

# ELEKTRIČNI PRETVARAČI SNAGE

**PREDAVANJE -1**

**POLUPROVODNIČKE KOMPONENTE**

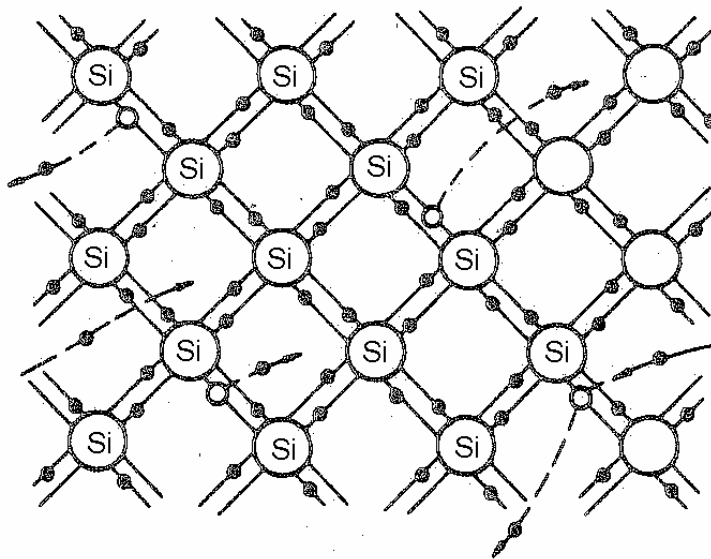
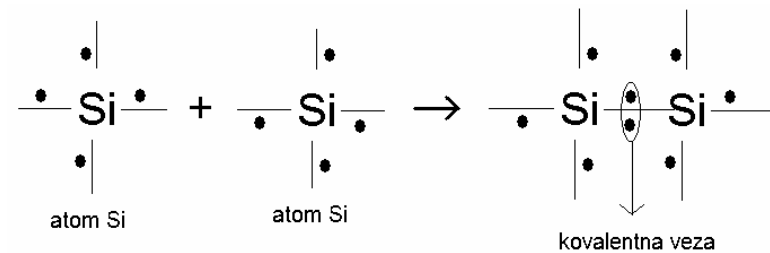
**PREDAVAČ: Dr Željko Despotović**



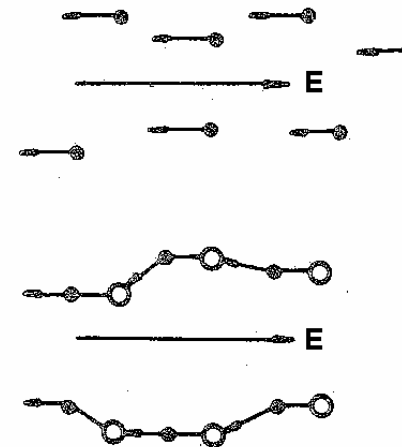
## OSNOVA POLUPROVODNIKA- MONOKRISTAL SILICIJUMA

**Si- četvorovalentan** el. konfiguracija zadnjeg nivoa :  $ns^2np^2$

KOVALENTNA VEZA-sparivanje elektrona



(a)



(b)

