за наизменичну струју у излазном колу.

наизменичних величина, а h -параметри у општем случају зависе од учестаности.

При вишим учестаностима морају се узети у обзир паразитивне капацитивности. Слика 4.39 приказује коло које се користи као прва апроксимација, а важи за већину транзистора унутар одређеног опсега фреквенција. Значења појединих симбола су дата у табели 4.2.



Слика 4.39. Модификовано еквивалентно π -коло транзистора са заједничким емитором

симбол	опис
$r_{bb'}$	унутрашња отпорност базе
$g_{b'e}$	унутрашња проводност споја између базе и емитора
$C_{b'e}$	унутрашња капацитивност споја између базе и емитора
$C_{b'c}$	унутрашња капацитивност између базе и колектора
g_m	унутрашња проводност преноса (стрмина)
C_{bc}	капацитивност између базе и колектора

Табела 4.2. Параметри модификованог еквивалентног π -кола

Еквивалентна кола описују, са одређеним апроксимацијама, елемент који моделују. Различити модели засновани на истим апроксимацијама међусобно су еквивалентни, што значи да између скупова параметара који одговарају различитим моделима истог елемента постоји одређена веза, тако да се на основу једног скупа параметара могу одредити сви остали скупови [20]. Вредности параметара за модел одређеног типа зависе од начина спреге којом је остварена веза транзистора и других елемената. На пример, $h_{FE} = \beta$, $h_{FB} = \alpha$, односно (једначина 4.5):

$$h_{FE} = \frac{h_{FB}}{1 - h_{FB}}. \quad (4.62)$$

Притом, за један одређени транзистор, постоји једнозначна веза између h -параметара за спој са заједничким емитором и h -параметара за спој са заједничким колектором односно базом. Када је познат скуп параметара који описује транзистор у једној од веза, одговарајућим трансформацијама се могу одредити параметри за друге облике спајања.

Типичне вредности h -параметара за мале сигнале, за транзистор BC307A, на пример, у споју са заједничким емитором, мерене у радној тачки која одговара поларизацији једносмерном струјом $I_C = 2 \text{ mA}$ и једносмерним

напоном $U_{CE} = 5 \text{ V}$, при побуди наизменичним сигналом учестаности $f = 1 \text{ kHz}$, су:

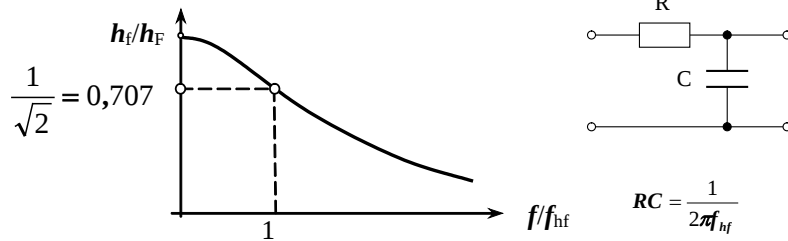
- $h_{ie} = 2,7 \text{ k}\Omega$;
- $h_{re} = 3 \cdot 10^{-4}$,
- $h_{fe} = 220$,
- $h_{oe} = 25 \text{ }\mu\text{S}$.

Типична вредност појачања једносмерне струје од базе до колектора за овај транзистор је $h_{FE} = 170$.

Појачање струје h_f представља реалан број само при ниским учестаностима побудног сигнала. С обзиром да у бази не постоји електрично поље које би убрзавало покретљиве носиоце наелектрисања на њиховом путу од емиторског до колекторског споја, они се релативно споро крећу кроз базу дифузијом, што има за последицу временско кашњење између промена емиторске и колекторске струје. Посматрано у фреквенцијском домену, зависност параметара транзистора од учестаности моделује се одговарајућом фреквенцијском зависношћу параметра који представља појачања струје h_f :

$$h_f = \frac{h_F}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_{hf}} \right)^2}}, \quad (4.63)$$

где је f_{hf} гранична учестаност при којој величина појачања струје за мале сигнале h_f опадне на вредност која је $\sqrt{2}$ пута мања од појачања једносмерне струје h_F . Учестаност f_1 при којој је појачање струје h_{fe} једнако јединици, назива се **учестаност јединичног појачања** струје.



Слика 4.40. Фреквенцијска зависност појачања струје транзистора

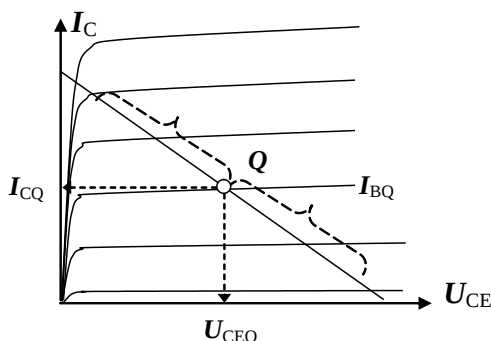
Између граничне учестаности појачања струје транзистора у споју са заједничким емитором, f_{hfe} , и граничне учестаности појачања струје транзистора у споју са заједничком базом, f_{hfb} , постоји веза [21]:

$$f_{hfe} = \frac{f_{hfb}}{1 + h_{FE}} = (1 - h_{FB}) f_{hfb}. \quad (4.64)$$

Тачнија апроксимација зависности струјног појачања од учестаности добија се помоћу сложенијих функција [22].

4.8.2. Математичка анализа кола са биполарним транзисторима

Да би се остварило појачање сигнала, биполарни транзистор мора да буде у одговарајућем радном (активном) стању у којем постоји линеарна зависност између промена струје базе и промена струје емитора односно колектора. Сигнал који се појачава сабира се са сигналом поларизације тако да се, услед деловања побудног сигнала, радна тачка у U - I равни помера дуж радне праве која је, за транзистор у споју са заједничким емитором одређена једначином 4.26. Да би се пресликавање сигнала са улаза на излаз појачавача вршило без изобличења таласног облика, радна тачка мора да буде у некој околини мирне радне тачке $Q(I_{CQ}, U_{CEQ})$ која се налази унутар активне (радне) области транзистора (слика 4.41).



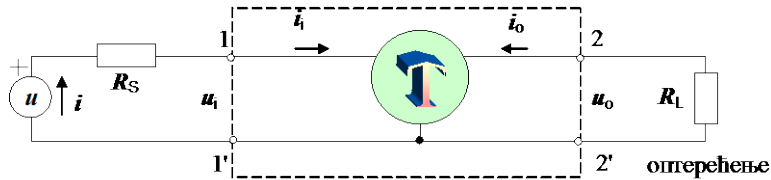
Слика 4.41. Одређивање положаја мирне радне тачке транзистора у споју са заједничким емитором

При довољно малим променама струја и напона у околини мирне радне тачке транзистора²² (одређене поларизацијом) транзистор се може представити линеарним моделом, а однос улазне и излазне величине линеарном једначином. Да би такав модел важио, потребно је да променљиви улазни (побудни) сигнал буде мали у односу на једносмерне вредности којима је дефинисана мирна радна тачка. Такви се сигнали називају “мали сигнали”. Сигнали који изазивају промену излазних величина до вредности блиских највећим могућим вредностима у посматраном колу називају се “валики сигнали”. Под дејством побуде, радна тачка се у том случају помера изван граница подручја у којем важи линеарни модел. Карактеристика преноса је нелинеарна, излазни сигнал представља изобличену слику улазног сигнала.

Независно од врсте споја, појачавач са транзистором може да се у најопштијем облику представи колом приказаним на слици 4.42, у којем отпорност R_S симболизује еквивалентну спрежну отпорност, посредством које се остварује веза са извором информације коју треба проследити до пријемника, а може да обухвати и унутрашњу отпорност самог извора

²² Одговара стању у којем се транзистор налази у одсуству сигнала који треба појачати.

сигнала. Отпорност R_L је отпорност оптерећења транзистора као појачавача, која укључује еквивалентну отпорност кола за поларизацију (која делује паралелно излазним крајевима транзистора) и унутрашњу отпорност оптерећења (*load*) односно кола којем се сигнал преноси.



Слика 4.42. Принципска шема појачавача са транзистором

Као улазне величине појачавача се обично посматрају напон $u_i(t)$ ²³ и струја $i_i(t)$, а као излазне: напон $u_o(t)$ на крајевима отпорности R_L и струја $i_o(t)$ кроз отпорност оптерећења. Посматрано као целина, коло електронског појачавача описују четири основна “спољна” параметра: појачање напона (A_u), појачање струје (A_i), улазна отпорност (R_i), и излазна отпорност (R_o).

Појачање напона, A_u , представља однос излазног напона $u_o(t)$ и напона $u_i(t)$ на улазу појачавача:

$$A_u = \frac{u_o}{u_i}, \quad (4.65)$$

Када је улазни сигнал синусна величина, појачање напона дефинисано је односом ефективних вредности улазног и излазног напона:

$$A_u = \frac{U_o}{U_i}. \quad (4.66)$$

При вишим учестаностима параметри транзистора, а услед тога и параметри појачавача, представљају комплексне величине.

Појачање струје, A_i , је по дефиницији одређено односом струје i_o , која протиче кроз отпорност оптерећења, и струје i_i коју даје извор сигнала побуде:

$$A_i = \frac{i_o}{i_i}; \quad (4.67)$$

Улазна отпорност, R_i , између тачака 1 и 1' појачавача са транзистором једнака је количнику напона u_i и струје i_i :

$$R_i = \frac{u_i}{i_i}. \quad (4.68)$$

То је отпорност коју извор сигнала чија је унутрашња отпорност R_S “види” као оптерећење које представља коло са транзистором.

²³ Строго узевши, улазну величину појачавача на слици 4.42 представља напон $u(t)$ као сигнал побуде.

Посматрана у односу на прикључке савршеног извора сигнала побуде u , улазна отпорност појачавача са транзистором једнака је збиру отпорности R_i и отпорности R_S .

Излазна отпорност, R_o , једнака је количнику напона u_{oo} који постоји између крајева 2 и 2' када је оптерећење R_L одспојено (“напон празног хода”) и излазне струје i_{os} која тече када су крајеви 2 и 2' краткоспојени (“струја кратког споја”):

$$R_o = \frac{u_{oo}}{i_{os}} . \quad (4.69)$$

То је отпорност коју потрошач “види” посматрајући појачавач као несавршени извор напона са унутрашњом отпорношћу R_o .

Излазни напон u_o и излазна струја i_o су повезани Омовим законом:

$$u_o = -R_L i_o , \quad (4.70)$$

па се израз за појачање напона може представити у облику:

$$A_u = -A_i \frac{R_L}{R_i} . \quad (4.71)$$

Вредности параметара A_u , A_i , R_i , и R_o појачавача са слике 4.42. могу да се одреде уколико су познати параметри еквивалентног кола транзистора. У каталозима произвођача најчешће су наведени h -параметри транзистора па је погодно користити коло приказано на слици 4.43 на основу којег следе изрази за вредност појачања струје A_i :

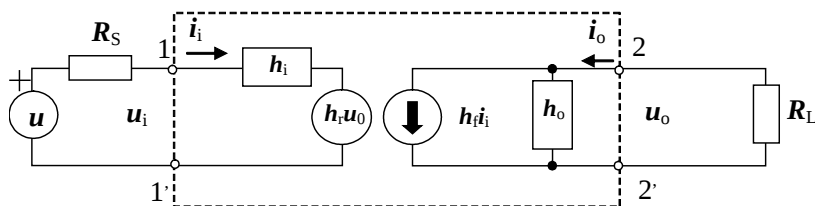
$$A_i = \frac{i_o}{i_i} = \frac{h_f}{1 + h_o R_L} , \quad (4.72)$$

улазну отпорност R_i :

$$R_i = \frac{u_i}{i_i} = h_i - \frac{h_f h_r R_L}{1 + h_o R_L} , \quad (4.73)$$

и излазну проводност, G_o :

$$G_o = \frac{1}{R_o} = h_o - \frac{h_f h_r}{h_i + R_S} . \quad (4.74)$$

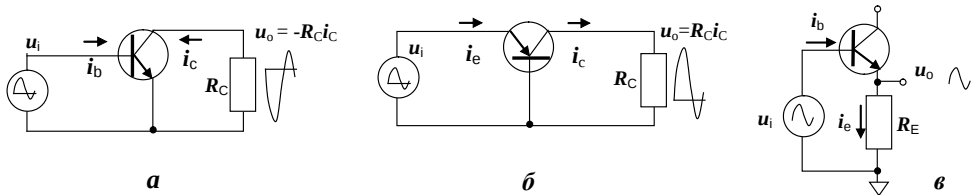


Слика 4.43. Еквивалентно коло појачавача са транзистором

Наведени изрази имају општи карактер, али се вредности h -параметара транзистора разликују у зависности од начина његовог спајања. На пример, појачање напона транзистором у споју са заједничким емитором (слика 4.44.а) одређено је изразом:

$$A_{ue} = -\frac{h_{fe} R_L}{h_{ie} + h_e R_L} \cong -\frac{h_{fe} R_L}{h_{ie}}. \quad (4.75)$$

Знак "-" указује да се при повећању улазног напона (u_{BE}) излазни напон (u_{CE}) смањује. Када се капацитивности у колу могу занемарити, фаза наизменичног напона u_o на излазу (колектору) у односу на улазни напон u_i је једнака 180° .



Слика 4.44. Основна појачавачка кола са транзисторима

Транзистор са заједничким емитором има најширу примену у појачавачким колима. За мале сигнале, појачање струје транзистора у споју са заједничким емитором, A_{ie} , једнако је појачању струје од базе до емитора, β :

$$A_{ie} = \frac{i_c}{i_b} \approx \beta. \quad (4.76)$$

У споју са заједничком базом (слика 4.44.б), улазна величина је струја емитора, а излазну величину представља струја колектора. За мале сигнале, појачање струје, A_{ib} , једнако је појачању струје од емитора до колектора транзистора, α :

$$A_{ib} = \frac{i_c}{i_e} \approx \alpha = \frac{\beta}{1 + \beta}. \quad (4.77)$$

Вредност A_{ib} је мања од један.

Појачање напона транзистора у споју са заједничким емитором, A_{ue} , једнако је:

$$A_{ue} = \frac{u_o}{u_i} = \frac{-R_C i_c}{r_e i_b} \approx -\beta \frac{R_C}{r_e}, \quad (4.78)$$

где је r_e еквивалентна динамичка отпорност емиторског споја:

$$r_e = \frac{U_T}{i_e}, \quad (4.79)$$

која типично износи неколико десетина ома. Захваљујући томе појачање напона A_{ue} је много веће од један.

Појачање напона транзистора у споју са заједничком базом, A_{ub} , једнако је:

$$A_{ub} = \frac{u_o}{u_i} = \frac{R_C i_c}{r_e i_e} \approx \frac{R_C}{r_e}, \quad (4.80)$$

За транзистор у споју са заједничким колектором улазна величина је напон базе, а излазна напон емитора (слика 4.44.в).

$$A_{uc} = \frac{u_o}{u_i} = \frac{u_e}{u_b} \approx 1, \quad (4.81)$$

Појачање струје транзистора у споју са заједничким колектором једнако је:

$$A_{ic} = \frac{i_e}{i_b} \approx 1 + \beta. \quad (4.82)$$

Општа својства појединих начина спајања биполарног транзистора приказана су у табели 4.3.

величина		заједнички емитор	заједничка база	заједнички колектор
појачање напона	A_u	велико	велико	≈ 1
појачање струје	A_i	≈ 1	$\approx \beta$	$\approx \beta + 1$
улазна отпорност	R_i	мала	мала	велика
излазна отпорност	R_o	велика	мала	мала

Табела 4.3. Основна својства различитих врста појачавача

4.9. ЛИТЕРАТУРА

1. R. Lendi, D. Devis, A. Albreht, *Priručnik za elektroniku*, Građevinska knjiga, 1965, стр 2-62.
2. Ei, *Poluprovodnici*, 1985.
3. S. Marjanović, *Elektronika, diskretna i integrisana analogna kola*, Naučna knjiga, 1984, стр. 225.
4. P. Horowitz, W. Hill, *The art of electronics*, p. 95.
5. J. Millman, C. Halkias, *Integrated electronics*, Mc Graw-Hill, 1972, p 127.
6. Реф. 5, стр 129.
7. V. Cvekić, *Elektronika I*, Poluprovodnički elementi, Naučna knjiga, 1978, стр. 95
8. Реф. 5, стр 141.
9. Semiconductor discrete devices and integrated circuits, Part 7, Bipolar transistors, IEC 747-7, 1988, 4.20.
10. B. Raković, *Elektronika 1*, Naučna knjiga, 1963, стр.147.
11. Реф. 10, стр.142.
12. S. Tešić, D. Vasiljević, *Osnovi elektronike*, Građevinska knjiga, 1990, стр 91.
13. Leter symbols for semiconductor devices and integrated microcircuits, Bipolar and field effect transistors, IEC 148, 1969 (1974,1979), Словни симболи за полупроводничке компоненте, биполарни транзистори и транзистори са ефектом поља, ЈУС Н.Р1.353, 1979.
14. Реф. 5, стр 140.
15. Реф. 5, стр 303.
16. Реф. 5, стр 295.
17. J. Millman, H. Taub, *Pulse, digital, and switching waveforms*, McGraw.Hill, 1965, p 211.
18. Реф. 5, стр 295.
19. Реф. 5, стр 293.
20. Реф. 4, стр 192.
21. Реф. 4, стр 117.
22. Реф. 2, стр 139.

ПИТАЊА

1. Написати потпуне изразе којим су дефинисана појачања струје биполарног транзистора:
а) од емитора до колектора и
б) од базе до колектора.
Колике су њихова вредности код дискретних транзистора?
2. Графички приказати однос струја код биполарних транзистора PNP и NPN типа.
3. Објаснити појаву која се назива Ерлијев ефекат. Шта је Ерлијев напон?
4. Нацртати улазну и излазну статичку карактеристику биполарног транзистора.
5. Нацртати статичке карактеристике преноса биполарног транзистора.
6. Која су ограничења у раду транзистора? Шта је “хипербола снаге”?
7. Нацртати излазну статичку карактеристику биполарног транзистора у споју са заједничким емитором, назначити и објаснити границе радне области. Чиме су одређене области засићења и закочења?
8. Написати једначине које представљају математички h -модел биполарног транзистора. Како је дефинисан и шта представља параметар h_{ie} (h_{fe} , h_{fb} , h_{oe})?
9. Нацртати дијаграм који показује зависност појачања струје биполарног транзистора од учестаности.
10. Нацртати дијаграм који показује како појачање струје од базе до колектора биполарног транзистора зависи од вредности струје колектора.
11. Објаснити појаву која се назива “термичко бежање”.
12. Нацртати хибридно еквивалентно коло транзистора и објаснити физичку природу појединих параметара.
13. Нацртати еквивалентно π -коло транзистора у споју са заједничким емитором и објаснити физичку природу појединих параметара.
14. Одредити појачање струје за мале сигнале појачавача са транзистором у споју
а) са заједничким колектором, и
б) са заједничким емитором.
15. Нацртати спој транзистора који представља Дарлингтонов пар еквивалентан NPN (PNP) транзистору. Одредити појачања струје од базе до емитора еквивалентног транзистора.
16. Нацртати спој комплементарних транзистора који је еквивалентан NPN транзистору.
17. Одредити изразе за појачање напона, улазну и излазну отпорност транзистора у споју са заједничким колектором.
18. Како је дефинисана гранична учестаност транзистора?
19. Како су у електроници дефинисани “мали”, а како “велики” сигнали?
20. Од којих параметара зависи стабилност мирне радне тачке?

5. ТРАНЗИСТОРИ СА ЕФЕКТОМ ПОЉА

У овом поглављу се разматрају транзистори код којих у процесу провођења суделују слободни носиоци наелектрисања само једног поларитета. Детаљнији приказ физичког модела транзистора са ефектом поља (*field-effect transistor* - **FET**) је дат у осмом поглављу. У овом делу је приказан принцип рада, описане су статичке карактеристике и дефинисане области рада. Приказани су поступци поларизације спојних транзистора са ефектом поља, представљена су еквивалентна кола и дати су општи елементи анализе електронских склопова у којима се ови транзистори користе.

Описан је принцип рада транзистора са изолованим гејтом. Разматрају се разлике у структури транзистора са уграђеним и подстакнутим каналом. Приказане су статичке карактеристике, дефинисане области рада и описани поступци поларизације.

5.1. ПРИНЦИП РАДА

У транзистору са ефектом поља интензитет електричне струје кроз област која, као **канал** од полупроводничког материјала, повезује прикључне електроде, контролише се помоћу електричног поља које се успоставља прикључењем напона одговарајућег поларитета на управљачку электроду која наткриљује канал. Под дејством електричног поља мења се геометрија проводне области¹, услед чега се мења електрична проводност између електрода на супротним крајевима канала. Ове електроде се означавају као **сорс** (*source*) и **дрејн** (*drain*), а управљачка електрода као **гејт** (*gate*).

Према саставу, односно према типу полупроводника у средишњем подручју кроз које електрична струја протиче, разликују се **N-канални** и **P-канални транзистори**. Струју образују само већински носиоци наелектрисања у материјалу канала: електрони у N-каналном, односно шупљине у P-каналном транзистору. У начелу, због веће покретљивости

¹ Назив "ефект поља" (*field effect*) је усвојен као опис појаве (*effect*) управљања интензитетом електричне струје променом димензија области (*field*) просторног наелектрисања.

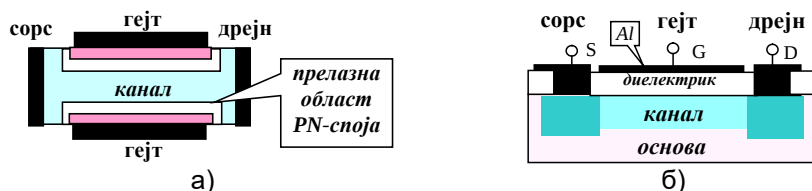
електрона у односу на шупљине, канал од полупроводника N-типа има, при осталим једнаким условима, већу проводност.

Према начину на који се остварује утицај електричног поља на проводност канала разликују се:

- **спојни транзистор** са ефектом поља, са PN-спојем између гејта и канала (*junction field-effect transistor - JFET*), и
- **транзистор са изолованим гејтом** (*insulated gate field-effect transistor - IGFET*).

У транзисторима са PN-спојем, између управљачке електроде (гејта) и канала се налази слој полупроводника са повећаном концентрацијом примеса супротног типа у односу на канал (слика 5.1.а). Између ове две области кристала полупроводника, у којима постоје слободни носиоци наелектрисања супротног поларитета (електрони у области N-типа, односно шупљине у области P-типа), налази се прелазна област која је дифузионим процесом “испражњена”, тако да не садржи покретљиве носиоце наелектрисања (*depletion layer*). Инверзном поларизацијом споја гејт-канал прелазна област у каналу се проширује. Тиме се постиже да ефективни пресек канала, односно његова проводност, зависи од интензитета напона на управљачкој електроди.

У транзисторима са ефектом поља са изолованим гејтом проводност канала се мења променом концентрације слободних носилаца наелектрисања под дејством електричног поља у кондензатору који образују метална електрода гејта, са једне стране, полупроводник, са друге, и танак слој диелектричног материјала (слика 5.1.б). Производе се технологијом напаравања врло танких слојева метала, изолатора и полупроводника (танкослојни транзистори, *thin film transistor - TFT*) или технологијом напаравања метала на танак слој оксида силицијума (SiO_2) који је оксидацијом образован на површини полупроводника (*metal-oxide-semiconductor - MOS*).



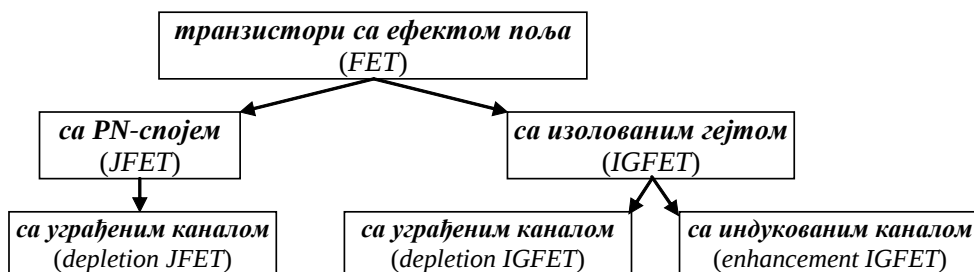
Слика 5.1. Транзистори са ефектом поља

Према начину образовања канала постоје:

- **транзистори са уграђеним каналом**², код којих проводни канал постоји и када гејт није поларисан; напон на гејту мења ширину прелазне области PN-споја, осиромашене у погледу концентрације слободних носилаца наелектрисања, чиме се мења геометрија, а тиме и проводност канала;

² У литератури се за транзисторе код којих се управљачко дејство остварује ширењем испражњене (*depletion*) области користи и назив “транзистори са потиснутим каналом”.

- **транзистори са индукованим каналом**³, код којих се деловањем електричног поља индукују слободни носиоци наелектрисања у области између прикључака за дрејн и сорс, чиме се остварују потребни услови за постојање електричне струје⁴.



Слика 5.2. Основна класификација транзистора са ефектом поља

Шема класификације транзистора са ефектом поља је приказана на слици 5.2. Уобичајено је да се називом **"фет"** у ужем смислу означавају спојни транзистори са ефектом поља, док се за транзисторе са изолованим гејтом у технологији метал-оксид-полупроводник (МОП) користе називи **"мосфет"** (*MOSFET*) и МОП-транзистор.

5.2. СПОЈНИ ТРАНЗИСТОРИ СА ЕФЕКТОМ ПОЉА

При инверзној поларизацији PN-споја гејт-канал одговарајућим напонам⁵, проширује се прелазна област у којој се налазе само "непокретни" некомпензовани јони атома примеса смештени у чворовима кристалне решетке, а не постоје слободни, покретљиви носиоци наелектрисања. Тиме се сужава подручје кроз које може да протиче струја између прикључака за сорс и дрејн, и смањује проводност канала што, при сталном напону на његовим крајевима, доводи до смањивања струје кроз канал.

У погледу начина рада транзистор са ефектом поља је сличан електронској цеви са три електроде (триода), код које се помоћу напона доведеног на решетку ствара електрично поље које делује на електроне који се крећу између катодe и аноде (слика 5.3.а). У транзистору са ефектом поља, променом напона поларизације мења се ширина прелазне области, односно ефективни попречни пресек канала, а услед тога и проводност између дрејна и сорса.

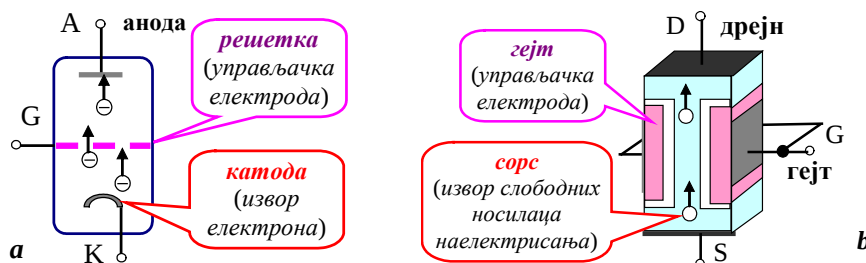
За разлику од вакуумске цеви, у којој су слободни носиоци наелектрисања електрони који термоелектронском емисијом "извиру" из

³ У литератури се користи и назив "транзистори са подстакнутим каналом" (*enhancement*).

⁴ Повећање концентрације слободних носилаца наелектрисања исказује се као успостављање (увођење, додавање, *enhancement*) проводног канала између прикључака за дрејн и сорс.

⁵ Поларитет напона на крајевима канала, U_{DS} , је такав да већински носиоци извиру (истичу) из сорса (извор, довод) и пониру у дрејн (одвод).

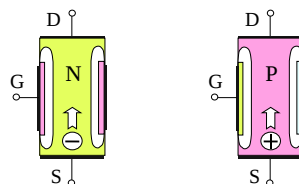
катоде (чиме је једнозначно одређен смер струје, а тиме и поларитет напона између електрода), у транзисторима са каналом P-типа слободни носиоци наелектрисања су шупљине, па су смерови извора напона дрејн-сорс и гејт-сорс, као и физички смер струје кроз канал обрнути. У уобичајеним условима рада напон гејт-сорс је позитиван, а напон дрејн-сорс негативан.



Слика 5.3. Аналогија између транзистора са ефектом поља и електронске цеви

За N-канални транзистор у уобичајеним условима рада аналогија са електронском цеву је потпуна. Напон дрејн-сорс је позитиван, а напон гејт-сорс негативан. Слободни носиоци наелектрисања у каналу су електрони који се крећу од сорса према дрејну. У начелу, конструкција фета може бити таква да је он потпуно симетричан у погледу приступа преко прикључака на крајевима канала. Прикључци за дрејн и сорс се тада могу заменити без утицаја на својства фета као елемента. Другим речима, од поларитета извора напона за поларизацију зависи који ће прикључак представљати сорс, а који дрејн.

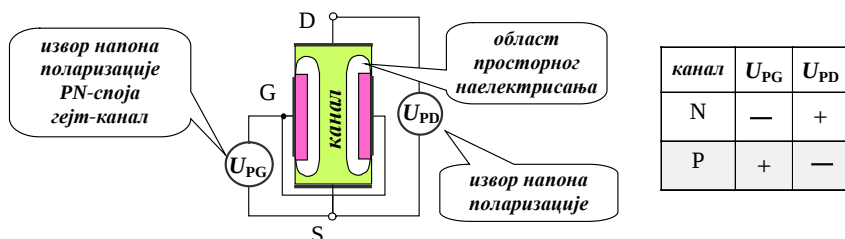
Сорс је електрода из које “извиру” слободни носиоци наелектрисања.



У поређењу са биполарним транзисторима, фет се разликује у погледу неколико значајних обележја:

- у процесу провођења суделују само носиоци наелектрисања једног типа (униполарни транзистори);
- улазна отпорност управљачке електроде (гејта) је веома велика, типично неколико мегаома;
- напон између излазних прикључака (дрејна и сорса) једнак је нули када је струја кроз канал једнака нули;
- димензије транзистора су мање, а процес производње једноставнији.

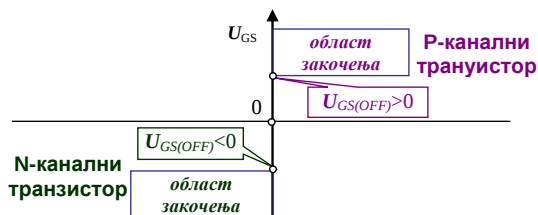
Инверзном поларизацијом PN-споја гејт-канал повећава се ширина прелазне области просторног наелектрисања, а услед тога и отпорност између дрејна и сорса. При сталној вредности напона U_{DS} између сорса и дрејна, струја кроз канал I_D зависи од вредности напона U_{GS} инверзно поларисаног споја гејт-канал.



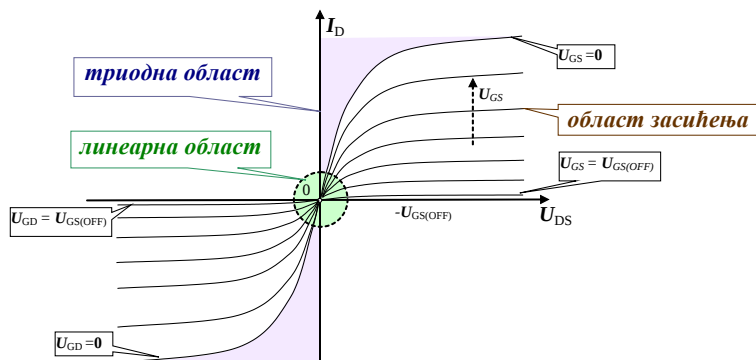
Слика 5.4. Поляризација транзистора са ефектом поља

При довољно великом напону инверзне поляризације споја гејт-канал “испражњена” област се простире преко целог канала. Канал се прекида и кроз њега тече само веома мала одводна струја⁶. Вредност напона при којем прелазна област обухвата цео попречни пресек канала се назива **напон прекида**⁷ и означава са $U_{GS(OFF)}$ или U_{GSoff} [1].

Напон прекида $U_{GS(OFF)}$ је позитиван за P-канални транзистор, а негативан за N-канални транзистор.



Ред величине напона $U_{GS(OFF)}$ је неколико волта. Када је напон инверзне поляризације споја гејт-сорс по интензитету већи од напона прекида ($|U_{GS}| > |U_{GS(OFF)}|$) отпорност канала веома је велика, фет је “закочен”. Струја $I_{DS(off)}$ (drain cutoff current) је типично мања од микроампера.



Слика 5.5. Зависност струје кроз канал од напона поляризације

При сталној вредности напона инверзне поляризације PN-споја гејт-канал, U_{GS} , мањој од напона потребног за прекидање канала, струја I_D је

⁶ Струја одвода, цурења (leakage current)

⁷ У литератури и каталозима произвођача користе се и следећи називи и ознаке: напон додира (прелазна подручја PN-споја се додирују, канал је прекинут), напон уштинућа канала (gate pinch-off voltage V_p , Abschnürspannung, напращение отсечки) или напон прага вођења (gate-source cutoff voltage). При специфицирању се наводи вредност напона U_{DS} и струје одвода (цурења, leakage) кроз “затворен” канал.

сразмерна вредности напона између прикључака на крајевима канала, U_{DS} . Канал се понаша као отпорник. Повећањем напона U_{DS} , међутим, повећава се инверзни напон поларизације PN-споја гејт-канал у делу који представља прикључак за дрејн. Канал почиње да се сужава у подручју дрејна, па је релативно повећање струје I_D све мање уколико је напон U_{DS} већи. При довољно великим вредностима напона U_{DS} динамичка отпорност напонско-струјне карактеристике $I_D(U_{DS})$ се повећава, настаје **засићење** (слика 5.5). У овој области струја I_D се веома мало мења са променом напона на крајевима канала.

Зависност $I_D(U_{DS})$, посматрана у ширем опсегу вредности напона U_{DS} , је нелинеарна. У начелу, могу се дефинисати три области рада транзистора са ефектом поља.

- При малим вредностима напона на крајевима канала ($U_{DS} \approx 0$) ширина подручја просторног наелектрисања у свим тачкама дуж осе канала има једнаку вредност, зависну од напона гејт-сорс. При сталној вредности напона U_{GS} ефективни пресек канала је константан, струја I_D сразмерна напону U_{DS} :

$$I_D = GU_{DS}; U_{GS} = const, \quad (5.1)$$

па се ово подручје назива **линеарна област**.

- При већим вредностима напона U_{DS} , али мањим од напона потребног за настанак засићења, ширина подручја просторног наелектрисања, а тиме и ефективни пресек канала, зависи од растојања посматране тачке од сорса. Функција којом се описује зависност $I_D(U_{DS}, U_{GS})$ има облик сличан облику зависности струје триоде од напона анода-катода и решетка-катода, [2], због чега се ова област назива **триодна област**⁸.
- При довољно великој вредности напона U_{DS} се може сматрати да струја I_D не зависи од напона U_{DS} - **област засићења**. Напонско-струјна карактеристика фета у овој области се описује једначином:

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_{GS(OFF)}} \right)^2, \quad (5.2)$$

Струја I_{DSS} је струја засићења (*saturation drain current*) када је напон U_{GS} једнак нули⁹:

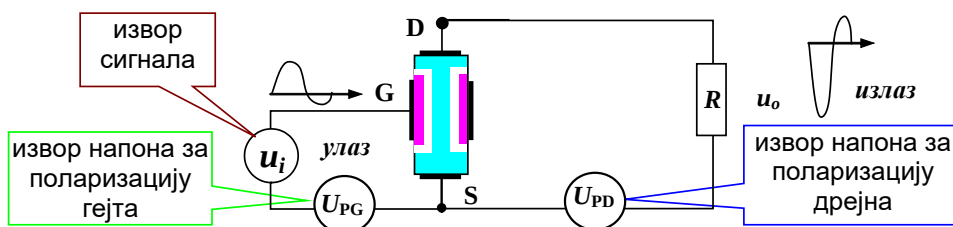
$$I_{DSS} = I_{Dsat}|_{U_{GS}=0} = I_D|_{U_{DS}=-U_{GS(OFF)}; U_{GS}=0}. \quad (5.3)$$

У области засићења проводност (кондуктанса) излазног кола зависи од улазног напона U_{GS} . Транзистори са ефектом поља делују као транскондуктансни појачавачи.

⁸ У литератури се користе и називи: "незасићена" и "омска" област.

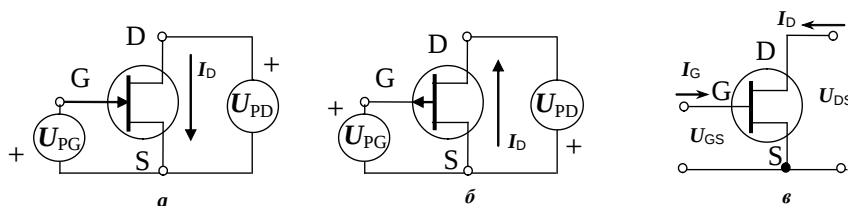
⁹ Ознаке у индексу симболизују дефиницију величине I_{DSS} – струја засићења канала између дрејна и сорса, при кратком споју између гејта и сорса (*Drain to Source current with the gate Shorted to source*).

Спојни транзистор са ефектом поља је, као и биполарни транзистор, елемент са три прикључка који се повезује тако да једна електрода представља улазни, друга излазни прикључак, а трећа је заједничка улазном и излазном колу. Спој са заједничким сорсом (слика 5.6) је основни облик спреге. Електрично поље инверзно поларисаног PN-споја гејт-канал мења проводност канала, што доводи до одговарајуће промене напона између крајева канала.



Слика 5.6. Транзистор са ефектом поља као појачавач

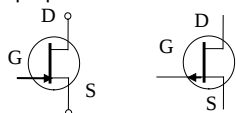
На слици 5.7 су приказани графички симболи N-каналног и P-каналног фета¹⁰ са назначеним физичким смеровима извора (једносмерних) напона поларизације гејта, U_{PG} , и дрејна, U_{PD} , и физичким смеровима једносмерних струја. Према конвенцији, струја која утиче у елемент (фет) је позитивна (слика 5.7.в).

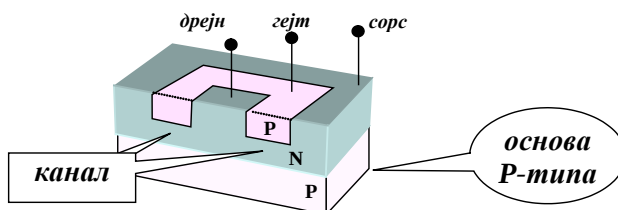


Слика 5.7. Графички симболи N-каналног и P-каналног спојног транзистора

Са становишта економичности производње, структура приказана на слици 5.1 није погодна због потребе да се примесе уносе са обе стране плочице кристала полупроводника (*wafer*). На слици 5.8. је приказана конструкција која омогућује да се дифузија увек врши само са једне стране [3]. На основи P-типа, на пример, поступком који се назива епитаксијални раст кристала, образује се слој N-типа који представља канал. Потом се гејт остварује дифузијом примеса у подручје канала. Основа (*substrate*) може да делује као гејт.

¹⁰ Приказани симболи одговарају америчком стандарду. Европски стандард (IEC) препоручује графичке симболе код којих је извод за гејт наспрам извода за сорс транзистора.





Слика 5.8. Конструкција транзистора са ефектом поља

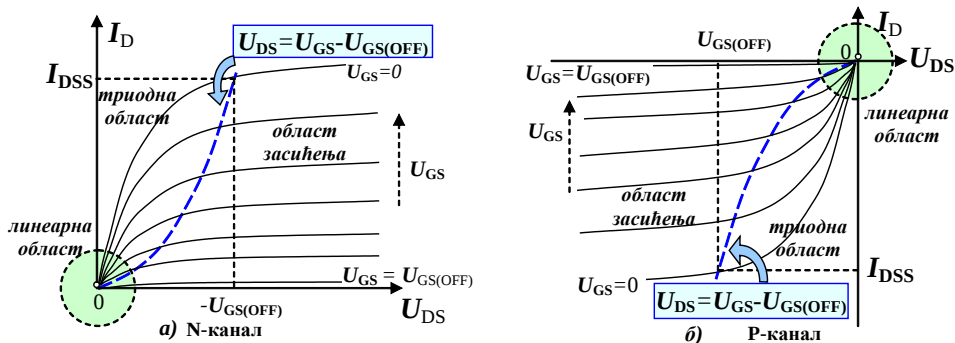
Као и биполарни транзистори, транзистори са ефектом поља су осетљиви на светлосно зрачење. Ово својство се користи у фотометрији, [1], као и за израду оптоелектронских елемената који омогућују пренос сигнала са галванским раздвајањем улазних и излазних прикључака.

5.2.1. СТАТИЧКЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ

Улазна струја I_G , која представља инверзну струју PN-споја гејт-канал, је занемарљиво мала¹¹, па U - I карактеристика улаза (приступ гејт-сорт) није значајна за пројектовање кола са фетовима. При анализи користе се само карактеристика излаза $I_D(U_{DS})$ и карактеристика преноса $I_D(U_{GS})$.

5.2.1.1. Карактеристика излаза

На слици 5.9. су приказане фамилије типичних излазних карактеристика N-каналног и P-каналног транзистора за различите вредности напона U_{GS} као параметра. На дијаграму се могу уочити три карактеристичне области.



Слика 5.9. Излазне карактеристике

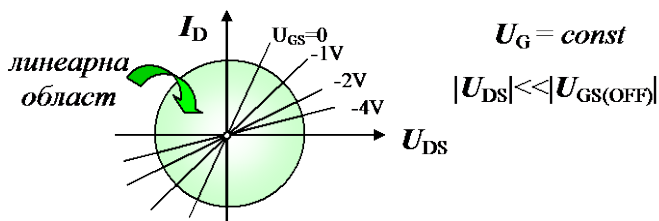
- За врло мале вредности напона између спољашњих прикључака за крајеве канала транзистор се налази у линеарном режиму. Струја I_D сразмерна је вредности напона U_{DS} , при чему сачинилац сразмерности (проводност канала G) зависи од напона U_{GS} .
- Када је напон између дрејна и сорта по интензитету већи од напона

¹¹ Струја I_{GSS} (gate reverse current) је обично знатно мања од микроампера.

прага $U_{GS(OFF)}$, транзистор се налази у области засићења. Струја I_{Dsat} тада зависи од конструкционих параметара транзистора и вредности напона U_{GS} , а веома мало зависи од напона U_{DS} .

- У подручју између засићења и почетне линеарне области се налази област у којој карактеристика транзистора са ефектом поља одговара карактеристици електронске цеви - триоде.

Када је $|U_{DS}| \ll |U_{GS(OFF)}|$, фет делује као отпорник чија је **отпорност управљана напонам** (напонски управљана отпорност). Отпорност канала је најмања када је напон између гејта и сорса једнак нули, $U_{GS} = 0$, а највећа при $|U_{GS}| \geq |U_{GS(OFF)}|$, када је транзистор закочен (слика 5.10). У спецификацијама транзистора се наводи вредност статичке отпорности између дрејна и сорса у стању провођења, $r_{DS(ON)}$, при $U_{GS} = 0$ и назначеној вредности струје I_D , односно вредност еквивалентне отпорности између дрејна и сорса у стању провођења, $r_{ds(on)}$, при $U_{GS} = 0$, $I_D = 0$ и назначеној вредности учестаности.



