



ELEMENTI UREĐAJA Ee

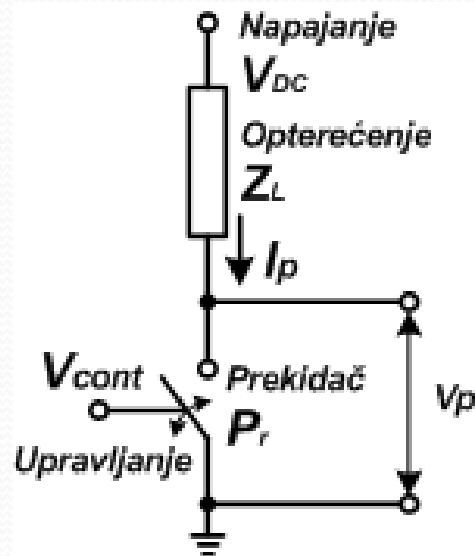
ENERGETSKA ELEKTRONIKA
Ee

Visoka škola elektrotehnike i računarstva

Neša Rašić

Prekidački elementi

Su sastavni delovi prekidačkih kola. Osnovno prekidačko kolo sastoji se od: prekidača, opterećenja, napajanja i upravljačkog ili kontrolnog kola.

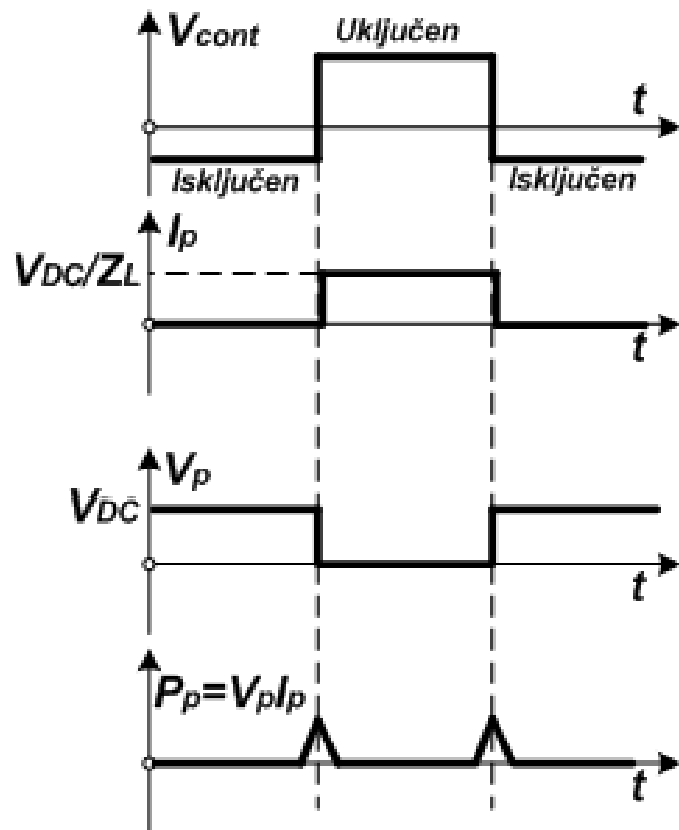


Kontrolni signal V_{cont} upravlja stanjem prekidača.

Idealni prekidač treba da se ponaša kao otvorena veza (beskonačna otpornost) kada je isključen i kao kratak spoj (otpornost jednaka nuli) kada je uključen. Njegova statička karakteristika je nelinearna.



Prekidački elementi



U uključenom stanju napon na prekidaču je nula, a u isključenom stanju struja kroz prekidač je nula. Zato je tada disipacija snage na prekidaču nula. Ta stanja nazivaju se statičkim stanjima.

Idealni prekidač trenutno se isključuje i uključuje, što znači da su vremena prelaza iz jednog u drugo statičko stanje jednaka nuli.



Prekidački elementi

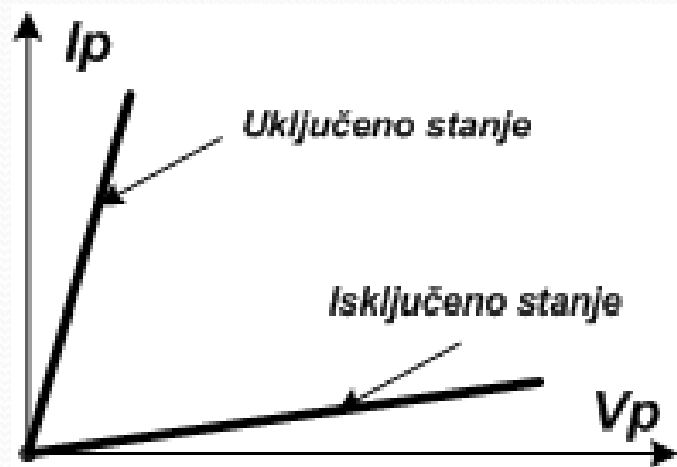
Ni jedan elektronski prekidač ne ponaša se kao idealni.

Realni prekidački element karakterišu:

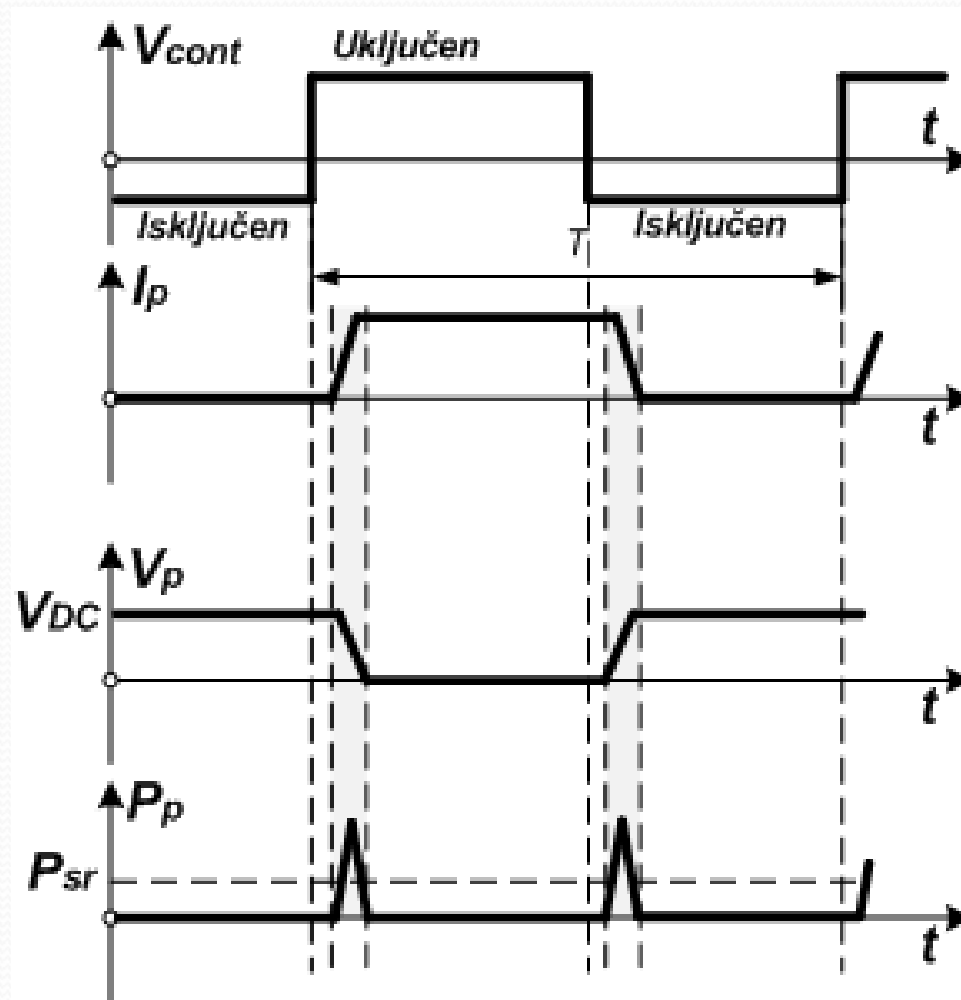
- konačna otpornost kada je isključen
- otpornost veća od nule u uključenom stanju
- vremena prelaza iz uključenog u isključeno stanje i obrnuto veća su od nule
- postoji disipacija snage

Statičke i dinamičke karakteristike realnog prekidača prikazane su na sledećoj slici.