(a)-monokristal u odsustvu spoljnog električnog polja

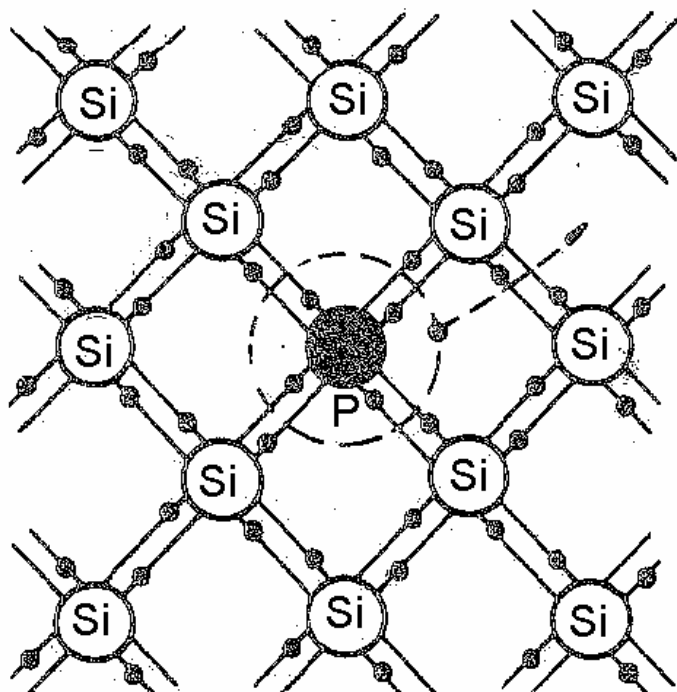
(b)-Dejstvo spoljnog električnog polja

## PRIMESNI POLUPROVODNICI

Fosfor-P petovalentan, el. konfiguracija  $ns^2np^3$

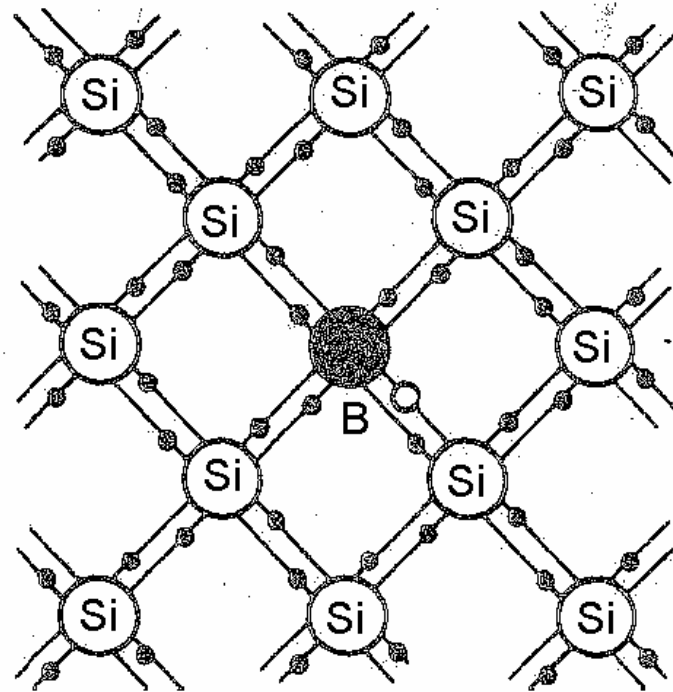
Bor-B trovalentan, el. konfiguracija  $ns^2np^1$

N-tip poluprovodnika



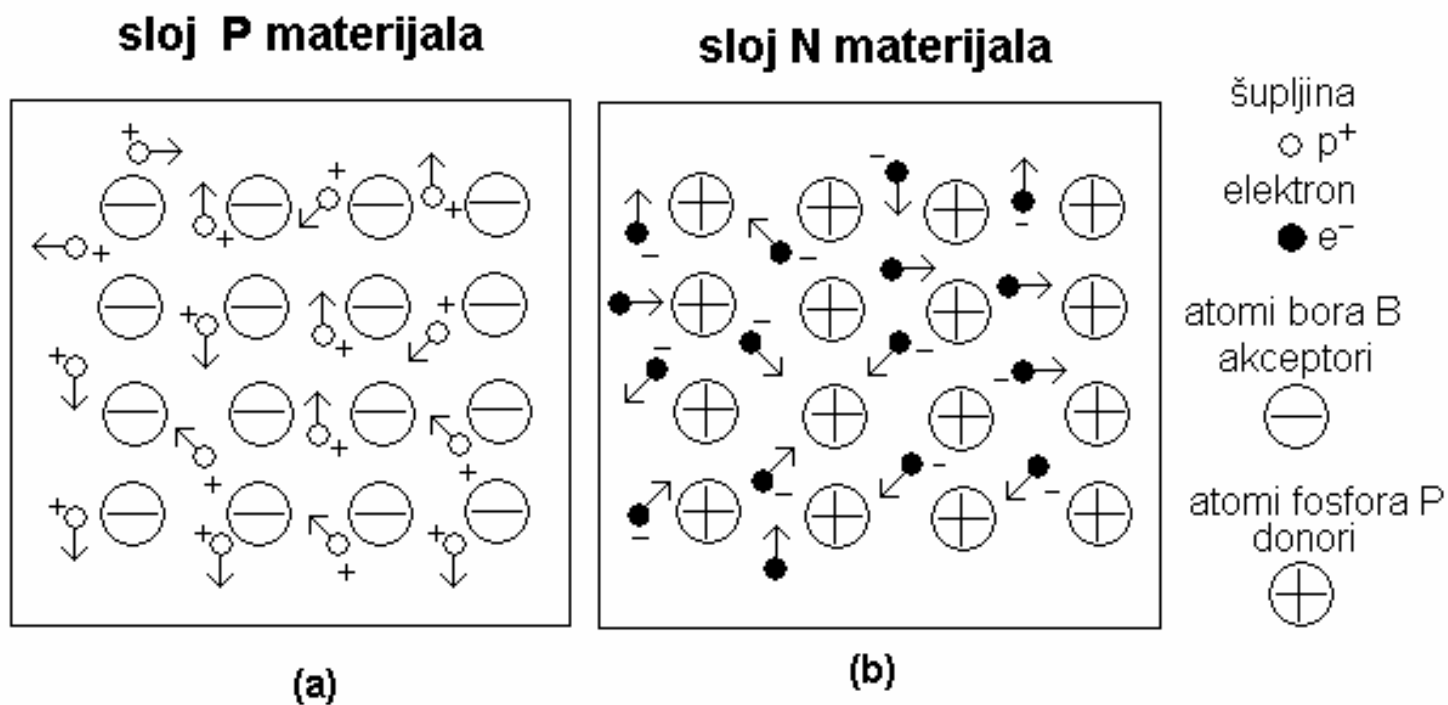
P-fosfor DONOR (+)