Слика 5.10. U - I карактеристика N-каналног транзистора у линеарној области

Граница триодне области и области засићења представља параболу приказану испрекиданом линијом на дијаграмима излазних карактеристика N-каналног и P-каналног фета (слика 5.9).

$$I_{Dsat} = I_{DSS} \left(\frac{U_{DSsat}}{U_{GS(OFF)}} \right)^2. \quad (5.4)$$

У области засићења транзистор се "понаша" као извор струје управљан напонам (транскондуктансни појачавач).

Отпорност (проводност) канала између дрејна и сорса¹² зависи од положаја мирне радне тачке $Q(I_{DQ}, U_{DSQ})$. Као што слике 5.5 и 5.9 показују, излазне карактеристике фета у засићењу нису паралелне са осом напона. **Динамичка отпорност канала** r_{ds} (*channel, drain-source resistance*) представља парцијални извод функције $I_D(U_{DS}, U_{GS})$:

$$r_{ds} = \left. \frac{\partial U_{DS}}{\partial I_D} \right|_{U_{GS}=const}. \quad (5.5)$$

Слично као код биполарних транзистора, вредност динамичке отпорности r_{ds} у области засићења се може специфицирати Ерлијевим напонам U_{EY} :

¹² У литератури се користе и ознаке r_d односно g_d .

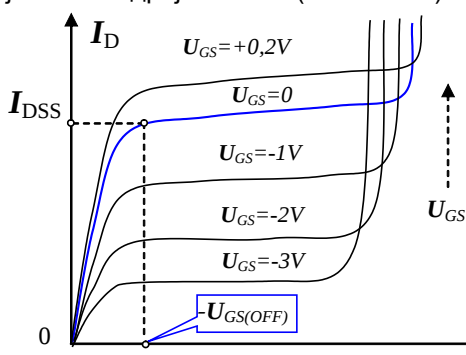
$$r_{ds} = \frac{U_{EY}}{I_{DQ}}. \quad (5.6)$$

Нагиб излазне карактеристике $I_D(U_{DS})|_{U_{GS}=\text{const}}$ одређује **динамичка излазна проводност** транзистора (између дрејна и сорса):

$$g_{ds} = \left. \frac{\partial I_D}{\partial U_{DS}} \right|_{U_{GS}=\text{const}} = \frac{1}{r_{ds}}, \quad (5.7)$$

која је обрнуто сразмерна динамичкој отпорности канала r_{ds} .

Напон пробоја инверзно поларисаног PN-споја гејт-сорс је типично од 30 V до 50 V. До појаве пробоја долази и при било којој инверзној поларизацији споја гејт-канал, ако напон U_{DS} исувише порасте. Уколико је при инверзној поларизацији гејта напон U_{GS} по апсолутној вредности већи, утолико је пробојни напон дрејна мањи (слика 5.11).



Слика 5.11. Статичке карактеристике N-каналног транзистора у области пробоја

Спој гејт-канал се може поларисати у пропусном смеру, али се тада губе основна својства спојног транзистора са ефектом поља као елемента који омогућује контролу проводности канала практично без икаквог оптерећења управљачког кола. При “благој” проводној поларизацији, основни облик карактеристике остаје неизмењен, као што је то приказано на слици 5.11.

5.2.1.2. Карактеристика преноса

Зависност $I_D(U_{GS})$ је нелинеарна. Нагиб (стрмина) карактеристике преноса представља основну величину која одређује својства фета као појачавача. Ова величина назива се **динамичка проводност преноса** (*mutual conductance*) или динамичка транскондуктанса, а дефинисана је једначином:

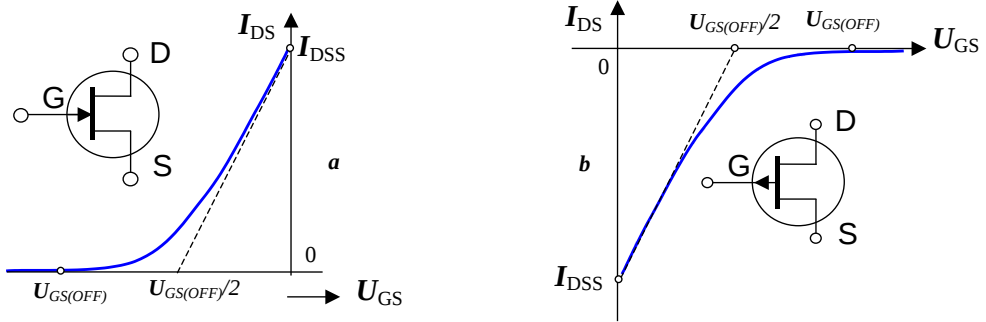
$$g_m = \left. \frac{\partial I_D}{\partial U_{GS}} \right|_{U_{DS}=0}. \quad (5.8)$$

У великом броју случајева примене транзистора са ефектом поља, укључујући и линеарно појачање сигнала, радна тачка се налази у области засићења излазне карактеристике, када напон U_{DS} има веома мали утицај на вредност струје која протиче кроз канал. Статичка карактеристика преноса фета у области засићења приказана је на слици 5.12.

За $|U_{GS}| \ll |U_{GS(OFF)}|$ карактеристика преноса може се апроксимирати правом линијом:

$$I_D \approx I_{DSS} + g_{m0} U_{GS} \quad (5.9)$$

која представља тангенту на стварну карактеристику преноса у тачки $U_{GS} = 0$.



Слика 5.12. Карактеристике преноса N- и P-каналног транзистора у области засићења

На основу формуле 5.2 следи да у области засићења важи:

$$g_m = g_{m0} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_{GS(OFF)}} \right), \quad (5.10)$$

где је g_{m0} проводност преноса при $U_{GS} = 0$:

$$g_{m0} = g_m|_{U_{GS}=0} = \frac{2I_{DSS}}{-U_{GS(OFF)}}. \quad (5.11)$$

Величине I_{DSS} и $U_{GS(OFF)}$ су увек супротног знака, па је вредност g_{m0} увек позитивна¹³. На основу једначина 5.2 и 5.10 следи:

$$g_m = g_{m0} \sqrt{\frac{I_D}{I_{DSS}}}. \quad (5.12)$$

односно:

$$g_m = \frac{2}{|U_{GS(OFF)}|} \sqrt{I_{DSS} I_D}. \quad (5.13)$$

Према формули 5.12, напон прекида канала је једнозначно дефинисан вредностима величина g_{m0} и I_{DSS} , које се могу прецизно измерити¹⁴. На основу

¹³ Као што слика 5.12. показује, излазна карактеристика транзистора, $I_D(U_{GS})$, је растућа функција независно од врсте (поларитета) слободних носиоца наелектрисања који се крећу кроз канал.

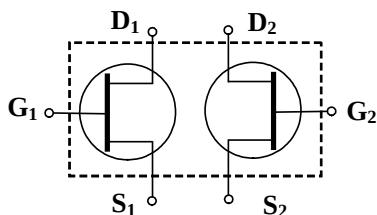
¹⁴ Напон $U_{GS(OFF)}$ одређен је тачком у којој тангента на карактеристику преноса $I_D(U_{GS})$ у тачки

тога могуће је одредити вредност $U_{GS(OFF)}$. Већина произвођача транзистора, међутим, у својим каталозима под ознаком $U_{GS(OFF)}$ наводи напон гејта при коме је струја I_D смањена до неке назначене мале вредности. Притом, вредности које се гарантују за одређени тип транзистора могу бити у сразмерно широким границама. На пример, према подацима које произвођач, фирма *Siliconix*, даје у оквиру спецификација N-каналног JFET-транзистора 2N4391 (тебела 5.1), најмања, $\min U_{GS(OFF)}$, и највећа вредност напона пробоја, $\max U_{GS(OFF)}$, су у односу 1 : 2,5. Широк опсег могућих вредности напона прекида транзистора истог типа представља проблем при пројектовању електронских кола, када се захтева да се након уградње специфицираних елемената коло налази у пројектованом режиму рада без додатног усклађивања.

величина	симбол	јединица	min	max	радни услови ($T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$)
Напон прекида	$U_{GS(OFF)}$	V	-4	-10	$U_{DS} = 20\text{ V}$ $I_D = 1\text{ nA}$
Струја цурења	$I_{D(OFF)}$	pA		100	$U_{DS} = 20\text{ V}$ $U_{GS} = -12\text{ V}$
Струја дрејна при кратком споју између гејта и сорса	I_{DSS}	mA	50	150	$U_{DS} = 20\text{ V}$ $U_{GS} = 0$

Табела 5.1. Спецификација параметара за N-канални транзистор 2N4391

За примене у којима се захтева једнакост карактеристика транзистора, производе се, у виду монолитне целине, дуални транзистори (слика 5.13), код којих се односи струја I_{DSS1}/I_{DSS2} и проводности g_{m1}/g_{m2} налазе у релативно уским границама, на пример од 0,95 до 1,05.



Слика 5.13. Дуални транзистори

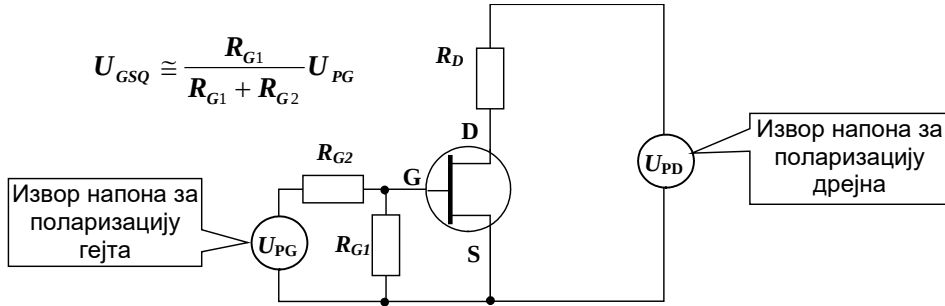
5.2.2. ПОЛАРИЗАЦИЈА

5.2.2.1. Поларизација са два независна извора напона

Поларизацијом се мирна радна тачка $Q(U_{DSQ}, I_{DQ})$ поставља у жељену област рада транзистора. За разлику од биполарних транзистора, код транзистори са ефектом поља није могуће остварити независну поларизацију улаза и излаза помоћу само једног извора напона, јер у уобичајеним условима рада једносмерни напони U_{PG} и U_{PD} имају супротан поларитет (слика 5.4). У колу приказаном на слици 5.14, делитељ напона који образују

$U_{GS} = 0$, сече напонску осу (слика 5.12).

отпорници R_{G1} и R_{G2} олакшава задавање (подешавање) жељене вредности напона поларизације гејта.



Слика 5.14. Поларизација са два извора

Ако су познате вредности струје засићења I_{DSS} и напона прекида $U_{GS(OFF)}$, вредност мирне радне струје I_{DQ} се израчунава на основу израза који описује карактеристику преноса $I_D(U_{GS})$ у области засићења:

$$I_{DQ} = I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GSQ}}{U_{GS(OFF)}} \right)^2. \quad (5.14)$$

Да би транзистор био у засићењу (када се може применити једначина 5.14) потребно је да напон између гејта и дрејна буде већи од напона прекида транзистора (слика 5.9):

$$|U_{GD}| \geq |U_{GS(OFF)}|. \quad (5.15)$$

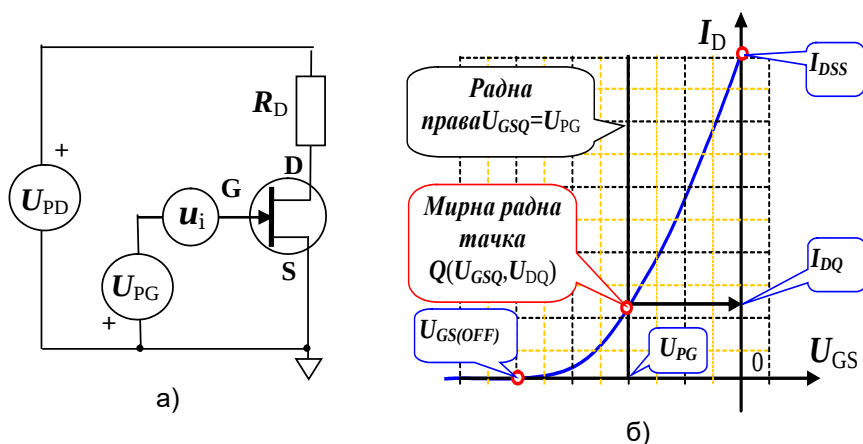
Основни облик појачавача са заједничким сорсом је приказан на слици 5.15.а. Напон U_{GSQ} , који представља једносмерни напон на гејту, је једнак:

$$U_{GSQ} = U_{PG}. \quad (5.16)$$

Вредност напона U_{DSQ} одређује се на основу другог Кирхофовог закона примењеног на излазну контуру кола:

$$U_{DSQ} = U_{PD} - R_D I_{DQ}. \quad (5.17)$$

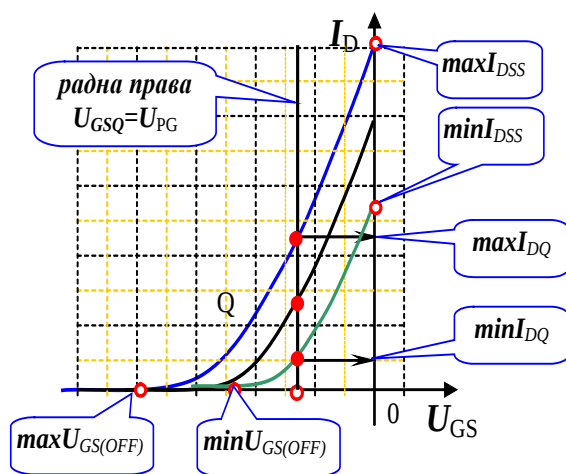
Одређивање положаја мирне радне тачке може се, као и код биполарних транзистора, извршити графички (слика 5.15.б), уколико се располаже одговарајућим дијаграмима.



Слика 5.15. Одређивање положаја мирне радне тачке

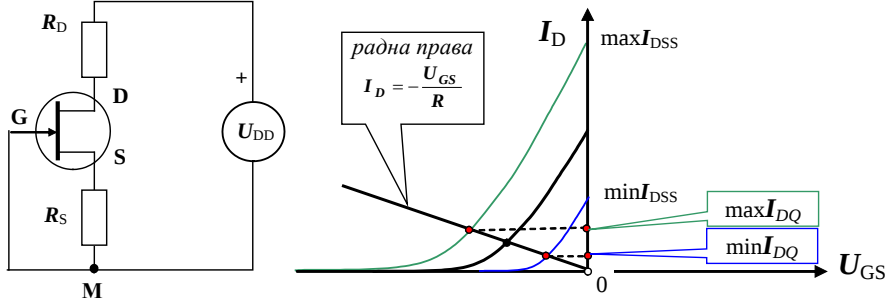
Као што је већ истакнуто, вредност напона прекида одређеног типа транзистора се разликује од комада до комада. Сразмерно широк опсег могућих вредности постоји и у погледу вредности струје засићења I_{DSS} . За већ поменути N-канални транзистор 2N4391 (*Siliconix*), на пример, однос $\min I_{DSS}$ и $\max I_{DSS}$ је један према три (табела 5.1).

Велика одступања у вредностима карактеристичних параметара транзистора одређеног типа отежавају анализу и пројектовање електронских кола. Олакшавајућу околност, када се ради са транзисторима са ефектом поља, представља чињеница да, из разлога који се налазе у геометрији фета, транзистори који имају већу струју I_{DSS} имају и већи напон $U_{GS(OFF)}$. То значи да се криве $I_D(U_{GS})$ које одговарају граничним случајевима, ($\max I_{DSS}$, $\max U_{GS(OFF)}$) односно ($\min I_{DSS}$, $\min U_{GS(OFF)}$), не секу, па је могуће одредити вредности $\min I_{DQ}$ и $\max I_{DQ}$, које представљају границе опсега могућих вредности мирне радне струје (слика 5.16).

Слика 5.16. Одређивање опсега вредности радне струје I_{DQ} у колу са два извора напона поларизације

5.2.2.2. Поларизација једним извором напона

Помоћу отпорника везаног између сорса и чвора М који представља референтну тачку, у односу на коју је дефинисан потенцијал излаза извора напона за поларизацију дрејна, постже се жељена поларизација фета применом само једног извора (слика 5.17). Отпорник за поларизацију, R_S , у овом случају припада и улазној (гејт-сорс) и излазној (дрејн-сорс) контури, што значи да његова вредност мора да буде усаглашена са различитим захтевима у погледу радних услова улазног и излазног кола.



Слика 5.17. Поларизација N-каналног транзистора једним извором

На основу једначине која, према другом Кирхофовом закону, важи за контуру у којој се налази спој гејт-сорс:

$$U_{GSQ} + R_S I_{DQ} = 0, \quad (5.18)$$

и једначине 5.13, може се одредити величина отпорности R_S при којој струја кроз канал има жељену вредност I_{DQ} :

$$R_S = -\frac{U_{GSQ}}{I_{DQ}} = -\frac{U_{GS(OFF)}}{I_{DQ}} \left(1 - \sqrt{\frac{I_{DQ}}{I_{DSS}}} \right). \quad (5.19)$$

Знак »-« у овом изразу последица је чињенице да, за усвојене референтне смерове, напон U_{GS} и струја I_D имају супротан предзнак.

Мирна радна струја I_{DQ} у овом колу, када су познате вредности елемената као и параметри транзистора I_{DSS} и $U_{GS(OFF)}$, одређена је изразом:

$$I_{DQ} = I_{DSS} \left(1 + \frac{R_S I_{DQ}}{U_{GS(OFF)}} \right)^2. \quad (5.20)$$

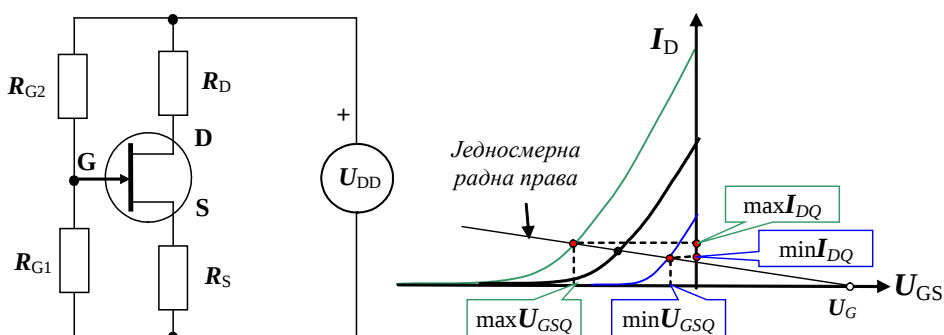
Проблем одређивања вредности струје I_{DQ} своди се, дакле, на решавање квадратне једначине.

Осетљивост положаја мирне радне тачке у односу на промене параметара фета је утолико мања уколико је мањи нагиб радне праве (*bias line*), дефинисане једначином:

$$U_{DSQ} = U_{DD} - R_D I_{DQ}. \quad (5.21)$$

Другим речима, стабилност радне тачке утолико је већа уколико је отпорност R_S већа. Потребна вредност струје I_{DQ} , међутим, одређује и вредност отпорности R_S (једначина 5.19).

Смањење осетљивости постиже се позитивном претполаризацијом гејта, као што је то показано на слици 5.18. Помоћу делитеља напона који образују отпорници R_{G1} и R_{G2} успостављен је позитиван напон U_G на гејту N-каналног транзистора.



Слика 5.18. Стабилизација положаја радне тачке

Једначина којом је дефинисана радна права, у овом случају има облик:

$$U_{GSQ} = U_G - R_S I_{DQ}. \quad (5.22)$$

На основу једначина 5.18 и 5.22 могуће је, за декларисане парове вредности ($\min I_{DSS}$, $\min U_{GS(OFF)}$), и ($\max I_{DSS}$, $\max U_{GS(OFF)}$), и пројектовану највећу и најмању вредност мирне радне струје, $\max I_{DQ}$ и $\min I_{DQ}$, одредити вредност напона U_G , односно односно прорачунати делитељ напона који образују отпорници R_{G1} и R_{G2} .

5.2.3. ЕКВИВАЛЕНТНА КОЛА

Помоћу извора једносмерног напона и отпорника транзистор са ефектом поља се поларише са циљем постављања мирне радне тачке Q (U_{DSQ} , I_{DQ}) у изабрани положај у жељеној области U - I равни. Фет је напонски управљан елемент који се описује функцијом која приказује зависност струје I_D од напона U_{GS} и U_{DS} :

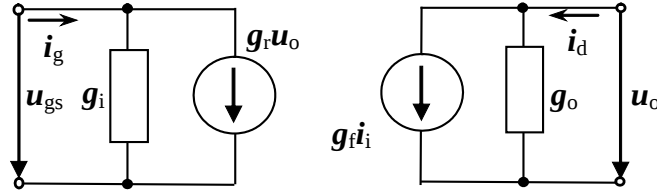
$$I_D = I_D(U_{GS}, U_{DS}). \quad (5.23)$$

Функција 5.23 је нелинеарна, али се за мале сигнале (у околини мирне радне тачке) транзистор са ефектом поља посматра као линеарни елемент са два приступа.

У анализи електронских кола у којима се користе транзистори са ефектом поља могу се применити различити математички модели елемената са више приступа који су описани у другом поглављу ове књиге. Најподеснији је **g-систем једначина**, чији параметри имају димензију проводности:

$$\begin{bmatrix} i_i \\ i_o \end{bmatrix} = \mathbf{g} \cdot \begin{bmatrix} u_i \\ u_o \end{bmatrix}; \quad \mathbf{g} = \begin{bmatrix} g_i & g_r \\ g_f & g_o \end{bmatrix}. \quad (5.24)$$

Одговарајуће еквивалентно коло је приказано на слици 5.19.



Слика 5.19. Хибридно еквивалентно коло – g модел

Као што је већ истакнуто, у уобичајеним радним условима, спој гејт-канал је поларисан у непропусном смеру, улазна струја i_g је занемарљиво мала, па се улазни параметри, g_i и g_r , не узимају у разматрање. Математички модел фета се своди на само једну једначину:

$$i_d = g_m u_{gs} + g_{ds} u_{ds}. \quad (5.25)$$

Величине $g_m = g_f$ и $g_{ds} = g_o$, односно $r_{ds} = 1/g_{ds}$, су основни параметри транзистора са ефектом поља, чије еквивалентно коло за мале сигнале ниских учестаности се своди на коло приказано на слици 5.20.а. Применом теореме о еквиваленцији независног напонског и струјног генератора, долази се до кола којим се спојни транзистор са ефектом поља представља као несавршени напонски контролисани извор напона (слика 5.20.б), чија је унутрашња отпорност једнака r_{ds} , а константа преноса μ једнака:

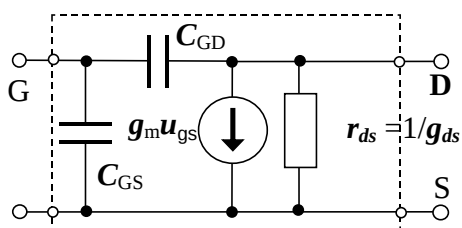
$$\mu = g_m r_{ds}. \quad (5.26)$$



Слика 5.20. Еквивалентна кола транзистора са ефектом поља

При вишим учестаностима се мора узети у обзир утицај некомпензованог наелектрисања у прелазној области инверзно поларисаног PN-споја између гејта и канала. Овај ефекат се исказује капацитивностима C_{GS} и C_{GD} које садрже и паразитне капацитивности прикључака¹⁵ (слика 5.21). Капацитивност између дрејна и сорса је веома мала (0,1 pF до 1 pF), и обично се занемарује.

¹⁵ У каталозима произвођача ове величине се означавају са C_{iss} (common-source input capacitance), односно C_{rss} (common-source reverse transfer capacitance).



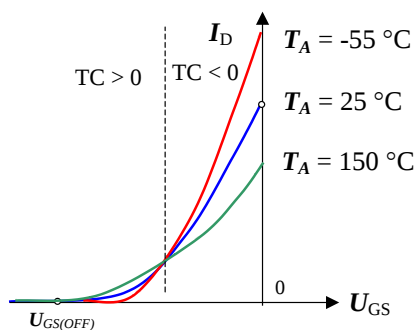
Слика 5.21. Еквивалентно коло за високе учестаности

Типичне вредности основних параметара транзистора са ефектом поља, које се наводе у спецификацијама произвођача, дате су у табели 5.2.

параметар	ознака	јединица	опсег вредности
струја засићења	I_{DSS}	mA	од 5 до 500
инверзна струја гејта	I_{GSS}	nA	од 0,01 до 1
пробојни напон	$U_{(BR)}$	V	од 20 до 100
напон кочења	$U_{GS(OFF)}$	V	од 1 до 10
излазна проводност	$g_{ds}(g_{os})$	μS	од 1 до 500
проводност преноса	$g_m(g_{is})$	μS	од 100 до 18 000
улазна капацитивност	$C_{GS}(C_{iss})$	pF	од 3,5 до 45
излазна капацитивност	$C_{GD}(C_{rss})$	pF	од 0,85 до 10

Табела 5.2. Типичне вредности основних параметара

У мањој или већој мери, сви параметри транзистора са ефектом поља су зависни од температуре. Струја I_{GSS} се приближно удвостручава на сваких 10 °C пораста температуре. Утицај температуре на карактеристику преноса је приказан на слици 5.22. При малим вредностима напона U_{GS} струја I_D има негативни температурски коефицијент, који постаје позитиван када је напон U_{GS} велики.



Слика 5.22. Утицај температуре на карактеристику преноса

Ова појава резултат је два процеса. Покретљивост слободних носилаца наелектрисања у каналу се смањује са повећањем температуре, отпорност канала расте, због чега се струја I_D смањује. Са друге стране, висина потенцијалне препреке има негативни температурски коефицијент, што доводи до повећања струје I_D са температуром. У тачки у којој се ова два ефекта међусобно поништавају температурски коефицијент TC струје I_D једнак је нули, што пружа могућност подешавања поларизације транзистора

тако да се положај мирне радне тачке веома мало мења са променама температуре.

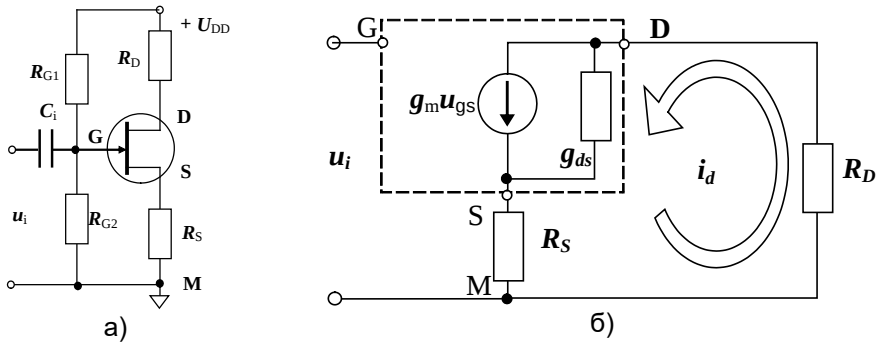
Инверзна струја гејта је веома мала, знатно мања од инверзне струје биполарних транзистора и “обичних” сигналних диода. Ово својство користи се за израду диода (FED) намењених за заштиту улаза електронских кола која раде са веома малим улазним струјама, када велика инверзна струја заштитних елемената уноси недопустиву грешку при обради сигнала. Инверзна струја диоде JPAD5 (*Siliconix*), на пример, мања је од 5 pA при инверзној поларизацији напонам од 20 V.

5.2.4. АНАЛИЗА КОЛА СА СПОЈНИМ ТРАНЗИСТОРИМА СА ЕФЕКТОМ ПОЉА

Електронска кола, у којима су примењени спојни транзистори са ефектом поља, анализирају се на исти начин као и кола са биполарним транзисторима. У начелу, могућа су три основна облика спреге: са заједничким сорсом, дрејном или гејтом. У спрези са заједничким гејтом улазна отпорност фета је мала па се таква веза сразмерно ретко користи. На слици 5.23.а приказан је општи облик кола појачавача са фетом. Еквивалентно коло за мале сигнале је приказано на слици 5.23.б. Управљачки напон u_{gs} је у овом случају једнак:

$$u_{gs} = u_i - R_S i_d \quad (5.27)$$

где је i_d променљива (наизменична) компонента струје кроз транзистор.

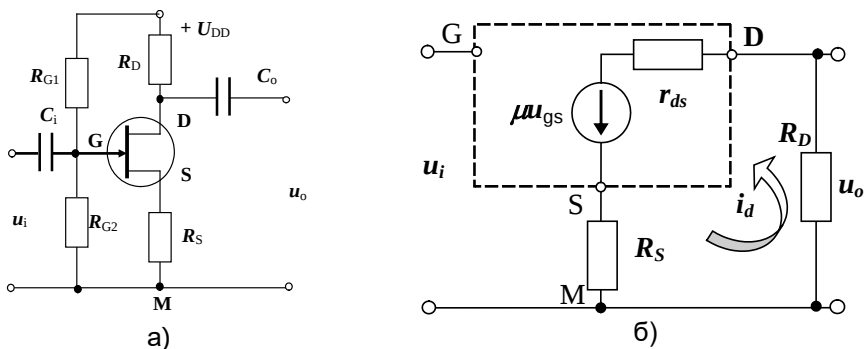


Слика 5.23. Општа шема и еквивалентно коло појачавача

Улазни сигнал, напон $u_i(t)$, се доводи преко кондензатора за спрегу на гејт транзистора. Вредност капацитивности C_i се бира тако да се њен утицај може занемарити у радном опсегу учестаности сигнала $u_i(t)$:

$$X_i = \frac{1}{j\omega C_i} \cong 0. \quad (5.28)$$

Излазни сигнал посматраног кола се може узети преко прикључка за сорс или прикључка за дрејн¹⁶. Промене напона у овим тачкама су комплементарне: када се, због повећања струје кроз канал, потенцијал прикључка за сорс повећава, потенцијал прикључка за дрејн се смањује. На слици 5.24 је приказан инвертујући појачавач, који се добија када се излазни сигнал узима са дрејна.



Слика 5.24. Принципска шема и еквивалентно коло инвертујућег појачавача

Кондензатор C_o одстрањује сталну (једносмерну) компоненту, U_D , променљивог напона $u_D(t)$, која потиче од поларизације транзистора:

$$u_D(t) = U_D + u_d(t) = U_{DD} - R_D I_{DQ} + u_d(t). \quad (5.29)$$

Ако утицај капацитивности C_o може да се занемари, напон $u_o(t)$ на излазу кола једнак је напону $u_d(t)$.

Излазни напон u_o представља наизменичну компоненту напона дрејна:

$$u_o = -R_D i_d \quad (5.30)$$

Применом другог Кирхофовог правила на излазну петљу овог кола (слика 5.24.б):

$$\mu I_{gs} + (r_{ds} + R_S + R_D) i_d = 0, \quad (5.31)$$

и сменом одговарајућег израза за напон (5.27):

$$\mu(u_i - R_S i_d) + (r_{ds} + R_S + R_D) i_d = 0, \quad (5.32)$$

добија се израз вредност струје i_d :

$$i_d = -\frac{\mu u_i}{r_{ds} + R_D + (1 + \mu) R_S}. \quad (5.33)$$

На основу једначина 5.30 и 5.33 следи израз за појачање напона за мале сигнале:

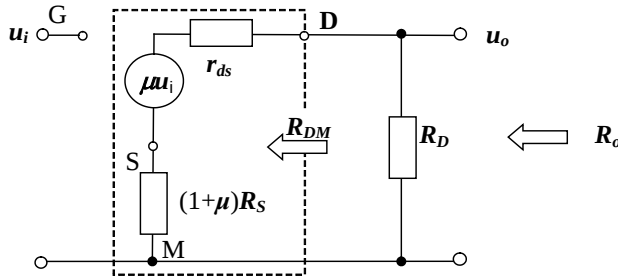
¹⁶ Ако се прикључак за сорс посматра као еквивалент прикључка за емитор, а прикључак за дрејн као еквивалент прикључка за колектор, аналогија са биполарним транзисторима поједностављује анализу кола са фетовима.

$$A_u = \frac{u_o}{u_i} = -\frac{\mu R_D}{r_{ds} + R_D + (1 + \mu)R_S} = -g_m \frac{r_{ds} R_D}{r_{ds} + R_D + (1 + \mu)R_S}. \quad (5.34)$$

Знак "-" у последњој једначини указује да се при повећању напона на гејту напон на дрејну смањује. То значи да је, када се капацитивности у колу могу занемарити, наизменични напон u_o на излазу "фазно померен" за 180° у односу на улазни напон u_i (инвертујући појачавач).

Узимајући у обзир једначину 5.33, којом је одређен однос напона u_{gs} и струје i_d , посматрано коло се може представити еквивалентном шемом приказаном на слици 5.25, помоћу које се може одредити излазна отпорност, R_{DM} , посматрана између дрејна и заједничког прикључка (тачка М):

$$R_{DM} = r_{ds} + (1 + \mu)R_S, \quad (5.35)$$



Слика 5.25. Еквивалентно коло појачавача са излазом на дрејну

Ако се утицај капацитивности C_i улазног кондензатора за спрегу може занемарити, излазна отпорност R_o појачавача са излазом преко прикључка за дрејн једнака је:

$$R_o = R_D \parallel R_{DM} = R_D \parallel \{r_{ds} + (1 + \mu)R_S\}. \quad (5.36)$$

Улазна отпорност посматраног кола једнака је еквивалентној отпорности паралелно везаних отпорника R_{G1} и R_{G2} (слика 5.24.a):

$$R_G = R_{G1} \parallel R_{G2} = \frac{R_{G1} R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}}. \quad (5.37)$$

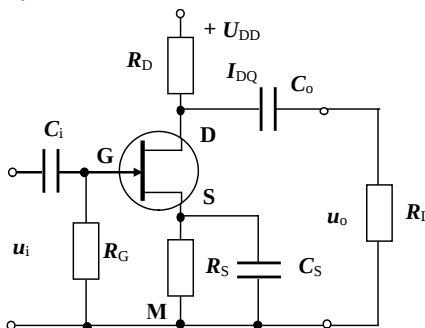
Анализа једначина 5.34 и 5.37 показује да отпорност R_S има неповољан утицај на појачање и вредност излазне отпорности. Овај ефекат се умањује помоћу кондензатора који се везује паралелно са отпорником за поларизацију R_S као што је то приказано на слици 5.26. Ако је капацитивност C_S овог кондензатора довољно велика да се у радном опсегу учестаности сигнала $u_i(t)$ може сматрати да је сорс S спојен са заједничким прикључком (масом) M, за посматрано коло важе једначине:

$$A_{us} = \frac{u_o}{u_i} = -g_m \cdot (r_{ds} \parallel R_D), \quad (5.38)$$

$$R_{os} = r_{ds} \parallel R_D, \text{ и} \quad (5.39)$$

$$R_{is} = R_G, \quad (5.40)$$

где је A_{us} појачање напона, R_{os} излазна, а R_{is} улазна отпорност појачавача у споју са заједничким сорсом.



Слика 5.26. Принципска шема инвертујућег појачавача

Као што је већ речено, у колу приказаном на слици 5.23.а излазни сигнал се може извести са прикључка за сорс транзистора. У том случају излазни напон u_o једнак је паду напона који струја i_d ствара на отпорности R_S :

$$u_o = R_S i_d. \quad (5.41)$$

На основу једначина 5.33 и 5.41 следи израз за појачање напона у оваквој спрези:

$$A_u = \frac{u_o}{u_i} = \frac{\mu R_S}{r_{ds} + R_D + (1 + \mu) R_S}. \quad (5.42)$$

Ако је вредност довољно велика да је испуњен услов:

$$(1 + \mu) R_S \gg r_{ds} + R_D, \quad (5.43)$$

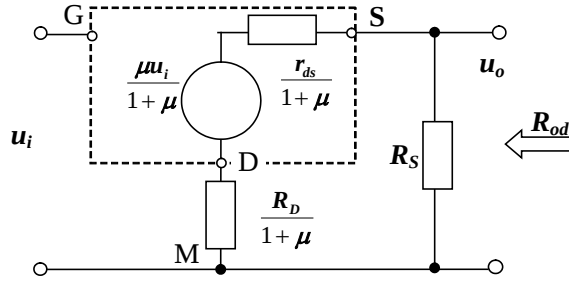
вредност појачања биће приближно једнака један (*source-follower*)

Трансформацијом једначине 5.33 у облик:

$$i_d = - \frac{\frac{\mu}{1 + \mu} u_i}{\frac{r_{ds}}{1 + \mu} + \frac{R_D}{1 + \mu} + R_S}, \quad (5.44)$$

долази се до закључка да се појачавач може моделовати и еквивалентним колом приказаним на слици 5.27. Овакво еквивалентно коло омогућује једноставно одређивање излазне отпорности, R_{SM} , посматране између сорса и заједничког прикључка (тачка М):

$$R_{SM} = \frac{r_{ds} + R_D}{1 + \mu}. \quad (5.45)$$

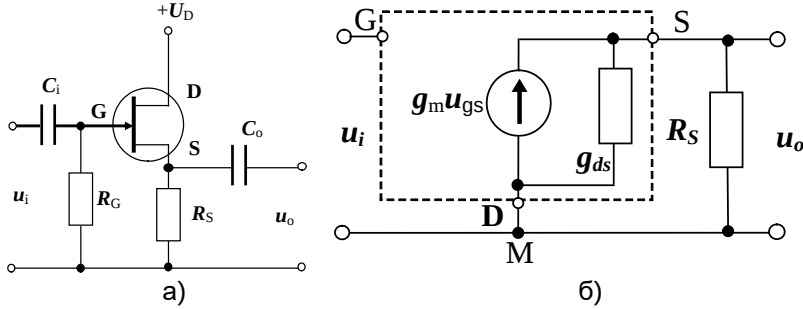


Слика 5.27. Еквивалентно коло појачавача са излазом преко прикључка за сорс

Еквивалентна излазна отпорност R_o појачавача са излазом преко сорса једнака је:

$$R_o = R_S \parallel R_{SM} = R_S \parallel \frac{r_{ds} + R_D}{1 + \mu}. \quad (5.46)$$

Отпорност R_D може у овом случају да буде једнака нули, као што је то приказано на слици 5.28.а. У том случају, еквивалентно коло појачавача са заједничким дрејном (*source follower*) садржи само три елемента (слика 5.28.б).



Слика 5.28. Појачавач са заједничким дрејном

Струја кроз канал i_d (једначина 5.33) у овом случају је једнака:

$$i_d = -\frac{\mu u_i}{r_{ds} + (1 + \mu)R_S}. \quad (5.47)$$

Вредности појачања напона A_{ud} и излазне отпорности R_{od} су одређене једначинама:

$$A_{ud} = \frac{\mu R_S}{r_{ds} + (1 + \mu)R_S}, \quad (5.48)$$

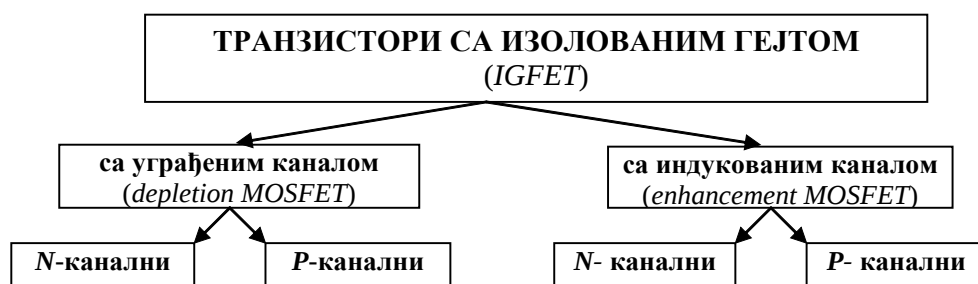
$$R_{od} = \frac{r_{ds}}{1 + \mu} \parallel R_S. \quad (5.49)$$

Дакле, појачање појачавача са заједничким дрејном је увек позитивно (неинвертујући појачавач) и мање од један, а излазна отпорност мала.

5.3. MOS-ТРАНЗИСТОРИ

Рад транзистора са ефектом поља са изолованим гејтом заснован је на чињеници да је контролу струје кроз полупроводнички материјал могуће остварити без непосредног додира управљачке електроде и канала. Гејт је метална електрода која је слојем изолатора галвански одвојена од канала, тако да не постоји спој две области различитог типа који може бити поларисан у проводном смеру. Захваљујући изолацији између гејта и канала, улазна отпорност ове врсте транзистора је веома велика, реда величине $10^{10} \Omega$ до $10^{15} \Omega$.

Заједничка ознака (назив) за ову врсту транзистора је *IGFET* (*Insulated-Gate FET*). Према начину рада разликују се транзистори са уграђеним каналом (*depletion IGFET*) и транзистори са индукованим (успостављеним) каналом (*enhancement IGFET*). Као и код фетова, према садржају примеса у полупроводнику од којег је канал образован, разликују се N-канални и P-канални транзистори. Основна шема класификације транзистора са изолованим гејтом је приказана на слици 5.29 [4].



Слика 5.29. Основна класификација транзистора са изолованим гејтом

Технологија заснована на примени процеса оксидације са циљем добијања танког слоја изолатора назива се *MOS*-технологија (*Metal Oxide Semiconductor*), па се транзистор са ефектом поља са гејтом изолованим слојем силицијум-оксида (SiO_2), назива *MOSFET*. У литератури се понекад ознака *IGFET* поистовећује са ознаком *MOSFET*, и обрнуто, што није оправдано, јер у општем случају изолациони слој може да буде образован од неке друге врсте материјала, као што је, на пример силицијум-нитрид [5]. У литератури се срећу и ознаке *MIS* (*Metal Insulator-Semiconductor*) односно *MISFET*, које почивају на чињеници да је суштинско својство средишњег слоја да представља изолатор [6].

На слици 5.30 су приказани графички симболи основних облика мосфетова. У основи, мосфет је елемент са четири прикључка. Симбол **B** означава основу¹⁷ (*bulk, body*) од основног полупроводничког материјала, на којем се одговарајућим технолошким процесом образују елементи транзистора (сорс, дрејн и канал).

¹⁷ Супстрат, од лат. *substratum*, подлога, основа.

са уграђеним каналом		са индукованим каналом	
N-канални	P-канални	N-канални	P-канални

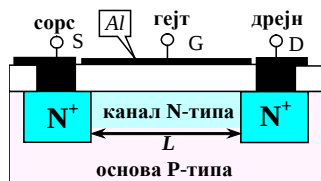
Слика 5.30. Графички симболи транзистора са изолованим гејтом

Изолациони слој је веома танак па је напон пробоја сразмерно мали, због чега је потребно да се предузимају мере предострожности при руковању, како би се предупредило оштећење елемента електростатичким пражњењем. Улаз интегрисаног кола у MOS-технологији штити се Ценер-диодом између гејта и основе. У нормалним условима рада диода нема утицаја на рад кола. Изолациони слој између гејта и канала омогућује израду елемената са два (или више) независна управљачка прикључка (*dual-gate mosfet*) што олакшава остваривање сложених функција у електронским колима.

5.3.1. ПРИНЦИП РАДА

5.3.1.1. Транзистори са уграђеним каналом

Начин рада мосфета са уграђеним каналом је сличан као и код спојних транзистора са ефектом поља (*depletion JFET*), али се принцип деловања у основи разликује. На слици 5.31 је приказана конструкција N-каналног транзистора. На подлози коју чини полупроводник P-типа образоване су одговарајућим технолошким поступком две области, са великом концентрацијом примеса атома донора, преко којих се остварује повезивање са металним прикључцима за сорс и дрејн. Између ових области је канал са мањом концентрацијом примеса, прекривен слојем изолатора преко којег је напаравањем направљен метални извод (гејт), који делимично наткриљује области кристала преко којих се остварују прикључци за дрејн и сорс. Структура метал (гејт) - диелектрик (оксид) – полупроводник (канал) представља (равни) плочасти кондензатор посредством којег се утиче на проводност подручја између две области са великом концентрацијом примеса.