Prekidački elementi



Karakteristike realnog prekidača, statička (gore), dinamička (desno)





Prekidački elementi

Kod realnih prekidača struja u isključenom i napon u uključenom stanju uglavnom su zanemarljivi. Zato je i disipacija snage realnog prekidača u statičkim stanjima zanemarljiva.

U prelaznom režimu, u toku promene stanja prekidača, realno postoje i struja i napon, pa trenutna disipacija snage ne može biti zanemarena.

Prekidački elementi

Vremena prelaska prekidača iz jednog u drugo statičko stanje zavise od frekventnih karakteristika prekidačkog elementa, karaktera opterećenja i upravljačkog kola.

Ova vremena ne zavise od perioda (T) uključivanja i isključivanja. Zato će srednja snaga disipacije snage biti utoliko veća ukoliko je period (T) manji.

Dinamička disipacija snage na visokim učestanostima može da bude znatna, zato je maksimalna frekvencija prekidačkog kola ograničena ne samo vremenima uključivanja i isključivanja već i dozvoljenom disipacijom snage prekidača.



Prekidački elementi

Kao prekidači u kolima Ee koriste se snažni poluprovodnički elementi: diode, bipolarni i MOS tranzistori, tiristori i BiMOS tranzistori.

Zajedničko za sve njih je da moraju upravljati signalima velike snage sa što kraćim vremenima uključivanja i isključivanja.

Karakteristike snažnih poluprovodničkih prekidača

Vrsta	Tip	Maksimalni napon / struja	Maksimalna frekvencija [kHz]	Prekidačko vreme [ms]	Otpornost u uključenom stanju
Diode	Opštenamenske	5000V/5000A	1	100	0.16 mΩ
	Veoma brze	3000V/1000A	10	2 do 5	1 mΩ
	Šotki	40V/60A	20	0.23	10 mΩ
Tiristori	SCR	5000V/5000A	1	200	0.25 mΩ
		2500V/400A	5	40	2.16 mΩ
	RCT	2500V/1000A	5	40	2.1 mΩ
	GATT	1200V/400A	20	8	2.24 mΩ
	GTO	4500V/3000A	10	15	2.5 mΩ
	SITH	4000V/2200A	20	6.5	5.75 mΩ
	MCT	600V/60A	20	2.2	18 mΩ
Bipolarni tranzistori	Darlington	400V/250A	20	9	4 mΩ
		400V/40A	20	6	31 mΩ
		630V/50A	25	1.7	15 mΩ
		1200V/400A	10	30	10 mΩ
MOSFET		500V/8.6A	100	0.7	0.6 Ω
		1000V/4.7A	100	0.9	2 Ω
		500V/50A	100	0.6	0.4 Ω
IGBT		1200V/400A	20	2.2	18 mΩ
SIT		1200V/300A	100	0.55	1.2 Ω

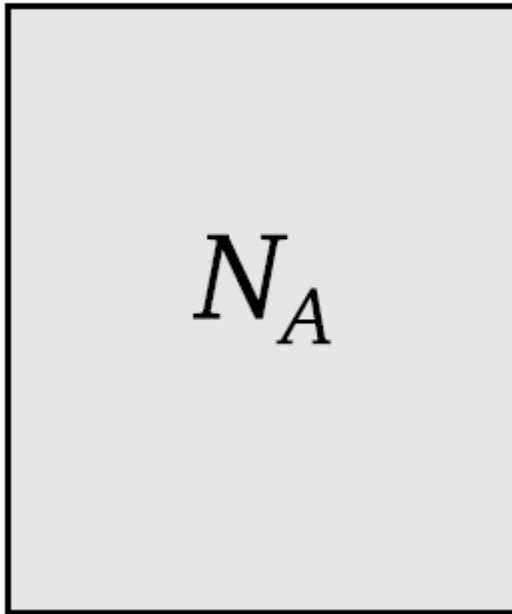


PN spoj

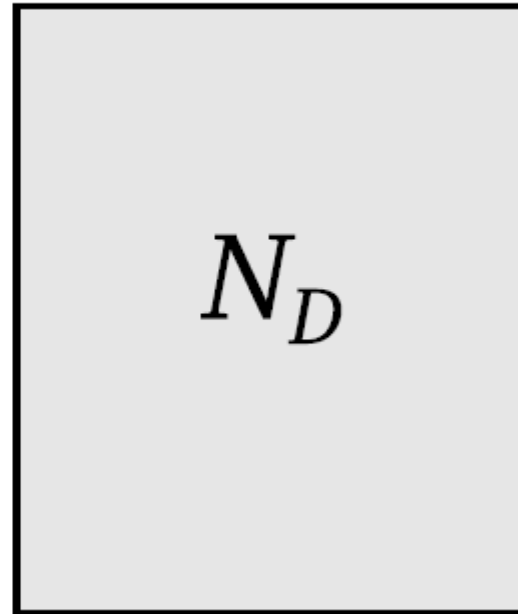
PN spoj u misaonom eksperimentu

PN spoj u misaonom eksperimentu se pravi od dva komada silicijuma koji su uniformno dopirani akceptorskim i donorskim primesama koncentracija N_A i N_D , respektivno, pri čemu smatramo da je $N_A > N_D$.