P-tip poluprovodnika



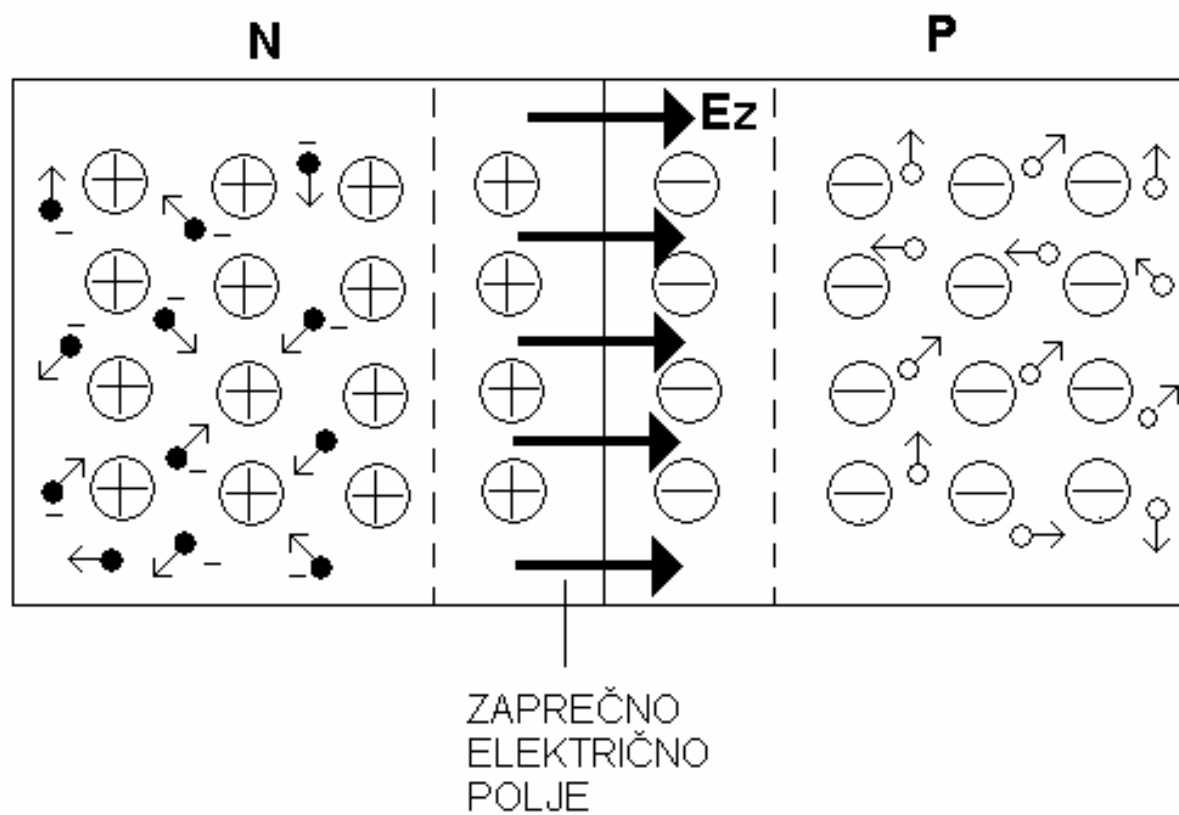
B-Bor AKCEPTOR (-)