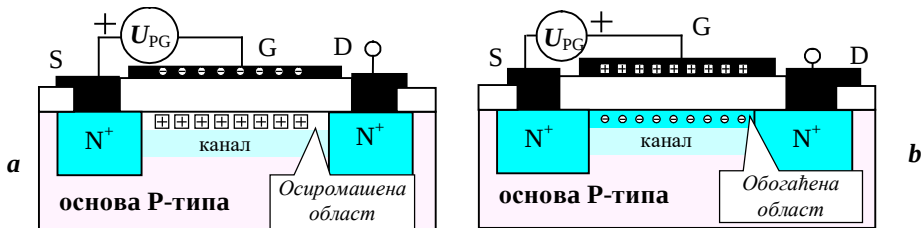


Слика 5.31. Поједностављен приказ NMOS-транзистора са уграђеним каналом

Ако је прикључак за гејт слободан, довођењем напона на прикључке за дрејн и сорс, остварује се протицање струје кроз канал. Када је гејт

N-каналног фета на негативном потенцијалу у односу на сорс (канал), услед деловања електричног поља, слободни електрони у каналу се удаљавају из подручја које се налази непосредно уз диелектрик (слика 5.32.а). У каналу се образује “осиромашени” слој у којем је, због “потискивања” електрона, смањена концентрација слободних носилаца наелектрисања¹⁸. Променом напона U_{GS} врши се модулација ефективног пресека канала, чиме се мења његова проводност, што омогућује управљање струјом која протиче између сорса и дрејна.

MOS-транзистор са уграђеним каналом, при раду у режиму осиромашења граничног површинског слоја канала (*depletion mode, режим обеднения*), понаша се као спојни транзистор са ефектом поља. При довољно великом негативном напону између гејта и сорса долази до заклочења транзистора, када је струја између дрејна и сорса веома мала. Тај напон се, као и код фетова, назива **напон прекида**, а означава са $U_{GS(OFF)}$ или U_{GSoff} .



Слика 5.32. Провођење струје у NMOS-транзистору са уграђеним каналом

С обзиром на то да у MOS-транзистору не постоји PN-спој између гејта и канала, не постоји ни ограничење, присутно код спојних транзистора, у погледу предзнака потенцијала гејта у односу на сорс. Непроводни слој између канала и прикључка за гејт омогућује да управљачки напон U_{GS} има било који поларитет. При позитивном напону на гејту N-каналног фета, површина металне електроде је позитивно наелектрисана. Са друге стране диелектрика, у подручју канала повећава се концентрација електрона као покретљивих носиоца наелектрисања у полупроводнику (слика 5.32.б). У режиму “обогаћења” (*enhancement mode, режим обогащения*) концентрација слободних носилаца наелектрисања у подручју канала је већа од равнотежне концентрације при датој температури, па је и проводност канала већа. Зависност струје кроз канал од напона на његовим крајевима у овим условима слична је као и у режиму осиромашења, с тим да вредност струје засићења расте са повећањем напона U_{GS} .

У области засићења струја је одређена једначином која има исти облик као и код спојних транзистора са ефектом поља (5.2):

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_{GS(OFF)}} \right)^2. \quad (5.50)$$

¹⁸ Поједини аутори структуру МОС-транзистора са уграђеним каналом називају “мосфет с потиснутим каналом”.

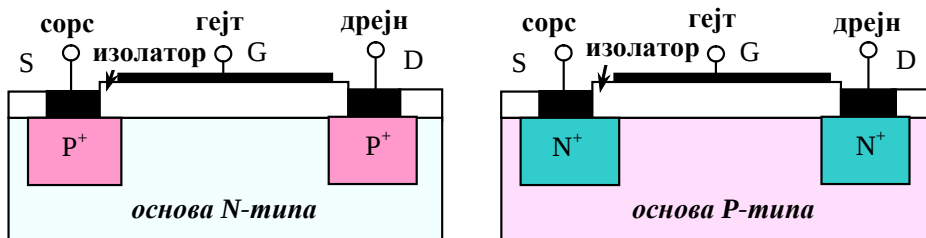
Овај израз се примењује када су испуњени услови:

$$\begin{aligned} U_{DS} &\geq U_{GS} - U_{GS(OFF)} \\ U_{GS} - U_{GS(OFF)} &\geq 0 \end{aligned} \quad (5.51)$$

Величина I_{DSS} и код MOS-транзистора са уграђеним каналом представља струју засићења дрејна при кратком споју гејта и сорса ($U_{GS}=0$).

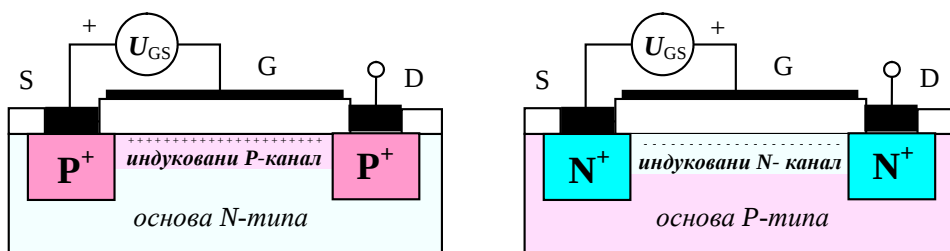
5.3.1.2. Транзистори са индукованим каналом

У транзисторима са индукованим каналом, конструктивно не постоји непосредна проводна веза између области које представљају сорс и дрејн (слика 5.33). За разлику од транзистора са уграђеним каналом, код којег постоји могућност протицања електричне струје између сорса и дрејна и када је гејт слободан (*normally-on*), кроз транзистор у којем се канал "успоставља" као последица деловања електричног поља, у одсуству напона на гејту не тече никаква струја између сорса и дрејна (*normally-off*).



Слика 5.33. Поједностављен приказ MOS-транзистора са индукованим каналом

Када је напон U_{GS} једнак нули, а напон U_{DS} различит од нуле, један од PN-спојева између области са великом концентрацијом примеса (које представљају сорс и дрејн) и основе је поларисан у непроводном смеру. Кроз транзистор тада тече веома мала струја која одговара инверзној струји овог споја. Међутим, при одговарајућем поларитету напона U_{GS} , у површинском подручју полупроводника који се налази до диелектрика, долази до повећања концентрације мањинских слободних носилаца наелектрисања, који се, под дејством електричног поља, прикупљају из основе и групишу у подручју које додирује изолатор. При довољно великом напону U_{GS} , када концентрација индукованих покретљивих носилаца наелектрисања у том подручју постане већа од концентрације атома примеса који одређују тип основе, долази до промене типа полупроводника и образовања канала који повезује сорс и дрејн, што омогућује протицање електричне струје. Са становишта процеса провођења електричне струје, овај »инвертовани« слој (*inversion layer*) се ни по чему не разликује од канала који је формиран одговарајућим технолошким процесом у транзисторима са уграђеним каналом.



Слика 5.34. Образовање канала индукцијом

Струја кроз индуктовани канал утолико је већа уколико је апсолутна вредност напона између гејта и сорса већа. Напон U_{GS} при којем се успоставља струја између дрејна и сорса назива се **напон прага** (*threshold voltage*) и означава U_{GST} , $U_{GS(th)}$ или $U_{GS(TO)}$. У каталозима произвођача као напон прага наводи се најмања вредност $|U_{GS}|$ при којој струја I_D достигне дефинисану малу вредност.

Поларитет напона прага $U_{GS(TO)}$ је супротан од поларитета напона прекида $U_{GS(OFF)}$ MOS-транзистора са истим типом канала.

Зависност струје I_D од напона описује се једначинама аналогним 5.51 и 5.52, са том разликом што се напон прекида замењује напоном прага. У области засићења важи:

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_{GS(TO)}} \right)^2. \quad (5.52)$$

$$U_{DS} \geq U_{GS} - U_{GS(TO)}$$

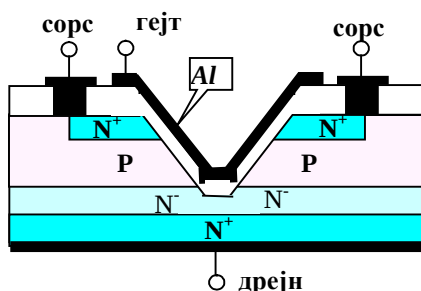
$$U_{GS} - U_{GS(TO)} \geq 0.$$

Струја I_{DSS} у овом случају веома је мала, па се у каталозима произвођача означава и као струја одвода (*drain-source leakage current*).

У поређењу са транзисторима са уграђеним каналом, транзистори са индуктованим каналом имају много шире подручје примене као појединачни елементи или у саставу интегрисаних електронских кола. Посебну врсту MOS-транзистора представљају транзистори код којих је геометрија области полупроводника различитог типа таква да струја I_D тече окомито на површину дрејна који се у односу на сорс налази на супротној страни кристала (*vertical structure-VMOS*). Велика површина дрејна олакшава проблем одвођења топлоте што омогућује рад са великим струјама. Први MOS-транзистори произведени на основу овакве геометрије имали су гејт у облику жљеба усеченог у P- и N-слојеве између насупрамних страна кристала (слика 5.35). Када се гејт прикључи на позитиван напон у P-области непосредно испод оксида долази до повећања концентрације електрона. Уколико је напон на гејту већи од напона прага $U_{GS(TO)}$, долази до инверзије и образовања канала кроз који може да протиче струја између дрејна и сорса. N-област дрејна је са мањом концентрацијом примеса, са изузетком слоја уз металну электроду. На тај начин се постиже већи пробојни напон. Електрода прикључка за сорс спаја

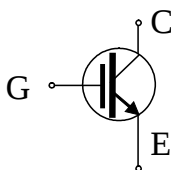
сорс (област N-типа) и основу (област P-типа), тако да између дрејна и сорса постоји диода (чију аноду представља сорс), која доспева у проводно стање уколико је напон U_{DS} мањи од нуле. Велика густина паковања елемената основно је обележје овакве структуре, али су трошкови производње повећани. Одликују се великим пробójним напонима, а користе се као прекидачи за велике струје [7], [8], [9].

MOS-транзистори са ефектом поља примењују се у енергетској електроници. Проблем заштите од прегревања решава се интеграцијом транзистора велике снаге и одговарајућег кола за температурску заштиту (*TEMP-FET*). Хибридно коло, које обухвата сензор залепљен за транзистор, електрично је повезано са гејтом и сорсом. У случају прекорачења температуре коло за заштиту периодично краткотрајно искључује транзистор.



Слика 5.35. Вертикални MOS-транзистор - VMOS

За примену у енергетским претварачима великих снага развијени су елементи који представљају спој биполарне и MOS-технологије. Графички симбол биполарног транзистора са изолованим гејтом (*Insulated Gate Bipolar Transistor- IGBT*) приказан је на слици 5.36. Мешовита технологија омогућује да брзина прекидања, снага управљања и робусност оваког елемента буде као код MOS-транзистора, а да се истовремено одликује малом унутрашњом отпорношћу у засићењу, као код биполарног транзистора.



Слика 5.36. Графички симбол биполарног транзистора са изолованим гејтом

Транзистор са изолованим гејтом може да се користи као појачавач, отпорник или као кондензатор. Захваљујући томе, на основу MOS-технологије, применом само једног основног елемента, остварена су веома сложена интегрисана електронска кола (*Very Large Scale of Integration - VLSI*).

5.3.2. СТАТИЧКЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ

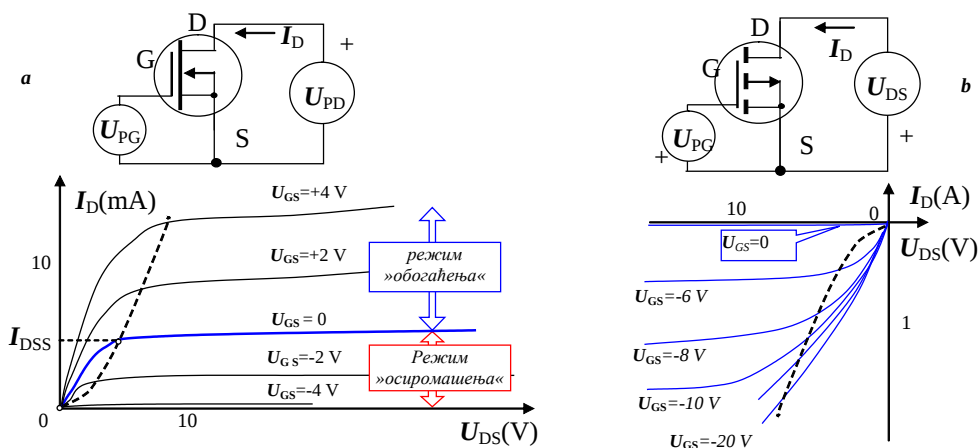
Аналитички изрази којима је моделована функционална зависност струје I_D од напона U_{DS} и U_{GS} омогућују решавање једначина којима се описују електронска кола са MOS-транзисторима, као и графички приказ статичких карактеристика самих елемената.

5.3.2.1. Карактеристика излаза

Излазна карактеристика MOS-транзистора са уграђеним каналом при раду у режиму осиромашења граничног површинског слоја канала у потпуности је аналогна карактеристици одговарајућег фета (слика 5.9). У режиму обogaћења функција $I_D(U_{DS})$ има исти облик, при чему вредност струје засићења расте са повећањем напона U_{GS} . Крива $U_{GS} = 0$ представља границу између ова два начина рада. На слици 5.37.а приказана је фамилија излазних карактеристика једног N-каналног MOS-транзистора [10].

Као и у случају спојних транзистора са ефектом поља на $I_D(U_{DS})$ дијаграму могу се уочити три карактеристичне области.

- **Линеарна област**, у околини координатног почетка, за врло мале вредности напона између спољашњих прикључака за крајеве канала, за које је струја I_D сразмерна вредности напона U_{DS} , при чему сачинилац сразмере зависи од напона U_{GS} .
- **Триодна област**, у којој је зависност струје I_D од напона U_{DS} при сталној вредности напона U_{GS} нелинеарна.
- **Област засићења** у којој струја I_D зависи од вредности напона U_{GS} , а веома мало зависи од напона U_{DS} . Транзистор се понаша као извор струје контролисан напонам.



Слика 5.37. Излазне карактеристике MOS-транзистора

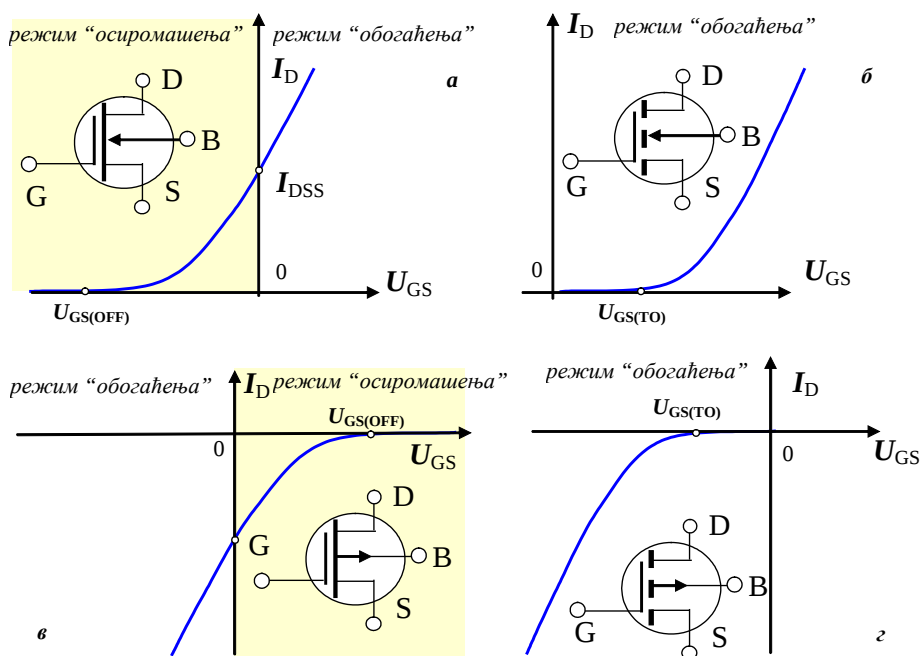
Граница области засићења код транзистора са уграђеним каналом, који могу да раде и у режиму осиромашења, одређује се из услова достизања

напона прекида између неке тачке канала и гејта¹⁹. Испрекидана линија на дијаграму представља границу области засићења.

Транзистори са индукованим каналом раде само у режиму обogaћења и не проводе струју када је потенцијал гејта једнак потенцијалу сорса. На слици 5.37.б, која приказује фамилију карактеристика Р-каналног MOS-транзистора са индукованим каналом, VP1008L (*Siliconix*), могу се такође уочити три области рада. Граница области засићења одређена је вредношћу напона U_{DS} , при којем у некој тачки граничног слоја долази до појаве уштинућа индукованог канала између дрејна и сорса.

5.3.2.2. Карактеристика преноса

Карактеристика преноса транзистора са уграђеним каналом има исти облик као карактеристика одговарајућег спојног транзистора, са продужетком у области позитивних (N-канални транзистор) односно негативних (P-канални транзистор) напона на гејту (слика 5.38.а и 5.38.в). Радни део карактеристике преноса транзистора са индукованим каналом налази се само у једном квадранту U_{GS} - I_D равни (слика 5.38.б и 5.38.г).

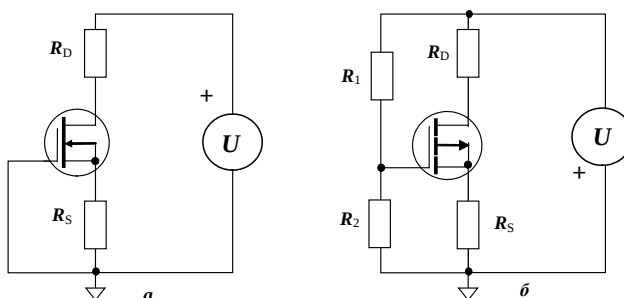


Слика 5.38. Карактеристике преноса MOS-транзистора

¹⁹ Видети поглавље "Физика полупроводника".

5.3.3. ПОЛАРИЗАЦИЈА

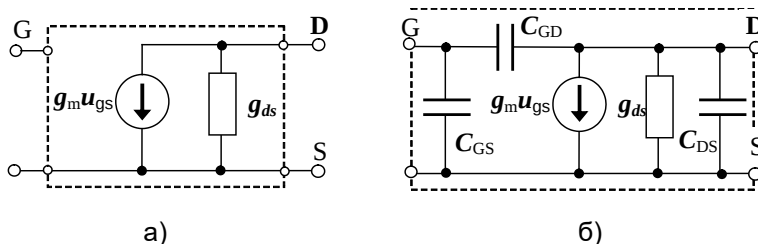
У начелу, поларизација MOS-транзистора остварује се на исти начин као и поларизација спојног транзистора са ефектом поља. Као што слике 5.37 и 5.38 показују, код транзистора са индукованим каналом напони U_{GS} и U_{DS} су истог поларитета. То значи да је за дефинисање мирне радне тачке довољан један извор напона за поларизацију транзистора. У начелу, мирна радна тачка поставља се у жељени положај за сва четири типа транзистора применом само једног извора, помоћу отпорника везаног између сорса и референтне тачке (маса), у односу на коју је дефинисан потенцијал излаза извора напона за поларизацију (слика 5.39).



Слика 5.39. Поларизација MOS-транзистора

5.3.4. ЕКВИВАЛЕНТНА КОЛА

Еквивалентно коло MOS-транзистора на ниским учестаностима садржи само два елемента (слика 5.40.а). На вишим учестаностима, поред капацитивности између гејта и сорса, C_{GS} , односно између гејта и дрејна, C_{GD} , постоји и капацитивност инверзно поларисаног споја између основе и прикључака на крајевима канала, која се, када је основа спојена са сорсом, исказује као капацитивност између дрејна и сорса, C_{DS} (слика 5.40.б).



Слика 5.40. Еквивалентна кола MOS-транзистора

5.4. ЛИТЕРАТУРА

- 1 Словни симболи за полупроводничке компоненте, Биполарни транзистори и транзистори са ефектом поља, ЈУС Н.Р.1.353, 1979 (*Letter symbols for semiconductor devices. Bipolar and field effect transistors*, 1969).
- 2 B. Raković, *Elektronika I*, Naučna knjiga, 1963, str 38.
- 3 J. Millman, C.Halkias, *Integrated electronics: analog and digital circuits and systems*, McGraw-Hill, 1972, стр. 65.
- 4 J. Watson, *An introduction to Field Effect Transistors*, Siliconix, 1970, p. 5.
- 5 Реф. 4, стр. 12.
- 6 A. Jovanović, *Elektronika I*, Elektrotehnički fakultet, 1980, str 279.
- 7 E. Oxner, "MOSPOWER Semiconductor", *Powerconversion International*, June, 1982, Siliconix Technical Article TA82-2.
- 8 Реф. 4, стр 59.
- 9 S. Marjanović, *Elektronika, Diskretna i integrisana analogna kola*, Naučna knjiga, 1984, str 59.
- 10 Реф. 4, стр 13.

ПИТАЊА

1. Које су најзначајније разлике у својствима транзистора са ефектом поља у поређењу са биполарним транзисторима?
2. Објаснити принцип рада спојних транзистора са ефектом поља. Шта је сорс?
3. Дефинисати напон прекида спојног транзистора са ефектом поља.
4. Како је дефинисана струја I_{DSS} ?
5. Нацртати графичке симболе за Р-канални и N-канални фет и објаснити у чему се ови типови транзистора разликују. Скицирати пресек N-каналног спојног транзистора са ефектом поља.
6. Које су основне области рада транзистора са ефектом поља?
7. У чему се разликују области засићења биполарног транзистора и транзистора са ефектом поља?
8. Нацртати излазну статичку карактеристику N-каналног спојног транзистора са ефектом поља.
9. Написати израз којим је одређена вредност струје транзистора са ефектом поља у области засићења.
10. Нацртати статичку карактеристику преноса N-каналног спојног транзистора са ефектом поља.
11. Како је дефинисана динамичка излазна проводност транзистора са ефектом поља и шта геометријски представља? Написати израз којим је одређена вредност

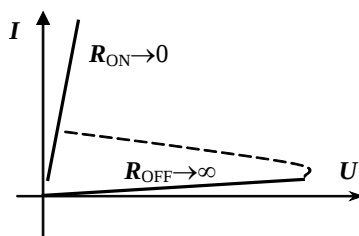
динамичке проводности преноса транзистора са ефектом поља у области засићења.

12. Нацртати еквивалентно коло транзистора са ефектом поља на ниским и високим учестаностима.
13. Нацртати универзално коло за поларизацију транзистора са ефектом поља.
14. Објаснити принцип рада транзистора са изолованим гејтом. Описати структуру MOS-транзистора.
15. Нацртати графички симбол и скицирати поједностављен приказ пресека N-каналног MOS-транзистора са уграђеним каналом. Нацртати излазну карактеристику овог транзистора.
16. Нацртати еквивалентно коло MOS-транзистора на високим учестаностима.
17. Нацртати графички симбол и статичку карактеристику преноса N-каналног MOS-транзистора са подстакнутим (индукованим) каналом.
18. Нацртати статичку карактеристику преноса N-каналног MOS-транзистора са индукованим каналом у области засићења.
19. Шта је VMOS-транзистор?
20. Шта је IGBT? Нацртати графички симбол овог елемента.



6. ТИРИСТОРИ

Тиристор¹ је полупроводнички елемент који има само два стања - проводно (укључено, *on*) и непроводно (искључено, *off*) [1]. Може да има две, три или четири електроде. У непроводном стању струја кроз тиристор је мала, а његова отпорност велика (слика 6.1). У проводном стању унутрашња отпорност тиристора је мала, а струја мпже бити велика (одређена стањем кола у којем се тиристор налази). Карактеристично обележје тиристора је постојање подручја са негативном динамичком отпорношћу најмање у једном квадранту статичке U - I карактеристике.



Слика 6.1. Тиристорска карактеристика

Тиристорски елементи се израђују од силицијума, а веома много се користе у енергетским претварачима, па се појам »тиристор« понекад поистовећује са појмом »силицијумски управљани усмерач« (*silicon controlled rectifier*), иако је овај назив уобичајен за означавање једног одређеног типа тиристорских елемената².

Начин рада тиристора заснован је на истоветним процесима као и у биполарним транзисторима. Као елементи са два стабилна стања и малом

¹ Назив тиристор (*thyristor*) је потекао од првобитне примене као транзисторске замене за електронску цев пуњену гасом – тиратрон (*THYRatron transISTOR*) чија напонско-струјна карактеристика садржи подручје негативне унутрашње отпорности.

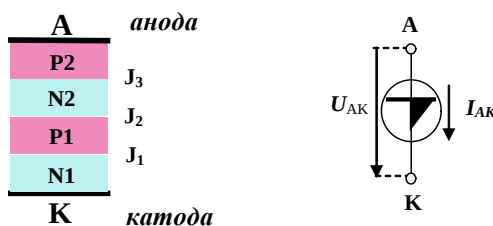
² Према стандардима међународне електротехничке комисије (IEC), назив »тиристор« је генерички назив целог скупа вишеслојних прекидачких елемената [1].

сопственом дисипацијом, нашли су широку примену као електронски прекидачи. Подручје њихове употребе обухвата од уређаја у домаћинствима (управљање интензитетом светлости или брзином малих мотора), до конвертора великих снага који се користе у електроенергетским разводним постројењима. Од појаве првих тиристора срединим педесетих година, развијено је више десетина хиљада различитих типова, зависно од величине струје у проводном стању (која може бити у опсегу од неколико милиампера до неколико хиљада ампера) и величине напона који се прекида (од неколико десетина волти до неколико киловолти) [2].

Тиристорски елементи садрже четири или више области које се слојевито ређају, па се обично сврставају у категорију »вишеслојних силицијумских елемената«. Због међусобног утицаја суседних PN-спојева (слично као у биполарним транзисторима), понашање ових елемената суштински се разликује од понашања низа повезаних полупроводничких диода које одговарају појединим спојевима.

6.1. ДИОДНИ ТИРИСТОР

Диодни тиристор је елемент са два прикључка који садржи четири³ слоја који се наизменично ређају, као што је то приказано на слици 6.2. Гранична (спољашња) област P-типа представља аноду, а гранична област N-типа катоду.

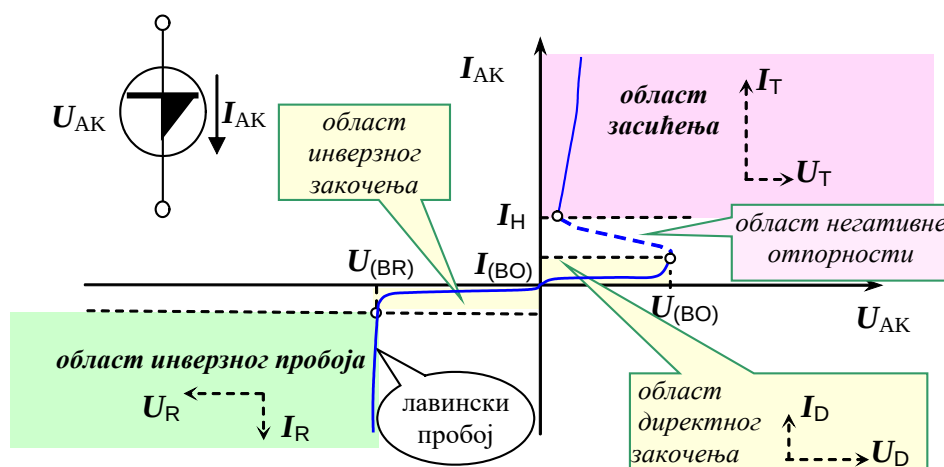


Слика 6.2. Диодни тиристор

Напонско-струјна карактеристика овог елемента је приказана на слици 6.3. На њој се могу уочити различите области. Зависно од тога у којој области се налази радна тачка тиристора $Q(U_{AK}, I_{AK})$, карактеристичне величине, струја кроз тиристор, I_{AK} , и напон између његових крајева, U_{AK} , имају различите називе и различите ознаке [3].

При инверзној поларизацији, када је потенцијал аноде нижи од потенцијала катодe, PN-спојеви J_1 , J_2 и J_3 су поларисани у непропусном смеру, тиристор је искључен (област инверзног закочења). Инверзна струја у непроводном стању I_R (*reverse-blocking current*) је мала све док напон инверзне поларизације U_R не достигне вредност која представља **напон инверзног пробоја** $U_{(BR)}$ (*reverse breakdown voltage*). У III квадранту U - I равни тиристор се понаша слично као »обична« диода у непроводном стању.

³ У литератури се диодни тиристори означавају различитим називима: четворослојне диоде (*four-layer diode*), PNPN-диоде (*p-n-p-n diode*) и Шокли-диоде.



Слика 6.3. Статичка карактеристика диодног тиристора

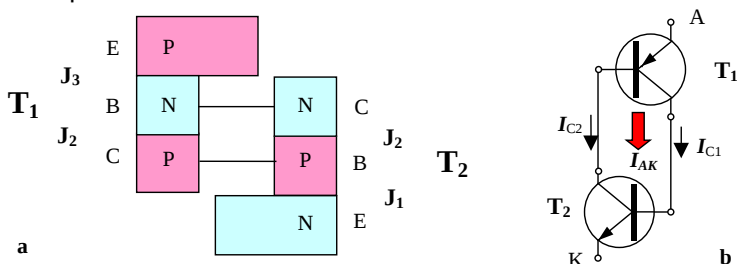
При директној поларизацији, када је потенцијал аноде виши од потенцијала катоде, PN-спојеви J_1 и J_3 су поларисани у пропусном смеру, док је спој J_2 поларисан у непропусном смеру. Када су ови спојеви на растојању које је веће од дифузионе дужине мањинских носилаца, тако да је њихов међусобни утицај занемарљив, расподела потенцијала унутар кристала је таква да је највећи пад напона на инверзно поларисаном споју J_2 , па је струја у непроводном стању у директном смеру (*direct off-state current*), I_D , одређена инверзном струјом овог споја, тиристор је у стању закочења. Напон у непроводном стању у директном смеру, U_D , одређен је параметрима спољашњег кола. У U - I равни радна тачка се налази у области директног закочења (*cutoff region*).

При повећању спољашњег напона струја између аноде и катоде се повећава због ефекта лавинског умножавања носилаца наелектрисања кроз инверзно поларисан спој J_2 , који се понаша као колекторски спој NPN транзистора чији емитор је катода тиристора. Када при напону $U_{(BO)}$ (**напон пребацивања**, *breakover voltage*) струја достигне критичну вредност $I_{(BO)}$, започиње кумулативни процес којим тиристор прелази из стања велике у стање мале отпорности. Спој J_2 постаје директно поларисан, па се његова отпорност смањује. Струја кроз диоду расте до вредности ограничене параметрима спољашњег кола. Радна тачка се премешта на део U - I карактеристике који одговара карактеристици директно поларисних PN-спојева J_1 , J_2 и J_3 (област засићења, *saturation region*).

Проводно стање (*forward-conducting state*, *Durchlaßzustand*) одржава се све док, услед смањивања напона провођења у директном смеру, U_T , проводна струја у директном смеру (*direct on-state current*), I_T , не опадне до вредности I_H , која се назива струја држања (*holding current*, *Haltestrom*). Након тога се поново успоставља стање велике отпорности, када кроз коло протиче струја I_D која одговара непроводном стању у директном смеру.

Понашање четворослојне структуре може да се моделује унакрсном спрегом пара комплементарних транзистора, као што је то приказано на

слици 6.4.а [4]. Спој J_2 је заједнички за оба транзистора. На слици 6.4.б ова структура је приказана коришћењем уобичајених графичких симбола за PNP и NPN транзисторе.



Слика 6.4. Еквивалентна структура диодног тиристора

Независно од стања у којем се тиристор налази, за струје у овом колу важе следећи односи:

$$\begin{aligned} I_{AK} &= I_{E1} = I_{C1} + I_{C2} = I_{E2}, \\ I_{B1} &= I_{C2}, \\ I_{B2} &= I_{C1}. \end{aligned} \tag{6.1}$$

У области директног закочења струја I_D кроз тиристор је одређена инверзним струјама засићења колекторских спојева транзистора, I_{CBO1} и I_{CBO2} , и факторима појачања струје од емитора до колектора, α_1 и α_2 . С обзиром на једнакости:

$$\mathbf{I}_{G1} = \alpha_1 \mathbf{I}_{E1} + \mathbf{I}_{GBO1}, \quad (6.2)$$

$$I_{C2} = \alpha_2 I_{E2} + I_{CBO2}, \quad (6.3)$$

вредност струје I_D одређена је једначином:

$$\mathbf{I}_D = \frac{\mathbf{I}_0}{1 - (\boldsymbol{\alpha}_1 + \boldsymbol{\alpha}_2)}, \quad (6.4)$$

где је I_0 инверзна струја PN-споја J_2 :

$$\mathbf{I}_0 = \mathbf{I}_{\text{CBO1}} + \mathbf{I}_{\text{CBO2}}. \quad (6.5)$$

Струја I_D је већа од струје засићења инверзно поларисаног споја J_2 , али има коначну вредност, осим у случају ако је испуњен услов:

$$\alpha_1 + \alpha_2 = 1, \quad (6.6)$$

када би према једначини 6.4 струја I_D требало да буде бесконачно велика. У стварности, када је услов 6.6 испуњен спој J_2 више не спречава пролазак струје. Пад напона на директно поларисаним спојевима је мали, па вредност струје I_{AK} више не зависи од параметара транзистора T_1 и T_2 , већ је одређена (ограничена) елементима спољашњег кола.

Дакле, да би се коло које образују два унакрсно везана комплементарна транзистора, понашало као тиристор потребно је да буду испуњени одређени услови:

- да би при малим позитивним напонима коло било у непроводном стању (*forward-blocking state*), потребно је да при малим струјама појачање струје од емитора до колектора транзистора T_1 и T_2 буду мала (збир појачања α_1 и α_2 треба да буде мањи од један).
- да би могло да дође до преласка у проводно стање, потребно је да се при повећању струје (услед повећања напона U_{AK} и ефекта лавинског умножавања носилаца) вредности појачања струје, α_1 и α_2 , повећавају, тако да њихов збир може да достигне критичну вредност једнаку јединици.

Оваква својства има силицијум (појачање струје од емитора до колектора расте са повећањем струје колектора), док се код германијума не може постићи услов $\alpha_1 + \alpha_2 < 1$, тако да четворослојна структура нема стабилни режим закочења, већ прелази у проводно стање [5].

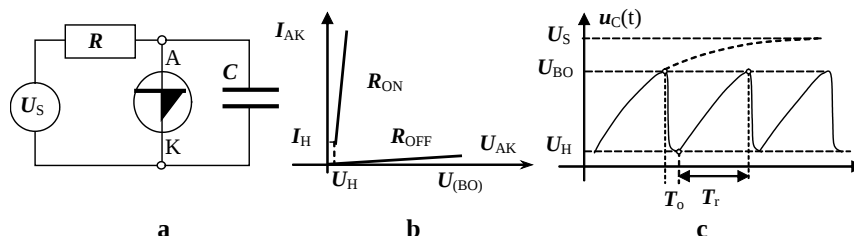
Када је тиристор укључен (отворен), оба транзистора се налазе у засићењу (сва три споја су директно поларисана). Стање мале отпорности се одржава докле год је струја I_T довољно велика да је испуњен услов:

$$\alpha_1 + \alpha_2 > 1. \quad (6.7)$$

Струја држања I_H је, заправо, најмања вредност директне струје I_T при којој је услов 6.7 испуњен [6]. Прелазак из проводног у непроводно стање врши се када струја I_T опадне испод вредности I_H .

Унутрашња отпорност диодног тиристора у непроводном стању већа је од 10 MΩ. Напон пробоја $U_{(BO)}$ може бити од неколико десетина до неколико стотина волти. Струја “паљења” $I_{(BO)}$ је типично мања од милиампера. У проводном стању динамичка унутрашња отпорност је мања од 10 Ω. Струја држања I_H је у опсегу од неколико милиампера до неколико стотина милиампера [7].

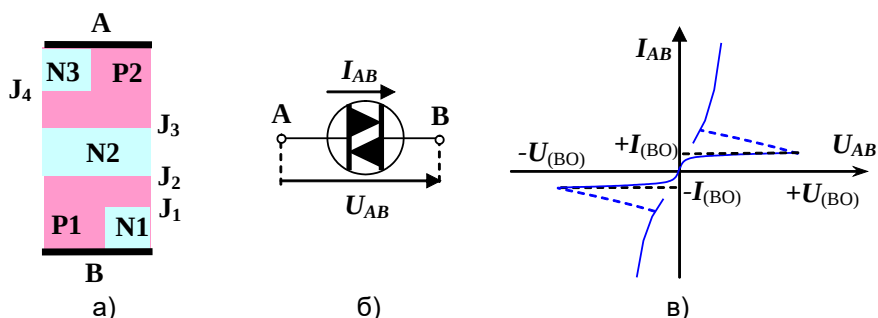
При директној поларизацији диодни тиристор је бистабилни елемент који може да прелази из стања велике отпорности (R_{OFF}) у стање мале отпорности (R_{ON}), и обрнуто. Између те две области се налази подручје у којем је диференцијална отпорност негативна (слика 6.3). Ово својство користи се за остваривање астабилних кола. На слици 6.5. је приказана принципска шема једноставног релаксационог осцилатора са диодним тиристором.



Слика 6.5. Осцилатор са диодним тиристором

6.1.1. СИМЕТРИЧНИ ДИОДНИ ТИРИСТОР

Диодни тиристор може бити у проводном стању само при једном одређеном смеру напона на његовим крајевима ($U_{AK} > 0$). Антипаралелним везивањем два диодна тиристора добија се симетрични бидирекциони елемент. Напонско-струјна карактеристика таквог елемента садржи подручја негативне отпорности за оба смера струје. Еквивалентна својства има елемент који садржи пет области, чија конструкција, симбол и начелна статичка карактеристика су приказани на слици 6.6.



Слика 6.6. Симетрични диодни тиристор

Десна половина вишеслојне структуре приказане на слици 6.6.а, коју образују области P2, N2, P1 и N1, је “обични” диодни тиристор који доспева у проводно стање када при позитивном напону између крајева **А** и **В** наступи пробој споја J_2 . Услед пада напона на слоју P1, спој J_1 биће директно поларисан. Слој N3 при том не суделује у процесу провођења струје (спој J_4 је инверзно поларисан). Када је смер прикљученог напона обрнут, процес провођења се одвија на левој половини (N3, P2, N2 и P1). Слој N1 не суделује у процесу провођења струје, а спој J_1 је инверзно поларисан. Оваква структура се, дакле, понаша као бидирекциони прекидач који под одређеним условима може да буде у проводном стању за оба смера протицања струје. Избором дебљине слојева P1 и P2, као и величине преклапања слојева N1 и N3 подешава се вредност струје “паљења” $I_{(BO)}$ [8]. Карактеристика може бити симетрична, сваки од прикључака може бити анода или катода, зависно од спољашње поларизације. Симетрични бидирекциони диодни тиристор се назива диак (*diac*).

У табели 6.1 су дате, као пример, основне електричне карактеристике симетричног диодног тиристора D3202U(RCA).

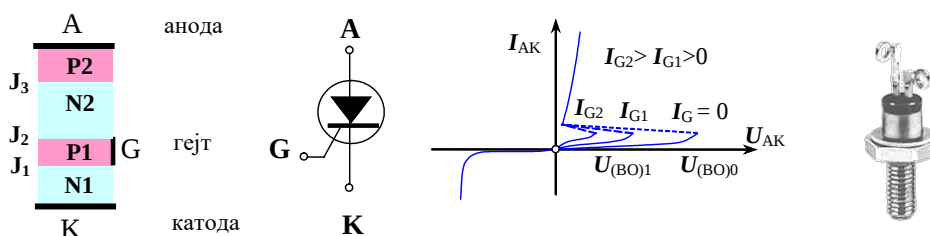
назив	ознака	вредност	јединица
напон пребацивања	$U_{(BO)}$	24 до 40	V
несиметрија напона пребацивања	$ +U_{(BO)} - -U_{(BO)} $	± 3	V
струја пребацивања	$I_{(BO)}$	25	μA
највећа проводна струја	I_{TM}	190	mA

Табела 6.1. Карактеристике симетричног диодног тиристора

6.2. ТРИОДНИ ТИРИСТОР

Триодни тиристор је четворослојни елемент са три краја (прикључка) који проводи струју само у једном смеру⁴. Помоћу трећег прикључка изведеног са једног од унутрашњих слојева омогућује се пребацивање из непроводног у проводно стање пре достизања напона (односно струје) пробоја четворослојне (PNPN) диоде.

Триодни тиристор Р-типа (*silicon controlled rectifier SCR, four-layer triode*) се доводи у проводно стање помоћу управљачке електроде (гејта) изведене на области Р-типа која је у споју са катодом (слика 6.7). Након укључења, повратак у непроводно стање је могућ само у случају ако се струја смањи испод нивоа који представља струју држања I_H . При негативном напону између аноде и катоде U_{AK} (мањем од напона инверзног пробоја) тиристор се не може довести у проводно стање.

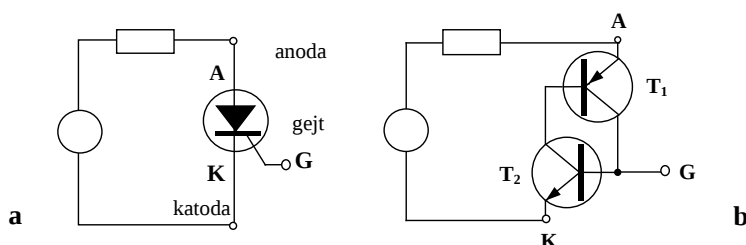


Слика 6.7. Триодни тиристор Р-типа

Понашање триодног тиристора Р-типа може да се моделује унакрсном спрегом PNP и NPN транзистора, при чему је управљачка електрода база NPN транзистора T_2 (слика 6.8.б). Конструкција тиристора је таква да је појачање струје NPN транзистора веће (област N2, која представља базу транзистора T_1 , је знатно шира од области P1, која представља базу транзистора T_2).

У непроводном стању, при позитивном напону U_{AK} , спојеви J_1 и J_3 су директно поларисани, а спој J_2 инверзно. То значи да су оба транзистора поларисана за рад у уобичајеном (активном) режиму. Ако би из спољашњег извора преко прикључка G потекла струја I_G у базу транзистора T_2 , било би омогућено протичање емиторске струје оба транзистора. Триодни тиристор може да се доведе у проводно стање при било ком позитивном напону између аноде и катодe, деловањем побуде између гејта и катодe, којом се транзистор T_2 доводи у проводно стање. Тиме је повећана проводност четворослојне структуре, односно омогућено провођење струје од емитора до базе транзистора T_1 , због чега струја I_{AK} расте. Са повећањем струје колектора расте појачање силицијумског транзистора, што доводи до даљег повећања струје. Овакавим регенеративним процесом оба транзистора доспевају у стање zasiћења.