silicijum p -tipa



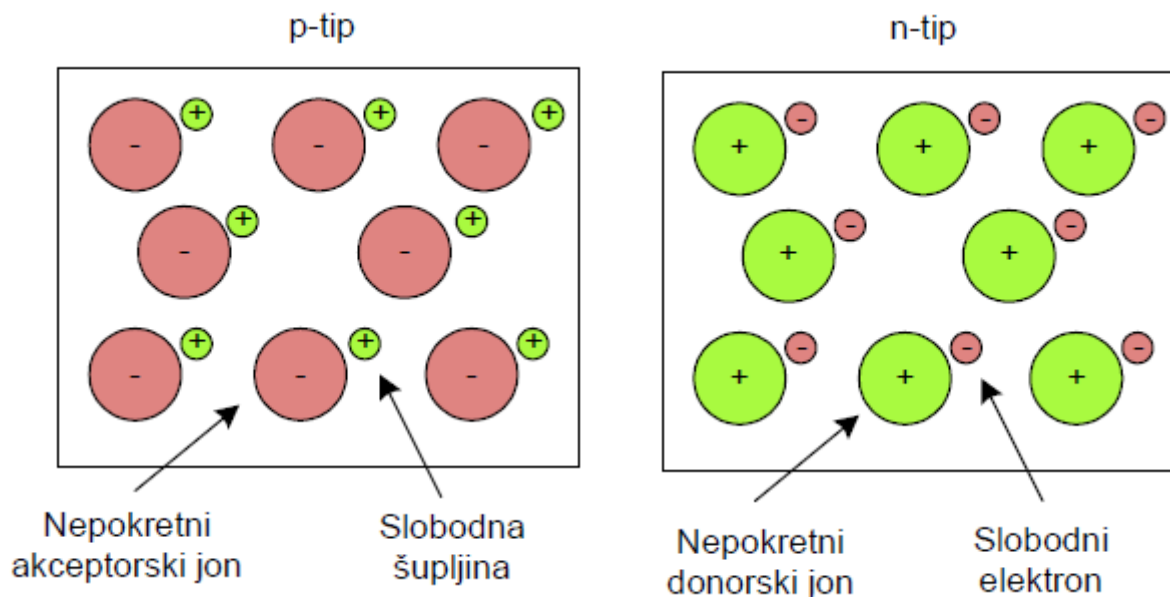
silicijum n -tipa



PN spoj pre formiranja

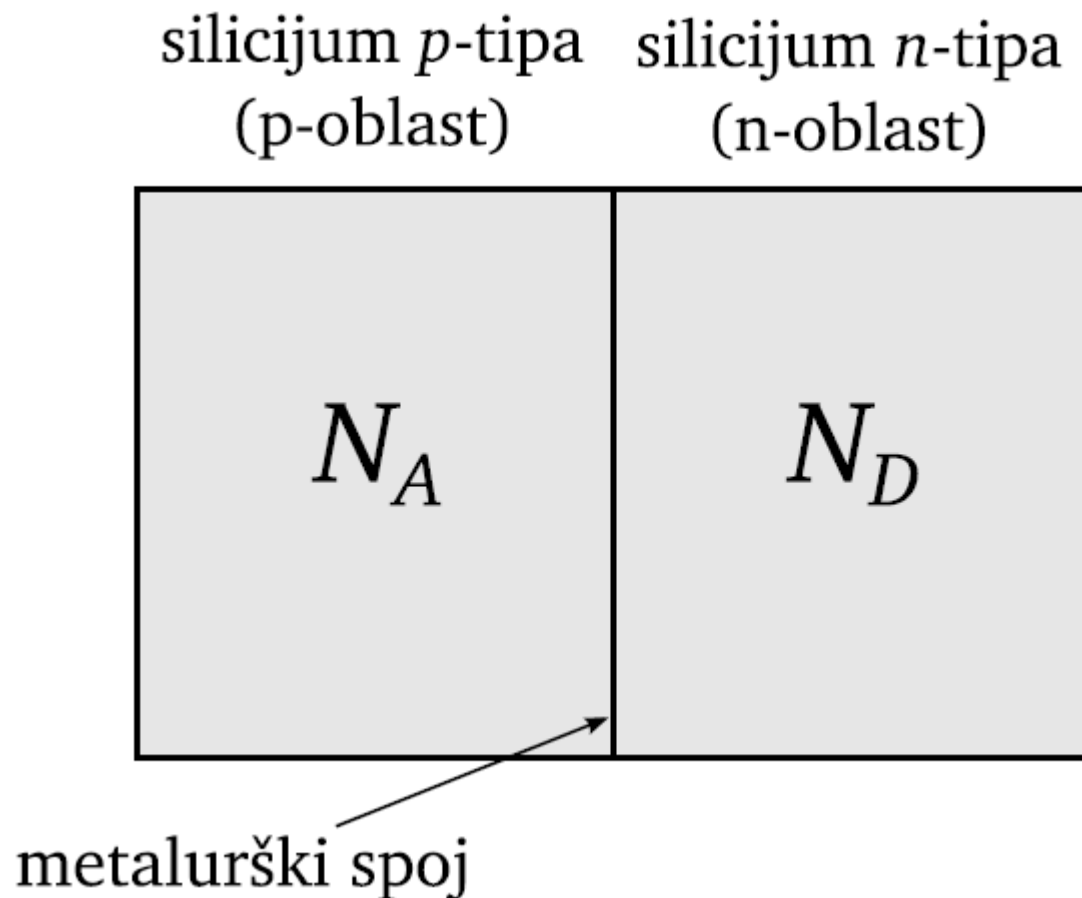
p-tip poluprovodnika pre formiranja pn spoja ima nepokretne akceptorske jone i slobodne šupljine.

n-tip poluprovodnika pre formiranja pn spoja ima nepokretne donorske jone i slobodne elektrone.

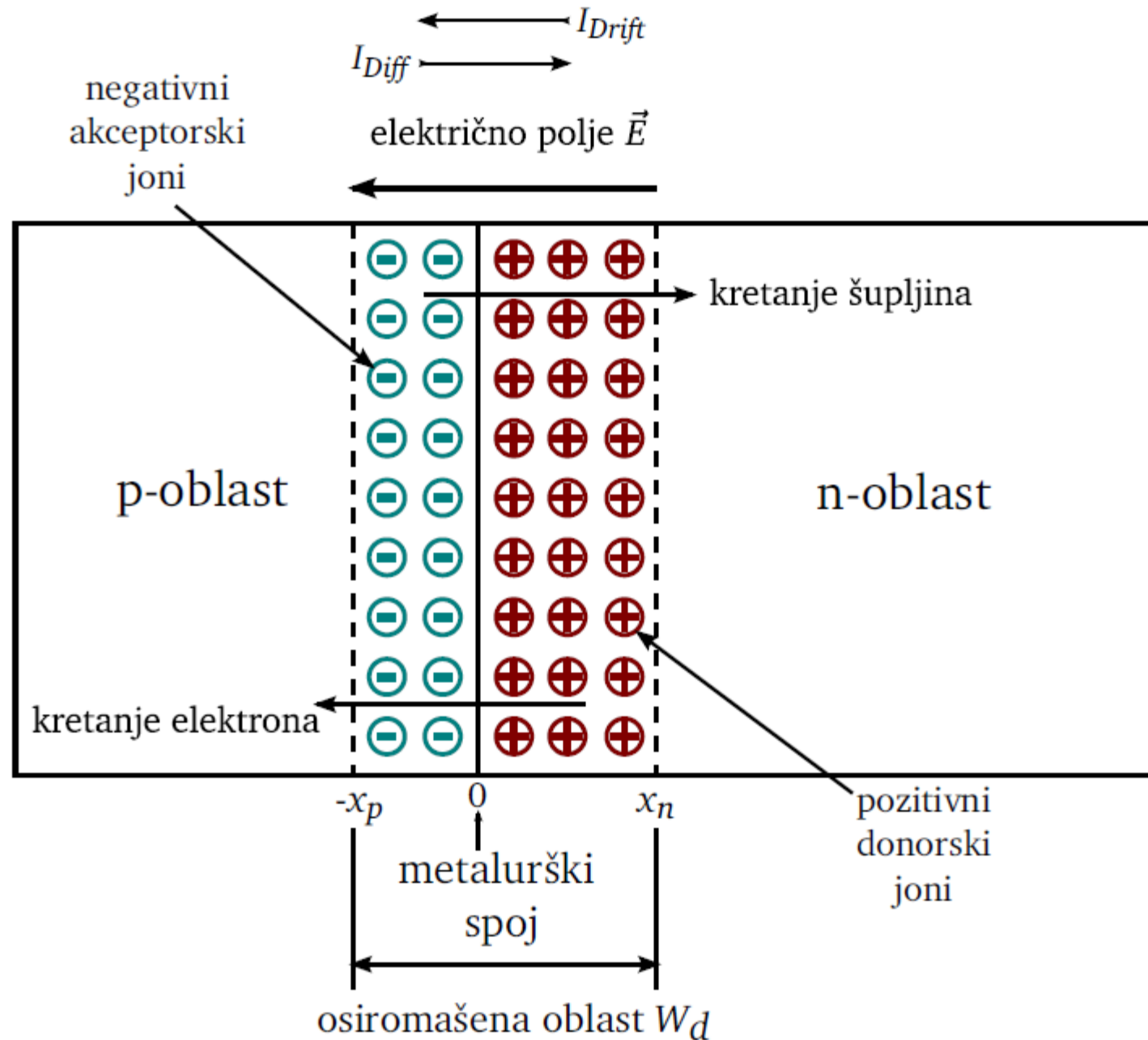


Metalurški spoj

Metalurški spoj predstavlja liniju dodira između silicijuma p-tipa i silicijuma n-tipa.



Oblast prostornog tovara



Prelazak elektrona iz n-tipa u p-tip poluprovodnika (pp)

- ❖ Elektroni iz n-tipa pp difuzijom prelaze u p-tip pp, pošto je koncentracija elektrona u n-tipu pp veća nego u p-tipu pp.
- ❖ Elektroni koji su prešli iz n-tipa pp u p-tip pp ostavljaju za sobom pozitivno naelektrisane donorske jone u n-tipu pp.
- ❖ Elektroni koji su prešli iz n-tipa pp u p-tip pp se rekombinuju sa šupljinama u p-tipu pp, i time nastaju negativno naelektrisani akceptorski joni u p-tipu pp.
- ❖ Prelazak elektrona iz n-tipa pp u p-tip pp pravi difuzionu struju elektrona.

Prelazak šupljina iz p-tipa u n-tip poluprovodnika (pp)

- ❖ Šupljine iz p-tipa pp difuzijom prelaze u n-tip pp, pošto je koncentracija šupljina u p-tipu pp veća nego u n-tipu pp.
- ❖ Šupljine koje su prešle iz p-tipa pp u n-tip pp ostavljaju za sobom negativno naelektrisane akceptorske jone u p-tipu pp.
- ❖ Šupljine koje su prešle iz p-tipa pp u n-tip pp se rekombinuju sa elektronima u n-tipu pp, i time nastaju pozitivno naelektrisani donorski joni u n-tipu pp.
- ❖ Prelazak šupljina iz p-tipa pp u n-tip pp pravi difuzionu struju šupljina.