## PREDSTAVE POLUPROVODNIKA P i N TIPa

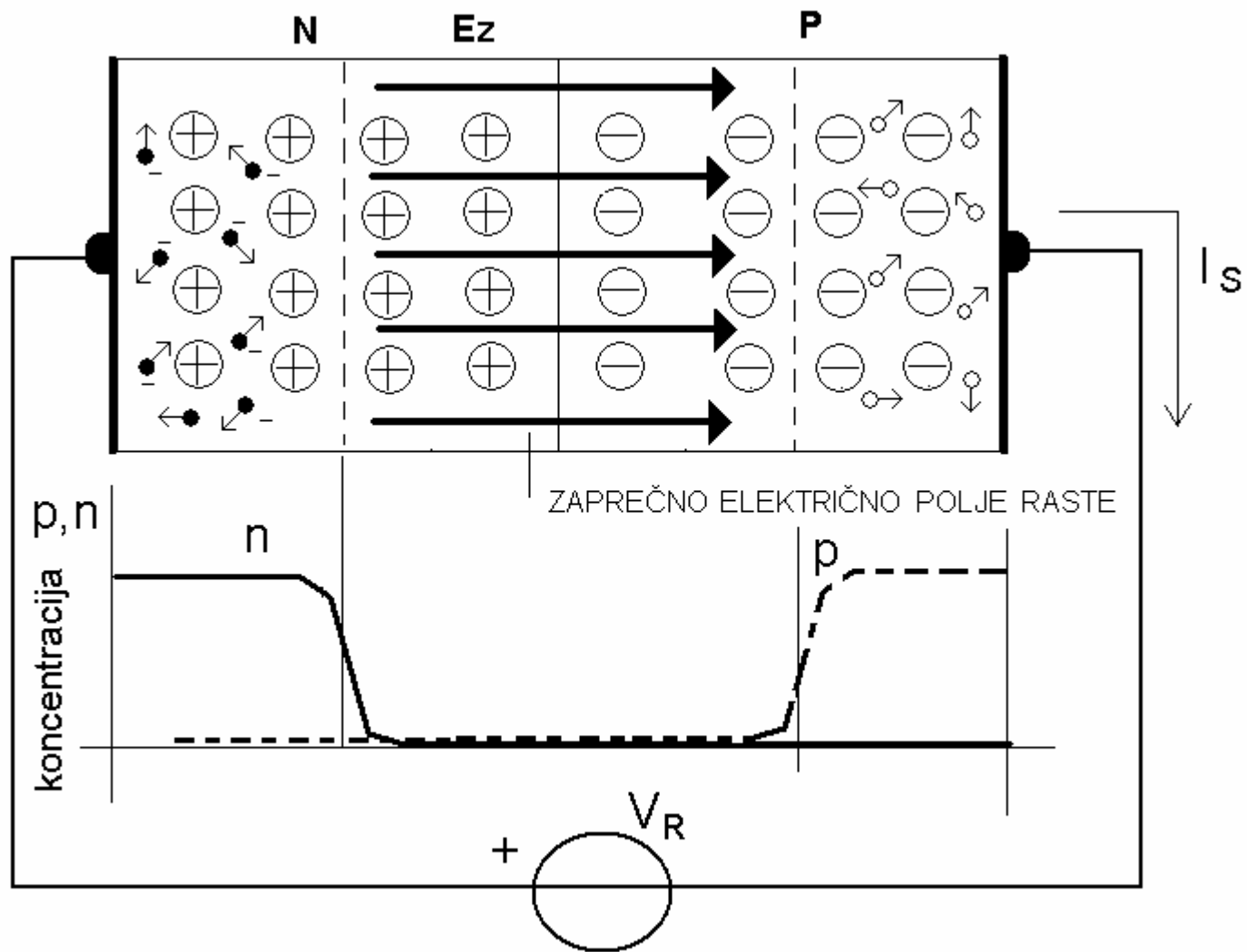


*Predstave poluprovodnika, (a)- P tip materijala , (b)-N tip materijala*

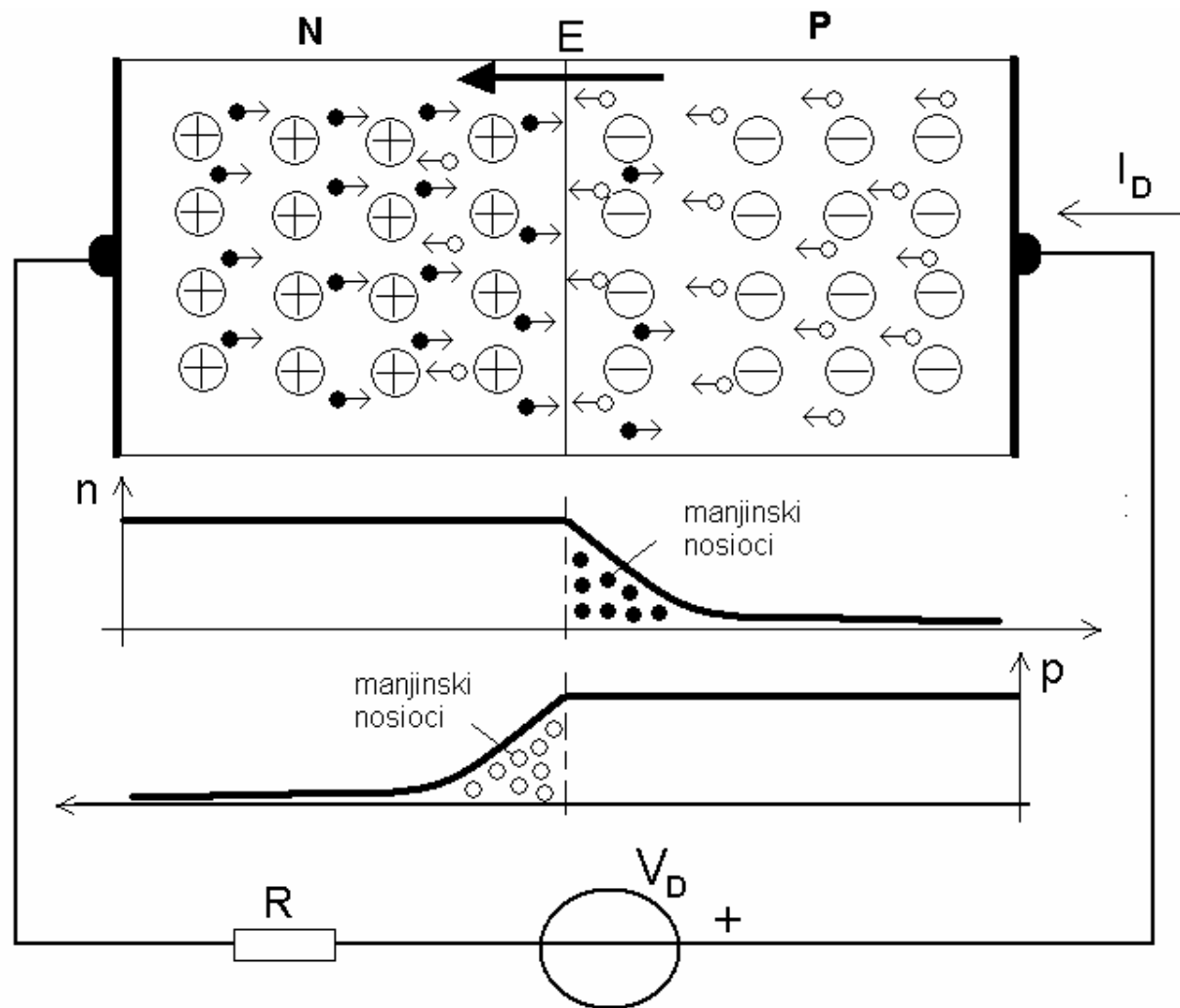
## P-N spoj bez polarizacije



# INVERZNO POLARISAN P-N SPOJ



## DIREKTNO POLARISAN P-N SPOJ



# MATEMATIČKE JEDNAČINE P-N SPOJA (DIODE)

$$V_D = \frac{\eta k T}{q} \cdot \ln \left[ \frac{I_D}{I_S} + 1 \right]$$