⁴ У литератури се често назив тиристор употребљава у ужем смислу, за означавање инверзно непроводних тиристора са три прикључка (*reverse-blocking triode tiristor*).



Слика 6.8. Еквивалентно коло триодног тиристора

Колекторска струја транзистора T_1 протиче кроз базу транзистора T_2 , тако да се проводно стање одржава и после престанка деловања сигнала на гејту, уколико је испуњен услов да је збир појачања струје транзистора T_1 и T_2 већи од један (6.7). Као код диодног тиристора, еквивалентни транзистори триодног тиристора остају у проводном стању све док се (спољашњим дејством) струја I_T на смањи испод вредности струје држања I_H .

Једначина која одређује вредност струје I_D у непроводном стању четворослојне диоде (6.4) у случају триодног тиристора Р-типа има облик:

$$I_D = \frac{I_0 + \alpha_2 I_G}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)}, \quad (6.8)$$

који показује да тиристор може да се укључи при сваком позитивном напону U_{AK} , ако је струја гејта довољно велика да обезбеди потребно повећање струје I_{AK} , тако да услов 6.7. буде испуњен. Када је струја гејта једнака нули, прелазак у проводно стање се врши као код обичног тиристора, повећањем напона U_{AK} до вредности при којој колекторски спој транзистора T_2 доспева у подручје лавинског пробоја.

Амплитуда сигнала који се доводи на гејт са циљем укључивања тиристора треба да буде довољно велика да се оствари директна поларизација PN-споја гејт-катода. Типична вредност струје гејта, довољна за иницирање промене стања, је неколико десетина милиампера. Након довођења тиристора у проводно стање побудни сигнал може да се укине, тиристор остаје отворен уколико је струја I_{AK} довољно велика да је услов 6.7. испуњен. Потребно трајање побудног импулса је реда величине микросекунде. Импулсно побуђивање има значајну предност у односу на побуђивање сталним сигналом због смањене потрошње (дисипације) у управљачком колу. Високонапонски тиристор може да остане у непроводном стању чак и у случају када се анода налази на напону од неколико хиљада волти.

У начелу, укључење тиристора (довођење у проводно стање, "паљење") може да се оствари на више начина.

- Повећање напона U_{AK} изнад напона пробоја $U_{(BO)}$ (односно $U_{(BR)}$) изазива појаву лавинског умножавања носилаца наелектрисања и повећање инверзне струје. Кумулативним процесом тиристор доспева у проводно стање. Овакво укључење може бити и нежељено.

- Струја управљачке електроде (гејта) повећава вредност струје I_{AK} . Ако струја I_{AK} достигне критичну вредност при којој је, $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$ тиристор прелази у проводно стање. Овакав начин укључења користи се за управљање радом тиристора као управљаног прекидача.
- Нагло повећање напона U_{AK} доводи до повећања висине потенцијалне препреке, односно ширења прелазне области. Струје којима се пуне паразитне капацитивности PN-спојева појачавају се транзисторским ефектом на спојевима J_1 и J_3 , па могу довести до укључења тиристора, на исти начин као и струја гејта. Вредност капацитивних струја сразмерна је производу брзине промене напона и вредности еквивалентне капацитивности:

$$i_C = C \frac{du}{dt} . \quad (6.9)$$

Критична вредност $(du/dt)_{cr}$ представља један од основних параметара тиристора. У циљу спречавања неконтролисаног укључења при веома брзим променама напона који се прекида, између аноде и катоде се везује RC-коло којим се успорава промена напона U_{AK} (снабер-коло) [9].

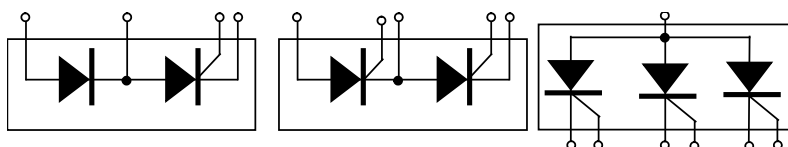
- Као и сваки полупроводнички елемент, тиристор показује особине фотоосетљивости уколико се омогући да светлосно зрачење допре до полупроводника. Услед фотоелектричног ефекта повећава се инверзна струја споја J_2 , па се и на тај начин тиристор може довести у проводно стање. Паљење тиристора може да се оствари излагањем светлости (фото -тиристор) или неком другом зрачењу.
- Загревањем се повећава инверзна струја споја J_2 , па анодна струја расте. Да би се предупредило нежељено пребацивање потребно је ограничити дисипацију и обезбедити хлађење тиристора, тако да температура споја θ_J не прелази назначену највећу дозвољену вредност.

Триодни тиристор се укључује побудом преко гејта, а искључује смањивањем струје I_{AK} испод вредности струје држања I_H . Искључење тиристора може се остварити и кочењем NPN транзистора дејством негативне струје на гејту. Код ове врсте тиристора (*gate turn off - GTO*) конструкцијом је постигнуто веће струјно појачања транзистора NPN, чиме је добијена мања струја базе у проводном стању, што омогућује ефикасније кочење тиристора.

У проводном стању триодни тиристори намењени за примену у енергетици могу да пропуштају струју од неколико хиљада ампера. У табели 6.2 су дате основне електричне карактеристике два типа тиристора BStr15 (Siemens) и T2800D (RCA).

Тиристори су, у начелу, врло робусни елементи, предвиђени за рад са великом густином струје и великим напонима. Производе се и као

полупроводнички прекидачки слогови који представљају комбинације више тиристора или тиристора и диода (слика 6.9).



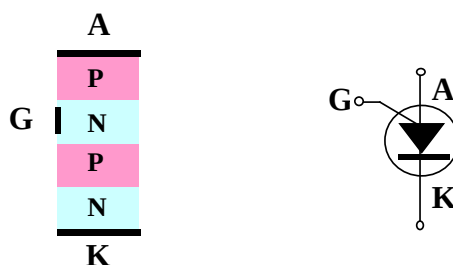
Слика 6.9. Сложени тиристорски елементи

назив	ознака	јединица	BStr15	T2800D
Напон провођења у директном смеру	U_T	V	1,95 ($I_T=4\ 200\ A$)	1,7 ($I_T=30\ A$)
Највећа стална проводна струја у директном смеру	I_T	A	1 400	8
Динамичка отпорност	r_T	$m\Omega$	0,213	30
Периодични вршни напон непровођења у директном смеру	U_{DRM}	V	1 800	400
Највећа струја у непроводном стању у директном смеру	I_D	mA	30	0,1
Струја држања (гејт отворен)	I_H	mA	150	15
Критична брзина промене напона	dy/dt	V/ μs	200	250
Време укључења тиристора управљаног гејтом	t_{GT}	μs	1,5	1,6
Окидни напон гејта	U_{GT}	V	2,5	1,25
Окидна струја гејта	I_{GT}	mA	300	10

Табела 6.2. Карактеристике триодних тиристора

Триодни тиристор N-типа, који се понекад назива “програмабилни једноспојни транзистор” (*programmable unijunction transistor - PUT*), има извод прикључен на N-област која је у споју са анодом, као што је то приказано на слици 6.10. Да би се остварило пребацивање из непроводног у проводно стање, довољно је побудити транзистор PNP довођењем његове базе на потенцијал нижи од потенцијала аноде (која представља емитор овог транзистора).

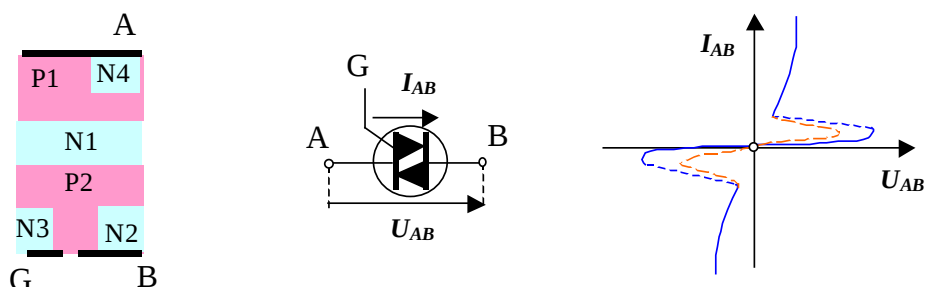
С обзиром да прелазак из непроводног у проводно стање започиње уколико је напон на аноди већи од напона на гејту, триодни тиристор N-типа је погодан за остваривање астабилних кола чија учестаност осциловања не зависи од напона напајања при чему је омогућено задавање (програмирање) вредности напона при коме долази до преласка из непроводног у проводно стање, а тиме и периоде, односно учестаности осциловања.



Слика 6.10. Триодни тиристор N-типа

6.2.1. СИМЕТРИЧНИ ТРИОДНИ ТИРИСТОР

Триодни, као и диодни тиристор може да доспе у проводно стање само при директној поларизацији прикључака анода-катода ($U_{AK} > 0$). Антипаралелним везивањем два тиристора добија се билатерални прекидач који може бити у проводном стању за оба смера протицања струје. Таква својства има елемент који садржи шест области, чија конструкција, симбол и статичка карактеристика су приказани на слици 6.11.

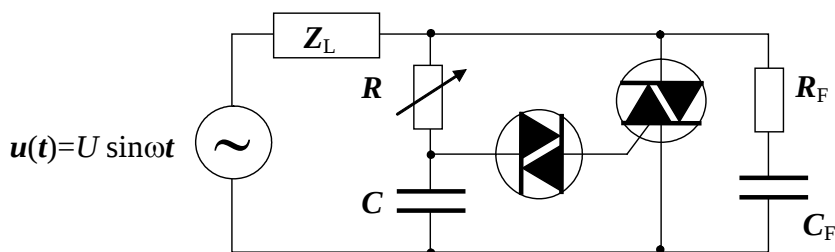


Слика 6.11. Симетрични триодни тиристор

Укључење оваквог тиристора може да се изврши при било ком поларитету напона U_{AB} , као и позитивним или негативним напонем доведеним на гејт. Напонско-струјна карактеристика може бити симетрична, сваки од прикључака може бити анода или катода, зависно од поларитета напона напајања. То омогућује примену у колима наизменичне струје. Симетрични триодни тиристор се назива триак (*triac*).

Начином рада, триодни тиристор представља струјно контролисани прекидач. Међутим, вредности окидне струје I_{GT} и окидног напона U_{GT} , којима се тиристор пребацује у проводно стање, зависе не само од карактеристика тиристорског елемента, него и од параметара побудног кола. Проблем контролисаног укључивања триодног тиристора се успешно решава помоћу диодног тиристора (диака). Начин на који се то остварује приказан је на слици 6.12, која представља принципску шему кола за управљање снагом потрошача (као што су сијалица, грејач или мотор) напајаног наизменичним напонем. Тиристорски прекидач (триак) везан је на ред са потрошачем, Z_L ,

тако да овај може да узима енергију из мреже када је тиристор у проводном стању.



Слика 6.12. Коло за контролу снаге потрошача наизменичне струје

На почетку сваке полупериоде мрежног напона $u(t)$ тријак се налази у непроводном стању, струја кроз потрошач једнака је нули, а напон на његовим крајевима је једнак нули⁵. Диак је напонски контролисан прекидач чије својство негативне отпорности се користи, у спрези са кондензатором C , за добијање струјних импулса велике амплитуде, потребних за довођење триака у проводно стање. Потрошач се прикључује на напајање током сваке полупериоде од тренутка паљења триака до тренутка његовог гашења, када мрежни напон опадне до нуле. На тај начин се управља снагом која се приводи потрошачу.

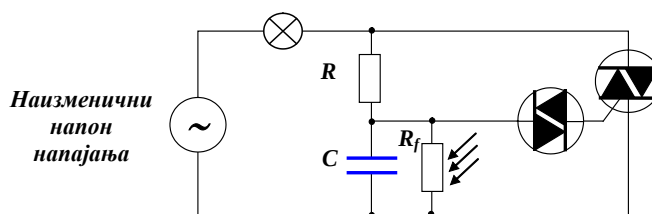
RC -константа кола за пуњење кондензатора одређује фазни однос између напона напајања $u(t)$ и напона на кондензатору. Када напон $u_C(t)$ достигне вредност напона пребацивања $U_{(BO)}$ диака, кондензатор се празни кроз диак и гејт триака. Овај струјни импулс доводи триак у проводно стање. Потрошач се прикључује на мрежу све до краја текуће полупериоде напона напајања, након чега се идентичан процес понавља у следећој полупериоди. Помоћу отпорника (потенциометра) се R одређује кашњење при укључењу триака, односно трајање интервала вођења, а тиме и снага која се приводи потрошачу.

$R_F C_F$ -мрежа прикључена паралелно тиристорима има улогу филтра којим се ограничава брзина промене напона на његовим крајевима. Вредности R_F и C_F зависе од вредности напона напајања и карактеристика потрошача.

На слици 6.13 је приказано модификовано коло које омогућује управљање јачином осветљења у зависности од јачине дневне светлости. Радом кола управља фотоотпорник R_f везан паралелно кондензатору C . При интензивној дневној светлости отпорност фотоотпорника је мала што онемогућује пуњење кондензатора до напона пребацивања $U_{(BO)}$ диака. Потрошач (извор светлости) је трајно искључен. Када интензитет дневне светлости почне да се смањује, отпорност R_f расте, амплитуда напона на

⁵ Строго гледано, у посматраном колу неизбежно постоји неки мали напон на потрошачу као последица одводне струје (*leakage current*) која тече кроз тиристор и када се овај налази у непроводном стању. Инверзна струја тиристора је релативно мала, реда величине милиампера, па је оправдано занемарити пад напона на потрошачу.

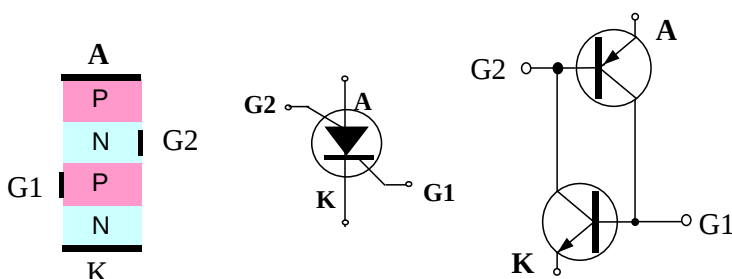
кондензатору се повећава све док не достигне вредност напона $U_{(BO)}$, када коло почиње да функционише на претходно описан начин.



Слика 6.13. Коло за контролу осветљења

6.3. ТИРИСТОРСКИ ПРЕКИДАЧ СА ДВА ГЕЈТА

Тиристорски прекидач (*silicon controlled switch - SCS*) је четворослојни елемент са четири прикључка, који заправо представља најопштији облик инверзно непроводног тиристора, из којег се могу извести диодни и триодни тиристори. Конструкција и симбол четворослојног тиристора са два гејта су приказани на слици 6.14.



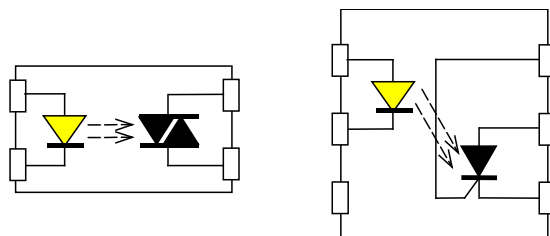
Слика 6.14. Тиристорски прекидач са два гејта

Позитиван сигнал на гејту G_1 у односу на катоду K доводи тиристор у проводно стање. На еквивалентан начин, негативан сигнал на гејту G_2 изазива прелазак из искљученог у укључено стање. Када је тиристор доспео у стање велике проводности гејтови губе управљачку улогу. Прелазак у непроводно стање се остварује смањивањем напона U_{AK} на нулу, односно смањивањем струје I_{AK} испод вредности струје држања.

6.4. ФОТО-ТИРИСТОРИ

Фотоосетљивост полупроводника омогућује побуду тиристора оптичким путем. Оптиелектронски тиристорски елементи функционално одговарају класичним релеима, код којих су управљачко и радно коло галвански раздвојени, па се понекад и означавају као полупроводничка релеа (*solid-state*

relay). Производе се као интегрисане јединице у којима је пребацивање из непроводног у проводно стање омогућено посредством инфрацрвене (GaAs) фотоемитујуће диоде (слика 6.15). У поређењу са електромеханичким прекидачима, овакви елементи се одликују малим димензијама, значајно мањом дисипацијом и многоструко већом брзином укључивања.



Слика 6.15. Фото-тиристори

У табели 6.3 су, као пример, дате основне електричне карактеристике фото-тиристора TLP745J (TOSHIBA).

назив	ознака	вредност	јединица
Побудна струја диоде	I_F	5	mA
Побудни напон диоде ($I_F = 10 \text{ mA}$)	U_F	1,15	V
Напон провођења у директном смеру ($I_T = 100 \text{ mA}$)	U_T	0,9	V
Највећа ефективна вредност периодичне струје провођења	I_{TRM}	150	mA
Највећи периодични вршни напон непровођења	U_{DRM}	600	V
Највећа струја у непроводном стању у директном смеру	I_{DRM}	10	nA
Струја држања	I_H	0,2	mA
Критична брзина промене напона	du/dt	10	V/ μ s
Време укључења	t_{on}	10	μ s
Напон изолације (једносмерни, 1 мин)	U_S	10 000	V

Табела 6.3. Карактеристике фото-тиристора

6.5. ЛИТЕРАТУРА

- 1 Полупроводничке компоненте, Општи део, Термини и дефиниције, Terms and definitions for semiconductor devices, general, IEC 147-0, 1973, ЈУС Н.Р1.320, 1979,2.2.18.
- 2 K. Satoh, M. Yamamoto, The Present State of the Art in High-Power Semiconductor devices, *Proceedings IEEE*, vol 89, No 6, 2001, стр 813-821.
- 3 Словни симболи за полупроводничке компоненте, Тиристори, Letter symbols for semiconductor devices and integrated microcircuits, Chapter VIII, IEC 148, 1969, ЈУС Н.Р1.352, 1979,2.3.1.
- 4 T.C.McNultz, *A Review of Thyristor Characteristics and Applications*, Application Note, AN-4242, RCA. 1974
- 5 J. Millman, C. Halkias, *Integrated electronics, analog and digital circuits and systems*, Mc Graw-Hill, 1972, стр 710.
- 6 E. Leblanc, *Thyristors and Triacs, an important parameter: holding current*, SGS-THOMSON, Applications note, 1996.
- 7 J. Millman, H. Taub, *Pulse digital and switching waveforms*, Mc Graw-Hill, 1965, стр 464.
- 8 V. Cvekić, *Elektronika I, poluprovodnički elementi*, Naučna knjiga, 1978, стр 196.
- 9 S. Tešić, D. Vasiljević, *Osnovi elektronike*, Građevinska knjiga, 2000, стр 73.

ПИТАЊА

1. Шта је тиристор, која су његова основна својства и где се примењује? Набројати врсте тиристора.
2. Које су области рада тиристора?
3. Шта је диодни тиристор и како се може представити?
4. Нацртати ***U-I*** карактеристику бидирекционог диодног тиристора и објаснити како се остварује прелаз из непроводног у проводно стање. Скицирати пресек.
5. Шта је триодни тиристор и како се може представити?
6. Шта је триак?
7. Како се управља радом тиристора? Да ли се управљање триодним тиристором може вршити импулсно?
8. Колико је време укључења тиристора?
9. Може ли се тиристор укључити када је струја гејта једнака нули?
10. Шта је фото-тиристор?



Прво интегрисано коло

7. ИНТЕГРИСАНА ЕЛЕКТРОНСКА КОЛА

Проналазак појачавачког ефекта представљао је револуцију у електротехници која је, одјекнувши читавом планетом¹, означила почетак освајања новог подручја људског знања: електронике. Електронски појачавач је активни елемент који помоћу енергије узете из спољашњег извора, другачијег од извора (генератора) улазног сигнала, производи излазни сигнал који представља “слику” улазног сигнала. Вакуумска електронска цев са три електроде, коју је почетком двадесетог века конструисао Ли де Форест, омогућила је развој телекомуникација, али и подстакла стварање једне нове привредне гране која ће прерасти у највећу индустријску област савременог света.

Квалитативан скок у развоју технологије производње електронских компонената представљало је откриће да се све функције ручно произведених електронских цеви, чије се димензије мере у центриметрима, могу остварити помоћу минијатурног кристала полупроводника, образованог на одговарајући начин аутоматизованим процесом производње. При томе се значајно добија на побољшању поузданости електронских елемената, смањењу њихове потрошње и осетљивости на вибрације и ударе. Смањивање димензија омогућује модуларну структуру уређаја, а тиме и повећање сложености и разноврсности функција које електронски уређаји остварују. Суштинску предност представља погодност за масовну производњу, која омогућује многоструко смањивање производних трошкова. Тиме се поуспешује ширење области примене, што повратно утиче на смањивање продајне цене и подстиче даљи развој.

Сагледавање да се и читаво сложено електронско коло може произвести у облику компактне кристалне структуре, која делује као јединствена функционална целина, представљало је трећи револуционарни корак. Већ више од четрдесет година, таква интегрална² кола постоје на

¹ Електронска цев са три електроде (триода) примењена је при радио-преносу наступа, у то време најчувенијег оперског певача, Енрика Каруза у Њујоршкој опери Метрополитен, 1910. године.

² Од лат. *integralis*, целински, који постоји сам за себе. У домаћој литератури преовлађује употреба назива “интегрисано коло”, који потиче од енглеског језика: *integrated circuit - IC*.

светском тржишту као компоненте намењене произвођачима електронских уређаја. Највећи степен интеграције остварен је у рачунарској техници. Електронска кола на којима се заснивају савремени рачунарски уређаји и системи, садрже више стотине милиона електронских елемената у једном кућишту запремине свега неколико кубних центиметара.

Под називом интегрисано³ коло подразумева се део електронског уређаја израђен од полупроводничког материјала као компактна целина (монолитни⁴ кристални блок) смештена у одговарајуће метално, керамичко или пластично кућиште, која је са “спољашним светом” повезана преко својих прикључака. Мање од пола века након остваривања првих монолитних електронских кола, захваљујући управо њима, електроника је постала свеprisутна. Савремена интегрисана кола садрже стотине милиона полупроводничких елемената која физички чине једну целину чији су поједини делови технолошки обрађени тако да представљају не само “класичне” полупроводничке елементе (диоде и транзисторе) него и пасивне елементе (отпорнике и кондензаторе). Примењују се у свим областима: рачунарска техника, аудио и видео техника, саобраћај, индустријска техника.

Слике добијене из сателита и космичких летилица очаравају својом јасноћом. Њихово стварање и пренос у облику електричних сигнала омогућено је електронским уређајима. Усавршени електронски пријемници региструју веома слабе сигнале који су на свом путу из васионских дубина, због деловања мноштва сметњи, неизбежно изобличени. Задивљујуће прецизна слика је резултат сложене математичке обраде коју би практично било немогуће остварити без брзих електронских кола високог степена интеграције.

Интегрисана кола су у потпуности изменила методологију пројектовања, развоја и одржавања електронских уређаја и система. Савремени инжењер електронике се изузетно ретко бави анализом утицаја радних услова на карактеристике диода и транзистора, зависност њихових параметара од температуре, односно утицај несавршености дискретних полупроводничких елемената на перформансе електронског кола (система) у целини. За математичко решавање проблема анализе сложених електричних мрежа које садрже пасивне и активне елементе, чији су математички модели познати, стоје му на располагању бројни “програмски пакети”. Његов задатак је да, користећи достигнућа савремене технологије, изврши синтезу решења које остварује жељене функције у дефинисаним условима рада, и притом постигне оптимум односа цена-перформансе (*cost-performance*) уређаја, при чему тржиште представља “непристрасног судију” који оцењује квалитет понуђеног решења и потврђује вредност уграђеног знања.

У овом поглављу су приказане две основне класификације интегрисаних електронских кола: са аспекта технологије производње и са аспекта примене (намене). Дат је кратак преглед основних обележја интегрисаних аналогних, дигиталних и мешовитих кола. Детаљније

³ Уобичајено је да се под називом интегрисано коло подразумева коло образовано од једног кристала (монолитно). У литератури се користе и називи микроколо (*microcircuit*) и чип (*chip*).

⁴ Од грчких речи *monos* (један) и *lithos* (камен).

проучавање њихових својстава и примене превазилази обим ове књиге. Читаоцима, спремним да се упусте у изучавање појединих области електронике, намењен је преглед домаће и стране литературе, дат на крају овог поглавља.

7.1. СИГНАЛИ У ЕЛЕКТРОНИЦИ

Савремена електроника се превасходно бави информацијама⁵ и њиховом обрадом⁶. Чак и у оним случајевима када пренос или запис информације представљају конкретан циљ, неизбежан је неки облик обраде у најширем смислу, у циљу прилагођења извора и предајника, предајника и линије преноса, пријемника и корисника, промене носиоца или промене облика представљања информације. У електронским уређајима информације су представљене електричним сигнаlima.

Сигнал⁷, у најопштијем смислу, је променљива физичка величина која представља информацију. У практичном смислу, сигнал је физичка величина која се може детектовати⁸, помоћу које се преноси порука или информација. Са информационе тачке гледишта, физичка природа сигнала је неважна. У електроници сигнали су **електричне величине**, функције времена, чији један или више параметара носе информацију о једној или више променљивих, у општем случају неелектричних величина које сигнал представља. Информациони параметар може да буде тренутна вредност електричне величине која представља сигнал (напон или струја), или њена највећа вредност (амплитуда), ако се јачина (интензитет) изабране електричне величине (носиоца информације) периодично мења у времену на унапред одређен (познат) начин. Информација може бити представљена временским параметрима, као што су период, односно учестаност или трајање импулса. Са становишта тачности електронске обраде сигнала посебан значај имају информациони параметри који по својој природи представљају бездимензионе величине као што су, на пример, однос трајања и периоде правоугаоних импулса, или однос фаза два периодична сигнала исте учестаности.

⁵ Од лат. *informatio*, извештај, обавештење, упутство. Под информацијом се у ширем значењу подразумева знање, сазнање о неким новим, раније непознатим чињеницама, које се може представити у облику погодном за пренос, чување или обраду. Информација може бити представљена помоћу знакова, слика или звука. Појам информације је један од најзначајнијих у савременој науци. Његова важност произилази из његове општости: са појмом информације се сусрећемо при изучавању било које појаве у природи или друштву.

⁶ Енергетска електроника, релативно уска и специфична област која се бави проблемом ефикасности процеса претварања енергије из једног облика у други, односно проблемом ефикасности преношења енергије од извора до корисника (потрошача), за успешно извршавање постављеног задатка, такође подразумева одговарајућу обраду сигнала који представљају информације о стварном стању процеса и њихово коришћење за управљање радом енергетског претварача.

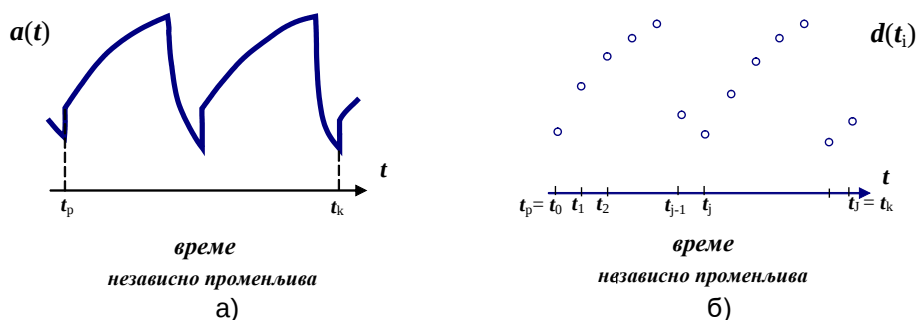
⁷ Од лат. *signum*, знак (којим се нешто јавља).

⁸ Опазити, открити, од лат. *detectio*, откривање, изношење на видело.

Основну врсту физичких променљивих представљају **аналогне**⁹ **величине** чији интензитет може имати било коју вредност која припада одређеном опсегу. Скуп могућих вредности аналогне величине се може представити као одсечак бројевне праве. Скуп је густ, између сваке две различите вредности аналогне величине постоји вредност која такође припада дефинисаном скупу могућих вредности. Вредност аналогне величине се, у начелу, може мењати у неограничено малим корацима, што значи да се таква величина може, теоријски, представити са бесконачно фином резолуцијом¹⁰.

Другу врсту представљају **дигиталне**¹¹ **величине** које могу да имају неку из низа одвојених (дискретних) вредности. Скуп могућих вредности дигиталне величине се може представити низом неповезаних тачака на бројевној правој. Размак између ових тачака може бити веома мали, али је резолуција представљања дигиталних величина увек коначна.

Посматрана као функција времена¹², физичка величина може да буде дефинисана у било ком тренутку унутар временског интервала посматрања (слика 7.1.а). У том случају, скуп T којим је одређена област дефинисаности функције $x(t)$ представља одсечак на временској оси који започиње у почетном тренутку, t_p , а завршава се у крајњем тренутку интервала посматрања, t_k . Област дефинисаности функције $x(t)$ је повезана. Функција $x(t)$ је **непрекидна по времену**.



Слика 7.1. Геометријска представа
а) функције непрекидне по времену
б) функције дискретне по времену

⁹ Назив потиче од грчке речи *analogos*, сличан, сродан, истоверсан. Аналогне физичке појаве су међусобно различите појаве у физици (механици, термодинамици, електротехници) које се могу описати истим аналитичким изразима. Аналогне (електричне) величине су сличне физичким величинама у свакодневном животу, као што су дужина, маса, брзина кретања, притисак и температура.

¹⁰ Способност разлагања (од лат. *resolutio*, разлучивање, растављање). У мерној техници се под овим називом подразумева најмања промена мерене или задате величине при којој се може очитати њена вредност без интерполације (процене на основу познатих суседних вредности).

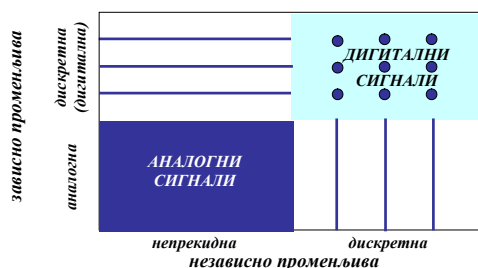
¹¹ **Дигит** је члан коначног скупа ненегативних целих бројева који се користи за представљање информација (бројчани знак, цифра, од лат. *digitus*, прст).

¹² У општем случају, величина x може бити функција независно променљиве која представља просторну координату или неку другу променљиву физичку величину.

Сигнал може да буде дефинисан само у одређеним тренуцима затвореног временског интервала (слика 7.1.б). Ако скуп T , којим је одређена област дефинисаности неке функције $x(t)$, представља низ неповезаних тачака на временској оси, функција $x(t)$ је **дискретна по времену**. Унутар интервала (t_{j-1}, t_j) функција $x(t)$ није дефинисана.

Сигнал који се може представити функцијом непрекидно по времену омогућује непрекидну (континуалну) промену вредности (интензитета). Функција дискретна по времену подразумева скоковите промене вредности.

У складу са овом општом поделом физичких величина, могу се дефинисати два основна облика представљања променљивих електричних величина по интензитету (“у простору”): аналогно и дигитално, и два облика представљања по независно променљивој (“у времену”): непрекидно и дискретно. На основу својстава скупа X могућих вредности посматране величине x и скупа T , којим је одређена област дефинисаности функције $x(t)$, разликују се четири основне класе облика представљања информација електричним сигналимa (слика 7.2).



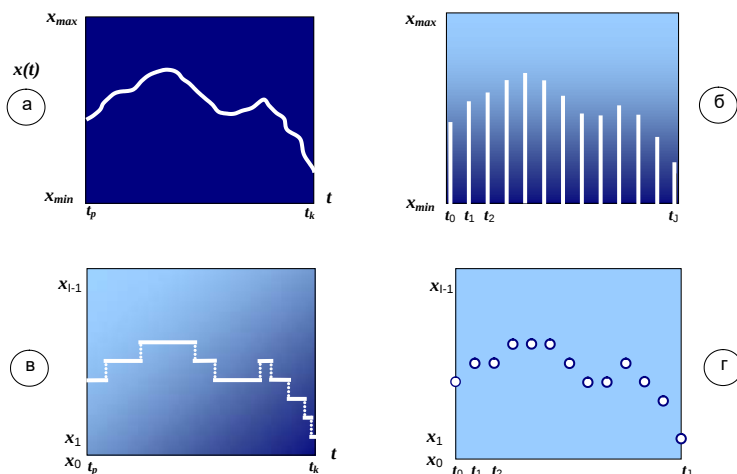
Слика 7.2. Класификација сигнала

Основну класу чине сигнали чији информациони параметар може да узме било коју вредност у задатом опсегу вредности (интензитета), при чему је његова област дефинисаности, посматраног као функција времена, повезана (слика 7.3.а). Уобичајено је да се сигнали ова класе називају **аналогни сигнали**.

Аналогни сигнали представљају аналогне (физичке) величине непрекидне по времену.

Другу класу чине **сигнали дискретни по времену** код којих информациони параметар представља аналогну величину (слика 7.3.б). Они представљају поворке импулса са сталним или променљивим интервалом понављања (дискретности), и обично се називају **импулсни сигнали**¹³. Информациони параметар може да буде највећа (вршна) вредност, период односно учестаност понављања импулса, или неки од показатеља облика функције $x(t)$ као што су средња и ефективна вредност.

¹³ У литератури се често под називом импулс подразумева сигнал несинусног облика који се одликује наглим променама вредности. Такви сигнали се добијају (генеришу) помоћу електричних кола која садрже прекидаче.



Слика 7.3. Основне класе сигнала

Трећу класу (слика 7.3.в) чине **сигнали дискретни по вредности, а непрекидни по времену**. Промена вредности врши се у било ком тренутку, скоковито, у коначним корацима (квантима). Сигнали ове класе представљају обележје релејних система аутоматског управљања.

Четврту класу (слика 7.3.г) чине **сигнали дискретни и по вредности и по времену**. Промена вредности је скоковита, а може да се изврши само у одређеним тренуцима времена. Уобичајено је да се сигнали ова класе називају **дигитални сигнали**.

Дигитални сигнали представљају дискретне (физичке) величине дискретне по времену.

Са становишта дигиталне електронике, посебан значај имају **бинарни¹⁴ сигнали**: дигитални сигнали који могу да имају само једну од две вредности. Називају се и **логички сигнали**, јер се вредност излазног сигнала може предвидети (одредити) на основу правила формалне (математичке) логике.

Сигнали који представљају информације могу да имају различити облик. Код аналогних сигнала информациони параметар може да има било коју могућу вредност унутар неког опсега. За пренос сваког оваквог сигнала у изворном облику потребан је, у начелу, посебан канал. Периодични сигнали омогућују пренос две величине, од којих једна одређује амплитуду, а друга периоду (учестаност) сигнала.

У савременим комуникационим системима све више се примењују дигитални сигнали код којих је информација представљена коначним бројем дискретних вредности. Као што постоји много типова информационих сигнала, са различитим карактеристикама, тако постоји много различитих типова канала. У настојању да се порука пренесе што је могуће ефикасније и

¹⁴ Двочлани, двојни сигнали (од лат. *bini*, по два, *binarius* који садржи два, од два дела).

са минимумом изобличења, развијене су различите методе преноса информација у аналогном и дигиталном облику. Развој технике преноса информација (сигнала) нераскидиво је повезан са развојем електронике.

Рачунске машине су првобитно развијене са циљем аутоматског обављања скупа (низа) рачунских операција. Способност памћења података (међуреЗултата и коначних исхода израчунавања) прерасла је у способност памћења начина (поступка) израчунавања, чиме је створена могућност једноставне измене алгорита¹⁵ рада и изградње уређаја опште намене – универзалних рачунских машина. Развој рачунарске технике¹⁶, нераскидиво повезан са развојем **дигиталне интегрисане електронике**, довео је до настанка нове области: информатике, која се у најопштијем смислу бави задацима и проблемима сакупљања, организације, чувања, претраживања, тумачења и коришћења података. Електроника је, омогућивши сагледавање нових начина преношења информација кроз време, дала нову димензију областима људског знања које се баве информацијама, њиховим преносом, обрадом и чувањем, и створила услове да вештина примене рачунара прерасте у науку.

Развој индустријске електронике, која се бави применама електронских кола и уређаја у производним процесима, значајно је убрзан применом технологије засноване на полупроводницима. Електроника је представљала предуслов синтезе аутоматике и рачунарске технике, омогућујући појаву тзв. процесних рачунара и настанак SCADA¹⁷ система који обрађују хиљаде процесних сигнала. Надзор и ефикасно аутоматско управљање сложеним технолошким процесима, географски распрострањеним системима електропривреде, нафтне и хемијске индустрије, подразумева једновременно узимање мноштва података, на различитим местима, и њихову централизовану рачунарску обраду. Мерни и управљачки уређаји различитог степена сложености представљају спољне (периферијске) јединице мање или више специјализованог рачунара који, на основу информација добијених од великог броја таквих терминалних уређаја, генерише и издаје одговарајуће податке за управљање процесом (слика 7.4).

Са циљем успешнијег преноса, обраде или записивања, неелектричне мерене величине се пресликавају на електричне. То се постиже помоћу посебних склопова којима се остварује спрега са процесом. Спрезање подразумева и прилагођавање, па у општем случају процесни интерфејс¹⁸

¹⁵ Поступак решавања математичког проблема низом узастопних корака (операција), од којих се неки понављају (лат. *algorismus*). Сматра се да назив потиче од имена арапског математичара Мохамеда ибн Муса Алхазизи (780-850). Може бити представљен описом поступка (процедуре), математичким изразом (формулом) или графички (дијаграм тока).

¹⁶ Шире посматрано, односи се на технику обраде информација у дигиталном облику.

¹⁷ Систем који (даљински) надгледа и управља географски распрострањеним процесима (SCADA = *Supervisory Control And Data Acquisition*).

¹⁸ У ужем смислу, под интерфејсом (*interface*) се подразумева граница, у смислу споја, спреге између система или делова система преко које се врши пренос информација. Тастатура, миш и екран (монитор) представљају спрегу помоћу које се остварује размена информација између корисника и рачунарског система, односно интерфејс између човека и машине (*man machine interface* - *MMI*). У ширем смислу, он обухвата и програме којима се остварује одговарајући дијалог.

обухвата и кола за кондиционирање¹⁹ којима се остварују потребни услови који треба да обезбеде постизање захтеване тачности али и безбедност људи и опреме.



Слика 7.4. Процесни систем

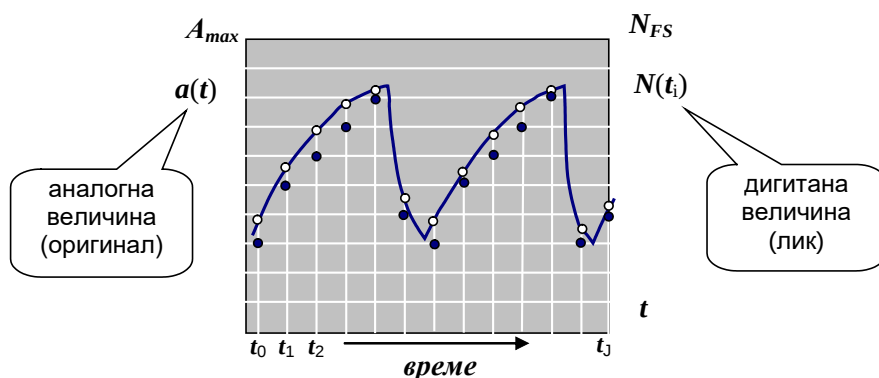
Највећи број посматраних физичких величина које приказују стање неког надзираног или управљаног процеса (температура, притисак, ниво течности, јачина електричне струје односно напона) представљен је сигнаlima који могу имати било коју вредност унутар граница одређеног опсега, а чији се интензитет може променити у било ком тренутку. Са друге стране, у дигиталним уређајима, који, захваљујући усавршеној технологији производње дигиталних електронских кола, преузимају водећу улогу у системима надзора и управљања, обрађују се, прослеђују или записују сигнали чији информациони параметар има коначан број стања. Да би се и при обради, преносу и запису аналогних сигнала омогућило коришћење погодности које дигитална електронска техника пружа неопходно је:

- ❖ улазне аналогне сигнале представити дигиталним сигнаlima (овај процес се назива аналогно-дигитална конверзија²⁰);
- ❖ математички модел захтеване обраде аналогног сигнала “преточити” у нумерички алгоритам манипулисања дигиталним подацима (дигитална обрада сигнала);
- ❖ резултате обраде (дигиталне излазне сигнале) представити у аналогном облику (дигитално-аналогна конверзија).

При аналогно-дигиталној конверзији обрађују се само узорци (одбирци) аналогног сигнала узети у одређеним тренуцима времена (дискретизација у времену). Ти одбирци се потом дискретизују по вредности (интензитету) тако да се као резултат конверзије добија податак који представља нумерички еквивалент вредности аналогне величине у тренутку одабирања (слика 7.5).

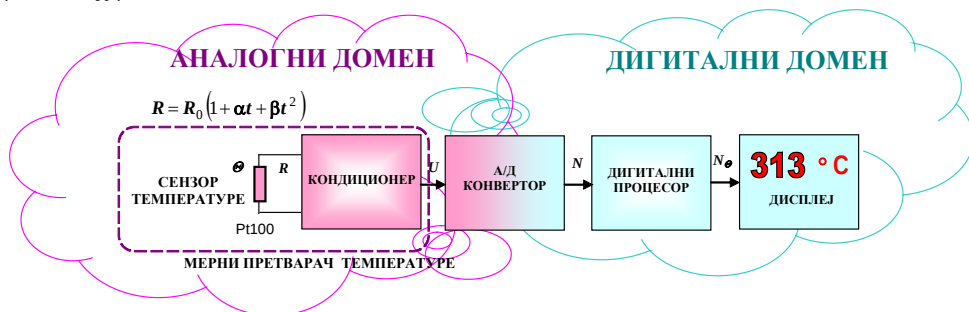
¹⁹ Усклађивање (од лат. *conditio*, услов, стање).

²⁰ Од лат *conversio*, промена, претварање, обртање.



Слика 7.5. Аналого-дигитална конверзија

Уношење информација о стању физичког процеса, изворно представљених у аналогном облику²¹, у дигитални систем који треба да врши њихово прикупљање, обраду, приказ, складиштење или пренос, подразумева аналого/дигиталну конверзију²². Неопходни део дигиталних инструмената и мерно-аквизиционих система чини управо склоп којим се обавља потребно преобликовање. Информација о температури неког објекта, која представља карактеристични параметар процеса или стања посматраног система (слика 7.6), пресликава се, помоћу одговарајућег сензора, на вредност неке електричне величине, као што је, на пример, електрична отпорност платинске жице. Улазни кондиционер обезбеђује да се вредност мерене величине (отпорности) представи у облику нормализованог сигнала који се доводи на улаз А/Д конвертора. Резултат мерења напона на излазу кондиционера нумерички се обрађује у складу са математичким моделом примењеног сензора. Израчуната вредност мерене неелектричне величине, исказана у одговарајућим јединицама мере, приказује се на одговарајућем приказивачу (дисплеју).

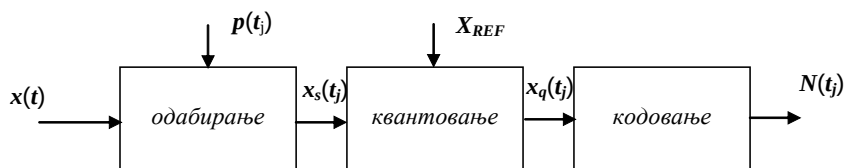


Слика 7.6. Мерни ланац дигиталног мерења температуре

²¹ Први и неизбежни корак при реализацији дигиталних система намењених за управљање процесима.