Oblast prostornog tovara

- ❖ Pozitivno naelektrisani donorski joni u n-tipu pp su nepomični unutar kristalne rešetke.
- ❖ Negativno naelektrisani akceptorski joni u p-tipu pp su takođe nepomični unutar kristalne rešetke.
- ❖ Oblast u kojoj se nalaze samo nepomični joni unutar kristalne rešetke se naziva oblast prostornog tovara (naelektrisanja).
- ❖ U oblasti prostornog tovara praktično nema slobodnih nosilaca naelektrisanja (elektrona i šupljina), tako da se ova oblast naziva i osiromašena oblast (*depletion region*).

Ugrađeno električno polje

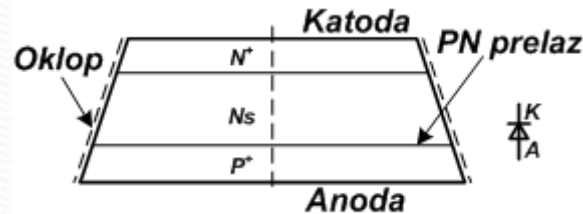
- ❖ Pozitivno naelektrisani donorski joni u n-tipu pp i negativno naelektrisani akceptorski joni u p-tipu pp formiraju ugrađeno električno polje u okolini pn spoja.
- ❖ Ugrađeno električno polje je usmereno od n-tipa pp ka p-tipu pp.
- ❖ Ugrađeno električno polje se suprotstavlja daljem prelasku elektrona iz n-tipa pp u p-tip pp.
- ❖ Ugrađeno električno polje se takođe suprotstavlja daljem prelasku šupljina iz p-tipa pp u n-tip pp.



Poluprvodnički elementi

Dioda

je neupravljivi prekidač. Kao element sklopa predstavlja nelinearnu otpornost zavisnu od polariteta i veličine priključenog napona.

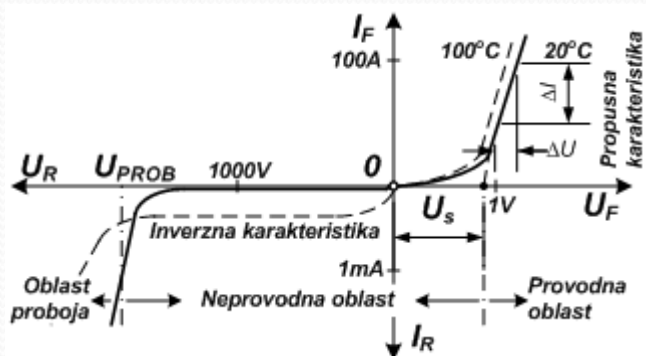


Na slici je prikazan presek strukture diode i njen simbol.

Između jako doniranih P^+ i N^+ slojeva nalazi se slabo donirani N_s ili P_s sloj debljine 100 do 400 μm .

Diode najčešće imaju naročito obrađene ivice pa do proboja dolazi samo u njenoj unutrašnjosti. Takve diode nazvane su *diode sa prinudnim lavinskim probojem*.

Statička karakteristika diode



ilustruje osnovne osobine diode. Ona predstavlja zavisnost propusne struje I_F od propusnog napona U_F i inverzne struje I_R od inverznog napona U_R

Grana $I_F=f(U_F)$ odnosi se na propusno polarisanu diodu, a grana $I_R=f(U_R)$ na inverzno polarisanu diodu.

Pri određenoj vrednsoti inverznog napona struja naglo poraste i nastaje proboj PN spoja. Veličina inverznog napona pri kome nastaje proboj zove se *probojni napon*.

Strujno naponska karakteristika diode jako zavisi od temperature, sa čijim porastom raste inverzna struja i malo se smanji pad napona propusno polarisane diode.

Nominalni parametri diode

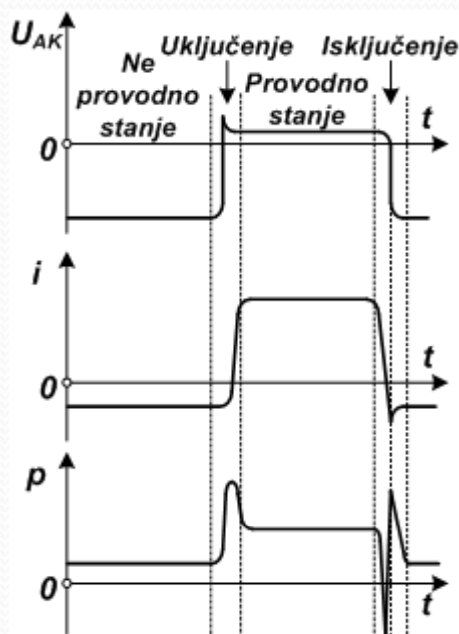
su: *nominalna propusna struja, nominalni propusni napon, napon početka vođenja U_s , nominalni inverzni napon, nominalna inverzna struja i dinamička otpornost propusne karakteristike.*

- Nominalna propusna struja I_F je maksimalna dopuštena trajna struja pri kojoj se ne prekorači dozvoljeno zagrevanje pri nominalnim uslovima hlađenja (za silicijumske diode ova struja je do 1500 A, za diode od germanijuma ona je manja)
- Nominalni propusni napon U_F je pad napona na propusno polarizovanoj diodi pri nominalnoj struji (kod silicijumskih dioda ovaj napon je 1 do 1.4V, za diode od germanijuma on je nešto niži)

Nominalni parametri diode

- Napon početka vođenja U_s je napon pri kome počinje da teče struja kroz diodu (za diode od silicijuma on je 0.4 do 0.8V, za diode od germanijuma on je niži)
- Nominalni inverzni napon U_R je maksimalna vrednost napona koji nepropusno polarizovana dioda može podneti bez nastanka proboja (kod dioda od silicijuma ovaj napon je 4 do 5kV, dok je kod dioda od germanijuma on mnogo niži)
- Nominalna inverzna struja I_R je struja koja teče kroz diodu pri nominalnom inverznom naponu U_R
- Dinamička otpornost r_D predstavlja otpornost propusno polarizovane diode za naizmenične veličine ($r_D = \Delta U / \Delta I$)

Dinamičke osobine diode



Kod prelaska diode iz provodnog u neprovodno stanje, i obratno, stacionarno stanje se ne uspostavlja trenutno. Pri prelasku u provodno stanje povećava se otpornost diode i pad napona na diodi u trenucima početka vođenja.

Kod isključenja diode smanjuje se propusna struja a nakon toga i struja menja smer. Tek posle određenog vremena dioda počinje da se suprotstavlja proticanju struje i počinje da preuzima inverzni napon.



Dinamičke osobine diode

Nakon isključenja dioda se može uključiti ponovo posle isteka tzv. vremena oporavka t_{op} . To vreme mora biti najmanje jednako vremenu koje protekne od trenutka prolaska struje kroz nulu do trenutka smanjenja te struje na 10% njene maksimalne inverzne vrednosti.

Prilikom uključanja i isključenja diode nastaju gubici koji su srazmerni frekvenciji. Posebno su veliki gubici isključenja jer je dinamička inverzna struja reda veličine propusne struje diode. Gubici kod provođenja diode zavise od trajanja tog vođenja.

Na višim frekvencijama koriste se brze diode sa malim dinamičkim inverznim strujama.



Eksplatacioni parametri diode

su važni za ispravno projektovanje i upotrebu Ee sklopova.
Tu spadaju: *sposobnost podnošenja preopterećenja, opteretna sposobnost, gornja i donja granica temperature silicijumske pločice, mehanička čvrstoća, temperatura i relativna vlažnost okolnog prostora i dr.*

Dioda

Dioda u poluprovodničkoj tehnologiji je pn spoj.

Anoda je povezana na p-tip pp, a katoda na n-tip pp.



Obična dioda za male signale, usmerače ili prekidačka dioda.



Zenerova dioda može da radi u oblasti Zenerovog proboja.



Šotkijeva dioda je spoj metala i dopiranog poluprovodnika.



Varikap dioda (varaktor) obezbeđuje što veću promenu kapacitivnosti sa promenom napona inverzne polarizacije.