$$I_D = I_S \cdot \left[ e^{\frac{V_D}{\eta V_T}} - 1 \right] \quad V_T = \frac{kT}{q} \quad V_T = 26mV$$

$V_D$  - napon diode (V)

$I_D$  - struja diode (A)

$I_S$  - inverzna struja zasićenja diode (A)

$T$  - apsolutna temperature (K)

$q$  - elementarno naelektrisanje ( $1.602 \cdot 10^{-19} C$ )

$k$  - Bolcmanova konstanta ( $1.38 \cdot 10^{-23} J/K$ )

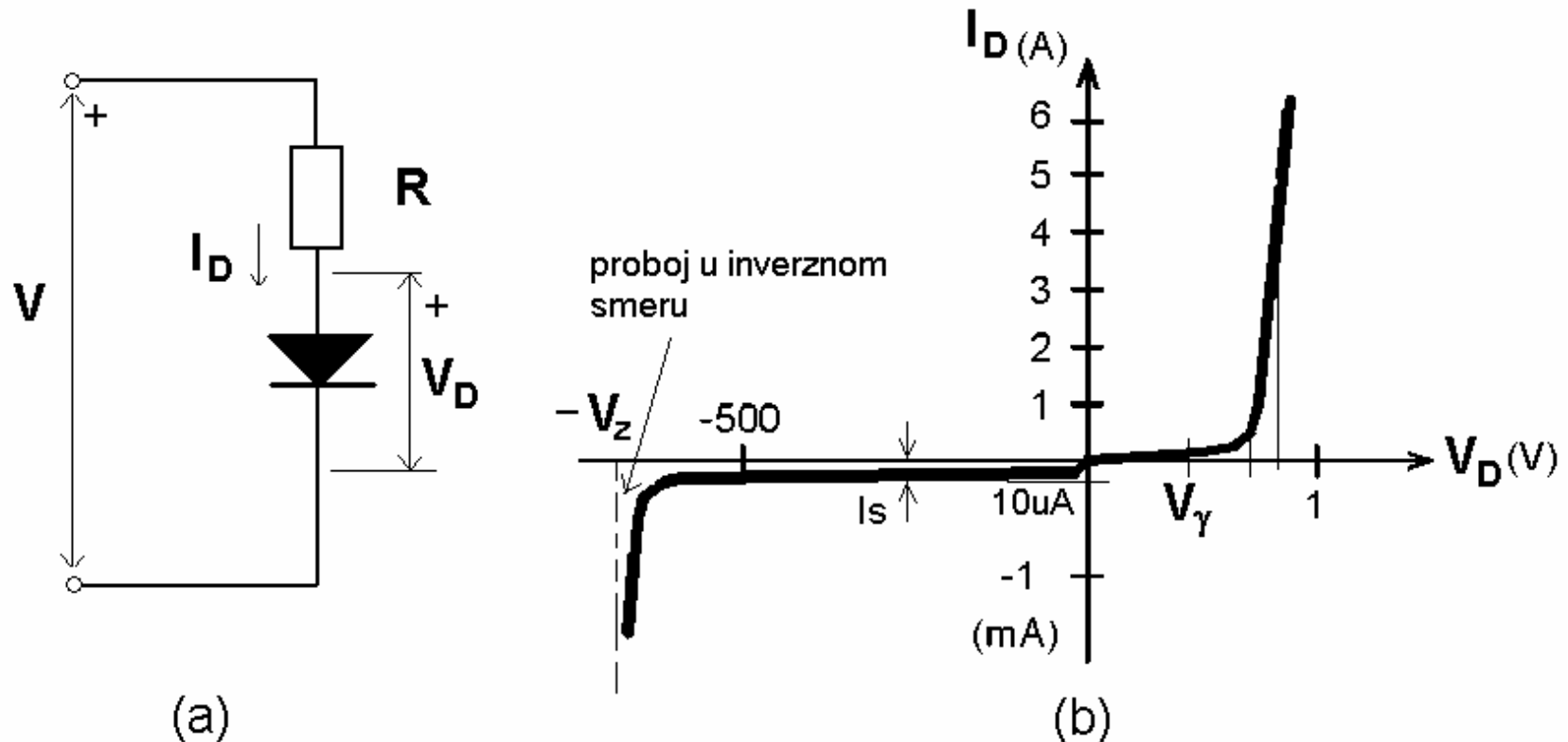
$\eta$  - koeficijent koji zavisi od tipa diode ( $\eta=1$  za Ge diode,  $\eta=2$  za Si diode).