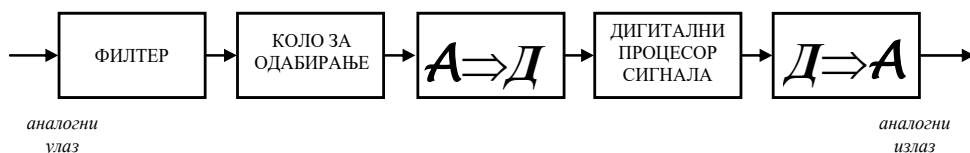
²² У општем смислу термин конверзија (*conversion*, *Umsetzung*, *преобразование*) означава претварање, трансформацију, на пример електричне енергије у топлотну (од лат. речи *conversio*, промена, претварање, обртање). У овој области, под појмом конверзија подразумева се промена облика представљања информација.

Преображај сигнала из аналогног у дигитални облик представља сложен процес који, у начелу, обухвата три разнородне трансформације: одабирање, квантовање и кодовање (слика 7.7). По својој суштини пресликавање из аналогног у дигитални домен је **мерење** аналогне величине. Резултат мерења приказан је у виду броја одређене дужине, којим је исказан однос интензитета улазне x и референтне аналогне величине X_{REF} .



Слика 7.7. Дигитализација аналогног сигнала

Теорема одабирања²³, дефинисана у оквирима математичке теорије телекомуникација, представља подлогу на којој је заснована примена дигиталне обраде сигнала²⁴ у разноврсним подручјима мерне технике као ефикасно средство за анализу спектра, филтрирање, смањивање шума, статистичку анализу, истраживање прелазних појава, као и синтезу временски променљивих сигнала. Електронски аналого-дигитални и дигитално-аналогни конвертори омогућили су да се и брзо променљиви аналогни сигнали могу обрађивати дигитално²⁵ (слика 7.8). Анализа сигнала у временском и фреквенцијском домену постала је широко прихваћен метод рада, не само при лабораторијским испитивањима, него и при мерењима у процесној индустрији.



Слика 7.8. Дигитална обрада аналогних сигнала

Класична електроника била је строго подељена на области које се баве аналогним, импулсним и дигиталним сигналимa. Технологија је убрзала развој дигиталне технике и омогућила њен продор и у она подручја која су, не тако давно, представљала делове области апсолутне доминације аналогних решења. Дигитална електронска кола високог степена интеграције отворила су нове хоризонте и пружила неслућене могућности. Последње деценије двадесетог века означавају се понекад као доба дигиталне револуције, разбуктале тековинама технологије интегрисаних електронских кола. Не без разлога, сматра се да она представља један од најзначајнијих догађаја у

²³ Теорема одабирања (*sampling theorem*) се у англоамеричкој литаратури назива још и Шенонова теорема а у руској литаратури теорема Котельникова.

²⁴ *Digital signal processing - DSP.*

²⁵ Процењује се да у данашње време 90% електричних кола у електронским системима обрађује сигнале у дигиталном облику.

људској историји. **Микропроцесори**, електронска кола (склопови) највеће сложености примењују се у универзалним и специјализованим рачунарским уређајима (системима) који су омогућили суштинску измену методологије управљања сложеним процесима. **Полупроводничке меморије** представљају другу врсту дигиталних кола високог степена интеграције која има посебан значај у савременом друштву.

Сложену обраду података добијених мерењима, због ефикасности и економичности, све више преузимају рачунарски остварени "виртуелни инструменти", али се спрега са стварним светом може остварити само посредством аналогних елемената и кола за спрегу који остварују потребно прилагођење и посебних мешовитих кола која остварују промену облика представљања информације (пресликавање из аналогног у дигитални домен, при уношењу информација у дигитални систем, односно из дигиталног у аналогни, при њиховом издавању). Мешовити системи, у којима су обједињена аналогна и дигитална електронска кола, све више добијају на значају. Овде спадају и **микроконтролери**, рачунари у чипу, оптимизирани за обављање управљачких функција у индустријским уређајима, који се све чешће и у све већем обиму уграђују у уређаје најразноврсније намене, као што су уређаји у домаћинству (микроталасна пећница), саобраћају, медицини.

7.2. ТЕХНОЛОГИЈА

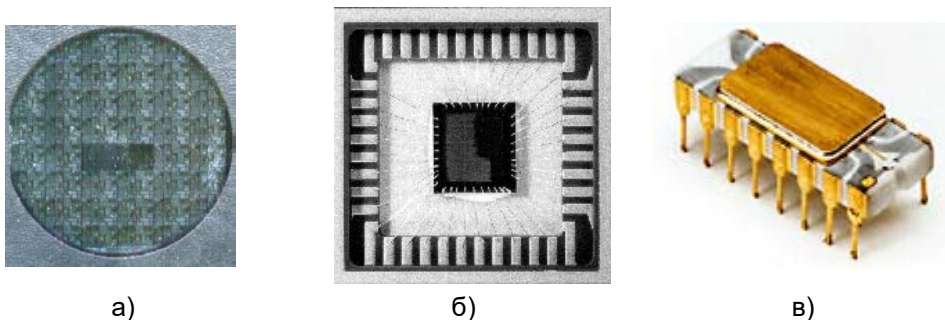
Почетком педесетих година двадесетог века сазрела је идеја да елементи електронских кола (отпорници, кондензатори, диоде и транзистори) могу да буду израђени као делови кристала полупроводника, обликовани уношењем одговарајућих примеса. Унапређење процеса производње електронских компонената, проналазак интегрисаних кола, везује се за имена два американаца, Џека Килбија и Роберта Нојса који су, радећи независно један од другог, такорећи једновременно, развили прва интегрисана електронска кола. Нова полупроводничка технологија омогућила је израду минијатурних сложених електронских уређаја (као што су калкулатори, лични рачунари, мобилни телефони), комерцијално доступних великом броју корисника.

Прво интегрисано коло фирме *Texas Instruments* је представљало астабилни мултивибратор остварен помоћу два транзистора, два кондензатора и седам отпорника. Џек Килби (*Jack Kilby, 1923 – 2005*) је био први који је успео да електронско коло, образовано од разнородних елемената, изради у једном кристалу германијума. Патентни захтев за свој проналазак "чврстог кола" (*solid circuit*) Килби је поднео у фебруару 1959. године. Намењено за израду слушних апарата, ово коло никада није пренето у серијску производњу, али је свом творцу донело светско признање. 2000. године награђен је Нобеловом наградом за допринос проналаску интегрисаних кола.



Интегрисано коло је минијатурно електронско коло израђено као јединствена целина, образована од полупроводничког материјала. Развијени су различити поступци за производњу интегрисаних компонената. Технологија производње је таква да се у једном сложеном процесу (који обухвата

фотолитографију, уношење примеса процесом дифузије на високим температурама, оксидацију и метализацију) израђује велики број интегрисаних кола на једном комаду полупроводничког кристала облика диска (слика 7.9.а). Кристална плоча (*wafer*) се потом реже на делове који представљају одвојена интегрисана кола - чипове (слика 7.9.б). Свако коло се потом уграђује у посебно кућиште са металним изводима (*pin*-овима) за повезивање (слика 7.9.в).



Слика 7.9. Интегрисано коло

Током деценија, технологија производње се непрекидно усавршавала. То се непосредно одражавало на смањивање цене производа појединачног кола као компоненте, као и на развој нових, све сложенијих склопова. 1965. године на тржиште је пласирано око 600 000 интегрисаних кола, скромних могућности и перформанси, по цени од 25\$ по комаду. Већ 1966. године цена је била двоструко нижа, а испоручена количина четири пута већа. Почетком седамдесетих година вредност једног стандардног интегрисаног кола опала је до нивоа једног долара. Започео је лавински процес који и данас траје.

Један од осам оснивача фирме *Fairchild Semiconductor* (1957) физичар Роберт Нојс (*Robert Noyce* 1927-1990), творац је првог планарног интегрисаног кола (1959). Његов проналазак (*unitary circuit*) је нудио практична решења за низ техничких проблема, као што је међусобно повезивање елемената у одговарајуће коло. У својој патентној пријави, коју је поднео у јулу 1959. године, Нојс је описао поступак који је био много погоднији за серијску производњу. Џек Килби се обично истиче као творац концепта интегрисаног кола, док се Роберту Нојсу одаје признање за решење које је омогућило серијску производњу и примену интегрисаних кола.

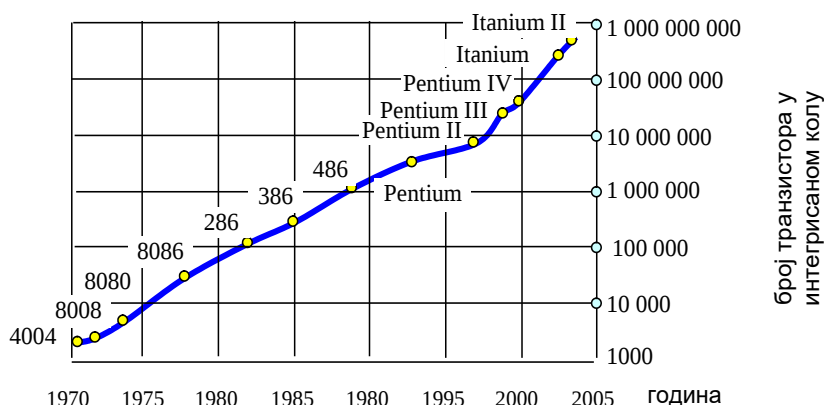


Интегрисана кола се најчешће класификују према броју транзистора и других електронских елемената у колу (табела 7.1).

НАЗИВ	број транзистора и осталих електронских елемената у колу
SSI (<i>small-scale integration</i>)	до 100
MSI (<i>medium-scale integration</i>)	од 100 до 3 000
LSI (<i>large-scale integration</i>)	од 3 000 до 100 000
VLSI (<i>very large-scale integration</i>)	од 100 000 до 1 000 000
ULSI (<i>ultra large-scale integration</i>)	више од 1 000 000

Табела 7.1. Класификација интегрисаних кола према степену интеграције

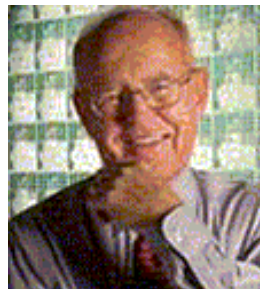
Анализа динамике производње полупроводничких компоненета у првим годинама развоја показала је да се меморијски капацитет интегрисаних кола удвостручава приближно сваких 12 месеци. Ово запажање је данас познато под називом “Муров закон” и обично се наводи у облику: “број транзистора у интегрисаним колима се удвостручава сваких 12 до 18 месеци”. На слици 7.10. је приказан дијаграм развоја степена интеграције микропроцесора које производи америчка фирма *Intel*, мереног бројем транзисторских елемената у једном интегрисаном колу. Сличан дијаграм могуће је направити и за развој рачунарског хардвера, почевши од електромеханичких решења на почетку двадесетог века до данас.



Слика 7.10. Развој микропроцесора

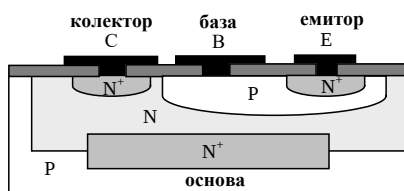
Гордон Мур (*Gordon Moore*, 1929) је са Робертом Нојсем основао фирму *Intel* (1968) која је убрзо постала један од водећих произвођача електронских кола високог степена интеграције.

Први микропроцесор, *Intel 2004*, развијен за потребе јапанске фирме *BUSICOM*, био је намењен за уградњу у преносиве електронске калкулаторе. Након одустајања наручиоца, *Intel* 1971. године износи на отворено тржиште електронских компонената први 4-битни процесор, а брзо потом и први 8-битни микропроцесор опште намене, *Intel 8008*. Могућности првог микропроцесора биле су, и са становишта тадашње технике, сасвим скромне: сабирање и одузимање четворобитних података брзином од 6000 операција у секунди. Оно што је било задивљујуће је чињеница да се све што је потребно за извршавање ових операција налази у једном једином интегрисаном колу.



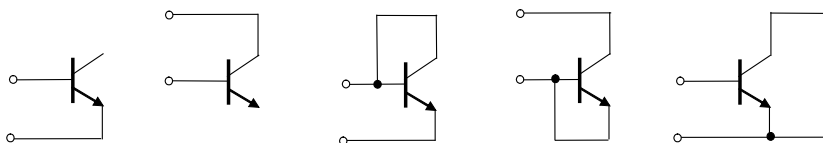
Основни елементи у технологији интегрисаних кола су биполарни NPN-транзистор и NMOS-транзистор. Поступци за њихову израду се разликују по броју операција: биполарна технологија интегрисаних кола је сложенија од MOS-технологије, али се њеном применом реализују кола која се одликују већом брзином. MOS-технологија се одликује мањом потрошњом и већом густином паковања елемената у интегрисаном колу.

Технолошки поступак за израду NPN-транзистора је једноставнији (слика 7.11), његово појачање струје од базе до колектора у односу на PNP-транзистор је у једнаким условима веће, а еквивалентне паразитне капацитивности мање. Због тога се они много више користе у интегрисаним колима у биполарној технологији.



Слика 7.11. Конструкција интегрисаног NPN-транзистора

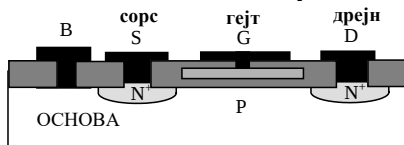
Технологијом која се примењује за израду биполарних транзистора могу се израдити и спојни транзистори са ефектом поља. Диоде се формирају коришћењем колекторског или емиторског споја или неке од веза приказаних на слици 7.12.



Слика 7.12. Конструкција диоде помоћу интегрисаног NPN-транзистора

Отпорници се израђују једновременно са изградом емиторског, базног или колекторског подручја кристалног диска. Отпорници који се израђују једновременно са изградом емитора имају малу отпорност (до 100 Ω) због велике концентрације примеса потребне да се обезбеди велико појачање²⁶. Отпорници који се израђују у подручју базе имају највећу отпорност (до 50 k Ω) због мале концентрације примеса. Вредност отпорности зависи од димензија отпорника. Тачност израде отпорности је мала (толеранција реда величине 20%), зависност отпорности од температуре велика (реда 1%/K), али је упареност добра, јер отпорници израђени од истог материјала, јединственим процесом, имају сличне карактеристике.

Број операција при изради интегрисаних елемената у MOS-технологији је мањи, а густина паковања око 20 пута већа него у технологији интеграције кола са биполарним транзисторима. Димензије P-каналног транзистора су веће од димензија N-каналног транзистора еквивалентних карактеристика (због мање покретљивости шупљина, однос ширине и дужине мора бити већи). На слици 7.13 приказана је структура интегрисаног N-каналног MOS-транзистора са индукованим каналом. Транзистор са уграђеним каналом има додатну N-област у подручју гејта.

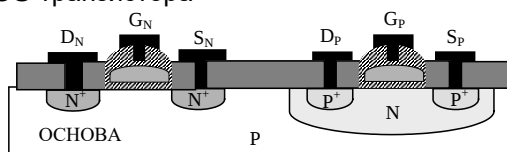


Слика 7.13. Конструкција интегрисаног N-каналног MOS-транзистора

У дигиталној интегрисаној електронике посебно место заузимају кола заснована на структури комплементарних MOS-транзистора. У комплементарној MOS-технологији NMOS и PMOS транзистори се формирају

²⁶ Услови А (страница 95). Детаљније у осмом поглављу ове књиге.

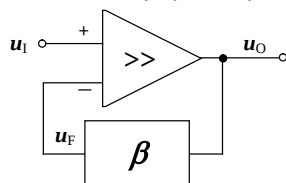
на истој основи (слика 7.14). Поступак је нешто сложенији, а густина паковања мања него код NMOS-транзистора



Слика 7.14. Конструкција интегрисаног N-каналног MOS-транзистора

7.3. ИНТЕГРИСАНА КОЛА ЗА ОБРАДУ АНАЛОГНИХ СИГНАЛА

Занемарујући нека “конзервативна” решења у аудио-техници, савремена аналогна електроника се у потпуности ослања на примену технологије интегрисаних кола. Најраспрострањеније аналогно електронско коло је **операциони појачавач** (*operational amplifier*, *OpAmp*, *OA*) који појачава разлику два напона (диференцијални појачавач). Он представља основни елемент разноврсних електронских уређаја у којима се обрађују аналогни сигнали. Карактеристична својства операционог појачавача су веома велико појачање, занемарљив утицај на извор улазног сигнала (веома велика улазна отпорност) и неосетљивост на промене оптерећења (мала излазна отпорност). Захваљујући томе, у колу са повратном спрегом, карактеристика преноса кола као целине зависи само од карактеристике преноса кола повратне спреге (слика 7.15). То омогућује да се разноврсне математичке операције, које се користе при обради аналогних сигнала (као што су сабирање више величина, одузимање, множење, дељење, интегралење и диференцирање), остваре са великом тачношћу.



$$u_F = \beta u_O$$

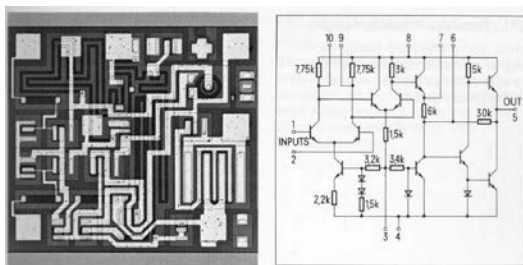
$$A_F = \frac{u_O}{u_I} = \frac{A}{1 + \beta A} \cong \frac{1}{\beta} \Big|_{\beta A \gg 1}$$

Слика 7.15. Операциони појачавач са негативном повратном спрегом

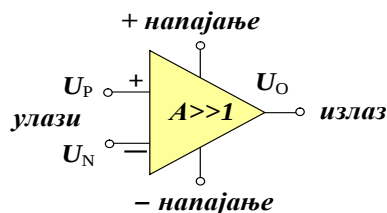
Као компонента електронског система, операциони појачавачи се описују преко својих карактеристика које се могу груписати у неколико категорија:

- **карактеристике улаза** (радни/дозвољени опсег улазног напона, струја поларизације улаза, улазна отпорност, еквивалентни напон помераја нуле на улазу),
- **карактеристике излаза** (опсег излазног напона, излазна отпорност, највећа/дозвољена вредност излазне струје, дозвољено трајање кратког споја на излазу),
- **карактеристике преноса** (појачање, показатељ потискивања заједнички унетог напона, показатељ потискивања промена напона напајања, пропусни опсег),

- **напајање** (радни/дозвољени опсег напона напајања, струја напајања, потрошња),
- **услови околине** (радни/дозвољени температурски опсег).



Слика 7.16. Интегрисани операциони појачавач



Први операциони појачавачи имали су релативно једноставну структуру (слика 7.16) и скромне перформансе. У поређењу са њима, савремени интегрисани операциони појачавачи се могу сматрати савршеним. Појачање врћр од милион и улазне струје реда пикоампера омогућују извршавање основних операција обраде аналогних сигнала са релативном грешком од неколико *ppm*. Захваљујући томе, дошло је до суштинских промена у методологији анализе и синтезе аналогних електронских кола. Пројектовање аналогних електронских кола је знатно олакшано, а интегрисани операциони појачавачи су, преузимајући улогу коју су некада имали дискретни појачавачки елементи (електронске цеви и транзистори), омогућили остваривање много бољих перформанси, нижу цену и мање димензије склопова и уређаја.

Поред операционих појачавача, који представљају кола опште намене која се користе за реализацију разноврсних функција обраде аналогних сигнала, као интегрисана аналогна кола производе се и регулатори напона, извори референтног напона, кола за примену у аудио-, радио- и TV-техници, као и низ специјалних електронских кола (логаритамски појачавачи, инструментациони појачавачи, изолациони појачавачи, претварачи температуре, кондиционери, множачи аналогних величина).

7.4. ИНТЕГРИСАНА КОЛА ЗА ОБРАДУ ДИГИТАЛНИХ СИГНАЛА

Дигитална електроника се бави сигнаlima који представљају величине дискретне по вредности и дискретне по времену. Основне елементе дигиталне електронике представљају логичка кола: склопови, чије се стање описује бинарним променљивим и функцијама, помоћу којих се физички остварују логичке операције²⁷. Логичка кола се често називају прекидачким колима, јер елементи у њима раде у прекидачком режиму, мењајући своје стање између два гранична стања која одговарају стањима затвореног (*ON*) и отвореног (*OFF*) прекидача.

²⁷ Математичка логика је теоријска основа за развој и примену логичких кола која представљају физичку основу дигиталне технике.

У ужем смислу, под појмом “основна логичка кола” подразумевају се кола која остварују основне логичке операције: комплементирање (инвертовање), логичко сабирање (ИЛИ) и логичко множење (И). Било који дигитални систем може бити конструисан коришћењем само логичких кола којима се остварују ове три основне логичке операције²⁸. У ширем смислу, у основна кола се убрајају и она којима се остварују логичке операције НИ, НИЛИ и ИСКЉУЧИВО-ИЛИ.

Логичке мреже, образоване од елемената којима се остварују основне операције над бинарним величинама, могу се сврстати у две групе: комбинационе и секвенцијалне. Стање комбинационих мрежа зависи само од тренутних вредности сигнала на њиховим улазима. Оне омогућују извршавање сложених логичких функција као што су претварање кода, прослеђивање одабраног бинарног сигнала до одговарајућег излаза (улаза следећег кола у ланцу обраде), поређење и испитивање исправности кодовања. Примењују се у свим дигиталним системима, од најједноставнијих до великих “супер” рачунара.

Одговарајућим повезивањем основних логичких кола могуће је образовати елемент који памти (чува, меморише) бинарни податак. Стање секвенцијалне мреже зависи не само од комбинације логичких стања улазних сигнала у тренутку посматрања, него и од стања која су постојала у мрежи током њене “предисторије”. То подразумева да таква мрежа у себи садржи меморијске елементе који памте претходна стања. Секвенцијалне мреже омогућују остваривање операције бројања и представљање дигиталног податка временским низом (секвенцом) стања једне бинарне променљиве.

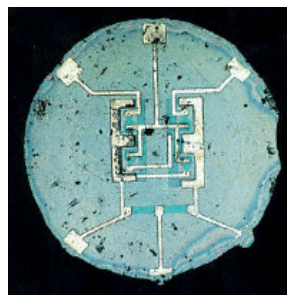
У савременој дигиталној електроници, логичка стања представљена су потенцијалима који одговарају потенцијалима прикључака извора за напајање. Основне параметре интегрисаних логичких кола представљају, поред напона напајања и потрошње (табела 7.2), граничне вредности напона логичке нуле и логичке јединице на улазу и излазу кола, вредности улазне и излазне струје у различитим стањима, као и брзина одзива (кашњење).

	TTL		CMOS			
	7400	74LS	74ALS	4000	74HC	74HCT
НАПАЈАЊЕ	5 V	5 V	5 V	3...18 V	2...6 V	5 V
ПОТРОШЊА	10 mW	2 mW	1 mW	2,5 nW	2,5 nW	2,5 nW
$minU_{IH}$	2.0 V	2.0 V	2.0 V	3,5 V @5 V	3,15 V @5 V	2.0 V
$maxU_{IL}$	0,8 V	0,8 V	0,8 V	1,5 V @5 V	1,1 V @5 V	0,8 V
$maxI_{IL}$	-1,6 mA	-0,36 mA	-0,2 mA	1 μ A	1 μ A	1 μ A
$maxI_{IH}$	40 μ A	20 μ A	20 μ A	1 μ A	1 μ A	1 μ A
$minU_{OH}$	2,4 V	2,7 V	2,7 V	4,5 V @5 V	3,7 V @5 V	3,7 V
$maxU_{OL}$	0,5 V	0,4 V	0,4 V	0,4 V @5 V	0,4 V @5 V	0,4 V
$minI_{OL}$	16 mA	8 mA	4 mA	4 mA @5 V	4 mA @5 V	4 mA
$maxI_{OH}$	-400 μ A	-400 μ A	-400 μ A	-4 mA @5 V	-4 mA @5 V	-4 mA
КАШЊЕЊЕ	10 ns	9,5 ns	4 ns	40 ns	9 ns	9 ns

Табела 7.2. Карактеристике дигиталних интегрисаних кола

²⁸ Полазећи од ставова математичке логики, следи да је за градњу било ког дигиталног уређаја (па и рачунара) довољна само једна врста логичког кола са два улаза: НИЛИ односно НИ.

Ако се откриће транзистора схвати као “упаљач”, развој технологије интегрисаних кола је представљао “мотор” дигиталне револуције. Прво комерцијално логичко коло се појавило 1963. године. Интегрисано коло 907 фирме *Fairchild* је садржало два флип-флопа, сваки образован од четири транзистора и четири отпорника). Већ 1967. године иста фирма избацује на тржиште коло које садржи неколико стотина транзистора чије везе програмира корисник. *Fairchild Micromosaic* је представљао први *ASIC* (*application specified integrated circuit*) чип.



Посебно место у дигиталној електроници заузима **микропроцесор** (*microprocessor*): централна процесорска јединица рачунара (*Central Processing Unit - CPU*) произведена као јединствено интегрисано коло (*chip*). Први микропроцесор, намењен за уградњу у кућне рачунаре, *Intel 8080*, који се појавио 1973. године, био је комплетан 8-битни рачунар у једном чипу. Велики преокрет у области рачунарства започео је 1979. године, након појаве 16-битног процесора *Intel 8088* који је фирма *IBM* применила за развој рачунара опште намене, ниске производне цене²⁹. Развој дигиталних електронских кола је омогућио да савремени рачунари баратају подацима дужине 32 и 64 бита и десет хиљада пута већом брзином (табела 7.3).

Ознака	Год.	Број транзистора	Учестаност (MHz)	Дужина речи (битова)	Ширина магистрале (битова)	MIPS
8080	1974	6,000	2	8	8	0.64
8088	1979	29,000	5	16	8	0.33
80286	1982	134,000	6	16	16	1
80386	1985	275,000	16	32	32	5
80486	1989	1,200,000	25	32	32	20
Pentium	1993	3,100,000	60	32	64	100
Pentium II	1997	7,500,000	233	32	64	~300
Pentium III	1999	9,500,000	450	32	64	~510
Pentium 4	2000	42,000,000	1.5 G	32	64	~1,700
Pentium 4 "Prescott"	2004	125,000,000	3.6 G	32	64	~7,000

MIPS (*millions of instructions per second*) груба мера перформанси процесора.

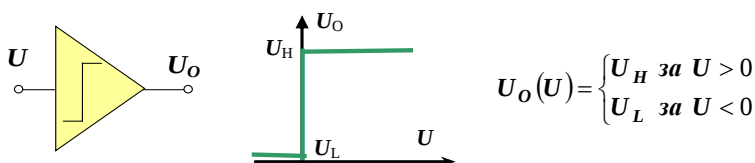
Табела 7.3. Перформансе микропроцесора

²⁹ Нова врста рачунара, пројектована тако да буде комерцијално доступна широком броју појединаца, добила је назив “лични рачунар” (*Personal Computer - PC*).

7.5. МЕШОВИТА ИНТЕГРИСАНА КОЛА

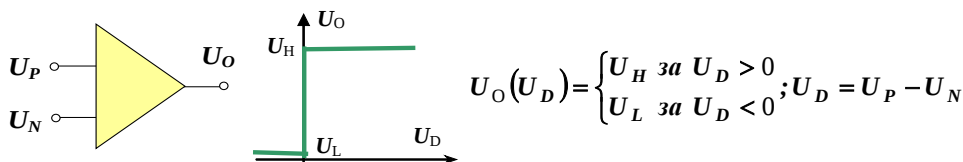
Мешовита интегрисана кола (*mixed-signal IC*) повезују две традиционално поларизоване области, аналогну и дигиталну технику, у јединствену целину чије успешно функционисање је резултат синтезе знања аналогне и дигиталне електронике. Садрже аналогне и дигиталне електронске склопове у истом чипу (*silicon die*). По правилу, ови делови су одвојени и смештени у различите регионе кристала, са циљем смањивања утицаја шума који стварају дигитална кола. Структура кола се пројектује тако да се што је више могуће смањи преношење шума, који стварају дигитална кола, у аналогни део кола (*noise leakage*). Примењују се у мерној техници, системима за надзор и управљање процесима, радио- и аудио-техници.

Компаратор је најједноставније мешовито коло. На његов улаз се доводи аналогни сигнал, док сигнал на излазу представља бинарну величину³⁰ која представља информацију о знаку (поларитету) улазне величине. Компаратор је заправо појачавач великог појачања са израженим ефектом засићења (слика 7.17).



Слика 7.17. Компаратор

Интегрисани компаратори су диференцијални: излазни сигнал добија се као резултат поређења два улазна сигнала (слика 7.18).



Слика 7.18. Диференцијални компаратор

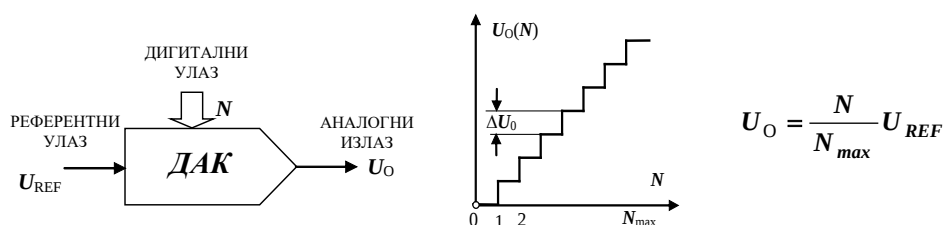
Дигитално-аналогни конвертор³¹ (ДАК) остварује претварање информације из дигиталног у аналогни облик. На свом излазу Д/А конвертор даје аналогни сигнал чији је интензитет једнозначно одређен нумеричком вредношћу улазног податка. У далеко највећем броју случајева користе се конвертори који на свом излазу дају аналогну величину чија је вредност **сразмерна** задатом броју (слика 7.19). За остваривање Д/А конверзије користе се електронски прекидачи имрежа отпорника³² или извора струје. По

³⁰ Компаратор је елементарни једнобитни аналого-дигитални конвертор.

³¹ *digital-to-analog converter* – DAC.

³² У неким посебним применама користе се кондензатори.

правилу, референтна аналогна величина (извор референтног напона) прикључује се споља.

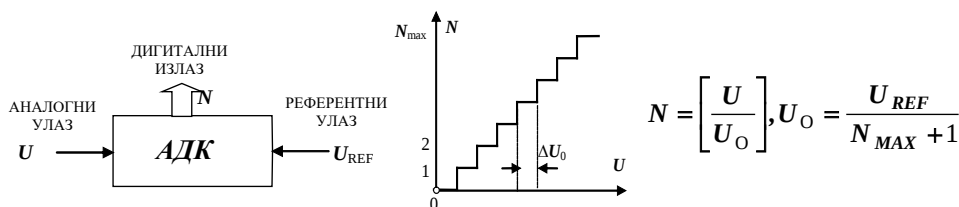


Слика 7.19. Д/А конвертор

Као компонента електронског система, Д/А конвертор се описују преко скупа параметара који описују:

- **карактеристику преноса** (облик карактеристике³³, резолуција³⁴, брзина одзива),
- **тачност конверзије** (грешка појачања, померај нуле, грешка нелинеарности, утицај температуре, осетљивост на промене напона напајања),
- **карактеристике аналогног излаза** (опсег вредности, излазна отпорност, највеће дозвољено оптерећење),
- **карактеристике референтног улаза** (опсег вредности, улазна струја),
- **карактеристике дигиталних улаза** (логичка компатибилност),
- **напајање** (радни/дозвољени опсег напона напајања, струја напајања, потрошња),
- **услове околине** (радни температурски опсег).

Аналого-дигитални конвертор³⁵ (АДК) остварује претварање информације из аналогног у дигитални облик. На свом излазу А/Д конвертор даје дигитални сигнал који представља нумерички податак приказан одређеним кодом, чија је бројна вредност одређен односом улазне (мерене) и референтне аналогне величине (слика 7.20).



Слика 7.20. А/Д конвертор

³³ Математички модел.

³⁴ Строго посматрано, резолуција А/Д конвертора представља промену излазне аналогне величине која одговара промени улазног податка за један. Међутим, уобичајено је да се за дигитално/аналогне конверторе резолуција исказује у битовима.

³⁵ *analog-to-digital converter* – ADC.

А/Д конвертор је сложен електронски склоп (систем) који се описује преко својих карактеристика које су груписане у неколико категорија:

- **карактеристике аналогног улаза** (радни/дозвољени опсег улазног напона, струја поларизације улаза, улазна отпорност, еквивалентни напон помераја нуле на улазу),
- **карактеристике дигиталних излаза** (паралелни/серијски облик издавања и начин представљања излазног податка, логичка компатибилност),
- **карактеристика преноса** (облик карактеристике³⁶, резолуција³⁷, тачност, трајање процеса конверзије, показатељ потискивања промена напона напајања)
- **напајање** (напон напајања, струја напајања, потрошња),
- **услови околине** (радни температурски опсег).

Са циљем налажења компромиса у погледу сложености решења, тачности конверзије и брзине њеног обављања, развијено је мноштво поступака (метода). Принцип рада А/Д конвертора намењених за примену у дигиталним мерним инструментима заснован је на интеграцији улазне величине. Резултат мерења сразмеран је средњој вредности мерене величине током периода интеграције. Одликују се великом тачношћу.

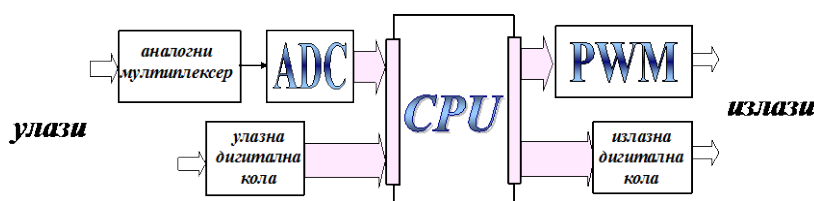
Постоје и друге методе, које се одликују великом брзином конверзије. Савремени интегрисани екстремно брзи 16-битни А/Д конвертори остварују дигитализацију аналогног сигнала брзином од милион узорака у секунди. У регистраторима прелазних појава А/Д конверзија се врши брзином од сто милиона узорака у секунди, са резолуцијом која одговара 10-битном бинарном коду.

У мешовита кола спадају и конвертори напона у учестаност, односно конвертори учестаности у напон, затим дигитални појачавачи (који се користе у дигиталним аудио-системима), као и нека кола за обраду сигнала у телекомуникацијама. Посебну групу чине микроконтролери и дигитални процесори сигнала.

Микроконтролер (*microcontroller*) је рачунар у чипу (*single-chip computer*) оптимизиран за обављање управљачких функција у индустријским уређајима. Осим централног рачунарског језгра (*CPU*), садржи и потребне ресурсе за спрегу са “спољашним светом” (слика 7.21). Аналогни улази се преко селекторског кола (мултиплексер) воде на улаз аналого-дигиталног конвертора (*ADC*). Бинарни улази могу представљати сигнализације о стању процеса или импулсе добијене из бројила електричне/топлотне енергије, водомера, гасомера, мерила запремине протекле течности. Бинарни излази могу побуђивати светлосне индикаторе стања процеса или извршне органе за прослеђивање управљачких налога (команди) типа укључи/искључи. Аналогни излазни сигнали се добијају применом дигитално контролисане импулсне ширинске модулације (*pulse width modulator - PWM*).

³⁶ Линеарна, логаритамска.

³⁷ Често се под резолуцијом А/Д конвертора подразумева број нивоа квантовања, најчешће исказан бројем битова.

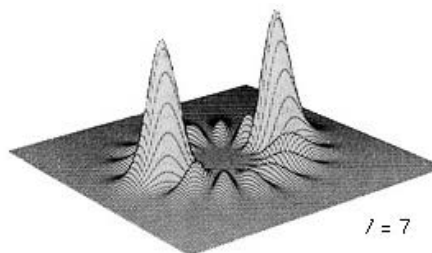


Слика 7.21. Општи структурни блок-дијаграм микроконтролера

Захваљујући ниској цени, малим димензијама, великој поузданости и прилагодљивости, микроконтролери су нашли примену на широком подручју индустријских система, у производима широке потрошње, као и у низу подручја специјалне намене, као што су биомедицина, роботика и војна индустрија. Приказ архитектуре микропроцесора, микрорачунара односно микроконтролера и дигиталних процесора сигнала, њихових хардверских карактеристика и програмских могућности превазилази садржај ове књиге.

7.6. ЛИТЕРАТУРА

1. Comer D., Comer D., *Fundamental of Elektronic Circuit Design*, John Wiley, 2003.
2. Cook N., *Elektronics*, Prentice Hall, 2004.
3. Cvekić V., *Elektronika I*, Poluprovodnički elementi, Naučna knjiga, 1978.
4. Drndarević V. *Elektronika*, Saobraćajni fakultet, 2005.
5. Horowitz P., Hill W., *The Art of electronics*, Cambridge University Press.
6. Hurst G., Meyer L., *Analysis and design of analog integrated circuit*, John Wiley, 2001.
7. Kilby J., *Miniaturized Electronic Circuits*, USA Pat 3,138,743.
8. Litovski V., Lazović S., *Osnovi elektronike*, 1996.
9. Marjanović S., *Diskretna i integrisana analogna kola*, Naučna knjiga, 1984.
10. Millman J., Halkias C., *Integrated electronics: analog and digital circuits and systems*, McGraw-Hill, 1972.
11. Millman J., Taub H., *Pulse digital and switching waveforms*, Mc Graw-Hill, 1965.
12. Muller R., Kamins T., *Device Electronics For Integrated Circuits*, John Wiley&Sons, 1986.
13. Razavi B., *Design of Analog CMOS Integrated Circuits*, McGraw Hill, 2001.
14. Sedra A., Smith K., *Microelectronic circuits*, Oxford Univesity Press, 1998.
15. Senturia S., Wedlock B., *Electronic circuits and applications*, руски превод: Электронны схеми и их применение, Мир, 1977.
16. Stojanović V., *Analogna elektronika*, Univerzitet u Nišu, 1994.
17. Tešić S., Vasiljević D., *Osnovi elektronike*, Građevinska knjiga, 2000.
18. Tocci R., Widmer N., Moss G., *Digital Systems*, Prentice Hall, 2004.
19. Watson J., *An Introduction to Field Effect Transistors*, Siliconix, 1970.
20. Živković D., Popović M., *Impulsna i digitalna elektronika*, Akademska misao, 2004.
21. <http://en.wikipedia.org>.



8. ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКА

Електрична својства материје (супстанце) су одређена њеном структуром, па су и законитости које одређују понашање и деловање електрона у електронским направама приказане моделима који су изграђени на основама квантне и таласне механике. За разумевање физичких основа процеса који се одвијају у електронским елементима неопходно је познавање општих поставки савремене физике о структури материје. У овом поглављу су, у сажетом облику, представљени основи теорије атома и физике чврстог стања.

Проналазак биполарних транзистора је имао пресудан утицај на развој електронике. Додељивање Нобелове награде америчким истраживачима за објашњење појаве која је названа “транзисторски ефекат” посредна је потврда сагледавању значаја физичке електронике у савременој науци. Упознавање са основним поставкама физике чврстог стања (*solid-state*), приказним у овом поглављу, има за циљ сагледавање микроскопских процеса који одређују макроскопска својства електронских елемената. Опис технологија израде полупроводничких компонената превазилази обим ове књиге.

Историјски посматрано, транзистори са ефектом поља пронађени су знатно раније (Лилиенфелд, 1925), као резултат настојања да се оствари кристални еквивалент електронске цеви са три електроде. Тек тридесет година касније сазрели су услови за комерцијалну производњу транзистора овог типа. Теоријско објашњење начин рада полупроводничких појачавачких елемената заснованих на промени, посредством електричног поља, проводности средине (канала) кроз које електрична струја пролази, дао је Шокли.

У овом поглављу су детаљније приказани математички модели којима се описују преношење наелектрисања кроз PN-спој, процеси у биполарним транзисторима и транзисторима са ефектом поља.

8.1. МОДЕЛ АТОМА

Према дефиницији, атом је најмања честица која се може добити дељењем хемијског елемента, а да садржи његове хемијске особине [1]. Појам елемената, као основних облика чисте материје од којих су састављена сва тела у природи, а који се не могу разложити на друге различите чисте материје, био је познат још у шестом веку пре наше ере и прихваћен од стране учитеља јонске филозофске школе. Они су били први који су покушали да нађу одговор на питање “Из чега све постаје?” Учење о корпускуларној¹ грађи појавило се нешто касније, али је, због материјалистичког схватања, било негирано од стране већине грчких филозофа, па и највећег мислиоца античког доба, Аристотела, који је сматрао да је материја непрекидна, да се до бесконачности може делити на мање делове².

Идеја о корпускуларној природи материје приписује се Леукипу (V век пне), а назив атом (грч. *a tomos*, недељив) потиче од његовог ученика Демокрита (*Democritus*, 460-370 пре н.е.). Он је замишљао атоме као ситне, невидљиве, недељиве честице, различите по облику и величини које су одвојене празним простором [2]. Атоми се налазе у вечитом кретању и све промене које се дешавају у природи резултат су спајања и растављања атома. Ово схватање атома је прихватио и старогрчки филозоф Епикур, чије је учење староримски песник Лукреције описао у свом чувеном епу “О природи ствари” (*De rerum natura*). То је било последње дело античке атомистичке мисли која је, након вековног прогањања од стране теолога, поново оживела са Ренесансом, препородом у европској култури који је означио крај средњег века.

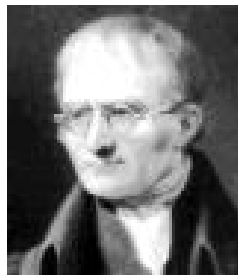


Демокрит

Учење о структури материје које су заступали грчки филозофи је било чисто теоријско, није поткрепљивано никаквим огледом, па зато и није имало неку сигурну основу.

Од античке атомистике до модерних схватања о основним честицама материје, релативно кратак али вијугав пут, трајао је више од две хиљаде година. Враћању атомистичкој теорији у физици допринела је хемија.

Почетком XIX века енглески научник Далтон (*John Dalton*, 1766-1844), у свом делу “Нови систем хемијске филозофије”, објављеном 1808. године, разрадио је атомску хипотезу засновану на резултатима квантитативних метода испитивања хемијских једињења. Њему припада заслуга што је, прихватајући Демокритово учење да би објаснио зашто се извесни елементи међусобно једине само у одређеним тежинским односима, указао на пут који води до разумевања неких основних закона који владају у природи и настанка савремене теорије о структури материје.



Далтон

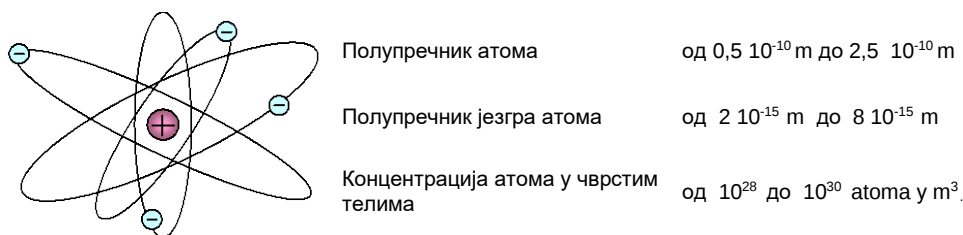
Данас је познато да је руски научник Ломоносов још 1756. године дошао до сличних закључака као и Далтон, али су његови радови у оно време прошли незапажени.