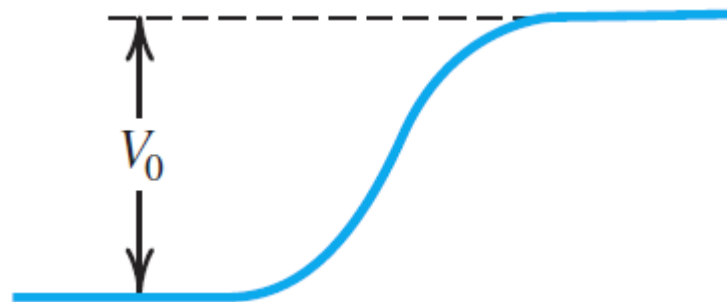
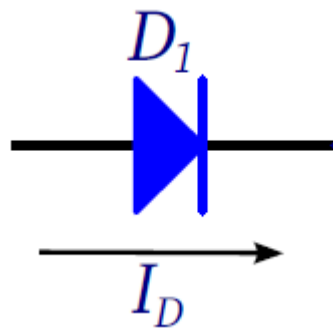
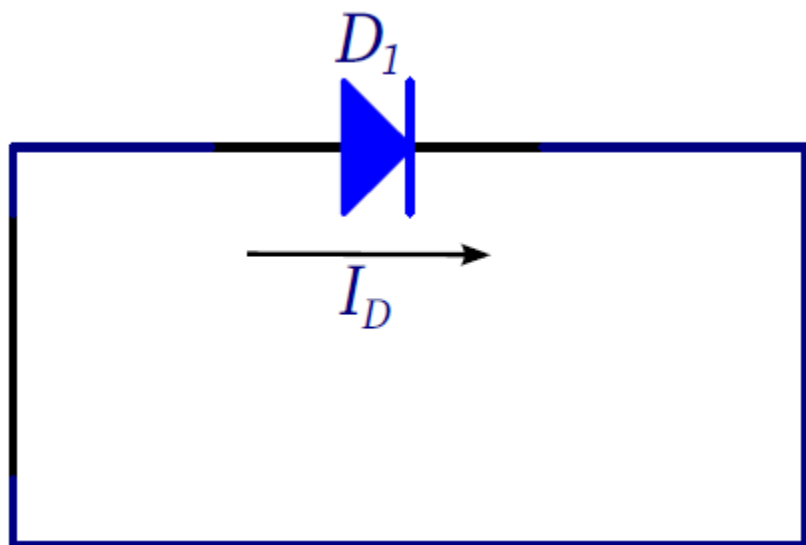
Svetleća dioda (LED) emituje svetlost pri rekombinaciji elektrona i šupljina.



Fotodioda menja inverznu struju zasićenja sa promenom intenziteta svetla.

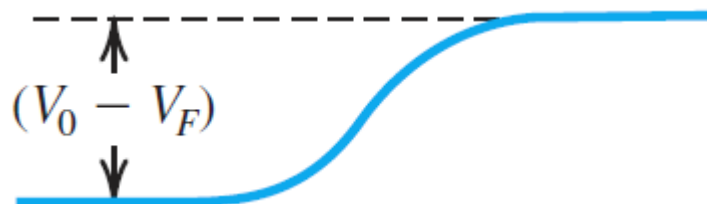
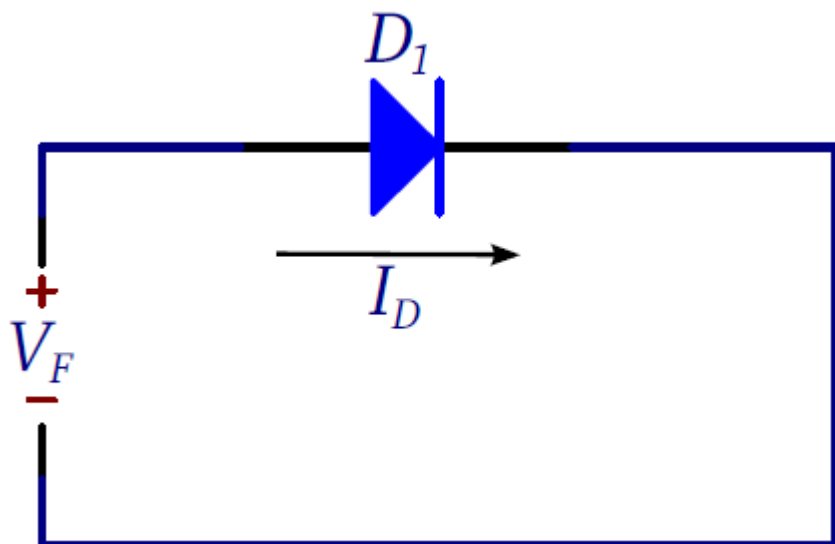
Nepolarisana dioda

- ❖ Nepolarisana dioda podrazumeva dovođenje kratkog spoja ili otvorene veze na njene priključke.



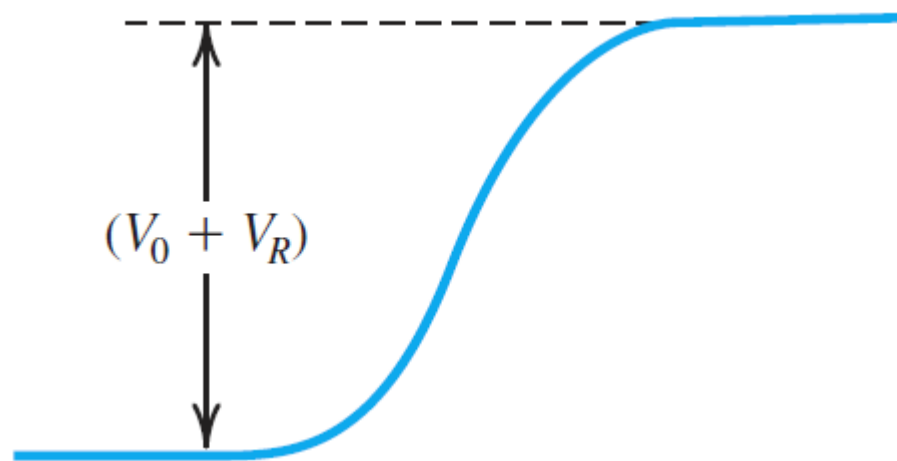
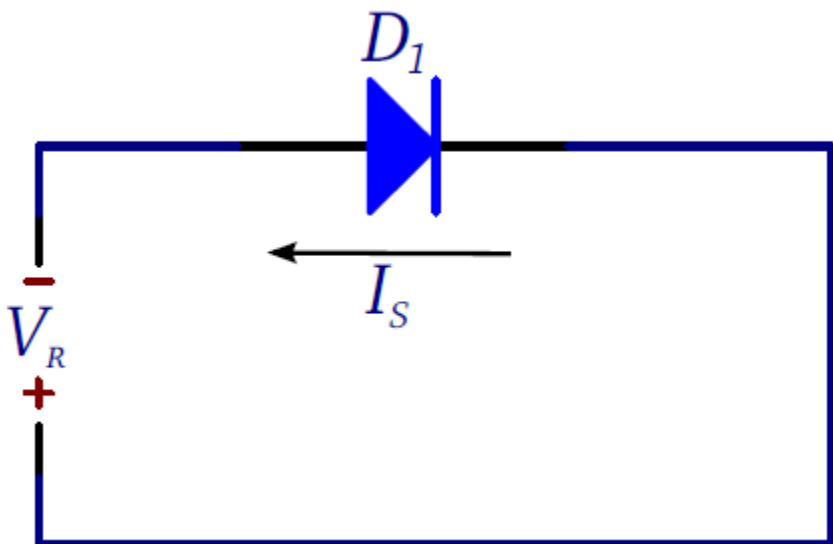
Direktna polarizacija

- ❖ Direktna polarizacija diode podrazumeva dovođenje spoljašnjeg napona V_F na njene priključke, tako da je pozitivan kraj napona na anodi, a negativan na katodi.
- ❖ Spoljašnji napon V_F generiše spoljašnje električno polje koje je suprotnog smera od ugrađenog električnog polja, i time smanjuje električno polje i napon na krajevima oblasti prostornog tovara $V_0 - V_F$.