Inverzna struja zasićenja jako zavisi od temperature

$$I_S(T) = I_S(T_1) \cdot 2^{\frac{T-T_1}{10}}$$

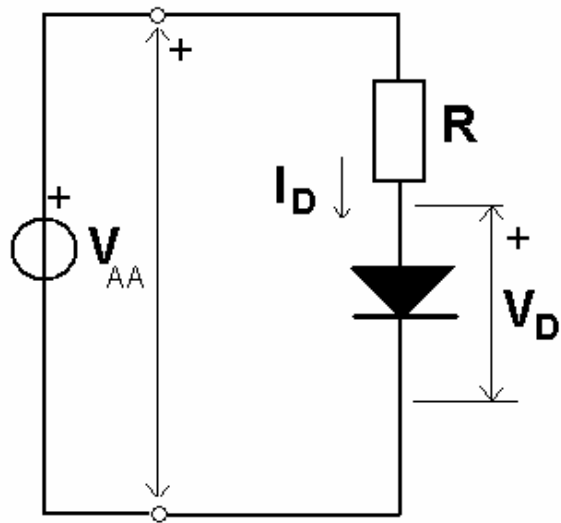


# STRUJNO-NAPONSKA KARAKTERISTIKA DIODE

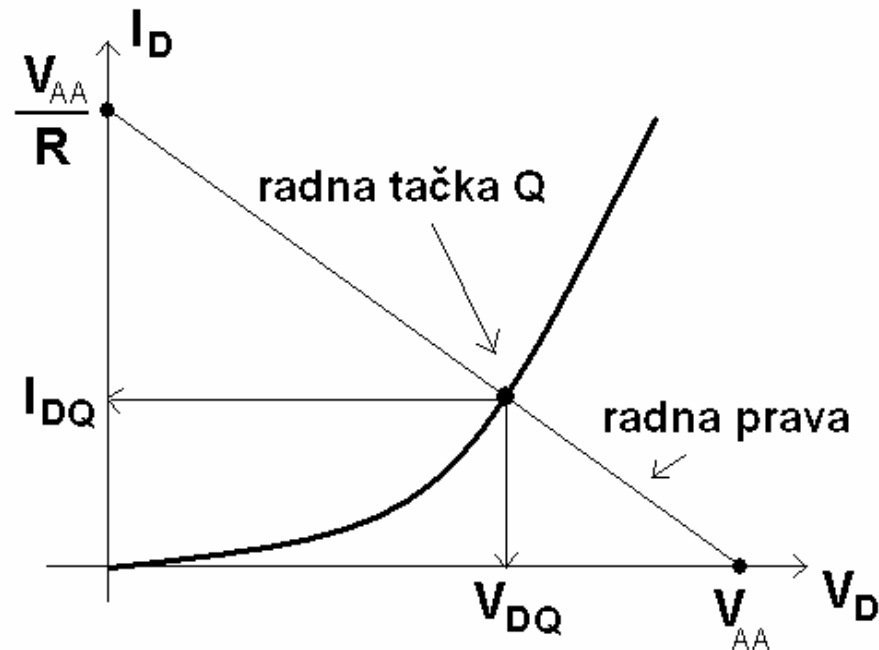


*Karakteristike diode, (a)-simbol i vezivanje u električnom kolu, (b)-strujno naponska karakteristika*

# KONCEPT RADNE PRAVE



(a)



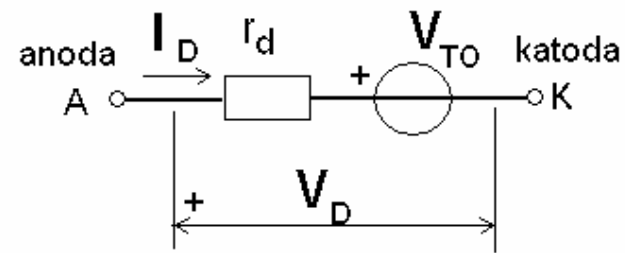
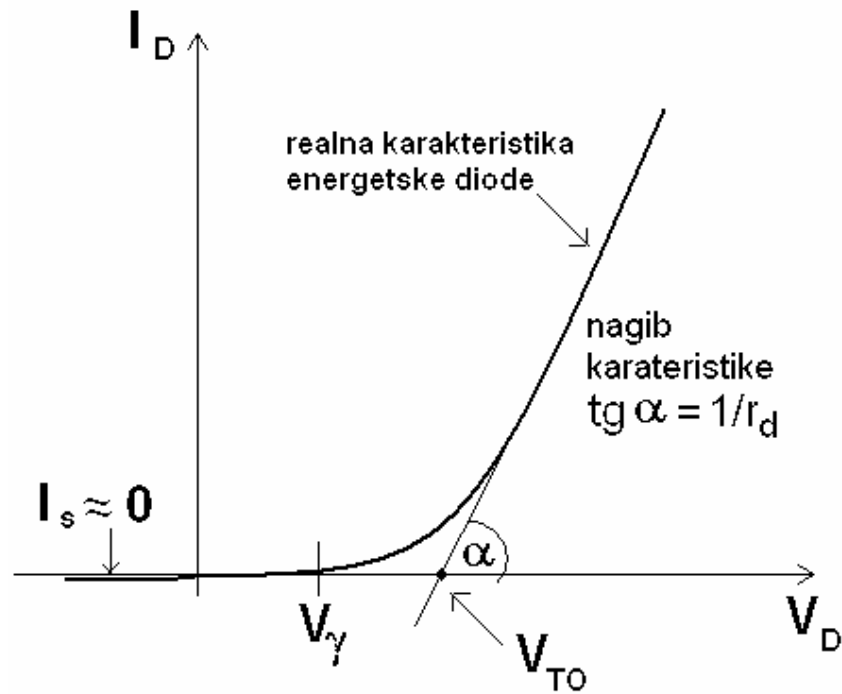
(b)