¹ Структура тела изграђених од честица (од лат. *corpusculum*, мало тело). Латински назив за атом је *corpusculum primitivum*.

² Након што је католички теолог Тома Аквински хришћанске догме “извео” из дела Аристотела, највећи енциклопедиста античког доба је вековима, током периода схоластике, представљао неприкословени ауторитет у чије се ставове не сумња. Аристотелово учење постало је темељ на којем су заснивани докази постојања Творца. 1621. године француске власти су прогласиле закон по којем ће све присталице атомистике бити подвргнуте мучењу.

Када је идеја о атомима експериментално потврђена, започела је научна револуција, са још увек несагледивим последицама. Проучавање електричних појава указало је да и сами атоми имају неку своју унутрашњу структуру. Први електрични модел атома предложио је Ампер (1825), који је сматрао да централни део атома има позитивно наелектрисање, а спољашњи део негативно [3]. Питање унутрашње структуре атома постало је веома актуелно након Менделејевог открића периодног закона хемијских елемената 1869. године. Периодичност у хемијским особинама наговештавала је особине и састав атома. Откриће и изучавање радиоактивних појава показали су да атоми нису недељиве честице материје и довели до сазнања о постојању субатомских честица и постављања модела атома.

Механички модел атома, према коме се негативно наелектрисане елементарне честице - електрони крећу по орбитама³ око позитивно наелектрисаног језгра као планете око Сунца, дао је британски физичар Радерфорд (*Rutherford*, 1911). Испитујући расејавање алфа-честица (за које је касније показао да представљају језгра атома хелијума која се ослобађају приликом радиоактивног распада) при њиховом пролазу кроз металну фолију, он је закључио да се атом састоји од језгра (*nucleus*), које има позитивно наелектрисање и скоро сву масу атома, и "лаких" негативно наелектрисаних честица (за које је касније прихваћен назив - електрони⁴) које се крећу око језгра на одређеним растојањима (слика 8.1).



Слика 8.1. Планетарни модел атома

Најједноставнији атом је атом водоника у којем се само једна негативно наелектрисана елементарна честица креће око друге позитивно наелектрисане елементарне честице која представља језгро атома. Колико је данас познато, електрон представља стабилну елементарну честицу (не може се раставити на мање честице), а наелектрисање електрона q_e усвојено је за **елементарно наелектрисање**⁵:

$$q_e = 0,160219 \cdot 10^{-18} \text{ C.} \quad (8.1)$$

³ Кружним путањима (од лат. *orbita*, путања којом се крећу небеска тела)

⁴ Назив "електрон" за најмању (јединичну) количину наелектрисања у природи предложио је ирски физичар Стони (*G.J.Stoney*) још 1891. године. Идеја о дискретној природи наелектрисања и постојању елементарне количине наелектрисања проистекла је из Фарадејевих истраживања појаве електролизе. Након експерименталне потврде постојања физичког носиоца елементарног негативног наелектрисања, термин је прихваћен као назив за субатомску честицу.

⁵ Сматра се да је прво експериментално одређивање вредности наелектрисања електрона остварио Миликан (*R.A.Millikan*) 1917. године.

Маса електрона у стању мировања⁶ једнака је $0,91095 \cdot 10^{-30}$ kg, што је приближно 1840 пута мање од масе најмањег атомског језгра (атом водоника). Полупречник електрона као честице је око 10^{-15} m.

Потпуни атоми, који имају све своје електроне, електрично су неутрални (нормално стање) и не делују једни на друге електричним силама осим на врло блиским растојањима. Тело чији су сви атоми електрично неутрални и само је електрички неутрално. Ово “нормално стање” атома може да се поремети утицајима споља. Са становишта електротехнике, посебно је значајна промена при којој електрон напушта атом удаљавањем изван утицаја језгра. У том случају атом постаје позитивни јон⁷ са онолико елементарних позитивних наелектрисања колико је електрона изгубио. Позитивно наелектрисана тела су она тела⁸ чији су неки атоми на било који начин изгубили по један или више електрона. Њихово позитивно наелектрисање износи онолико елементарних наелектрисања колико електрона недостаје њиховим атомима. Негативно наелектрисана тела су она тела чији неки атоми садрже вишак електрона. У општем случају, наелектрисање тела је алгебарски збир наелектрисања у њему. Између наелектрисаних тела делују електричне силе које представљају збир свих електричних сила које делују између вишкова наелектрисаних честица на једном и другом телу.

Енергија коју електрон у атому поседује, W , одређује његово растојање од језгра, r . Електрони који су најудаљенији у односу на језгро атома имају највећу енергију. Усваја се да је енергија слободног електрона (који се налази изван утицаја атомског језгра) једнака нули. Енергија негативно наелектрисаног електрона који се креће око позитивно наелектрисаног језгра је негативна. Укупна енергија сваког електрона једнака је збиру његове кинетичке и потенцијалне електричне енергије. Према законима класичне физике укупна енергија електрона у атому водоника је једнака:

$$W = -\frac{q_e}{8\pi\epsilon_0 r}, \quad (8.2)$$

На основу закона класичне електродинимике наелектрисана честица која се креће око неког центра “понаша” се као осцилатор који зрачи енергију у виду електромагнетских таласа чија је учестаност одређена учестаношћу осциловања. Зрачењем се смањује енергија честице, што би, према класичној електродинимици, значило да таласна дужина емитованог зрачења мора да се повећава. То је, међутим, у супротности са резултатима мерења. Спектар зрачења које емитују атоми је дискретан.

Аналогија између атома и сунчевог система не може бити потпуна. Према законима класичне физике атом чији електрони непрекидно емитују енергију је нестабилан. Губећи енергију зрачењем, електрон би спирално падао као језгру. Ову неусаглашеност теорије са експерименталним

⁶ Маса електрона који се креће малом брзином у поређењу са брзином светлости.

⁷ Јон је атом или група везаних атома која поседује неко наелектрисање, која као целина може да се креће под дејством електричног поља (грч. *ión*, оно што се креће).

⁸ Реч “тело” се користи у најопштијем смислу, укључујући чврсте, течне и гасовите облике посматраног узорка материјала.

чињеницама решена је даљим развојем идеје дисконтинуираности материјалног света, настанком теорије кванта (*quantum theory*) коју је 1900. године поставио Макс Планк да би формулисао закон којим се објашњава дискретан карактер спектра светлости. Планк је закључио да осцилатор не емитује енергију непрекидно, већ само у “порцијама” које представљају целобројне умношке одређене елементарне количине енергије.

Аустријски физичар Макс Планк (*Max Planck*, 1858-1947) је одбацио веровање да енергија може да се континуирано емитује. Закључио је да тело које зрачи електромагнетске таласе одаје енергију у целим умношцима једне одређене количине, коју је назвао “елемент енергије”:

$$W = h \nu$$

ν је учестаност зрачења, а h Планкова константа ($h = 6,6256 \cdot 10^{-34}$ Js).

Израз “квант енергије” уведен је касније. Његов творац је вероватно А. Ајнштајн. За откриће елементарног кванта енергије које је представљало основу за постављање теорије кванта Планк је награђен Нобеловом наградом за физику 1918. године.



Вредност кванта енергије је веома мала што указује на разлог зашто су квантни ефекти запажени тек када су развојем мерних метода и инструмената остварени услови за проучавање “фине” структуре материје. Квант зрачења видљиве светлости, таласне дужине 600 nm, приближно је једнак $3 \cdot 10^{-17}$ J.

Квантна физика која се бави појавама у којима се манифестује квантни карактер процеса обележила је почетак двадесетог века⁹. Полазећи од Планкове идеја о дисконтинуитету енергије зрачења, Алберт Ајнштајн је објаснио фотоелектрични ефекат (1905). Он је закључио да се енергија не само емитује, већ и преноси и апсорбује у квантима. При апсорпцији светлости сваки квант светлости узајамно делује само са једним електроном.

Несагласност теорије атомске структуре материје са експерименталним чињеницама решио је Нилс Бор (1913) повезујући Радерфордов планетарни модел атома са Планковом теоријом кванта.

Дански физичар Нилс Бор (*Niels Bohr*, 1885 - 1962) је, комбинујући законе класичне физике, Планкову теорију кванта и Ајнштајнову теорију фотоелектричног ефекта, успео да планетарни модел свог учитеља Радерфорда учини стабилним и усаглашеним са експерименталним резултатима. Боров модел је успешно објаснио структуру спектра водониковог атома.

За истраживања структуре атома Бор је награђен Нобеловом наградом 1922. године.



На основу стабилности атома, Бор је закључио да постоје стања у којима електрони не зраче енергију која је назвао стационарним стањима¹⁰. Основно у Боровом моделу атома је квантовање (дискретизација) путање (орбите) електрона, које је он дефинисао са своја два постулата:

⁹ Предавање у којем је описао закон зрачења заснован на необичној хипотези да атоми испрекидано, у извесним “порцијама” емитују енергију, Планк је одржао 14.12.1900. године, две недеље пре званичног почетка двадесетог века.

¹⁰ Од лат. речи *stationarius*, сталан, постојан, који не мења место (стање).

- У стационарном стању вредност угаоног момента електрона (mvr) је дискретна величина одређена формулом:

$$mvr = n \frac{h}{2\pi}. \quad (8.3)$$

- У стањима која одговарају овим вредностима (8.3) електрон не зрачи енергију. При прелазу са путање која одговара стационарном стању са енергијом W_A на путању која одговара стационарном стању W_B ($W_B < W_A$) емитује се енергија у облику електромагнетског зрачења чија је учестаност ν одређена формулом:

$$\nu = \frac{W_B - W_A}{h}. \quad (8.4)$$

Према Боровом моделу атома, електрон не може да поседује било коју енергију, већ само неке дискретне вредности:

$$W_n = \frac{W_1}{n^2}; n=1, 2, 3, \dots \quad W_1 = \frac{2\pi^2 q_e^4 m}{h^2} z^2, \quad (8.5)$$

где је W_1 енергија која одговара најнижем енергијском стању ($n = 1$), а z је број позитивно наелектрисаних елементарних честица (протона) у атомском језгру (атомски број¹¹).

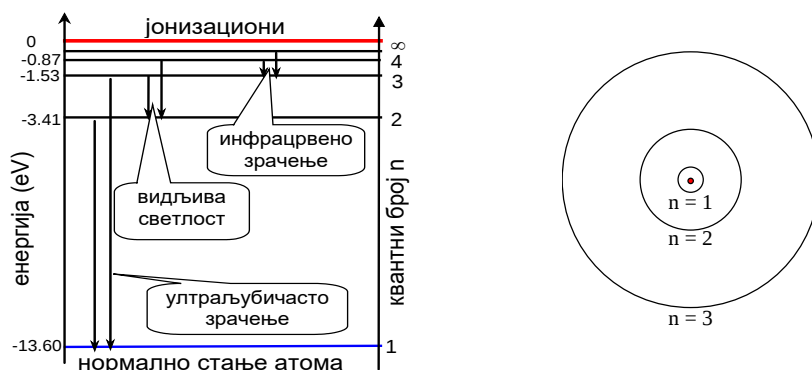
За полупречник орбите електрона важи формула:

$$r_n = r_1 n^2; n=1, 2, 3, \dots \quad r_1 = \frac{h^2}{4\pi^2 q_e^2 m} = \frac{q_e^2}{W_1}. \quad (8.6)$$

Удаљеност путање електрона од језгра је одређена енергијом коју тај електрон поседује. Зато се у физици посматрају вредности енергија електрона (енергијски нивои који одговарају одређеном квантном стању) уместо њихових путања. Енергијски дијаграм атома представља графички приказ енергијских нивоа електрона помоћу хоризонталних линија које за ординате имају енергију електрона у атому (слика 8.2). Електрони у атому који се налази у нормалном стању заузимају своје најниже енергијске нивое. Уобичајено је да се вредност енергијских нивоа електрона у атому изражава у електронволтима. Један **електронволт** је једнак промени енергије електрона подвргнутог промени потенцијала за 1 V:

$$1\text{eV} = 0,160219 \cdot 10^{-18} \text{ J}. \quad (8.7)$$

¹¹ Ред елемента у периодном систему Менделјејева, који је идентичан са бројем стабилних позитивних елементарних честица (протона) у језгру.



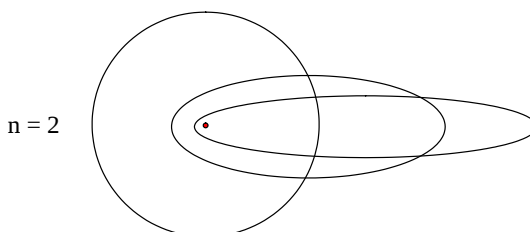
Слика 8.2. Нивои енергије електрона у атому водоника

Каснији развој физике усавршавао је Борову теорију. Могуће вредности енергијских нивоа електрона одређене су са четири квантна броја. Групе електрона који имају исти квантни број n образују електронске слојеве (опне¹²) K, L, M, N, O, P и Q.

Да би се објаснили детаљи који се односе на спектар зрачења које емитују атоми при преласку из побуђеног у нормално стање, немачки физичар Зомерфелд (*Arnold Sommerfeld*, 1868-1951) је увео квантовање облика и просторне оријентације орбита електрона. Овим проширењем Борове теорије објашњени су спектри сложених атома. Увођењем четири квантна броја Зомерфелд је омогућио објашњење утицаја магнетског и електричног поља на стационарна стања атома.



Главни квантни број (n) је цео позитиван број који даје величину орбите електрона и чије дисконтинуалне (скоковите) промене доводе до знатних промена енергије. Орбитални (азимутни) квантни број (l) одређује облик путање електрона у његовом кретању око језгра, која може бити кружна или елиптична. Овај број може имати све вредности од нуле до $n - 1$, где n означава главни квантни број. Осим тога постоје и унутрашњи (магнетски) квантни број j , који описује просторну оријентацију могућих кружних и елиптичних путања, и спин s , који је у вези са обртањем електрона око сопствене осе.



Слика 8.3. Орбите електрона

¹² Електронске љуске (*electron shell*).

Према принципу искључивости који је формулисао Волфганг Паули (*Pauli*, 1924) у сваком атому у одређеном стању може бити само један електрон. За сваки слој постоји највећи број електрона који може имати енергију која одговара том слоју (односно који се у њему може наћи).

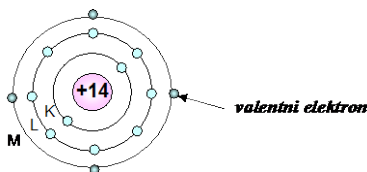
$$N = 2n^2. \quad (8.8)$$

Највећи број електрона који може да постоји у првом слоју, најближем језгру, који се означава словом K, једнак је 2; у другом слоју (L), 8; у трећем слоју (M), 18; и у четвртном слоју (N), 32 (слика 8.4).

n	љуска	N	расподела
1	K	2	2
2	L	8	2, 6
3	M	18	2, 6, 10
4	N	32	1, 6, 10, 14

Слика 8.4. Структура електронских љуски

Највећу енергију имају електрони који припадају спољашњем слоју. Они су најслабије везани за језгро атома и представљају валентне¹³ електроне помоћу којих се остварује спрега са другим атомима. На слици 8.5 је приказан модел атома силицијума чији је атомски број 14, што значи да његово језгро садржи позитивно наелектрисање +14 q_e .



Слика 8.5. Модел атома силицијума.

Два или више атома могу да се удруже тако да један или више “заједничких” електрона круже око језгара тих атома. Са становишта електронике посебно су значајне **парна веза**¹⁴, која се успоставља у кристалима који се формирају од истородних атома, и **метална веза**, коју остварују атоми метала, чији су електрони ослобођени и образују “**електронски гас**” који испуњава простор између чворова кристалне решетке у којима се налазе позитивни јони.

8.2. ФИЗИКА ЧВРСТОГ СТАЊА

Боров модел описује стање једноатомског система који се налази изван утицаја околних атома. Енергијски дијаграм на слици 8.2 одговара

¹³ Број једноструких веза које атом једног елемента може да оствари са суседним атомима (валенца) једнак је броју валентних електрона (лат. *valentia*, вредност, важност).

¹⁴ Сваки од два суседна атома “даје” по један “заједнички” електрон који кружи око оба језгра (*electron-pair*, *covalent bond*). Оваква веза се назива и хомеополарна (ковалентна) веза.

изоливаном атому. Када се два једнака атома налазе врло близу (двоатомски систем) долази до промене енергијских стања њихових електрона. Поједини енергијски нивои се "цепају" тако да од сваког енергијског нивоа једноатомског система настану два нивоа у двоатомском систему.

У материјалима, сачињеним од елементима који имају кристалну структуру, врло велики број једнаких атома се налази у међусобној близини. Услед узајамног деловања атома у чврстом телу од сваког енергијског нивоа једноатомског система настаје мноштво енергијских нивоа. Електрони су око језгра распоређени у слојевима које образују групе електрона који имају блиске енергијске нивое.

8.2.1. ЕНЕРГИЈСКИ ОПСЕЗИ АТОМА У ЧВРСТИМ ТЕЛИМА

Скуп дискретних, али врло густо сабијених, енергијских нивоа, чији је број једнак броју атома у кристалу, а који потичу од сваког појединог квантног стања атома, представља **енергијски опсег**¹⁵.

Дозвољени опсег је енергијски опсег у коме електрони могу да заузму сваки његов ниво [4]. **Забрањени опсег** је размак између два (дозвољена) опсега који представљају могуће вредности енергијских нивоа. У забрањеном опсегу нема електрона. Разлика између енергије најнижег нивоа вишег опсега и енергије највишег нивоа нижег опсега представља **енергијски процеп**¹⁶ између два опсега.

Поједини енергијски опсези атома могу бити потпуно или делимично попуњени, или празни. Под називом **попуњен опсег** подразумева се енергијски опсег чији је сваки ниво заузет. **Празан опсег** је опсег који може да буде попуњен, али чији ни један енергијски ниво не одговара енергији ма ког електрона у датом стању одређене супстанце. **Слободан опсег** представља опсег у којем нису сви енергијски нивои заузети електронима. Он је "изнад" попуњеног опсега - електрони који припадају слободном опсегу су удаљенији од атомског језгра. У слободном опсегу електрони се могу премештати у границама опсега или прелазити у међуатомски простор.

Валентни опсег је дозвољени опсег који заузимају валентни електрони. **Проводни опсег** је дозвољени опсег непотпуно заузет електронима. Садржи електроне чија се средња макроскопска брзина усмереног кретања може, дејлеовањем електричног поља, променити од нуле на неку коначну вредност, што има за последицу појаву проводности.

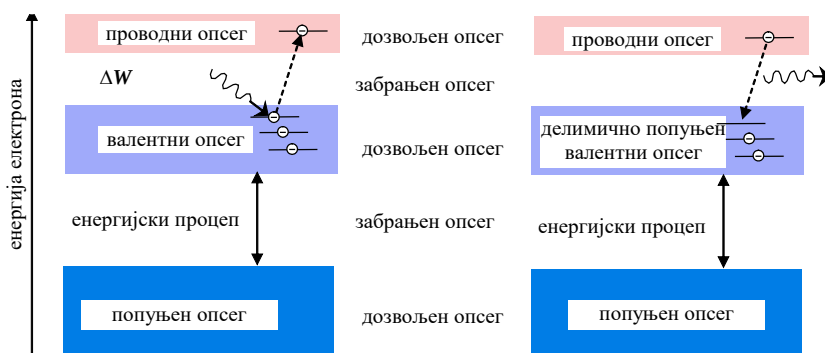
Атоми у чврстим телима, односно њихови електрони, заузимају нивое који одговарају минимуму енергије и првенствено попуњују најниже енергијске нивое, најближе језгру атома. Да би електрон прешао из нижег енергијског опсега у виши потребно је да на неки начин прими енергију која је једнака или већа од ширине енергијског процепа (слика 8.6). Енергија јонизације атома је најмања енергија која је потребна да би се јонизовао атом који се налази у

¹⁵ Енергијска зона (*energy band*, *Energieband*, *энергетическая полоса*).

¹⁶ Ширина забрањеног опсега (*forbidden energy gap*).

основном стању. Када електрон прелази из вишег енергијског опсега у нижи, разлика енергије два нивоа се ослобађа у виду електромагнетског зрачења.

Од посебног значаја за електричне особине тела су два највиша опсега: проводни опсег и испод њега, валентни опсег. Испод валентног опсега налазе се, у општем случају, други попуњени опсези чији су електрони чврсто везани за своје атоме и немају утицаја на електричне особине материјала¹⁷. Електрон у проводном опсегу има тако велику енергију да је сасвим слабо везан за атом кристалне решетке и може се усмерено кретати при дејству електричног поља¹⁸. **Слободни електрон** је електрон који није строго везан за структуру атома или молекула и који се слободно креће под дејством електричног поља.



Слика 8.6. Енергијски опсези електрона у чврстим телима

Квантно-механичка теорија енергијских опсега¹⁹ објаснила је многе појаве у кристалима као што су електрична проводљивост и интеракција чврстих тела (супстанце) и електромагнетског зрачења.

8.2.2. ЕЛЕКТРИЧНА СТРУЈА У ЧВРСТИМ ТЕЛИМА

Супстанца у чијем саставу постоји велики број наелектрисаних честица које могу релативно слободно да се крећу под дејством електричног поља (носиоци слободног наелектрисања) представља проводник. Најважнији проводници су метали. У њима су електрони веома лабаво везани за свој атом тако да постоји стално кретање тих електрона од атома до атома. Под дејством електричних сила које потичу из спољашњег извора ови електрони се крећу у правцу деловања тих сила образујући електричну струју.

Специфична отпорност ρ проводних материјала зависи од температуре. Сачинилац промене специфичне отпорности са температуром (температурски коефицијент), TC , дефинисан је формулом:

¹⁷ Везани електрон (*bound electron*), електрон који се налази у једном од енергијских нивоа атома или молекула и који слободно не може да се креће под дејством спољашњег поља.

¹⁸ Електрон провођења (*conduction electron*).

¹⁹ Зонска теорија, (*energy-band theory*).

$$TC = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT}. \quad (8.9)$$

Обично се изражава у процентима по степену ($\%/^{\circ}\text{C}$) или у милионитим деловима²⁰ по степену ($\text{ppm}/^{\circ}\text{C}$). Вредност TC је обележје материјала. Специфична електрична отпорност метала расте са повећањем температуре. Код племенитих метала температурски сачинилац је у опсегу од $+200 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$ до $+300 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$ и практично не зависи од температуре.

За метале, функција $\rho(t)$ се у првој апроксимацији представља линеарном једначином:

$$\rho = \rho(t_0) \cdot [1 + TC_0(t - t_0)]. \quad (8.10)$$

у којој $\rho(t_0)$ и TC_0 представљају вредности одговарајућих величина на референтној температури t_0 .

У течностима, процесом електролитичке дисоцијације, неутрални молекули растворене супстанце се разлажу на позитивне и негативне јоне који се крећу у смеру електричних сила, ако ове делују на њих. Пролажење струје кроз електролите доводи до хемијских промена. Проучавање ових појава спада у домен физичке хемије.

У чврстим телима која представљају проводнике, енергијски опсег који одговара нормалном стању (нормални опсег) и опсег који одговара побуђеном стању атома (побуђени опсег) се додирују, а могу се и преклапати (слика 1.4). Такав “комбинован” опсег је делимично попуњен (виши нивои су празни) и представља проводни опсег. Лабаво везани електрони из проводног опсега једног атома лако могу да пређу у непопуњен проводни опсег суседног атома. Када је последњи опсег атома потпуно попуњен електронима овај процес није могућ.

Супстанца у којој су, у уобичајеним (нормалним) условима, електрони чврсто везани за свој атом или групу атома који образују молекул, представља **диелектрик**. Под дејством спољашње електричне силе долази само до мале деформације атома (диелектрични померај²¹), али не и до усмереног кретања покретљивих носилаца наелектрисања. Да би прешли из валентног у проводни опсег електрони треба да приме релативно велику енергију, што на обичној собној температури и при умереној јачини електричног поља није могуће. Стога код диелектрика у проводном опсегу у нормалним условима нема електрона који су лабаво везани за атоме и који могу, под дејством одговарајуће побуде (електричног поља или дифузије), да се усмерено крећу кроз супстанцу.

У нормалним условима у гасовима постоји мали број јона²², па се они понашају као диелектрици. У случају када се гас налази у веома јаком

²⁰ 1 ppm = 10^{-6} , од лат. *pars per milionem*.

²¹ Диелектрик се дефинише као супстанца чије је основно електрично својство способност поларизације при дејству електричног поља.

²² У општем случају, јон је атом, молекул или група молекула чије укупно наелектрисање није једнако нули. Јонизација је настанак јона дељењем молекула или додавањем или одузимањем електрона у атомима, молекулима или групама молекула.

електричном пољу, јони изложени дејству електричних сила добијају велику брзину тако да при судару са неутралним молекулима могу да изврше јонизацију, разбију молекул на два супротно наелектрисана јона (ударна јонизација). При таквим условима, број јона нагло расте и гас постаје проводник.

Диелектрик је супстанца чији је енергетски дијаграм такав да је валентни опсег попуњен и раздвојен од првог проводног опсега опсегом забрањених вредности енергије, који има такву ширину да је за премештање (побуђивање) електрона из нормалног стања у стање које одговара проводном опсегу потребна енергија од 10 eV до 30 eV. Електрони из потпуно попуњеног валентног опсега не могу да се крећу под дејством страног поља, па у диелектрицима није могуће кретање валентних електрона од атома до атома.

Између проводника и диелектрика се налазе материјали у којима је број наелектрисаних честица које могу да се крећу под дејством електричних сила много мањи него у случају проводника, али и много већи него код изолатора. Материјал са таквим својствима се назива **полупроводник**²³.

У металима сви валентни електрони су електрони провођења. У полупроводницима број електрона провођења је мањи од броја валентних електрона. **Чисти полупроводници** (материјали састављени само од једне супстанце, без примеса) на ниским температурама имају сличне енергијске опсеге као диелектрици, али је енергијски процеп између валентног и проводног опсега знатно мањи²⁴, реда величине 1 eV. Због тога већ на собној температури неки од валентних електрона може да добије довољну енергију да пређе у проводни опсег. Након таквог преласка, валентни опсег остаје непопуњен, садржи мање електрона од највећег "дозвољеног" броја електрона у том опсегу. Ова празнина у валентном опсегу је као нека шупљина²⁵ која се понаша као носилац позитивног елементарног наелектрисања.

Електрони који су доспели у готово празан проводни опсег лако прелазе са једног атома на други. Образовањем празнина у валентном енергијском опсегу атома у кристалној решетки (слободних места које је електрон напустио премештајући се у други положај), стварају се услови за размену електрона између суседних атома, јер валентни опсег у коме се налази шупљина није више попуњен. Шупљина је празнина која се појављује у нормално попуњеном енергијском опсегу, која се понаша као носилац позитивног елементарног наелектрисања. Шупљина није јон, јони остају везани у кристалној решетки. Преласком електрона из валентног у проводни опсег настаје пар електрон-шупљина. Према томе, полупроводницима постоје две врсте слободних носилаца наелектрисања чијим кретањем се остварује премештање наелектрисања. Крећући се кроз кристалну решетку, слободни

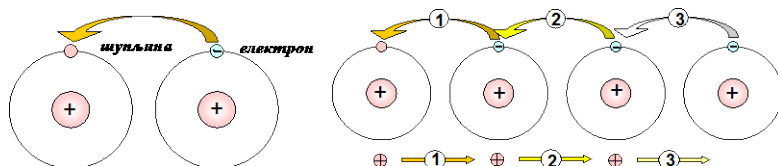
²³ Обично се у полупроводнике (*semiconductor*, *Halbleiter*, *полупроводник*) сврставају материјали чија је специфична електрична отпорност у опсегу од $10^{-5} \Omega\text{m}$ до $10^4 \Omega\text{m}$.

²⁴ На пример, у кристалу силицијума (Si) енергијски процеп на собној температури (300 K) је 1,1 eV, за германијум (Ge) ширина забрањене зоне је једнака 0,72 eV, док за цинк-оксид (ZnO) износи 0,4 eV. Са повећањем температуре енергијски процеп се смањује.

²⁵ Јама (*hole*, *Loch*, *дырка*) .

електрони и шупљине се међусобно сусрећу, при чему се опет сједињују. Спајање носилаца наелектрисања супротног знака се назива **рекомбинација**. У стању термичке равнотеже, број насталих парова електрон-шупљина једнак је броју рекомбинација.

Процес провођења у полупроводницима, осим кретања слободних електрона, обухвата и кретање шупљина које се, услед деловања електричног поља или дифузије, премештају у кристалној решетки путем сталне измене места са суседним електронима. Овај процес је еквивалентан кретању позитивних наелектрисања у супротном смеру (слика 8.7).



Слика 8.7. Кретање шупљине у полупроводнику

У начелу, постоје три врсте слободних (покретљивих) физичких носилаца наелектрисања:

- слободни електрони;
- позитивни јони, атоми који су изгубили један или више електрона;
- негативни јони, атоми који су добили један или више електрона.

У чврстим телима слободно покретљива наелектрисања су електрони који припадају спољашњој електронској љусци и који су врло лабаво везани за своје атоме и молекуле. У течним проводницима (електролитима) слободно покретљива наелектрисања су позитивни и негативни јони. У гасовима, слободно покретљива наелектрисања су позитивни и негативни јони и електрони.

У металима носиоце електричне струје представљају слободни електрони. Провођење струје не доводи до хемијских промена, с обзиром на то да слободних електрона има у металу и када ти метали нису искоришћени као проводници. Електрони се усмерено крећу када је проводник под напоном, односно када везује крајеве (полове) извора електричног напона са потрошачем електричне енергије.

У полупроводницима провођење електричне струје је омогућено настанком шупљина. Преласком електрона из валентног опсега у проводни опсег настаје пар електрон-шупљина. Шупљина је празнина која се појављује у нормално попуњеном енергијском опсегу понашајући се као носилац позитивног наелектрисања. Када електрон из суседног атома “ускочи” на место шупљине, шупљина се премешта у атом одакле је дошао електрон, док атом у коме је претходно била шупљина сада има попуњен валентни опсег. Попуњавање шупљина своди се на кретање позитивних оптерећења као слободних носилаца наелектрисања, у супротном правцу од електрона који их попуњавају. Покретљивост електрона је већа од покретљивости шупљина.

8.3. ПОЛУПРОВОДНИЦИ

Природни полупроводник²⁶ је материјал у којем су нормални опсег и суседни побуђени опсег врло мало размакнути²⁷. На температури апсолутне нуле природни полупроводник је диелектрик. Са повећањем температуре енергијски процеп се смањује. Енергија електрона се повећава и они се удаљавају од језгра. На довољно високој температури изван број електрона може да пређе из нормалног у проводни опсег. Њихов број расте са порастом температуре. У тим условима електрони из нормалног опсега, који је попуњен делимично, могу да учествују у провођењу. **Специфична отпорност полупроводника опада са порастом температуре.**

У односу на метале, појаве у полупроводницима су много сложеније природе. Полупроводник је материјал :

- ✦ чија се специфична електрична отпорност налази у опсегу између специфичних електричних отпорности метала и диелектрика,
- ✦ у којем постоје две врсте покретљивих (слободних) носилаца наелектрисања (електрони и шупљине) [5],
- ✦ у којем концентрација носилаца расте са повећањем температуре (у неком температурном опсегу) [6],
- ✦ у којем постоји двојак механизам њиховог кретања (кретање под дејством електричног поља и дифузија).

Са становишта примене у савременој електроници, најзначајнији полупроводници су германијум (атомски број 32) и силицијум (14), који припадају четвртој групи периодног система елемената (слика 8.8).

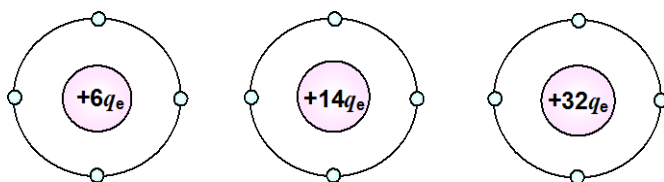
III	IV	V
бор B (5)	угљеник C (6)	азот N (7)
алуминијум Al (13)	силицијум Si (14)	фосфор P (15)
галијум Ga (31)	германијум Ge (32)	арсен As (33)
индијум	калај	антимон

Слика 8.8. Елементи III, IV и V групе периодног система Менделјејева

Атоми ових елемената имају четири електрона у последњем слоју (валентном опсегу). У атому германијума, на пример, K, L и M слој су попуњени, а у N слоју се налазе четири валентна електрона (слика 8.9).

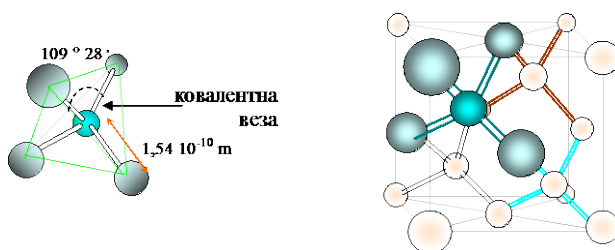
²⁶ Својствени полупроводник (*intrinsic semiconductor*, *Eigenhalbleiter*, *собственный полупроводник*).

²⁷ На температури апсолутне нуле, енергијски процеп германијума је 0,785 eV, а силицијума 1,21 eV.



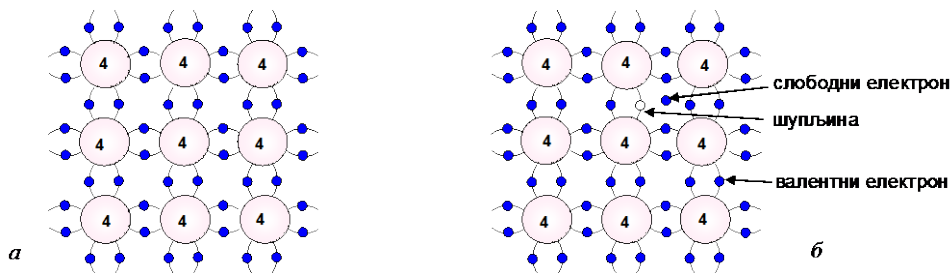
Слика 8.9. Упрости модели елемената четврте групе периодног система

Чист полупроводник има кристалну структуру, идентичну као и угљеник (дијамантска структура), у којој су четири валентна електрона раздвојени између суседних атома (ковалентна веза). Основну ћелију кристала представља тетраедар у чијем се центру и теменима налазе атоми (односно молекули). Сваки атом у кристалу једнако је удаљен од четири суседна атома. Распоред атома у простору приказан је на слици 8.10.



Слика 8.10. Дијамантска структура

Упрости модел кристалне решетке полупроводника приказане у равни дат је на слици 8.11. Електрички неутрално тело од чистог полупроводника на температури апсолутне нуле не садржи слободне носиоце наелектрисања (слика 8.11.а). Сви електрони су обухваћени валентним везама и у њему нема електрона који би били слободни носиоци наелектрисања. Међутим, већ на собној температури долази до разграђивања неких ковалентних веза и формирања парова електрон-шупљина (слика 8.11.б).



Слика 8.11. Упрости приказ кристалне решетке

С обзиром на начин на који настају слободни носиоци наелектрисања, концентрација електрона n и концентрација шупљина p у чистом полупроводнику међусобно су једнаке:

$$n = p = n_i, \quad (8.11)$$

где је n_i концентрација разграђених валентних веза - **сопствена** (*intrinsic*) **концентрација** чистог полупроводника. Она зависи од врсте материјала и његове температуре.

Када енергија слободног електрона опадне долази до процеса рекомбинације којим један слободни електрон и једна шупљина успоставе валентну везу. У полупроводнику се успоставља динамичка равнотежа процеса разграђивања и рекомбинације ковалентних веза. Сопствена концентрација слободних носилаца наелектрисања у условима равнотеже одређена је формулом [7]:

$$n_i = \sqrt{AT^3 e^{-\frac{W_G}{kT}}}, \quad (8.12)$$

где је W_G ширина енергијског процепа на температури апсолутне нуле, а A представља константу која зависи од својстава материјала.

Концентрација слободних електрона и шупљина у чистом германијуму и силицијуму²⁸ је од 10^{10} cm^{-3} до 10^{13} cm^{-3} . Концентрација атома код ових елемената је око $10^{23} \text{ атома/cm}^3$. Дакле, на нормалној (собној) температури се у чистим полупроводницима у проводној зони налази само један електрон на приближно 10^{10} атома. Покретљивост слободних носилаца наелектрисања у полупроводницима је реда величине $1\,000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ [8], што је знатно изнад покретљивости електрона у металу. Међутим, њихова концентрација у полупроводницима је знатно мања, па је однос специфичне проводности бакра и германијума, на пример, приближно $2 \cdot 10^7$.

Једначине које описују зависност густине електричне струје од електричног поља, односно зависност густине дифузионе струје од градијента концентрације, представљају основу за описивање појава у полупроводницима.

Процес дифузије је посебно значајан у полупроводницима, чија су електрична својства, као последица појаве дифузије, омогућила образовање елемената чија проводност зависи од смера протицања електричне струје, као и елемената којима се остварује појачање електричних сигнала.

Ако се неким процесом оствари да је на једном крају проводног тела (средине) концентрација слободних носилаца наелектрисања већа од концентрације n_0 која одговара равнотежном стању у посматраном телу, функција која описује зависност промене концентрације честица од растојања x посматране тачке има експоненцијални облик (слика 8.12):

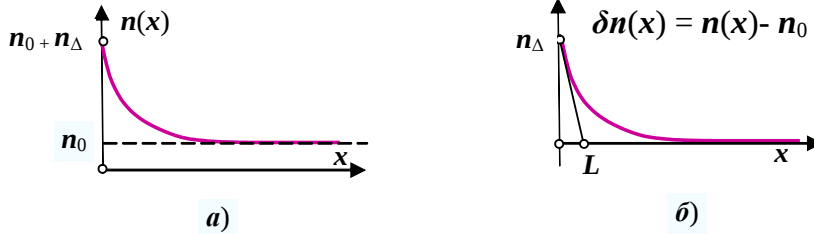
$$n(x) = n_0 + n_{\Delta} e^{-\frac{x}{L}}, \quad (8.13)$$

где је L дифузиона дужина која представља растојање на којем одступање концентрације $n(x)$ од равнотежне вредности n_0 опадне на $1/e$ од почетне вредности одступања n_{Δ} (слика 8.12.б):

²⁸ На температури 300 К концентрација слободних електрона и шупљина у чистом германијуму је $2,5 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, а у силицијуму $1,5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$.

$$\delta n(L) = \frac{n_{\Delta}}{e}, \quad n_{\Delta} = \delta n(x) \Big|_{x=0} \quad (8.14)$$

Вредност L зависи од вредности дифузионе константе честица D .

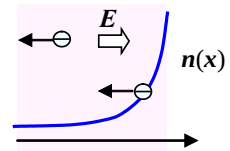


Слика 8.12. Процес дифузије

Густина J_n укупне струје слободних електрона ($q = -q_e$) једнака је:

$$J_n = q_e n \mu_n E + q_e D_n \frac{dn}{dx}, \quad (8.15)$$

где су n концентрација, μ_n покретљивост, а D_n дифузиона константа електрона.

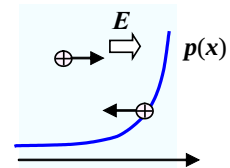


Слика 8.13. Кретање слободних електрона

За густину струје шупљина J_p важи еквивалентна формула ($q = q_e$):

$$J_p = q_e p \mu_p E - q_e D_p \frac{dp}{dx}, \quad (8.16)$$

где је p концентрација, μ_p покретљивост, а D_p дифузиона константа шупљина у посматраној средини.



Слика 8.14. Кретање шупљина

Специфична проводност савршено чистог полупроводника (сопствена проводност полупроводника) једнака је:

$$\sigma_i = q_e (n \mu_n + p \mu_p) = q_e n_i (\mu_n + \mu_p). \quad (8.17)$$

Уколико је ширина забрањеног енергијског слоја већа, сопствена концентрација n_i је мања, па је и сопствена проводност σ_i материјала мања.

Покретљивост електрона већа је од покретљивости шупљина²⁹. На собној температури дифузионе константе за германијум имају вредност 93,5 cm²/s за електроне, односно 44 cm²/s за шупљине [9].

Са повећањем температуре повећава се сопствена концентрација слободних носилаца наелектрисања n_i и специфична проводност σ_i расте (специфична отпорност опада). Покретљивост слободних носилаца

²⁹ При собној температури ($T=300$ K), за чист германијум, покретљивост електрона је око 3 800 cm²/Vs, а покретљивост шупљина 1 800 cm²/Vs. За чист силицијум, покретљивост електрона је око 1 500 cm²/Vs, а покретљивост шупљина 500 cm²/Vs.

наелектрисања такође зависи од температуре. Зависност специфичне отпорности полупроводника од температуре описује се једначином облика [10]:

$$\rho_i = AT^b e^{\frac{W_G}{kT}} \quad (8.18)$$

у којој A представља константу која зависи од материјала и геометрије проводника, а b параметар који зависи од материјала и температуре.

Полупроводници су неки елементи, као што су германијум (Ge) и силицијум (Si), и једињења, као што су галијум арсенид (GaAs), оксид бакра (CuO) и оксид цинка (ZnO). Концентрација атома који на собној температури имају у проводном опсегу један електрон је веома мала, па се чисти полупроводници не користе као проводни материјали. Да би се полупроводницима повећала специфична проводност додају се погодно изабране примесе³⁰.

8.3.1. ПОЛУПРОВОДНИЦИ СА ПРИМЕСАМА

Специфична проводност полупроводника може значајно да се повећа додавањем примеса. Атоми других елемената уносе несавршености у структуру кристалне решетке, што доприноси повећању концентрације слободних носилаца наелектрисања. На енергијском дијаграму, полупроводник са примесама³¹ има енергијски процеп између нормалног опсега и суседног побуђеног опсега упоредив са оним код чистог (природног) полупроводника, али има и уметнуте нивое који потичу од примеса.

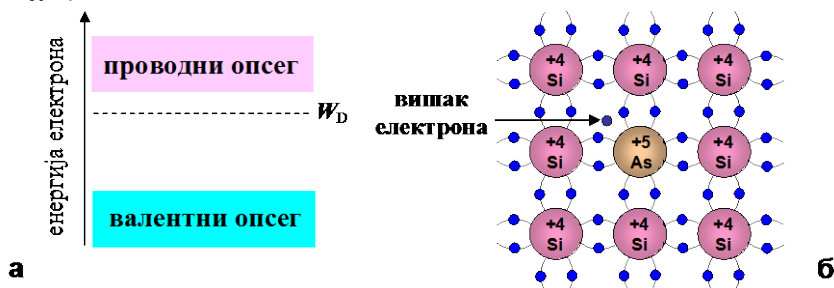
Број атома примеса је много мањи од броја атома основног материјала тако да је сваки атом примесе окружен атомима полупроводника. Атом тровалентне примесе уграђен у кристалну решетку коју образују четворовалентни атоми доспева у стање да му недостаје један електрон да попуни ковалентну везу са суседним четворовалентним атомом. Атом петовалентног елемента садржи, са становишта ковалентних веза, један прекобројни електрон.