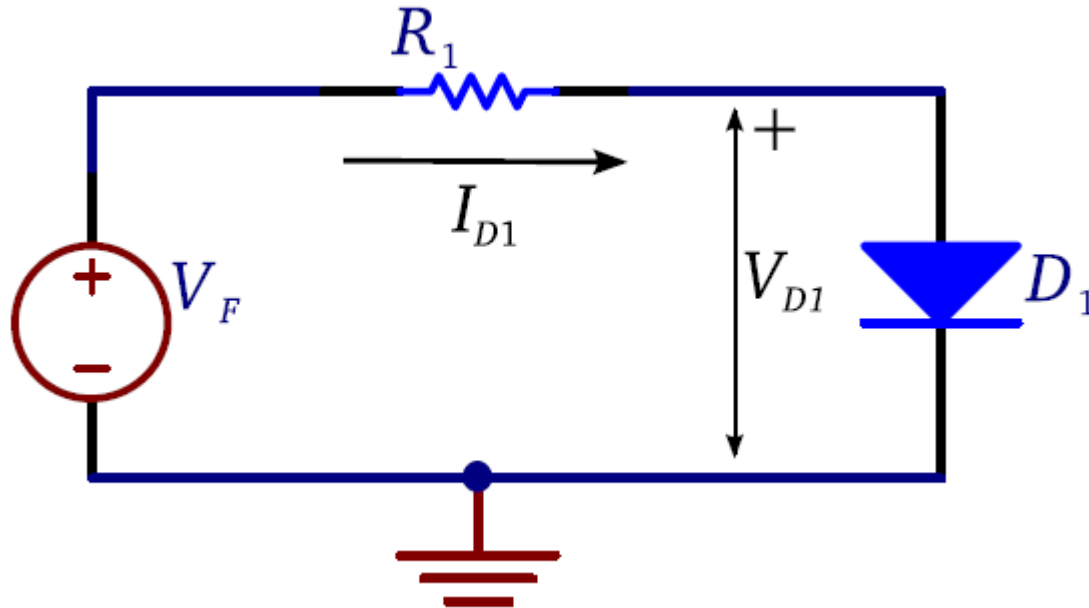
Inverzna polarizacija

- ❖ Inverzna polarizacija diode podrazumeva dovođenje spoljašnjeg napona V_R na njene priključke, tako da je negativan kraj napona na anodi, a pozitivan na katodi.
- ❖ Spoljašnji napon V_R generiše spoljašnje električno polje koje je istog smera kao ugrađeno električno polje, i time povećava električno polje i napon na krajevima oblasti prostornog tovara $V_0 + V_R$.



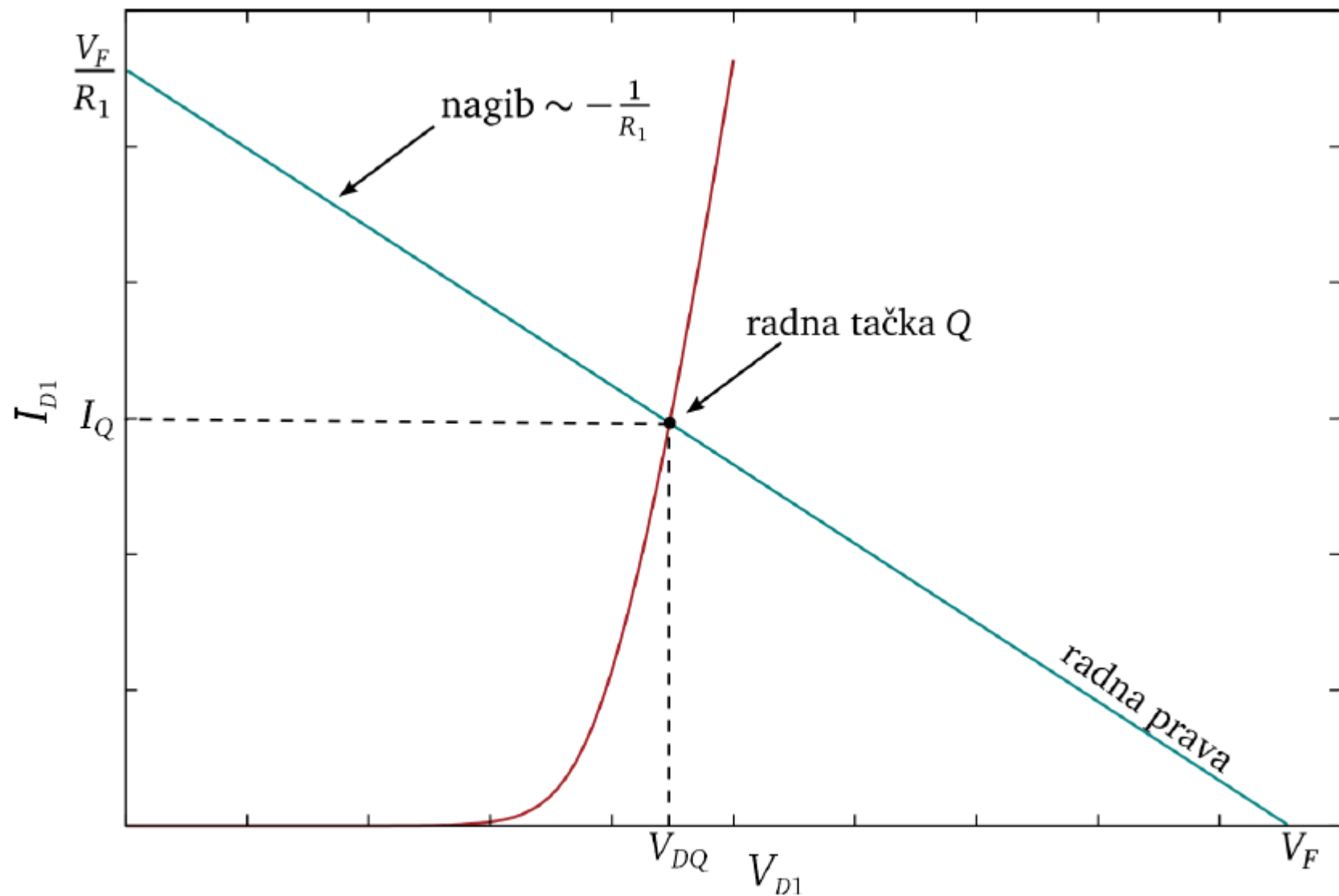
Radna tačka

Otpornik R_1 služi za ograničavanje struje diode i zadavanje mirne radne tačke Q.



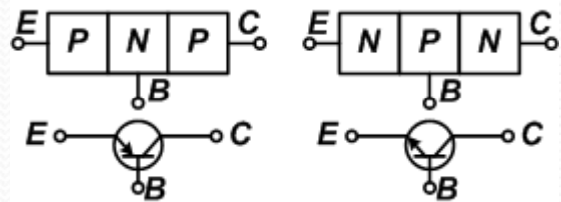
$$I_{D1} = \frac{V_F - V_{D1}}{R_1} = -\frac{1}{R_1}V_{D1} + \frac{V_F}{R_1}$$

Radna prava i radna tačka



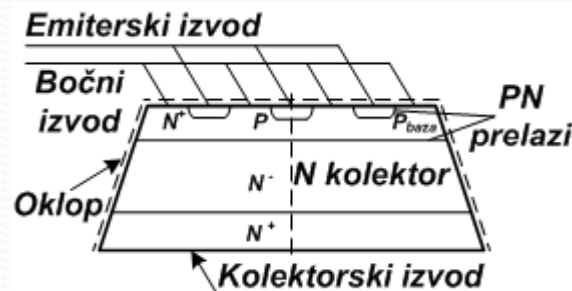
Tranzistor

je troslojna upravljiva prekidačka struktura koja može biti *PNP* ili *NPN* tipa.



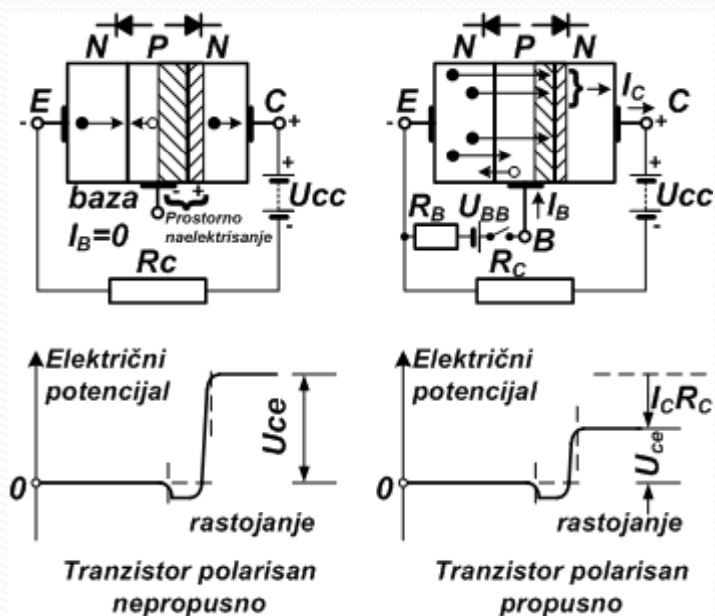
Na slici šematski su prikazani jedan i drugi tip tranzistora, kao i njihovi simboli.