$$+V_{AA} - RI_D - V_D = 0$$

$$I_D = \frac{V_{AA} - V_D}{R}$$

*Kako predstaviti diodu za velike signale, a da se ne koristi nepraktični eksponencijalni model volt-amperske karakteristike, ili grafički koncept radne prave?*

## MODEL DIODE ZA VELIKE SIGNALS-direktno polarisana dioda



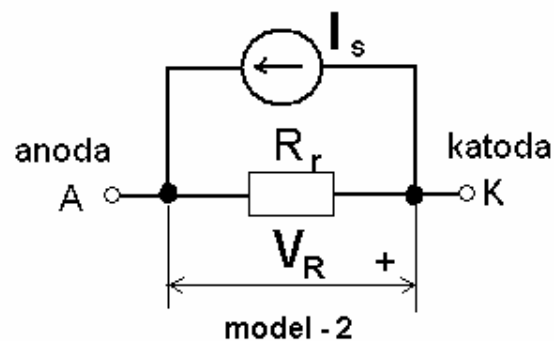
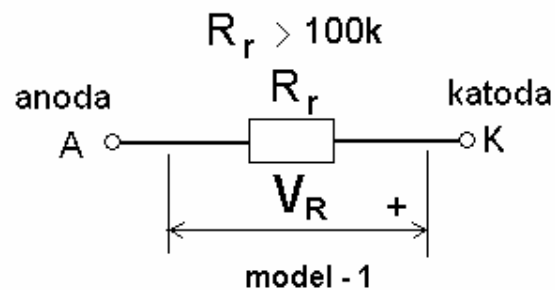
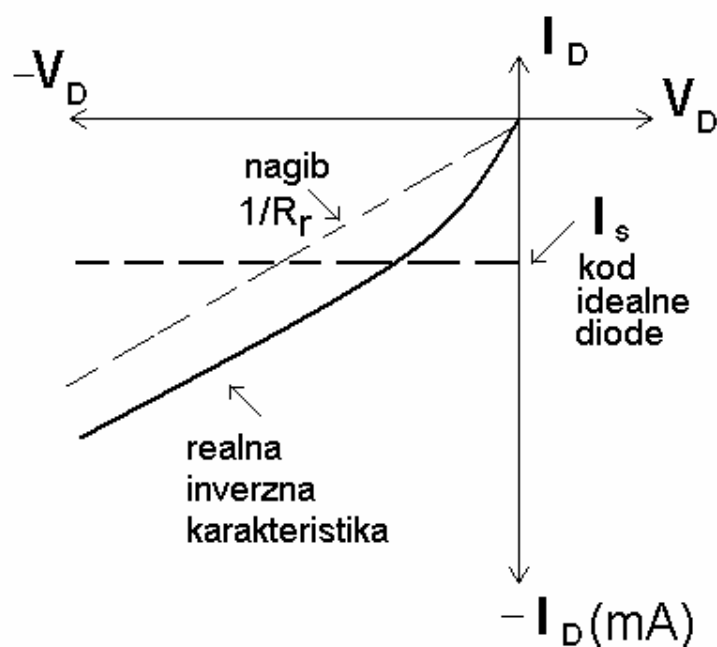
$$V_D = V_{TO} + r_d I_D$$

$$V_\gamma \approx 0.6V$$

$$V_{TO} \approx 0.9V.$$

$$V_D = V_{TO} + r_d \cdot I_D$$

# MODEL INVERZNO POLARISANE DIODE



Model-1  
 $R_r \geq 100k\Omega$

Model-2: blagi porast inverzne struje sa povećanjem inverznog napona zbog sekundarnih efekata u diodi

## Temperaturna zavisnost karakteristike diode

Parametri diode **prag provođenja** , odnosno **inverzna struja zasićenja** jako zavise od temperature.