Материјали примеса бирају се тако да на уобичајеној радној температури сви атоми који су "убачени" у кристалну структуру полупроводника буду јонизовани. То значи да су тровалентни атоми примеса попунили четврту ковалентну везу у тетраедарској структури кристала валентним електроном преузетим од неког суседног атома основног материјала, а петовалентни атоми "отпустили" своје електроне. Наиме, код неких примеса, као што су фосфор P (15) и арсен As (33), енергијски ниво

³⁰ Хемијска нечистоћа (*impurities, Verunreinigungen, примеси*), несавршеност (дефект) кристалне структуре.

³¹ Примесни полупроводник (*extrinsic semiconductor, Stöhalbleiter, примесный полупроводник*) је полупроводник чија концентрација слободних носилаца наелектрисања зависи од концентрације примеса или других несавршености.

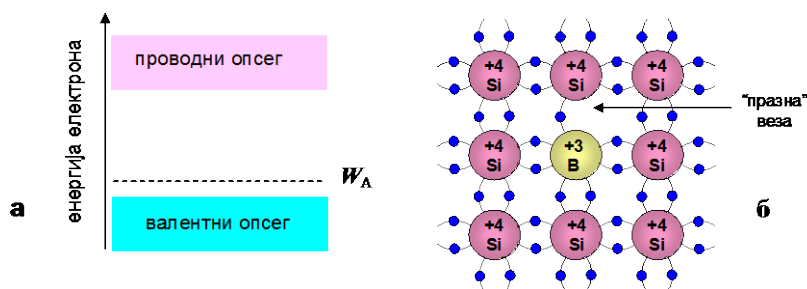
петог електрона атома примесе је у подручју које одговара забрањеном опсегу чистог полупроводника, али је врло близу проводног опсега (слика 8.15.а), па је потребно врло мало енергије (0,05 eV за силицијум и 0,01 eV за германијум) да постане слободан.



Слика 8.15. Модел кристалне решетке полупроводника N-типа

Уношењем примесе које представљају атоме петовалентних елемената у структури кристала појављује се један електрон "вишка". Овај, пети електрон атома примесе је већ на собној температури у проводном опсегу и може суделовати у образовању струје под дејством електричног поља. Атом примесе понаша се као "давалац" слободног електрона, **донор**³². У материјалу који садржи примесе атома донорских елемената постоји више слободних електрона него шупљина па се такав материјал назива полупроводник N-типа. На слици 8.15.б приказан је модел кристалне решетке силицијума³³ са примесама петовалентних атома арсена као донора. Пети валентни електрон који не учествује у образовању ковалентних веза са суседним атомима кристалне решетке лако прелази у проводни опсег и постаје слободан електрон. Атом примесе постаје позитиван јон, а концентрација n слободних електрона се повећава.

Уношењем примесе које представљају атоме тровалентних елемената, као што су бор В (5), галијум Ga (31) и индијум In (49), једно место (ковалентна веза) у валентном опсегу (гљусци) је непопуњено. Атом примесе понаша се као "прималац" електрона, **акцептор**³⁴. Модел кристалне решетке полупроводника P-типа са примесом тровалентног (3 е) атома приказан је на слици 8.16.б.



Слика 8.16. Модели кристалне решетке полупроводника P-типа

³² Од лат. *donatio*, давати.

³³ Еквивалентна слика важи и за германијум.

³⁴ Од лат. *acceptare*, прималац.

Преузимањем електрона, атом примесе који је примио електрон, прималац, постаје негативно наелектрисан јон, а атом основног материјала, који је изгубио валентни електрон, садржи шупљину. Дакле, додавањем тровалентних примеса повећава се концентрација p шупљина као слободних носилаца наелектрисања па се такав материјал назива примесни полупроводник Р-типа.

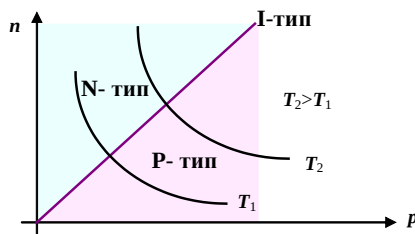
Концентрација атома примеса у полупроводним материјалима који се користе у електроници је у широким границама. Типично је један атом примесе на 10^6 до 10^8 атома полупроводника. Поред ових слободних носилаца насталих услед присуства примеса, постоје и електрони и шупљине који спонтано настају у самом полупроводнику, али је њихов број знатно мањи (на собној температури приближно један пар електрон-шупљина на сваких 10^{10} атома). Концентрација атома примеса је 100 до 10000 пута већа од концентрације термички разграђених веза на собној температури, због чега њихово присуство има преовлађујући утицај на електрична својства материјала. У примесним полупроводницима N-типа већински слободни носиоци наелектрисања³⁵ су електрони, поред којих постоје у малом броју и шупљине као мањински слободни носиоци наелектрисања³⁶.

Дакле, у зависности од тога која врста слободних носилаца наелектрисања преовлађује, постоје две врсте полупроводника (Р-тип и N-тип), а самим тим и различите врсте спојева. Полупроводник N-типа је полупроводник са примесама у којем је концентрација проводних електрона већа од концентрације покретних шупљина ($n_N \gg p_N$). Полупроводник Р-типа је полупроводник у којем је концентрација шупљина већа од концентрације проводних електрона ($p_P \gg n_P$).

У кристалу полупроводника са примесама³⁷ успоставља се термодинамичка равнотежа при којој важи [11]:

$$np = n_i^2. \quad (8.19)$$

Додавањем неутралних атома примесе не ремети се електрично стање тела у целини. Супстанца која садржи примесе је електрички неутрална. Повећањем температуре повећава се број разграђених валентних веза (слика 8.17), али неутралност остаје.



Слика 8.17. Концентрација слободних носилаца наелектрисања у полупроводнику

³⁵ У литератури се користи и назив: главни слободни носиоци (*majority carrier*).

³⁶ У литератури се користи и назив: споредни слободни носиоци (*carrier*).

³⁷ "Загађен" атомима/молекулима другог елемента/једињења (*doped semiconductor*).

Скоро чист и савршин полупроводник у којем су концентрације електрона и шупљина приближно једнаке у условима термодинамичке равнотеже, назива се полупроводник I-типа.

Када су сви атоми примесе јонизовани важи услов електричне неутралности:

$$N_D + p = N_A + n. \quad (8.20)$$

Вредности концентрација донорских и акцепторских атома, N_D и N_A , зависе од начина образовања полупроводника са примесама. У чистим полупроводницима је $N_D = N_A = 0$.

Ако су сви атоми примесе јонизовани, концентрација већинских носилаца наелектрисања приближно је једнака концентрацији атома примесе. У полупроводнику Р-типа, значи, концентрација већинских слободних носилаца наелектрисања (шупљина) n_P једнака је броју атома акцептора:

$$n_P = N_A. \quad (8.21)$$

На основу једначине 8.19 следи да је концентрација мањинских слободних носилаца наелектрисања у материјалу Р-типа (електрона) једнака:

$$n_P = \frac{n_i^2}{N_A}. \quad (8.22)$$

У полупроводнику N-типа важе еквивалентне релације:

$$n_N = N_D, \quad p_N = \frac{n_i^2}{N_D}. \quad (8.23)$$

Додавањем примесе значајно се мења специфична отпорност кристала. Само један атом примесе на 10^8 атома германијума смањује специфину отпорност за више од 11 пута [12].

8.4. ПОЛАРИЗАЦИЈА PN-СПОЈА

PN-спој³⁸ се образује легирањем полупроводничког кристала са једним или више материјала, извлачењем кристала из растопа првобитно прочишћеног полупроводника којем се у појединим фазама процеса додају одговарајуће примесе, дифузијом примеса у полупроводнички кристал, или бомбардовањем кристала јонима примеса [13],[14].

Физички, PN-спој је јединствено тело од полупроводничког материјала које у једном делу запремине претежно садржи примесе атома акцептора, тако да представља полупроводник Р-типа, а у другом претежно примесе атома донора (N-тип полупроводника). У ужем смислу, PN-спој представља подручје између полупроводника Р- и N-типа.

³⁸ PN-junction, PN-Übergang, p-n-переход.



Слика 8.18. PN-спој

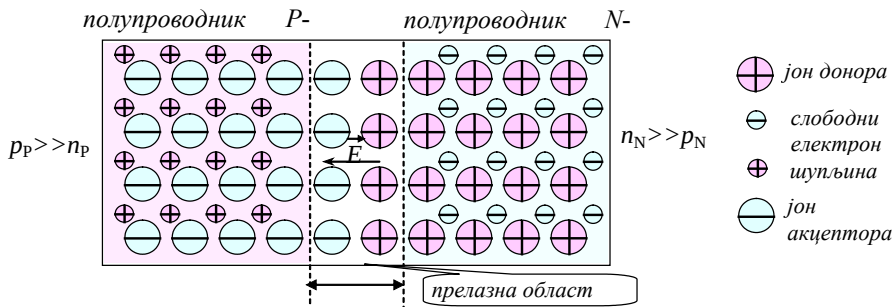
Посматран у целини, кристал полупроводника са примесама је електрички неутралан. У његовом Р-делу, међутим, постоје **некомпензовани носиоци наелектрисања** (слика 8.18):

-  покретљиви електрони и шупљине, настали термичком разградњом ковалентних веза атома елемента полупроводника;
-  негативно наелектрисани јони у чворовима кристалне решетке који су настали образовањем четврте ковалентне везе између тровалентног атома примесе (акцептора) и једног од суседних четворовалентних атома полупроводника (везано наелектрисање),
-  покретљиве шупљине, настале услед присуства тровалентних атома акцептора.

У N-делу PN-споја постоје некомпензовани носиоци наелектрисања:

-  покретљиви електрони и шупљине, настали термичком разградњом ковалентних веза;
-  позитивно наелектрисани јони у чворовима кристалне решетке који су настали "отпуштањем" петог валентног електрона атома примесе (донора),
-  електрони, настали услед присуства петовалентних атома примесе.

У Р-области кристала, у којој преовлађују атоми примесе тровалентних атома, постоји велика концентрација шупљина ($N_A \gg N_D$, $p_P \gg n_P$), које су већински слободни носиоци наелектрисања у тој области. У N-области кристала, у којој преовлађују атоми примесе петовалентних атома, постоји велика концентрација електрона као већинских носилаца наелектрисања ($N_D \gg N_A$, $n_N \gg p_N$). Неравномерна расподела покретљивих носилаца наелектрисања унутар једног тела (кристала) доводи до појаве дифузије. Међутим, процес дифузије слободних носилаца наелектрисања је самоограничавајући. Премештањем наелектрисаних честица са места веће концентрације ка месту мање концентрације ремети се електрична равнотежа, услед чега се ствара електрично поље које је усмерено од N-области ка Р-области и делује тако да спречи дифузионо кретање већинских носилаца. Уколико не постоји страно електрично поље, преношење наелектрисања се зауставља након успостављања равнотеже, струја кроз спој једнака је нули.



Слика 8.19. Модел PN-споја

Између два дела кристала од којих један представља полупроводник N-типа, а други полупроводник P-типа, образује се прелазно подручје у којем не постоје слободни носиоци наелектрисања, већ само некомпензовани јони примеса (слика 8.19). Ово подручје, чија ширина је мања од милионитог дела метра ($1 \mu\text{m}$), назива се **прелазна област**³⁹ [15]. Концентрација покретљивих носилаца у овој области није довољна да неутралише концентрацију наелектрисања непокретних јона донора и акцептора у чворовима кристалне решетке. Ако се може сматрати да изван прелазне области нема некомпензованих наелектрисања⁴⁰, електрично поље изван прелазне области је једнако нули. Прелазна област у којој се налазе некомпензована наелектрисања донорских и акцепторских јона делује као **потенцијална препрека**⁴¹. Електрично поље E , које се успоставља у овој области је усмерено од слоја позитивних јона донора на граници N-области ка слоју негативно наелектрисаних јона акцептора на граници P-области кристала. Оно спречава дифузионо кретање већинских носилаца наелектрисања кроз спој (шупљина из P-области у N-област, односно електрона из N-области у P-област). Заправо, успоставља се динамичка равнотежа при којој је број новонасталих парова електрон-шупљина једнак броју њихових рекомбинација тако да је, статистички посматрано, средња вредност густине некомпензованих донорских и акцепторских јона константна.

Са становишта теоријске анализе, најједноставније је ако се предпостави да је PN-спој остварен тако да постоји скоковита промена концентрације слободних носилаца наелектрисања при преласка из једне у другу област (слика 8.20.б). Разлика потенцијала на крајевима прелазне области таквог PN-споја једнака је [16]:

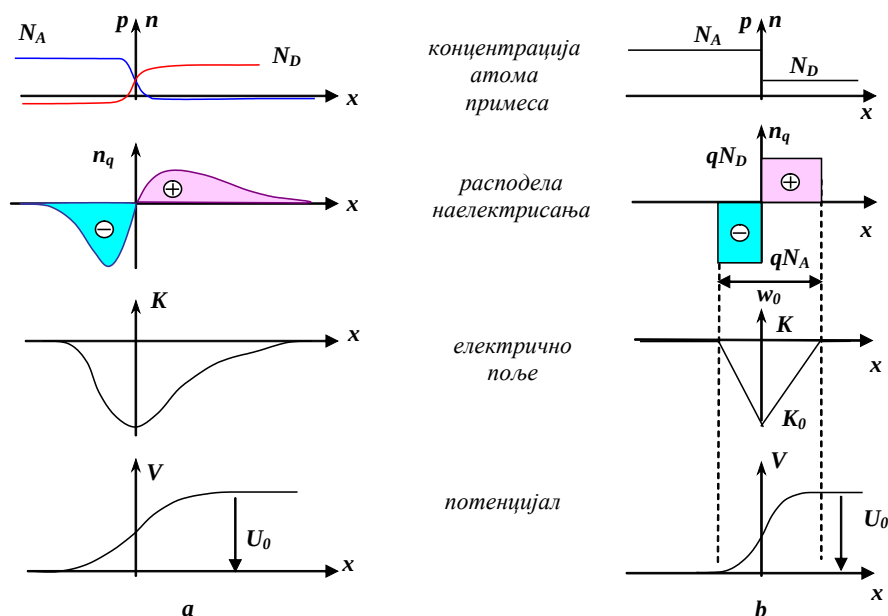
$$U_0 = U_T \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2}. \quad (8.24)$$

³⁹ У литератури се за прелазну област (*transition region*) користе и називи: област просторног наелектрисања (*space-charge region*), област просторног товара, испражњени или осиромашени слој (*depletion layer*, *обедненный слой*).

⁴⁰ Атоми примеса у прелазном подручју делују као вишак наелектрисања (*uncovered charge*).

⁴¹ Енергијска препрека, баријера (*potential barrier*, *Potentialberg*, *потенцијална бариера*).

Ова разлика потенцијала на месту додира два различита материјала⁴² зависи од температуре и концентрације примеса. На собној температури је реда величине неколико десетих делова волта. За типичне вредности, на пример: $N_D = 10^{15} \text{ 1/cm}^2$, $N_A = 10^{18} \text{ 1/cm}^2$, $n_i = 1,45 \cdot 10^{10} \text{ 1/cm}^2$, добија се: $U_0 \approx 0,78 \text{ V}$.



Слика 8.20. Прелазна област PN-споја

Ширина прелазне области, w_0 , зависи од облика функције којом се може представити промена концентрација примеса донора, N_D , односно акцептора, N_A , при преласку из једне у другу област. За теоријски најједноставнији случај скоковите промене концентрације атома примеса од N_D у N-области, на N_A у P-области може се применити формула [17]:

$$w_0 = \sqrt{\frac{2\epsilon U_0}{q_e} \frac{N_D + N_A}{N_D N_A}}. \quad (8.25)$$

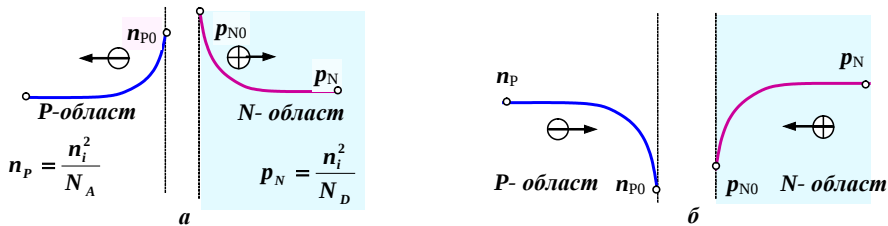
8.4.1. КАРАКТЕРИСТИКА PN-СПОЈА

Услед несиметрије расподеле наелектрисања у прелазној области, **полупроводник са PN-спојем се понаша несиметрично када се на њега прикључи напон**. Ако се слободни крајеви области које образују PN-спој прикључе на извор напона U , тако да се прикључак за P-област споја налази на вишем потенцијалу од прикључка N-области, долази до смањивања потенцијалне препреке и смањивања интензитета електричног поља у

⁴² Контактна разлика потенцијала (*contact difference of potential*).

прелазној области. То омогућује дифузију већинских носилаца наелектрисања кроз прелазну област. Електрони из N-области продиру у Р-област, повећавајући концентрацију мањинских носилаца наелектрисања на граници прелазне области, n_{p0} , изнад нормалне концентрације електрона у Р-области, n_p , која одговара термичкој равнотежи.

Када је напон поларизације $U = U_{PN}$ једнак нули, концентрација n_{p0} једнака је равнотежној концентрацији мањинских носиоца (електрона) n_p . Када је прикључени напон U_{PN} позитиван, гранична вредност концентрације електрона у Р-области, уз само прелазно подручје, n_{p0} , расте са порастом напона (слика 8.21.а), а висина потенцијалне препреке се смањује.



Слика 8.21. Расподела концентрација мањинских носилаца наелектрисања при поларизацији PN-споја позитивним (а) и негативним напонам (б)

Гранична вредност концентрације електрона у Р-области, уз само прелазно подручје, n_{p0} , је експоненцијална функција напона U на споју [18]:

$$n_{p0} = n_p e^{\frac{U}{U_T}} \quad (8.26)$$

За $U \gg U_T$ концентрација n_{p0} мањинских носилаца на граници прелазне области је много већа од концентрације n_p која одговара термичкој равнотежи. Због повећане концентрације мањинских носилаца наелектрисања у граничном слоју Р-области, које настаје при поларизацији позитивним напонам, долази до њиховог дифузионог кретања даље од споја. Услед рекомбинације са шупљинама као већинским носиоцима наелектрисања у Р-области, концентрација електрона се поступно смањује до вредности n_p која одговара термичкој равнотежи (слика 8.21.а).

На истоветан начин, шупљине се дифузијом премештају из Р-области у N-област, а потом и даље, као мањински носиоци, све до успостављања равнотеже. Гранична вредност концентрације шупљина у N-области, уз само прелазно подручје, p_{N0} , једнака је:

$$p_{N0} = p_N e^{\frac{U}{U_T}} \quad (8.27)$$

Када је знак прикљученог напона супротан ($U = U_{PN} < 0$), PN-спој је инверзно поларисан, висина потенцијалне препреке се повећава. Концентрација мањинских носилаца наелектрисања на граници прелазне области опада са порастом напона поларизације. Расподела мањинских носилаца наелектрисања при негативној поларизацији PN-споја дата је на

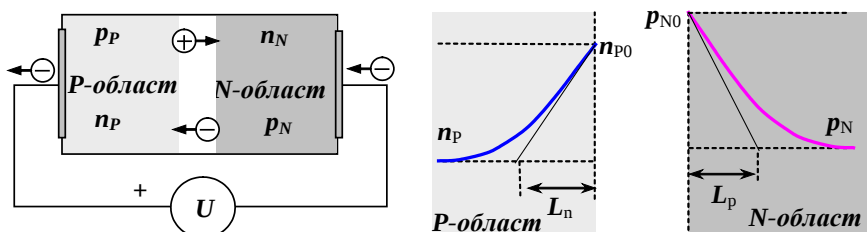
слици 8.21.б. На граници прелазне области концентрација мањинских носилаца наелектрисања је мања од оне која постоји у равнотежном стању у одсуству поларизације.

Функција која описује зависност концентрације мањинских слободних носилаца наелектрисања од растојања x посматране тачке од границе прелазне области има експоненцијални облик:

$$n_p(x) = n_{p0} e^{\frac{-x}{L_n}}, \quad (8.28)$$

$$p_N(x) = p_{N0} e^{\frac{-x}{L_p}}. \quad (8.29)$$

Растојање L , на којем концентрација опадне на $1/e$ од промене првобитне вредности, назива се **дифузиона дужина** (слика 8.22).



Слика 8.22. Дефиниција дифузионих дужина

На границама прелазне области важе једначине:

$$\frac{dn}{dx} = \frac{n_{p0} - n_p}{L_n} = \frac{n_p}{L_n} \left(e^{\frac{U}{U_T}} - 1 \right), \quad \frac{dp}{dx} = \frac{p_{N0} - p_N}{L_p} = \frac{p_N}{L_p} \left(e^{\frac{U}{U_T}} - 1 \right), \quad (8.30)$$

L_p и L_n су дифузионе дужине шупљина и електрона.

Густина укупне дифузионе струје J једнака је збиру густине дифузионе струје шупљина J_p и густине дифузионе струје електрона J_n , чије су вредности одређене једначинама дифузије:

$$J_p = -q_e D_p \frac{dp}{dx}, \quad J_n = q_e D_n \frac{dn}{dx}. \quad (8.31)$$

Решавањем система једначина (8.30 и 8.31) добија се израз који описује зависност густине укупне струје J од напона U :

$$J = J_p + J_n = q_e n_i^2 \left(\frac{D_p}{L_p N_D} + \frac{D_n}{L_n N_A} \right) \left(e^{\frac{U}{U_T}} - 1 \right). \quad (8.32)$$

PN-спој постаје проводан ако се на његове изводе доведе напон такав да је P-област прикључена на виши потенцијал у односу на N-област.

Поларизација⁴³ у директном, пропусном смеру ($U > 0$) омогућује протицање електричне струје кроз спој, при чему је густина струје J дата једначином:

$$J = J_s (e^{\frac{U}{U_T}} - 1), \quad (8.33)$$

где је J_s константа која, као што једначина 8.32 показује, зависи од својстава материјала.

$$J_s = q_e n_i^2 \left(\frac{D_p}{L_p N_D} + \frac{D_n}{L_n N_A} \right). \quad (8.34)$$

Када је смер прикљученог напона супротан ($U < 0$), процес је у начелу истоветан као у случају позитивне поларизације, тако да једначина 8.33 важи и за негативно (инверзно) поларисан спој. Струја има смер супротан смеру струје позитивно (директно) поларисаног споја, али је, као што из једначине 8.33 следи, многоструко мања.

При инверзної поларизацији, густина струје споја достиже засићење при врло малим вредностима негативног напона и постаје једнака J_s . Величина J_s се назива **површинска густина инверзне струја засићења споја**.

8.4.2. ПРОБОЈ PN-СПОЈА

Струја кроз спој одређена је површином споја S и вредношћу напона поларизације, који одређује површинску густину струје кроз спој, J_s :

$$I_s = SJ = SJ_s (e^{\frac{U}{U_T}} - 1), \quad (8.35)$$

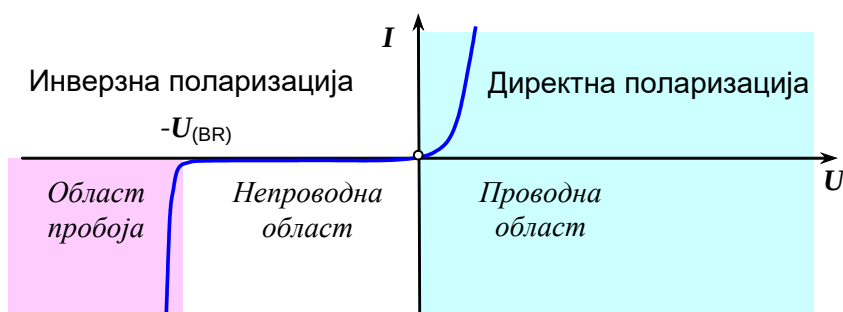
Теоријски, према једначини 8.35, са повећањем напона инверзне поларизације струја кроз спој тежи коначној вредности:

$$I_s = \lim_{U_{PN} \rightarrow -\infty} I_{PN}(U_{PN}) = SJ_s, \quad (8.36)$$

Међутим, при довољно великим вредностима инверзног напона настаје нагло повећање нагиба U - I карактеристике (слика 8.23). Ова појава се назива **пробој**⁴⁴.

⁴³ Под поларизацијом (*bias*) у општем смислу се у електроници подразумева додавање (суперпозиција) одређене вредности посматраној величини са циљем остваривања одговарајућих радних услова.

⁴⁴ Назив "пробој" (*breakdown*) се овде користи да означи прелазак из стања високе динамичке отпорности у стање знатно ниже динамичке отпорности (услед повећања величине инверзне струје) који, сам по себи, не представља разарање структуре PN-споја.

Слика 8.23. U - I карактеристика PN-споја

Настанак пробоја може бити заснован на лавинском или Ценеровом ефекту. Вредност напона пробоја $U_{(BR)}$ (*breakdown voltage*) зависи од карактеристика материјала који образује PN-спој, а може бити од неколико волти (Ценеров ефекат) до неколико стотина волти (лавински ефекат).

Пробој лавинским ефектом (*avalanche breakdown*) настаје услед кумулативног умножавања слободних носилаца под дејством јаког спољашњег електричног поља. При судару електрона са атомима полупроводника у кристалној решетки унутар прелазне области, долази до стварања парова електрон-шупљина као нових слободних носилаца наелектрисања (ударна јонизација). При довољно јаком електричном пољу новоослобођени електрони могу да добију довољно велику енергију да при судару ослободе нове парове електрон-шупљина. Инверзна струја кроз P-N спој у стању пробоја, I_{sB} , једнака је:

$$I_{sB} = M I_s, \quad (8.37)$$

где је I_s инверзна струја засићења споја, а M фактор умножавања који зависи од вредности напона инверзне поларизације, U_R :

$$M = \frac{1}{1 - \left(\frac{U_R}{U_{(BR)}} \right)^n}. \quad (8.38)$$

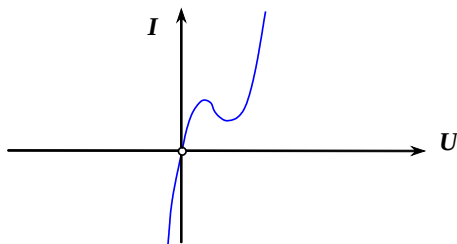
Зависно од врсте полупроводника и концентрације примеса, параметар n има вредност у границама 2 до 10 [19], [20].

Ценеров пробој (*Zener breakdown*) настаје при великој концентрацији примеса због чега у прелазној области постоји јако електрично поље. Пробој је проузрокован преласком електрона из валентног опсега у проводни опсег тунелским ефектом⁴⁵ под утицајем јаког електричног поља. Стварање нових

⁴⁵ Тунелским ефектом се назива појава проласка честица (носилаца наелектрисања) кроз потенцијалну препреку ако је ширина препрека довољно мала. Овакав пролазак испод врха потенцијалне препреке је немогућ по класичној механици, али по **таласној механици** вероватноћа овог догађаја није нула ако је дебљина потенцијалног брега (ширина препреке) мала. Талас који припада честици бива скоро потпуно рефлектован на првој падини потенцијалног брега, али један мали део ипак пролази кроз препреку. Тунеловањем електрони прелазе из проводног опсега у N-подручју и валентни опсег у P-подручју. Време пролаза је занемарљиво.

слободних носилаца наелектрисања доводи до повећања инверзне струје кроз спој. При великој концентрацији потребна јачина поља остварује се при напонима мањим од 6 V (Ценеров напон). При малим концентрацијама Ценеров напон је виши, па лавински ефект постаје доминантан.

Са повећањем концентрација примеса Ценеров напон се смањује. Код врло великих концентрација уместо нивоа који потичу од атома примеса акцептора и донора, у забрањеном енергијском опсегу налазе се уметнути опсези који се преклапају са проводним опсегом у N-типу, односно валентним опсегом у P-типу полупроводника. Ширина прелазне области је веома мала, реда величине 10 nm, што је мање од таласне дужине видљиве светлости. У таквим условима, према таласној теорији, постоји велика вероватноћа да електрон прође кроз потенцијалну препреку (тунеловање). Прелазак електрона између проводног опсега атома у N-области и валентног опсега атома у P-области, омогућује појаву пробоја при врло малом инверзном напону, при чему је измењен облик I - U карактеристике споја у пропусној области (слика 8.24).



Слика 8.24. Тунел-ефекат

Тунеловање, за разлику од дифузије носилаца наелектрисања обухвата само електроне и у свим практичним случајевима време пролаза је занемарљиво. Брзина одзива (трајање прелазног процеса при промени смера поларизације) је ограничена само паралелном капацитивношћу коју представља капацитивност споја и паразитне капацитивности веза.

8.4.3. ОТПОРНОСТ PN-СПОЈА

На основу једначине 8.35 се може, применом Омовог закона, одредити еквивалентна унутрашња отпорност поларисаног PN-споја у свакој тачки карактеристике:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{U_T}{I} \ln \left(1 + \frac{I}{I_S} \right). \quad (8.39)$$

При инверзној поларизацији, ван области пробоја ($U_{(BR)} < U < 0$) отпорност R је врло велика. При директној поларизацији ($U > U_T$), вредност R веома много зависи од вредности напона U односно струје I . Због тога ова величина не представља подесан параметар за описивање појава везаних за процесе који се одвијају у колима која садрже PN-спој. При прорачуну се тада користи инкрементална отпорност:

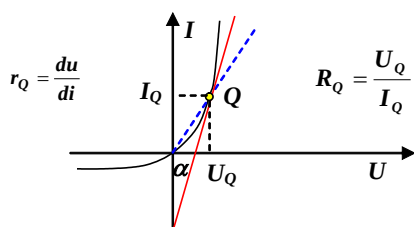
$$r_{\Delta} = \frac{\Delta U}{\Delta I}, \quad (8.40)$$

која одређује однос малих промена напона и струје унутар посматраног опсега. На пример, услед тунел-ефекта код PN-спојева са врло великом концентрацијом примеса, у једном делу U - I карактеристике диференцијална отпорност r_{Δ} је негативна (слика 8.24), што је веома значајно за неке области примене, иако је отпорност споја у целини, R , позитивна.

Динамичка отпорност, r , дефинисана је као први извод I - U карактеристике:

$$r = \frac{dU}{dI} = \frac{1}{\frac{dI}{dU}}, \quad (8.41)$$

Представља својство споја у одређеној радној тачки. Посматрано у U - I равни динамичка отпорност r_Q једнака је коефицијенту правца тангенте у одговарајућој тачки $Q(I_Q, U_Q)$ напонско-струјне карактеристике PN-споја (слика 8.25).



Слика 8.25. Статичка и динамичка отпорност PN-споја

На основу једначине 8.35 следи:

$$r = \frac{U_T}{I + I_s} \approx \frac{U_T}{I}; \quad I \gg I_s. \quad (8.42)$$

Посматрано на U - I карактеристици, пробој PN-споја представља прелазак из стања високе динамичке отпорности у стање знатно ниже динамичке отпорности.

8.4.4. КАПАЦИТИВНОСТ PN-СПОЈА

Прелазна област, на чијим наспрамним странама постоје некомпензована везана наелектрисања, може да се посматра као плочасти кондензатор чија је површина једнака површини S споја, а растојање између њих једнако ширини прелазног подручја w . Еквивалентна капацитивност C_T прелазне области⁴⁶ једнака је:

⁴⁶ Капацитивност прелаза (*transition capacitance*).

$$C_T = \epsilon \frac{S}{w}. \quad (8.43)$$

Капацитивност прелазне области зависи од диелектричних својстава материјала (ϵ) и концентрације атома примеса, али и од односа спољашњег напона U и напона потенцијалне препреке неполарисаног PN-споја U_0 .

Са повећањем напона инверзне поларизације вредност C_T се смањује. Типична вредност капацитивности C_T је од један до десет пикофарада, зависно од концентрације примеса, површине споја и напона поларизације. За инверзно поларисан спој са скоковитим преласком, на пример, важи [21]:

$$C_T = \frac{C_{T0}}{\sqrt{1 + \frac{U}{U_0}}}, \quad C_{T0} = S \sqrt{\frac{\epsilon q_e}{2} \frac{N_A N_D}{N_A + N_D}}. \quad (8.44)$$

Капацитивна својства PN-споја су повезана и са процесом дифузије вишка слободних носилаца при директној поларизацији. Дифузиона капацитивност, C_D , одражава процес успостављања равнотежне концентрације споредних носилаца наелектрисања која одговара одређеном напону поларизације. Промена напона dU доводи до промене концентрације односно количине мањинских носилаца наелектрисања, што значи и промену количине наелектрисања dQ у прелазној области (која се остварује њиховим нагомилавањем при повећању напона поларизације, односно рекомбинацијом при смањењу овог напона). Овај процес захтева неко време, па се може представити⁴⁷ као резултат деловања капацитивности C_D :

$$C_D = \frac{dQ}{dU}. \quad (8.45)$$

При инверзној поларизацији C_D је занемарљиво у поређењу са C_T . При директној поларизацији дифузиона капацитивност C_D већа је од капацитивности C_T прелазне области, и расте са повећањем напона поларизације, U , приближно по експоненцијалном закону:

$$C_D = C_{D0} e^{\frac{U}{U_T}}. \quad (8.46)$$

Дифузиона капацитивност, C_D , се испољава при директној поларизацији PN-споја, када је висина потенцијалне препреке смањена, чиме је олакшана дифузија већинских слободних носилаца наелектрисања из једне области у другу. Вредност ове величине је сразмерна вредности директне струје I_F :

$$C_D = \frac{\tau_F}{U_T}, \quad (8.47)$$

⁴⁷ Појава је слична пуњењу и пражњењу кондензатора, али се дифузиона капацитивност (*diffusion capacitance*) разликује од капацитивности прелазне области, која је по својој природи истоветна као и процес нагомилавања наелектрисања супротног знака на наспрамним облогама кондензатора.

где је τ средња вредност времена живота споредних носилаца наелектрисања⁴⁸ до њихове рекомбинације, . Типичне вредности су неколико нанофарада при струји од неколико милиампера.

При поларизацији у проводном смеру, за мале промене напона U_{AK} може се сматрати да диода представља паралелну везу капацитивности PN-споја и динамичке отпорности r_T . С обзиром да у таквим условима рада преовлађује дифузиона капацитивност C_D временска константа T_F не зависи од вредности струје кроз диоду:

$$T_F = C_D r_T \quad (8.48)$$

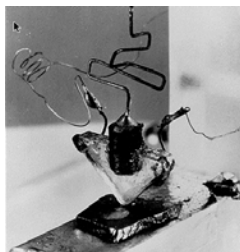
При инверзној поларизацији τ је врло мало, па је C_D занемарљиво у поређењу са C_T . При директној поларизацији капацитивност C_T је занемарљиво мала у поређењу са капацитивношћу C_D коју одређује процес дифузије.

8.5. ФИЗИЧКИ МОДЕЛ БИПОЛАРНОГ ТРАНЗИСТОРА

Биполарни транзистор је кристал полупроводника у коме су садржана најмање два PN-споја, а на коме су израђена најмање три прикључка за повезивање са другим електронским елементима. У процесу провођења суделују носиоци наелектрисања оба поларитета (електрони и шупљине).

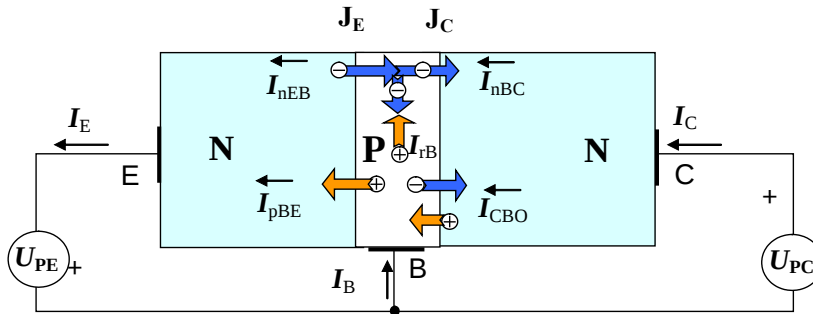
Принцип рада биполарних транзистора открили су Бардин и Бретен при истраживању могућности мерења отпорности танких слојева полупроводника. Први транзистори произведени су у Беловим лабораторијама (*Bell Telephone Laboratories Inc.*) у Сједињеним америчким државама.

Откриће транзистора је иницирало минијатуризацију електронских компоненета и склопова и допринело ширењу модулларне концепције при пројектовању и изради електронских уређаја. Производња транзистора у САД је нарасла од незнатног износа 1952. године до 29 милиона комада у 1957. години. Микропроцесор *Pentium 4*, који је пласиран на тржиште у последњој години другог миленијума, садржи 42 000 000 транзистора.



Под транзистором се у ужем смислу подразумева полупроводнички елемент у којем постоје два PN-споја са три прикључка за повезивање. Посредством прикључка за средишњу област (управљачка електрода, база) остварује се контролисање процеса провођења струје између друга два краја (емитор и колектор). Појачавачко дејство транзистора се исказује када је емиторски спој поларисан у директном, а колекторски спој у инверзном смеру (слика 8.26).

⁴⁸ "Убачених" дифузијом из области супротног типа.



Слика 8.26. Распредела струја у транзистору NPN типа

Према назначеним физичким смеровима, емиторска струја I_E једнака је збиру струје базе I_B и струје колектора I_C :

$$I_E = I_C + I_B. \quad (8.49)$$

Струју емитора I_E образују две компоненте:

$$I_E = I_{nEB} + I_{pBE}. \quad (8.50)$$

I_{nEB} је струја која потиче од електрона који из емитора прелазе у базу, I_{pBE} је струја која потиче од шупљина које из базе прелазе у емитер. Индекс **n** (односно **p**) означава електроне (односно шупљине), а редослед симбола којим су означена поједина подручја транзистора, означава смер кретања слободних носилаца наелектрисања. Референтни смер струје је смер кретања позитивног наелектрисања. Струју I_{nEB} , на пример, образују електрони који из емитора прелазе у базу. Њен физички смер је од базе према емитору, као што је то назначено на слици 8.26.

Струју базе I_B образују три компоненте:

- ♦ струја шупљина које из базе прелазе у емитер, I_{pBE} ;
- ♦ струја рекомбинације шупљина у бази са електронима приспелим из емитора, I_{rB} ; и
- ♦ инверзна струја засићења колекторског споја J_C при отвореном емитору, I_{CBO} .

$$I_B = I_{pBE} + I_{rB} - I_{CBO}. \quad (8.51)$$

Електрони који су из емитора прошли кроз базу, и као мањински носиоци наелектрисања прошли кроз инверзно поларисан спој база-колектор, образују компоненту I_{nBC} струје колектора I_C . За $U_{CB} \gg U_T$, интензитет ове струје веома мало зависи од вредности напона колектор-емитер, јер при инверзној поларизацији јачина поља у прелазној области споја практично не утиче на интензитет струје кроз спој.

Кроз инверзно поларисан спој колектор-база, J_C , пролазе мањински носиоци наелектрисања у области базе односно колектора, образујући инверзну струју засићења колекторског споја I_{CBO} . Дакле, укупну струју кроз

спој J_C транзистора образују мањински носиоци наелектрисања који представљају:

- ♦ слободне носиоце наелектрисања из емитора који су, као већински носиоци у области емитора, кроз директно поларисан спој емитор-база доспели у базу дифузијом, а који се нису рекомбиновали у бази,
- ♦ мањинске носиоце наелектрисања у областима базе и колектора (у NPN транзистору то су електрони из базе и шупљине из колектора).

$$I_C = I_{nBC} + I_{CBO} . \quad (8.52)$$

Струја базе I_B је утолико мања уколико је струја колектора I_C по вредности ближа струји емитора I_E . Количник струје I_{nEB} , од које се образује колекторска струја I_{nBC} , и укупне емиторске струје I_E представља **ефикасност емитора** γ :

$$\gamma = \frac{I_{nEB}}{I_E} = \frac{I_{nEB}}{I_{nEB} + I_{pBE}} . \quad (8.53)$$

Да би ефикасност емитора γ била што већа (ближа јединици), потребно је да компонента емиторске струје, I_{pBE} , која потиче од кретања шупљина из базе у емитор, буде што мања у поређењу са струјом I_{nEB} односно да концентрација примеса у емитору буде много већа него у бази.

Ефекат рекомбинације електрона у бази приказује се сачиниоцем преноса⁴⁹:

$$\beta^* = \frac{I_{nBC}}{I_{nEB}} . \quad (8.54)$$

Да би вредност β^* била што већа (блиска јединици) потребно је да време боравка слободних носилаца наелектрисања у бази (на њиховом путу од емиторског до колекторског споја) буде што краће, како би се смањила вероватноћа рекомбинације. Другим речима, потребно је да дебљина w_B базе буде што је могуће мања.

На основу претходних једначина следи:

$$I_{nBC} = \beta^* I_{nEB} = \beta^* \gamma I_E , \quad (8.55)$$

па се одговарајућом сменом у 8.50 добија основна једначина која описује однос струја у биполарном транзистору:

$$I_C = \alpha I_E + I_{CBO} . \quad (8.56)$$

Сачинилац α у овом изразу, који показује однос струје колектора и струје емитора када се занемари инверзна струја засићења колекторског споја I_{CBO} , назива се **појачање струје од емитора до колектора**⁵⁰:

⁴⁹ У литератури се користе и називи "фактор преноса" и "транспортни фактор".

⁵⁰ Статички коефицијент појачања струје (*large-signal current gain*) транзистора.

$$\alpha = \frac{I_C - I_{CBO}}{I_E}. \quad (8.57)$$

Вредност овог показатеља је одређена једначином:

$$\alpha = \frac{I_{nBC}}{I_E} = \frac{I_{nEB}}{I_E} \frac{I_{nBC}}{I_{nEB}} = \gamma \beta^*. \quad (8.58)$$

У уобичајеним условима показатељ (фактор) појачања струје α приближно је једнак фактору преноса β^* [22]. Код транзистора са површинским спојем вредност фактора појачања α је увек мања од јединице, а обично је у опсегу од 0,95 до 0,995.

Ако се струја колектора I_C прикаже у зависности од струје базе I_B добија се једначина:

$$I_C = \beta I_B + \frac{\beta}{\alpha} I_{CBO}. \quad (8.59)$$

Параметри β и α су повезани једначином:

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}, \quad (8.60)$$

односно:

$$\alpha = \frac{\beta}{1 + \beta}. \quad (8.61)$$

Када је емиторски спој транзистора поларисан у проводном, а колекторски у непроводном смеру, струја колектора I_C је линеарна функција струје базе I_B :

$$I_C = \beta I_B + (\beta + 1) I_{CBO}, \quad (8.62)$$

где је I_{CBO} инверзна струја засићења колекторског споја J_C , а β представља **појачање струје од базе до колектора транзистора**. Ова величина, која показује однос колекторске и емиторске струје када се занемари инверзна струја засићења колекторског споја I_{CBO} :

$$\beta = \frac{I_C - I_{CBO}}{I_B + I_{CBO}}, \quad (8.63)$$

представља најзначајнију карактеристику транзистора као електронског елемента. Уобичајене вредности појачања струје β су у опсегу од 20 до 500.