Tranzistor ima tri elektrode: emiter *E*, bazu *B* i kolektor *C*. Strelice u krugu baza-emiter tranzistora označavaju smer struje u tranzistoru i tip tranzistora.



Na slici je prikazan presek strukture silicijumskog *NPN* tranzistora.

Opis načina rada tranzistora

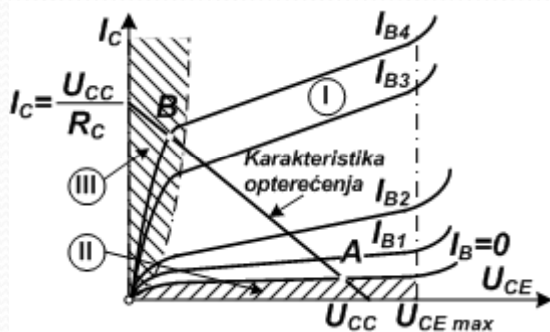


Slika za opis načina rada
NPN tranzistora

Troslojna struktura se može ekvivalentirati sa dva suprotno spojena PN spoja od kojih je jedan polarisan nepropusno.

Na slici je prikazano da je C (kolektor) na pozitivnom potencijalu u odnosu na E (emiter) pa je desni PN spoj (između B i C) polarisan nepropusno.

Statičke k-ke tranzistora



Familija izlaznih k-ka tranzistora u spoju sa zajedničkim emiterom

Trnazistori se u Ee najviše koriste u spoju sa zajedničkim emiterom.

Tranzistor može da radi u tri područja u polju familije izlaznih karakteristika. Radna tačka nalazi se u području I ako je emitorski PN spoj polarisan propusno a kolektorski nepropusno.

To je tzv. *aktivno područje* tranzistora i u tom području rade linearni pojačavački sklopovi. Tada za male signale između napona i struje vladaju linearni odnosi.



Statičke k-ke tranzistora

Da bi tranzistor radio u području **II**, i emitterski i kolektorski PN spoj moraju da budu nepropusno polarisani. To je područje u kome *tranzistor ne vodi*.

Za rad u području **III**, tranzistoru moraju oba PN spoja da budu polarisan propusno. Ako su ti uslovi ispunjeni onda je tranzistor u *zasićenju*.

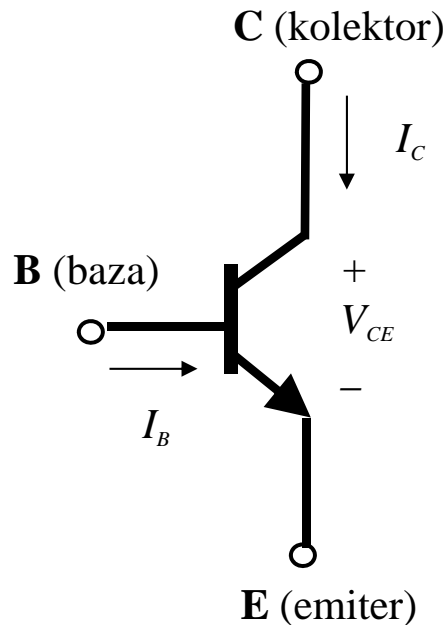
Ako se rad tranzistora odvija tako da mu se radna tačka pomera iz tačke A u tačku B po karakteristici opterećenja onda tranzistor radi kao prekidač. Prema tome područja **II** i **III** značajni su za rad tranzistora u prekidačkom režimu.



Dinamičke k-ke tranzistora

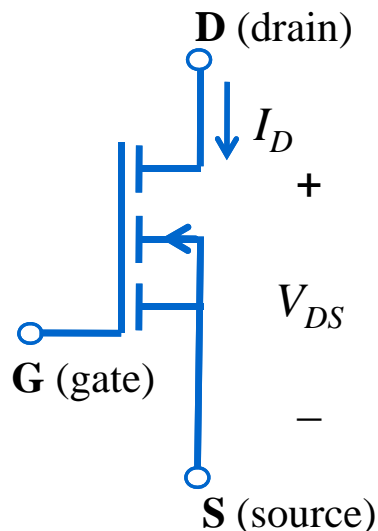
Kada tranzistor radi kao prekidač, njegove osobine su određene brzinom preklapanja iz nevodljivog u vodljivo stanje, i gubicima pri prelazu iz jednog u drugo stanje.

BIPOLARNI Tranzistor (BJT) – *Bipolar Junction Transistor*



- Potrebna velika bazna struja I_B (tipično 10% I_C) da bi ušao u zasićenje (kada radi kao uključeni prekidač)
- Malo se koriste poslednjih godina pa su naponi za koje su razvijeni do 1500V i struje do 600A
- Dobre karakteristike u uključenom stanju (mali napon V_{CE} tipično 2-3V)
- Učestanosti reda veličine 5 KHz

Tranzistor tipa MOSFET



- Pri $V_{GS} > +V_T$, provodi (mali otpor između D i S)
- Potrebna veoma mala energija za uključenje
- Jednostavan hardver za pobudu
- Napon do 1500 V, struje do 500A
- Mogu da rade i sa učestanostima preko 200 kHz
- Tipična primena, **niskonaponski pogoni** i invertori na **visokim učestanostima**

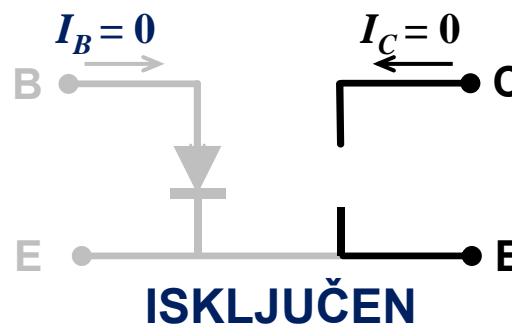
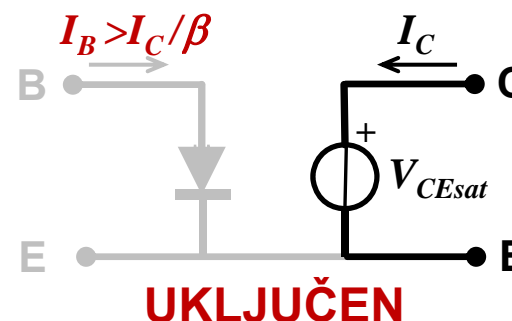
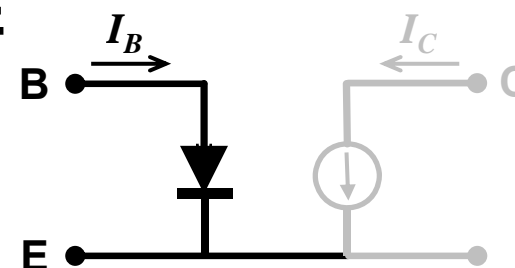
BIPOLARNI tranzistor kao prekidački element:

- Uključuje se stalnom strujom I_B od **B** ka **E**

- B-E spoj se ponaša kao dioda
- Minimalna I_B zavisi od struje I_C koju treba prekidati i iznosi $I_B > I_C/\beta$
- Kada se uključi, ponaša se približno kao naponski izvor napona V_{CEsat} koji iznosi 2-3V
- Napona V_{CE} i ne zavisi previše od struje (osim za jako male struje kada je nešto manji)

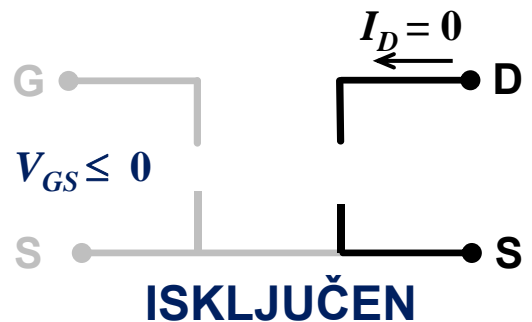
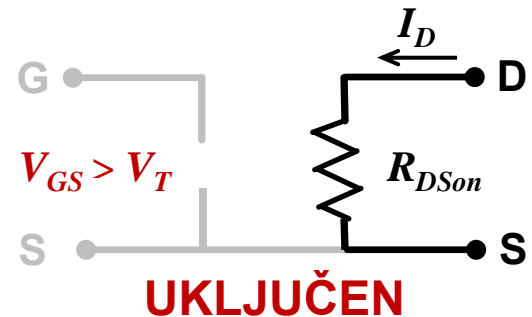
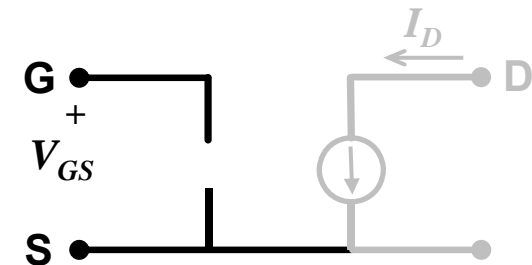
- Isključuje se kada je $I_B = 0$ ($V_{BE} \leq 0$)

- Isključen se ponaša vrlo približno idealnom prekidaču. Struja od **C** ka **E** se po pravilu može zanemariti.
- Bazne struje između **0** i I_C/β uvode tranzistor u linearni režim i nepoželjne su kada ovaj radi kao prekidač !