Струја емитора I_E једнака је:

$$I_E = (\beta + 1)(I_B + I_{CBO}). \quad (8.64)$$

Израз за струју колектора може се представити у облику:

$$I_C = \beta I_B + I_{CEO}, \quad (8.65)$$

где је I_{CEO} струја кроз транзистор када је база отворена⁵¹:

$$I_{CEO} = (\beta + 1)I_{CBO}. \quad (8.66)$$

Зависно од степена апроксимације појава у кристалу, изабраних парова улазних и излазних величина и опсега њихових вредности, могуће је дефинисати различите моделе транзистора. Транзистор у споју са заједничком базом, на пример, описан је математичким моделом који се у општем случају може представити једначином:

$$f(I_E, I_C, U_{EB}, U_{CB}) = 0. \quad (8.67)$$

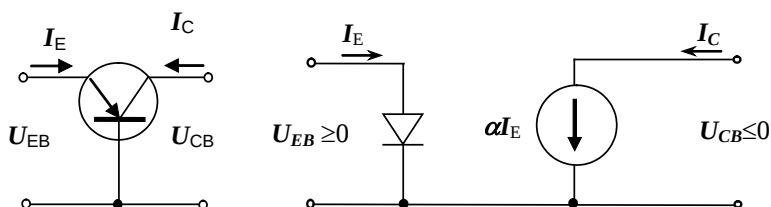
На основу претходног разматрања транзистор се може посматрати као линеарни појачавач струје:

$$I_C = \alpha I_E + I_{CBO}. \quad (8.68)$$

Међутим, начином свог рада транзистор представља транскондуктансни појачавач. Када је емиторски спој поларисан у пропусном, а колекторски у непропусном смеру, струја колектора I_C је одређена напонем између емитора и базе U_{EB} [23]:

$$I_C = I_S \left(e^{\frac{U_{EB}}{U_T}} - 1 \right). \quad (8.69)$$

где је I_S струја засићења транзистора. Еквивалентно коло које одговара моделу 8.67 приказано је на слици 8.27.



Слика 8.27. Модел NPN транзистора са заједничком базом

Транзистор се, као елемент са два приступа, понаша билатерално: промене које се дешавају са његове излазне стране у знатној мери утичу на улазне величине⁵².

При повећању напона инверзне поларизације колекторског споја шири се прелазна област у којој нису компензована наелектрисања донорских, односно акцепторских јона (област просторног наелектрисања). С обзиром да

⁵¹ Индекси "CE" означавају да струја тече кроз колектор и емитор, а индекс "O" означава да је трећа електрода (база) отворена (тј. $I_B=0$).

⁵² Овај ефекат је мање изражен код електронских цевчи.

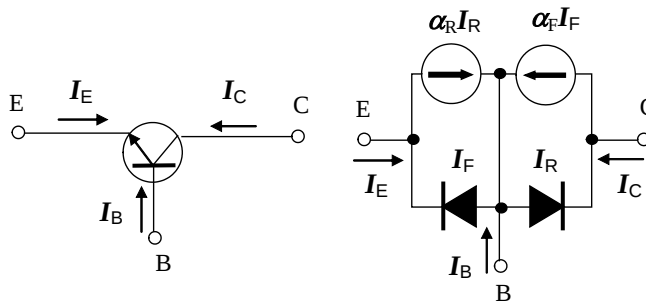
је концентрација примеса у бази значајно мања него у колектору, ширење прелазне области је знатно више изражено у подручју базе него у подручју колектора. Оно доводи до смањења ефективне ширине базе w_B и смањења струје рекомбинације у бази, I_{rB} , односно смањења струје базе I_B и при сталној вредности напона база-емитор.

Услед смањења ефективне ширине базе w_B долази и до повећања градијента концентрације мањинских носилаца наелектрисања у области базе, што доводи до повећања емиторске струје I_E и при сталној вредности напона база-емитор. Утицај напона колектора на вредност улазне струје, посредством модулације ширине базе (*base-width modulation*), назива се **реакција колектора** или Ерлијев (*Early*) ефекат. Повратно дејство напона на колектору се моделује еквивалентном отпорношћу, R_{EY} , која делује паралелно струјном генератору и излазном колу.

Потпунији модел, који описује транзистор независно од стања (области) у којем се налази представља систем једначина [24]:

$$\begin{aligned} I_C &= -I_R + \alpha_F I_F, \\ I_E &= -I_F + \alpha_R I_R, \\ I_F &= I_{ES} \left(e^{\frac{U_{EB}}{U_T}} - 1 \right), \\ I_R &= I_{CS} \left(e^{\frac{U_{CB}}{U_T}} - 1 \right), \\ \alpha_F I_{ES} &= \alpha_R I_{CS}, \end{aligned} \quad (8.70)$$

у којима α_F и α_R представљају сачиниоце појачања струје од емитора до колектора, односно од колектора до емитора. Графички приказ модела који одговара овим једначинама, који је у литератури познат под називом *Ebers-Moll* - ов модел транзистора, дат је на слици 8.28.



Слика 8.28. Еберс-Молов модел NPN-транзистора

Преношење наелектрисања кроз емиторски и колекторски спој остварује се процесом дифузије. Величине I_{CBO} и β (односно α) зависе од својстава материјала (дифузионе константе и дифузионе дужине електрона и шупљина, концентрација слободних носилаца наелектрисања) као и

конструкционих параметара транзистора (ширина слоја области базе). При сталном напону колектор-база, под претпоставком да се рекомбинација парова електрон-шупљина у подручју базе може занемарити, зависност вредности појачања струје од емитора до колектора од технолошких параметара може се представити изразом [25]:

$$\alpha = \frac{1}{1 + \frac{1}{2} \left(\frac{w}{L_n} \right)^2 + \frac{D_p N_A w}{D_n N_D L_p}} \quad (8.71)$$

Прецизнијим моделовањем долази се до израза [26]:

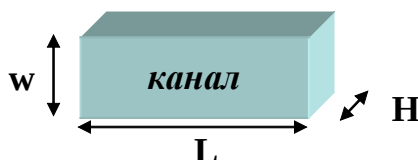
$$\alpha = \frac{\operatorname{sch} \frac{w}{L_{pB}}}{1 + \frac{D_n n_{E0} L_{pB}}{D_p p_{B0} L_{nE}} \operatorname{th} \frac{w}{L_{pB}}} \quad (8.72)$$

у којем **th** и **sch** означавају хиперболичке функције (хиперболички тангенс и секанс).

8.6. ФИЗИЧКИ МОДЕЛ ТРАНЗИСТОРА СА ЕФЕКТОМ ПОЉА

Процес преношења наелектрисања између излазних прикључака транзистора са ефектом поља контролише се помоћу електричног поља. Променом вредности напона који се доводи на управљачку электроду (гејт) мења се електрична проводност канала који повезује прикључке за дрејн и сорс. Ако се, ради једноставности, предпостави геометријски правилан облик канала (слика 8.29) промена његове отпорности се може остварити променом једне од димензија (на пример, ширине, w), или променом специфичне електричне отпорности ρ , што се постиже променом концентрације слободних носилаца наелектрисања у области канала:

$$R = \rho \frac{L}{S} = \frac{\rho}{w} \frac{L}{H} \quad (8.73)$$



Слика 8.29. Канал

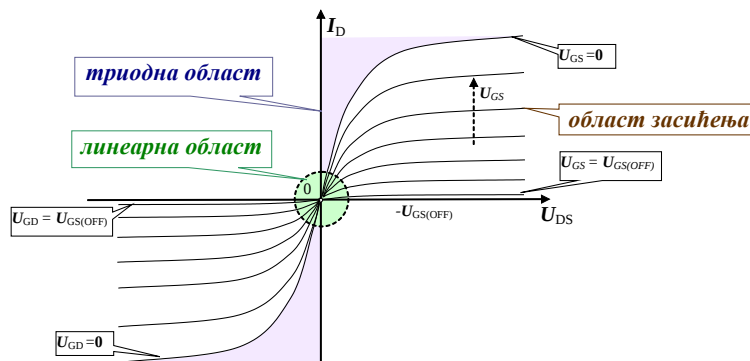
Управљачка електрода може бити изолована (слојем оксида, на пример) од области која представља канал (транзистори са изолованим

гејтом), или повезана са каналом преко подручја супротног типа од типа полупроводника у каналу (транзистори са PN-спојем, спојни транзистори).

8.6.1. СПОЈНИ ТРАНЗИСТОРИ

Зависност струје кроз канал, I_D , од вредности напона U_{DS} је нелинеарна (слика 8.30). Разликују се три стања односно, три области излазне карактеристике.

- У околини координатног почетка струја I_D је сразмерна напону U_{DS} : **линеарна област**.
- При довољно великој вредности напона U_{DS} може се сматрати да струја I_D не зависи од напона U_{DS} : **област засићења**.
- Између ове две области се налази подручје у којем функција којом се описује зависност $I_D(U_{DS}, U_{GS})$ има облик сличан облику зависности струје триоде од напона анода-катода и решетка-катода: **триодна област**.



Слика 8.30. Карактеристика излаза спојног транзистора

8.6.1.1. Линеарна област

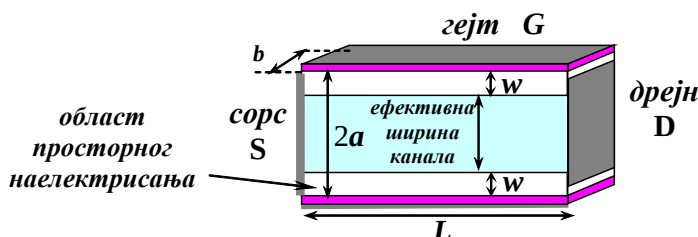
При малим вредностима напона на крајевима канала ($U_{DS} \approx 0$) може се сматрати да се ширина прелазне области споја гејт-канал не мења при променама напона инверзне поларизације и да има исту вредност дуж целог канала ($w(x) = \text{const}$).

Ако се претпостави:

- да је концентрација примеса у каналу свуда једнака;
- да је у одсуству поларизације ширина w прелазне области у каналу врло мала у односу на висину канала $2a$;
- да су ефекти граничних подручја крајева канала уз сорс и дрејн занемарљиви,

изглед канала при малим вредностима напона између дрејна и сорса може да се представи сликом 8.31. На основу овог поједностављеног модела се може

одредити зависност струје I_D , која протиче кроз канал, од вредности напона U_{DS} на крајевима канала, и напона U_{GS} који постоји између гејта и сорса (који се обично користи као заједнички прикључак).



Слика 8.31. Поједностављен приказ геометрије канала

Када је напон гејта U_{GS} једнак нули, а напон између дрејна и сорса мали, канал се понаша као проводно тело дефинисаног облика, сталних димензија и одређене специфичне проводности. Струја I_D сразмерна је напону U_{DS} :

$$I_D = G_0 U_{DS}; U_{GS} = 0, \quad (8.74)$$

где је G_0 проводност канала, која је (према 8.71) одређена изразом:

$$G_0 = \frac{1}{R_0} = \sigma \frac{2ab}{L}, \quad (8.75)$$

у којем $2a$ означава висину, b ширину и L дужину оног дела кристала који представља канал, а σ специфичну електричну проводност материјала од којег је канал изграђен.

Концентрација примеса у области гејта је већа од концентрације примеса у области канала. Због тога ширина w прелазне области PN-споја зависи од концентрације N_k примеса у подручју канала и разлике потенцијала P- и N-области. Ако је пад напона дуж канала занемарљиво мали, на основу формуле 8.25. долази се до израза:

$$w = \sqrt{\frac{2\epsilon U_{GS}}{q_e N_k}}, \quad (8.76)$$

где је $N_k = N_D$ за канал N-типа, односно, $N_k = N_A$ за канал P-типа.

При повећању величине напона инверзне⁵³ поларизације споја гејт-канал, област просторног наелектрисања се шири. Због мање концентрације примеса у области канала у односу на област гејта, ширење прелазне области је скоро искључиво у каналу, услед чега се проводност између дрејна и сорса смањује. Напон при коме би ширина прелазне области w постала једнака половини висине канала је **напон прекида**⁵⁴:

⁵³ Код N-каналног фета, $U_{GS} < 0$, код P-каналног фета, $U_{GS} > 0$.

⁵⁴ У литератури и каталозима произвођача користе се и следећи називи и ознаке: напон додира (прелазна подручја PN-споја се додирују, канал је прекинут), напон уштинућа канала (*gate pinch-off voltage* V_P , *Abschnürspannung*, *напряжение отсечки*) или напон прага вођења (*gate-source cutoff voltage*). При специфицирању, наводи се вредност напона U_{DS} и струје цурења закоченог фета $I_{DS(off)}$.

$$|U_{GS(OFF)}| = |U_{GS}|_{w=a} = \frac{q_e N_k a^2}{2\epsilon}. \quad (8.77)$$

Када је PN-спој, који образују гејт и канал, инверзно поларисан напонам чија је величина мања од величине напона прекида, $|U_{GS}| < |U_{GS(OFF)}|$, а напон између спољашњих прикључака канала мали, струја I_D и даље је сразмерна вредности напона U_{DS} (линеарна област рада – 8.72). Проводност G канала у овим условима је мања од вредности G_0 , сразмерно односу стварне (ефективне) и основне висине канала (слика 8.31):

$$\frac{G}{G_0} = \frac{a-w}{a}. \quad (8.78)$$

На основу једначина 8.72, 8.73 и 8.76 се може одредити израз који описује зависност проводности G канала од напона између гејта и сорса, U_{GS} :

$$G = G_0 \left(1 - \sqrt{\frac{U_{GS}}{U_{GS(OFF)}}} \right), \quad (8.79)$$

односно израз за отпорност између дрејна и сорса:

$$R_{DS} = \frac{R_{DS0}}{1 - \sqrt{\frac{U_{GS}}{U_{GS(OFF)}}}}, \quad R_{DS0} = \frac{1}{G_0}. \quad (8.80)$$

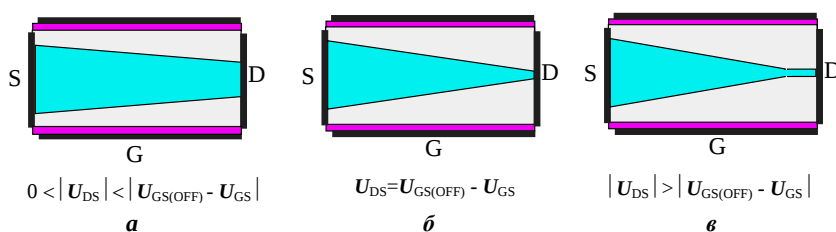
8.6.1.2. Триодна област

Анализа стања транзистора при већим вредностима напона између дрејна и сорса мора да узме у обзир утицај који пад потенцијала дуж канала има на геометрију области просторног наелектрисања. Деловање струје инверзно поларисаног споја гејт-канал може да се занемари, али услед протицања струје дрејна I_D потенцијал тачака дуж канала, посматран у односу на гејт, није исти, што значи да висина потенцијалне препреке, а тиме и ширина w прелазне области просторног наелектрисања, нема свуда, дуж канала, исту вредност.

Транзистор се налази у стању које одговара триодној области карактеристике ако су испуњени услови:

$$0 < |U_{DS}| < |U_{GS(OFF)} - U_{GS}|; |U_{GS}| < |U_{GS(OFF)}|. \quad (8.81)$$

У овом стању ширина прелазне области се повећава од дрејна ка сорсу, па је канал код дрејна најужи (слика 8.32.а). Проводност канала зависи од вредности оба напона, U_{DS} и U_{GS} ,

Слика 8.32. Изглед канала у зависности од величине напона U_{DS}

Уколико је напон између дрејна и гејта мањи од напона прекида, израз за ширину прелазне области (8.74) има облик:

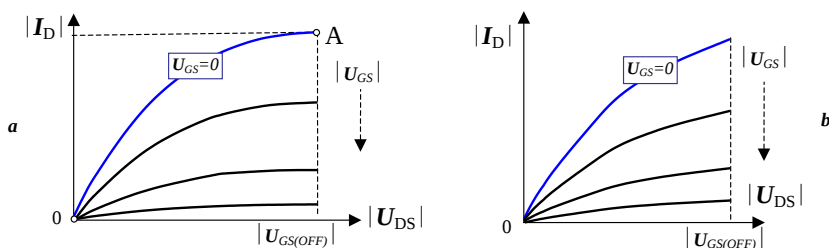
$$w(x) = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{qN_k} (U_{GS} - U(x))}, \quad (8.82)$$

где је x растојање од сорса, а $U(x)$ пад напона дуж канала:

$$0 \leq U(x) \leq U_{DS}; 0 \leq x \leq L. \quad (8.83)$$

Ефективна ширина (висина) канала на месту x је једнака:

$$2a - 2w(x) = 2a \left(1 - \sqrt{\frac{U_{GS} - U(x)}{U_{GS(OFF)}}} \right). \quad (8.84)$$

Слика 8.33. Зависност струје кроз канал од напона на његовим крајевима за $|U_{DS}| < |U_{GS(OFF)}|$

Зависност вредности струје I_D од напона U_{DS} и U_{GS} (слика 8.33) може се представити једначином:

$$I_D = G_0 U_{DS} (1 - \Delta), \quad (8.85)$$

у којој Δ представља поправку једначине 8.72 – релативно одступање карактеристике $I_D(U_{DS})$ од линеарне зависности која постоји при $U_{DS} \approx 0$ и $U_{GS} = 0$. Ово одступање је утолико веће уколико су напони U_{DS} и U_{GS} већи. Ако се струја инверзно поларисаног споја гејт-канал може да занемари, струја I_D је иста, посматрана на било ком пресеку канала. Под претпоставком да је специфична проводност σ материјала од којег је канал изграђен једнака целом дужином канала, важи једнакост:

$$I_D = S(x)J_D(x) = S(x) \cdot \sigma K(x) = \sigma 2ab \left(1 - \sqrt{\frac{U_{GS} - U(x)}{U_{GS(OFF)}}} \right) \frac{dU(x)}{dx}, \quad (8.86)$$

где су $J_D(x)$ и $S(x)$ густина струје односно површина попречног пресека канала на месту x . Вредност струје I_D представља решење интегралне једначине:

$$I_D \int_0^L dx = \sigma 2ab \int_0^{U_{DS}} \left(1 - \sqrt{\frac{U_{GS} - U}{U_{GS(OFF)}}} \right) dU. \quad (8.87)$$

На основу једначина 8.83 и 8.85 се добија:

$$\Delta = \frac{1}{U_{DS}} \int_0^{U_{DS}} \left(\frac{U_{GS} - U}{U_{GS(OFF)}} \right)^{\frac{1}{2}} dU = \frac{2}{3} \frac{U_{GS(OFF)}}{U_{DS}} \left[\left(\frac{U_{GS} - U_{DS}}{U_{GS(OFF)}} \right)^{\frac{3}{2}} - \left(\frac{U_{GS}}{U_{GS(OFF)}} \right)^{\frac{3}{2}} \right]. \quad (8.88)$$

Формула 8.86 показује да величина Δ зависи, осим од спољашњих напона U_{DS} и U_{GS} , само од напона прага $U_{GS(OFF)}$, који представља конструктивни параметар транзистора (формула 8.75).

Када је напон U_{GS} једнак нули, струја I_D једнака је:

$$I_D = G_0 U_{DS} \left[1 - \frac{2}{3} \left(\frac{U_{DS}}{-U_{GS(OFF)}} \right)^{\frac{1}{2}} \right]; U_{GS} = 0. \quad (8.89)$$

Повећање напона U_{DS} , при сталном напону U_{GS} , доводи до тога да, услед пада напона дуж канала, инверзни напон PN-споја расте од сорса према дрејну, због чега се отпор канала повећава, па струја I_D спорије расте од напона на дрејну. Када, услед повећања напона U_{DS} , напон између дрејна и канала постане једнак напону прекида, карактеристика $I_D(U_{DS})$ улази у засићење (тачка А на слици 8.33.а). Из услова који важи за максимум функције :

$$\left. \frac{\partial I_D}{\partial U_{DS}} \right|_{U_{GS}=\text{const}} = 0, \quad (8.90)$$

примењеног на једначину 8.87, добија се да при $U_{GS}=0$ карактеристика $I_D(U_{DS})$ достиже максимум када је $U_{DS} = -U_{GS(OFF)}$. Вредност струје засићења у тим условима једнака је:

$$I_{DSS} = -\frac{G_0 U_{GS(OFF)}}{3}. \quad (8.91)$$

У триодној области зависност вредности g_{ds} од вредности напона U_{GS} и U_{DS} може се моделовати функцијом [27]:

$$g_{ds} = G_0 \left[1 - \left(\frac{U_{GS} - U_{DS}}{U_{GS(OFF)}} \right)^{\frac{1}{2}} \right]. \quad (8.92)$$

За мале вредности напона U_{DS} , динамичка проводност фета g_{ds} једнака је статичкој проводности G за коју важи једначина 8.77.

8.6.1.3. Област засићења

Уколико разлика потенцијала између дрејна и гејта, услед повећања напона U_{DS} , постане једнака или већа од вредности напона прекида, наспрамна подручја прелазне области, у којој нема слободних (покретљивих) носилаца наелектрисања, приближе се на веома мало растојање, али се канал не прекида (слика 8.32.б). Отпорност тог најужег дела канала је врло велика, па се при даљем повећању напона U_{DS} почетак овог “уског грла” (*neck*) само мало помера према сорсу (слика 8.32.в), при чему не долази до веће промене отпорности канала, тако да струја кроз канал практично не зависи од напона на његовим крајевима, већ само од вредности напона U_{GS} .

Транзистор се налази у стању које одговара области засићења ако су испуњени услови:

$$|U_{DS}| > |U_{GS(OFF)} - U_{GS}|; |U_{GS}| < |U_{GS(OFF)}|. \quad (8.93)$$

Напонско-струјна карактеристика фета на граници засићења се приближно описује једначином [28], [29]:

$$I_{Dsat} = I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_{GS(OFF)}} \right)^2, \quad (8.94)$$

у којој I_{Dsat} представља струју кроз канал у условима засићења. Струја I_{DSS} је струја засићења (*saturation drain current*) када је напон U_{GS} једнак нули⁵⁵:

$$I_{DSS} = I_{Dsat} |_{U_{GS}=0} = I_D |_{U_{GS}=0; U_{DS}=-U_{GS(OFF)}}. \quad (8.95)$$

Граница триодне области и области засићења одређена је условом:

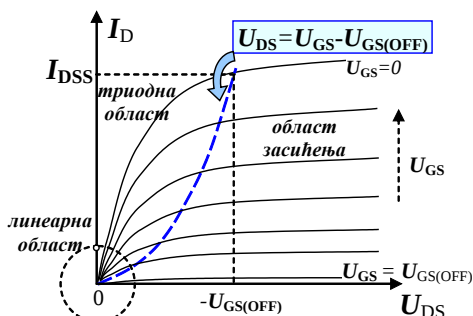
$$U_{GD} = U_{GS(OFF)}, \quad (8.96)$$

на основу којег, према 8.92, следи формула:

$$I_{Dsat} = I_{DSS} \left(\frac{U_{DSsat}}{U_{GS(OFF)}} \right)^2, \quad (8.97)$$

⁵⁵ Ознаке у индексу симболизују дефиницију величине: I_{DSS} је интензитет струје кроз канал у стању засићења, при кратком споју између гејта и сорса (*Drain to Source current with the gate Shorted to source*).

која представља параболу приказану испрекиданом линијом на дијаграму који приказује излазну карактеристику N-каналног транзистора (слика 8.34).



Слика 8.34. Излазна карактеристика транзистора са ефектом поља

Вредност струје на граници области засићења одређена је формулом 8.92. Повећањем напона преко границе засићења, смањује се дужина “слободног” дела канала, а тиме и отпорност између дрејна и сорса, што доводи до сразмерно малог повећања струје I_{Dsat} . Овај ефекат узима се у обзир, слично као код биполарних транзистора, увођењем напона U_{EY} којим се моделује промена ефективне дужине канала са повећањем напона U_{DS} :

$$I_{Dsat} \approx I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_{GS(0FF)}} \right)^2 \left(1 - \frac{U_{DS}}{U_{EY}} \right). \quad (8.98)$$

Повећање струје I_{Dsat} са повећањем напона U_{DS} је утолико више изражено уколико је почетна дужина канала L мања. Код фета са веома кратким каналом ($L \approx 2a$) засићење као да не постоји (слика 8.33.б).

8.6.2. MOS-ТРАНЗИСТОРИ

8.6.2.1. Транзистори са уграђеним каналом

Када MOS-транзистор није у засићењу, струја кроз канал зависи од оба напона, U_{DS} и U_{GS} . Функција $I_D(U_{GS}, U_{DS})$ представља се квадратном једначином [30], која се за транзистор са уграђеним каналом може приказати у облику:

$$I_D = I_{DSS} \frac{U_{DS}}{U_{GS(0FF)}} \left[2 \left(\frac{U_{GS}}{U_{GS(0FF)}} - 1 \right) - \frac{U_{DS}}{U_{GS(0FF)}} \right]. \quad (8.99)$$

Вредност струје I_{DSS} зависи од својстава полупроводничког материјала (покретљивости слободних носилаца наелектрисања и диелектричне константе оксида) и геометрије транзистора. Обично се одређује експерименталним путем [31]. Напон прекида $U_{GS(0FF)}$ зависи и од концентрације примеса у делу кристала који представља канал. Једначина 8.97 важи када су испуњени услови:

$$\begin{aligned} U_{DS} &\leq U_{GS} - U_{GS(OFF)} \\ U_{GS} - U_{GS(OFF)} &\geq 0 \end{aligned} \quad (8.100)$$

Први услов означава да ни у једној тачки канала не постоји уштинауће као последица деловања напона U_{DS} , а други услов искључује прекид због деловања напона U_{GS} . За $U_{DS} = U_{GS} - U_{GS(OFF)}$ извод $\partial I_D / \partial U_D$ је једнак нули (као и код спојних транзистора са ефектом поља), што значи да функција $I_D(U_{DS})|_{U_{GS} = \text{const}}$ достиже максимум. При даљем повећању напона U_{DS} транзистор доспева у област засићења у којој израз 8.97 не важи.

На граници засићења ($U_{DS} = U_{GS} - U_{GS(OFF)}$) једначина 8.97 се своди на исти облик као и код спојних транзистора са ефектом поља (8.94):

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_{GS(OFF)}} \right)^2 \quad (8.101)$$

Овај израз се примењује када су испуњени услови:

$$\begin{aligned} U_{DS} &\geq U_{GS} - U_{GS(OFF)}, \\ U_{GS} - U_{GS(OFF)} &\geq 0. \end{aligned} \quad (8.102)$$

На основу 8.99 следи да величина I_{DSS} и код MOS-транзистора са уграђеним каналом представља струју засићења дрејна при кратком споју гејта и сорса ($U_{GS}=0$).

8.6.2.2. Транзистори са индукованим каналом

Зависност струје I_D од напона описује се једначинама аналогним 8.97 и 8.99, са том разликом што се напон прекида замењује напоном прага. У триодној области транзистор са индукованим каналом се описује математичким моделом:

$$I_D = I_{DSS} \frac{U_{DS}}{U_{GS(TO)}} \left[\frac{U_{DS}}{U_{GS(TO)}} - 2 \left(\frac{U_{GS}}{U_{GS(TO)}} - 1 \right) \right], \quad (8.103)$$

$$\begin{aligned} U_{DS} &\leq U_{GS} - U_{GS(TO)}, \\ U_{GS} - U_{GS(TO)} &\geq 0. \end{aligned}$$

У области засићења важи:

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_{GS(TO)}} \right)^2, \quad (8.104)$$

$$\begin{aligned} U_{DS} &\geq U_{GS} - U_{GS(TO)}, \\ U_{GS} - U_{GS(TO)} &\geq 0. \end{aligned}$$

8.7. ЛИТЕРАТУРА

- 1 Terms in physic and chemestry used in electronics. Terms and definitions, IEC 50 (111)-1982, Pojmovi iz oblasti fizike i hemije koji se koriste u elektrotehnici, JUS N.A0.111, 1990, 01-25.
- 2 S. Arsenijević, *Neorganska hemija*, Naučna knjiga, 1962, стр. 12.
- 3 V.N.Kondratjev, *Struktura atoma i molekula*, Naučna knjiga, 1966, стр. 24.
- 4 Реф. 1, 01-51.
- 5 Terms and definitions for semiconductor devices, general, IEC 470-0, 1969, Poluprovodničke komponente, Opšti deo, Termini i definicije, JUS N.R1.320, 1979, 2.1.1.
- 6 Electromagnetism, Terms and definitions, IEC 50(121)-1978, Электромагнетизм, JYC H.A0.121, 1990, 02-04
- 7 J. Millman, C.Halkias, *Integrated electronics: analog and digital circuits and systems*, McGraw-Hill, 1972, стр. 751.
- 8 Реф. 7, стр. 29.
- 9 B. Raković, *Elektronika I*, Naučna knjiga, 1963, стр. 111.
- 10 V. Cvekic, *Elektronika I*, Poluprovodnički elementi, Naučna knjiga, 1978, стр. 215.
- 11 Реф. 9, стр. 105.
- 12 Реф. 7, стр. 30.
- 13 S. Marjanović, *Diskretna i integrisana analogna kola*, Naučna knjiga, 1984, стр. 155.
- 14 V. Litovski, S. Lazović, *Osnovi elektronike*, 1996, стр. 128.
- 15 Реф. 6, 2.1.14
- 16 Реф. 7, стр. 45.
- 17 Реф. 10, стр. 34.
- 18 Реф. 9, стр. 113.
- 19 J. Millman, H. Taub, *Pulse digital and switching waveforms*, Mc Graw-Hill, 1965, стр. 198
- 20 S. Tešić, D. Vasiljević, *Osnovi elektronike*, Građevinska knjiga, 2000, стр 15.
- 21 Реф. 7, стр.13.
- 22 Реф. 9, стр.138.
- 23 P. Horowitz W. Hill, *The Art of electronics*, Cambridge University Press, стр. 80.
- 24 R. Muller, T. Kamins, *Device Electronics For Integrated Circuits*, John Wiley&Sons, 1986, стр. 294.
- 25 Реф. 13, стр. 70.
- 26 Реф. 14, стр. 106.
- 27 Реф. 10, стр. 163.
- 28 J. Watson, *An Introduction to Field Effect Transistors*, Siliconix, 1970, стр. 18.
- 29 Реф. 18, стр. 49.
- 30 Реф. 21, стр. 121.
- 31 S. Senturia, B. Wedlock, *Electronic circuits and applications*, руски превод: Электронны схемы и их применение, Мир, 1977, стр. 247.

ПИТАЊА

1. Шта је енергијски дијаграм електрона у атому? Нацртати дијаграм енергијских нивоа усамљеног атома водоника.
2. Шта је електронволт и колика је његова вредност?
3. По чему се дијаграм енергије електрона у кристалној решетки разликује од дијаграма енергије електрона усамљеног атома?
4. По чему се разликују енергијски дијаграми проводника, полупроводника и изолатора?
5. Шта је сопствена концентрација чистог полупроводника и од чега зависи?
6. Шта је полупроводник са примесама? Зашто се у кристал полупроводника уносе примесе?
7. Какав је однос концентрација електрона и шупљина у полупроводнику са примесама у стању термодинамичке равнотеже?
8. Шта су већински, а шта мањински носиоци наелектрисања у полупроводнику? У чему се разликују полупроводници N- и P-типа?
9. Шта је прелазна област PN-споја? Како се мења ширина прелазне области PN-споја при повећању напона инверзне поларизације?
10. Како се мења висина потенцијалне препреке прелазне области PN-споја при повећању напона директне поларизације?
11. Шта је пробој PN-споја и како настаје? Како се вредност напона пробоја мења са температуром?
12. Одредити однос статичке и динамичке отпорности PN-споја при директној поларизацији напонам $U \gg U_T$.
13. Како се динамичка отпорност PN-споја мења: а) у зависности од температуре, б) у зависности од вредности струје?
14. Колика је приближна вредност динамичке отпорности силицијумског PN-споја на собној температури, при струји од 1 mA?

ОЗНАКЕ

A	прикључак аноде	I	стална (једносмерна) вредност електричне струје
A	појачање	i	тренутна вредност укупне електричне струје
A_I	појачање струје	I_{AV}	средња вредност укупне електричне струје
A_U	појачање напона	I_M	највећа вредност укупна електрична струја
B	прикључак базе	I_B	стална (једносмерна) струја базе
C	прикључак колектора	I_(BO)	стална (једносмерна) струја пребацивања тиристора
C	капацитивност	I_C	стална (једносмерна) струја колектора
C_D	дифузиона капацитивност	I_{CBO}	инверзна струја колекторског споја при $I_E=0$
C_J	капацитивност PN-споја	I_{CEO}	инверзна струја колекторског споја при $I_B=0$
C_p	паразитна капацитивност	I_D	највећа (вршна) струја у непроводном стању у директном смеру тиристора
C_T	капацитивност прелазне области	I_D	стална (једносмерна) струја дрејна транзистора са ефектом поља
C_{GS}(C_{iss})	улазна капацитивност фета	I_{DS}	струја дрејна при кратком споју између гејта и сорса
C_{GD}(C_{rss})	излазна капацитивност фета	I_E	стална (једносмерна) струја емитора
D	прикључак дрејна	I_F	стална (једносмерна) струја у директном (пропусном) смеру
D	константа дифузије	i_F	тренутна директна струја
D_n	константа дифузије електрона	I_{FM}	вршна директна струја
D_p	константа дифузије шупљина	I_{FRM}	вршна периодична директна (пропусна) струја
du/dt	(критична) брзина промене напона тиристора	I_{FSM}	ударна (непериодична) директна струја
E	прикључак емитора	I_G	стална (једносмерна) струја гејта транзистора са ефектом поља
E	електрично поље	I_{GT}	окидна струја гејта тиристора
f	учестаност	I_{GSS}	одводна (инверзна) струја гејта спојног транзистора са ефектом поља при кратком споју између дрејна и сорса
f₁	учестаност јединичног појачања	I_H	струја држања тиристора
G	прикључак гејта	I_O	средња излазна исправљена струја
g_d(g_{os})	излазна проводност фета	I_P	струја тачке врха тунел-диоде
g_{ij}	g-параметар еквивалентног кола	I_R	стална (једносмерна) струја у инверзном смеру
g_j	проводност PN-споја	i_R	тренутна инверзна струја
g_m(g_{fs})	проводност преноса	I_T	највећа стална проводна струја у директном смеру тиристора
h	хибридни (h) матрични параметри четворопола	I_{TM}	највећа проводна струја тиристора
h_{fb}	појачање струје за мале сигнале, при заједничкој бази	I_{TRM}	највећа ефективна вредност периодичне струја провођења тиристора
h_{FE}	појачање једносмерне струје, при заједничкој бази	I_V	струја тачке дола тунел-диоде
h_{fe}	појачање струје за мале сигнале, при заједничком емитору	I_z	стална (једносмерна) инверзна струја у опсегу радног напона Ценер-диоде
h_{FE}	појачање једносмерне струје, при заједничком емитору	J	густина електричне струје
h_{ib}	улазна отпорност за мале сигнале, при заједничкој бази	K	прикључак катоде
h_{ie}	улазна отпорност за мале сигнале, при заједничком емитору	L	индуктивност
h_{rb}	повратни сачинилац напона, при заједничкој бази	L_s	еквивалентна серијска индуктивност
h_{re}	повратни сачинилац напона, при заједничком емитору		

n	концентрација електрона	U_{CEsat}	напон засићења између колектора и емитора
N_i	сопствена концентрација слободних носилаца наелектрисања у полупроводнику	U_D	стални (једносмерни) напон непровођења у директном смеру тиристора
P	тачка врха	U_{DM}	највећи (вршни) напон непровођења у директном смеру тиристора
p	концентрација шупљина	U_{DRM}	периодични вршни напон непровођења у директном смеру тиристора
$p(t)$	тренутна вредност електричне снаге	U_{DS}	стални (једносмерни) напон између дрејна и сорса
P	стална (једносмерна) електрична снага, активна снага	U_{EB}	једносмерни напон између емитора и базе
P_C	дисипација колектора	U_{EY}	Ерлијев напон
q, Q	наелектрисање	U_F	директни (пропусни) стални (једносмерни) напон диоде (PN-споја)
q_e	наелектрисање електрона	u_F	тренутни укупни директни напон диоде (PN-споја)
r	динамичка отпорност	U_{FM}	највећа (вршна) вредност директног (пропусног) напона
R	статичка отпорност	U_{GT}	напон окидања гејта тиристора
r_{DS}	отпорност између дрејна и сорса	U_{GS}	стални (једносмерни) напон између гејта и сорса
$r_{DS(ON)}$	отпорност између дрејна и сорса у стању провођења	$U_{GS(OFF)}$	прекидни напон између гејта и сорса MOS-транзистора са уграђеним каналом и спојног транзистора са ефектом поља
$r_{DS(OFF)}$	отпорност између дрејна и сорса у стању непровођења	$U_{GS(TO)}$	напон прага између гејта и сорса MOS-транзистора са индукованим каналом
r_T	отпорност нагиба исправљачке диоде	U_P	напон тачке врха тунел-диоде
r_z	динамичка отпорност у опсегу радног напона	U_R	стални (једносмерни) инверзни (непропусни) напон
r_{Δ}	диференцијална отпорност	u_R	тренутни укупни инверзни напон диоде
r_{ij}	r -параметар еквивалентног кола	U_{RM}	вршни инверзни напон
S	прикључак сорса	U_{RRM}	највећа (вршна) вредност периодичног инверзног напона
t	време	U_T	термички напон
t_d	време кашења	U_T	напон провођења у директном смеру тиристора
t_r	време пораста	$U_{(TO)}$	напон прага исправљачке диоде
t_s	време задржавања	$U_{T(TO)}$	напон прага тиристора
t_f	време пада	U_V	напон тачке дола тунел-диоде
t_{fr}	време укључења диоде	U_z	радни напон диоде референтног напона
t_{gt}	време укључења тиристора управљаног гејтом	v	брзина
t_{rr}	време опоравка диоде	V	потенцијал
T	температура	V	тачка дола (дна)
TC	температурски коефицијент	W	енергија
U	стални (једносмерни) напон	W_G	енергијски процеп
u	тренутна вредност укупног напона	X	реактанса
U_{AV}	средња вредност укупног напона	α	појачање струје од емитора до колектора
U_M	највећа вредност укупног напона	β	појачање струје од базе до колектора
U_{BE}	једносмерни напон између базе и емитора	λ	таласна дужина
U_{BEsat}	напон засићења између базе и емитора	μ	покретљивост
$U_{(BO)}$	напон пребацивања тиристора	σ	специфична проводност
$U_{(BR)}$	пробојни напон	ρ	специфична отпорност
U_{CB}	једносмерни напон између колектора и базе	ω	угаона учестаност
U_{CE}	једносмерни напон између колектора и емитора		

ИНДЕКС

Ајнштајнова једначина	10	биполарног транзистора	121
Акцептор	14, 223	диоде	88
Активна (радна) област транзистора	109	<i>JFET</i> -а	149
Активни елемент	30	<i>MOS</i> -транзистора	164
Алгоритам	189	Електрон	11, 207
Аналогни сигнал	187	валентни	11
Анода	54, 56	Електрична струја	4
Атом	10, 206	Елемент	
модел	207	активни	30
енергијски нивои	210	савршени	32
База	57, 94	линеарни	68
Биполарни транзистор	57	пасивни	69
Боров модел атома	209	са два приступа	79
<i>BJT</i>	57	са једним приступом	69, 71
Валенца	212	Емитор	58, 94
Валентни опсег	213	Енергијски	
Варактор	78	опсег	12, 213
Гејт	116	процеп	213
Германијум	44	Ерлијев ефекат	167
Гранична учестаност	196	Ефикасност емитора	238
Густина електричне струје	34	Забрањен опсег	213
<i>G</i> -параметри	83	Индуктивност	40
<i>GTO</i>	175	Информација	185
Диак	172	Интегрисана електронска кола	183
Диелектрик	12, 21, 215	<i>LSI</i>	194
Диференцијална отпорност		<i>VLSI</i>	194
Дифузија	9	Изолатор	3, 12
Дигитална обрада сигнала	192	Извор електричног напона	69, 78
Дигитални сигнал	188	Извор електричне струје	70, 78
Динамичка отпорност	19, 37	<i>IEC</i>	28
Диода	38, 45, 54, 56	<i>IGBT</i>	161
Ценер	56, 80,	<i>IGFET</i>	134
фотоемитујућа	86	Једноспојни транзистор	118
фотоосетљива	84	Јон	11, 208
савршена	65	<i>JFET</i>	61, 134
исправљачка	67	Калем	39
прекидачка	67	Канал	116
референтног напона	67	индуковани	61, 135, 159
сигнална	67	уграђени	61, 134, 157
Шотки	83	Капацитивност	69
тунел	81	<i>PN</i> -споја	61
варикап	78	Карактеристика	
<i>PIN</i>	79	излаза	43, 105
Донор	14, 223	преноса	43, 107
Дрејн	60	статичка	43, 102
<i>DSP</i>	192	улаза	43, 102
Еквивалентно коло	32	Катода	54, 56
		Колектор	58, 94
		реакција	106
		Кондензатор	74, 79
		Квант	2

Квантни број	11	Повратна спрега	11
Ласер	25	Пробој	
LED	145	биполарног транзистора	113
Међународна електротехничка	28	лавински	18
комисија		термички	21
Мирна радна тачка	81	Џенеров	18
MOSFET	135	JFET-а	142
Напон		PN-споја	231
Ерлијев	106	Проводник	30
прага	69	Проводност	13
прекида	137	специфична	41
пробоја	70	Проводност	13
термички	39	специфична	38
Независни извор		PN-спој	50
напона	34	ppt	51
струје	35	Радна тачка	
Одабирање	192	мирна	115
Омов закон	13, 42	показатељи стабилности	118
Оптоелектронски елементи	62	Реакција колектора	167
Отпорник	71	Резолуција	5
Отпорност	4	Савршени елемент	22
диференцијална	60, 72	Сигнал	185
динамичка	60, 72	аналогни	187
диоде	70	импулсни	187
излазна	47, 128	дигитални	188
нагиба	69	Силицијум	44
специфична	38	Систем	4
статичка	60, 70	Слободни носиоци	
улазна	43, 127	наелектрисања	5, 15
PN-споја	59	Сорс	116
Пасивни елемент	30	Спојеви	
Појачање		биполарног транзистора	100
напона		фета	151
струје		Стандард	7
Појачавач	80	Стабилизација	11
напона	80, 84	Статичке карактеристике	
струје	80, 83	биполарног транзистора	102
Покретљивост	47	JFET-а	140
Поларизација	56	Струја	
Полупроводник	33, 43	директна	65
примесни	47	инверзна	65
I-типа	46	засићења	68
P-типа	49	Суперпроводност	22
N-типа	49	SCADA	189
		Температурски коефицијент	
		кондензатора	39

отпорника	36
Термички пробој	21
Термички напон	10
Тиристор	62, 167
еквивалентно коло	170
назив	167
статичка карактеристика	169
Транзистор	57
биполарни	58
једноспојни	62
назив	59
са ефектом поља	59
подела	57, 59, 134
Транспортни фактор	164
Триак	177
Триода	18
Тунел-ефекат	58
<i>UJT</i>	118
Фотоелектрични ефекат	36
<i>FET</i>	135
Хевисајдова (одскачна) функција	131
<i>H</i> -параметри	82
Ценер-диода	56, 80
Ценеров напон	20
Ценеров пробој	18
Шотки-диода	144
Шупљина	32