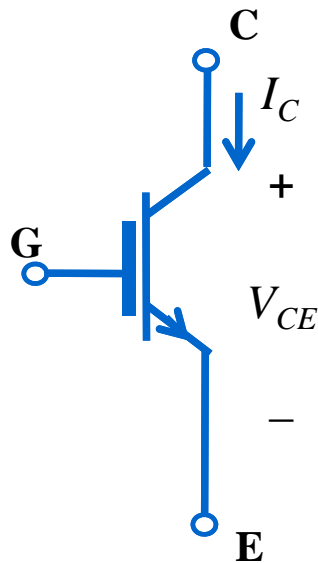


MOSFET kao prekidački element

- Uključuje se stalnim naponom $V_{GS} > V_T$
 - G-S spoj se ponaša kao otvorena veza (tačnije, kao mala parazitna kapacitivnost)
 - Minimalni V_{GS} da bi se uključio zavisi od tranzistora i označava se sa V_T
 - V_T može biti od nekoliko volti do petnaestak volti
 - Kada se uključi, ponaša se kao otpornost male vrednosti - R_{DSon}
- Isključuje se kada je $V_{GS} \leq 0$
 - Isključen se ponaša vrlo približno idealnom prekidaču. Struja od **D** ka **S** se po pravilu može zanemariti.
- Naponi gejta $0 < V_{GS} < V_T$ uvode tranzistor u linearni režim i nepoželjni su kada ovaj radi kao prekidač !



IGBT (*Insulated Gate Bipolar Tranzistor*)



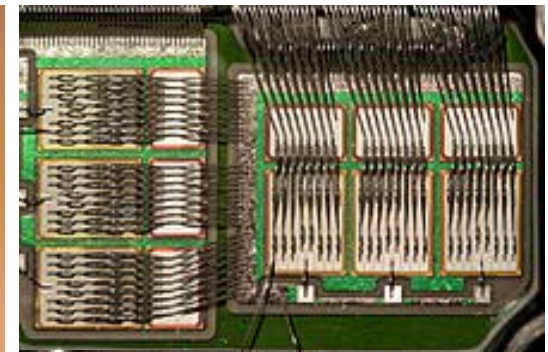
- Kombinacija MOSFET-a i bipolarnog tranzistora
- Kombinuje dobre osobine pobude MOSFET-a i izlaznog dela bipolarnog tranzistora
- Potrebna mala energija za uključenje
- Jednostavan hardver za pobudu
- Napon do 4700 V (6500 za HVIGBT), struje do 3600A
- Tipične radne učestanosti do 20 kHz



1700V/1200A

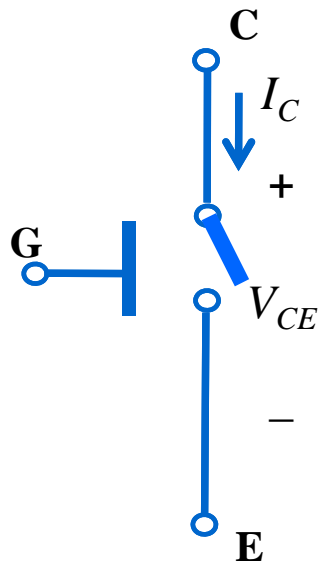


3300V/1200A IGBT moduli

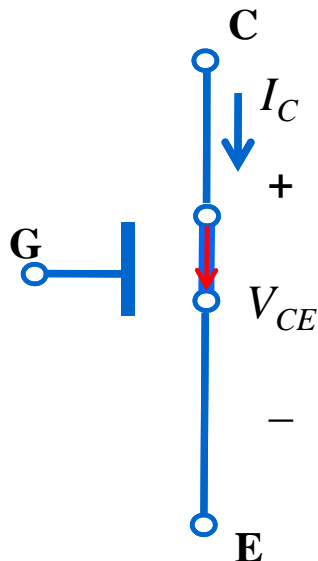


**Unutrašnjost 1200V/600A
Powerex IGBT modula**

IGBT kao IDEALNI prekidač



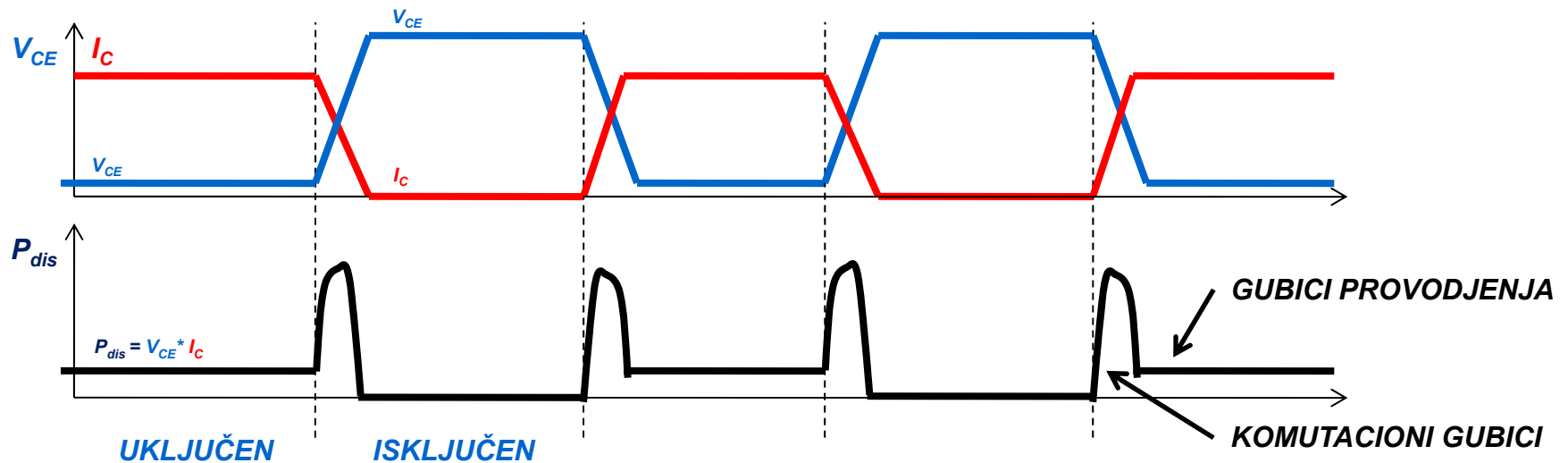
- Kada je prekidač **isključen** (uslov: $V_{GE} < V_T$)
Struja $I_C = 0$
Napon V_{CE} zavisi od ostatka kola
Disipacija na prekidaču $V_{CE} \cdot I_C = 0$



- Kada je prekidač **uključen** (uslov: $V_{GE} > V_T$)
Struja I_C zavisi od ostatka kola
Napon $V_{CE} = 0$
Disipacija na prekidaču $V_{CE} \cdot I_C = 0$

REALNI IGBT kao prekidač

- Kada je prekidač stalno **isključen** gubici se mogu zanemariti.
- Kada je prekidač stalno **uključen**, V_{CE} nije 0 pa postoje gubici provođenja $P_{dis} = V_{CE} \cdot I_C \neq 0$
 - Ova snaga zagreva prekidač sve vreme dok provodi !
- Pored ovih, postoje i **komutacioni gubici**.
- U trenutku promene stanja, promena V_{CE} i I_C nije trenutna.



- Komutacioni gubici se javljaju **pri svakoj promeni stanja**