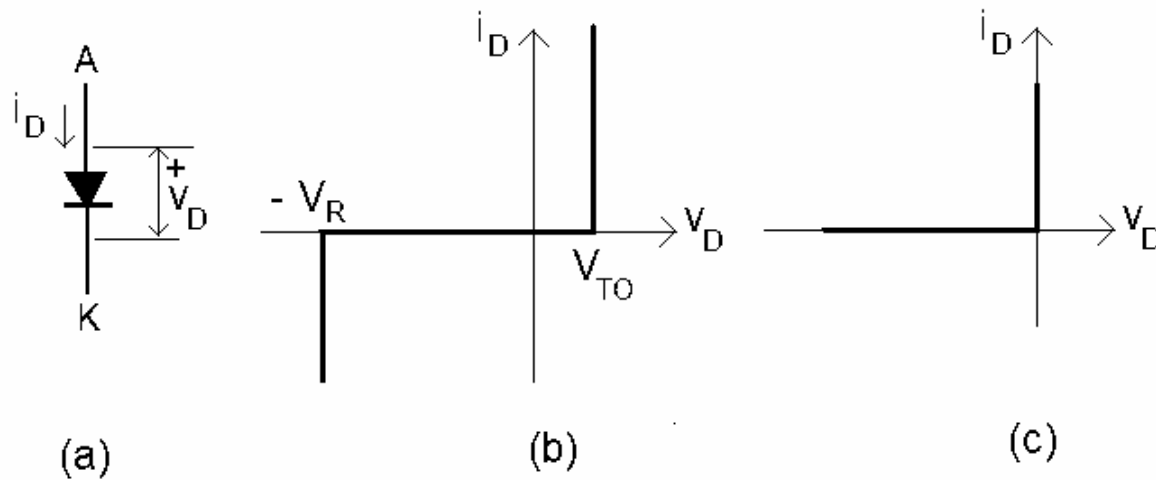
Teorijski **inverzna struja zasićenja** raste ako temperatura  $T$  raste za  $8\% / ^\circ\text{C}$  (praktično  $7\% / ^\circ\text{C}$ ), **odnosno poraste dva puta za svakih  $10^\circ\text{C}$**

Ako je struja diode konstanta, napon na direktno polarisanoj diodi-**prag opada sa porastom temperature.**

Pri tom je temperaturni gradijent napona za Si

$$\frac{dV_\gamma}{dT} \cong -2.2\text{mV}/^\circ\text{C}$$

## IDEALIZOVANE KARAKTERISTIKE DIODA



*Idealizovane karakteristike dioda, (a)-referentni smerovi,  
(b)-model 1, (c)-model 2*

$$\begin{aligned}
 v_D > V_{TO} &\Rightarrow i_D \in (0, +\infty) \\
 V_{TO} \geq v_D \geq -V_R &\Rightarrow i_D = 0 \\
 v_D < -V_R &\Rightarrow i_D \in (0, -\infty)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 v_D = 0 &\Rightarrow i_D \in (0, +\infty) \\
 i_D = 0 &\Rightarrow v_D \in (0, -\infty)
 \end{aligned}$$

# KATALOŠKI PARAMETRI ENERGETSKIH DIODA

## INVERZNI NAPONI

$V_{RSM}$  *Neponovljivi vršni inverzni napon* (može povremeno da se javi na diodi; ako se često javlja degradirajuće karakteristike diode; često se u katalogima sreće i oznaka  $V_{DSM}$ )

$V_{RRM}$  *Ponovljivi vršni inverzni napon* (može se uzastopno primenjivati bez oštećenja diode; često se u katalogima sreće i oznaka  $V_{DRM}$ )

$V_{(BR)R}$  *Probojni napon pri inverznoj polarizaciji*; dioda ulazi u proboj i može biti uništena; normalno se u eksploataciji energetske diode ova vrednost nikada ne postiže

## KATALOŠKI PARAMETRI ENERGETSKIH DIODA

### STRUJE

$I_{FAV}$     *Nazivna srednja vrednost struje vođenja*     $I_{FAV} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T i_F(t) \cdot dt$

Ova jednačina važi za bilo koji talasni oblik struje. Ne sme da se prekorači ni pri najpovoljnijim uslovima hlađenja

Alternativne oznake     $I_{TAV}, I_{DAV}$

$I_{FRMS}$     *Nazivna efektivna vrednost struje vođenja*     $I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T i_F^2(t) \cdot dt}$

$I_{SM}$     *Udarne struja u stanju vođenja*

maksimalna vršna vrednost jedne polovine sinusnog talasa  
udarne struje (pri kratkom spoju) u trajanju od 10ms



## KATALOŠKI PARAMETRI ENERGETSKIH DIODA

TOPLOTNI IMPULS DIODE  $I^2 \cdot t$

Ova veličina služi pri izboru odgovarajućih ultrabrzih osigurača (tip R) za zaštitu dioda od oštećenja usled prevelikih struja kratkih spojeva

$$(I^2 \cdot t)_{diode} = A_{diode} = \int_0^T i_D^2 \cdot dt$$

$$(I^2 \cdot t)_{diode} \geq (I^2 \cdot t)_{ultrabrzog-osig}$$

$$(I^2 \cdot t)_{diode} = 2(I^2 \cdot t)_{ultrabrzog-osig}$$

## KAPACITIVNOSTI U DIODI

Dok se dioda nalazi u stanju vođenja, oko P-N spoja se nalazi nagomilano dodatno naelektrisanje.

Ubrizgani nosioci naelektrisanja se šire u prostor gde je njihova koncentracija manja

$$Q_D = I_D \cdot \tau \quad \text{Difuziono naelektrisanje}$$

$I_D$  struja kroz P-N spoj

$\tau$  srednje vreme života nosilaca naelektrisanja dok se ne rekombinuju

$$\text{Difuzioni kapacitet} \quad C_D = \frac{dQ_D}{dV_D} \quad C_D = \frac{\tau \cdot I_D}{\eta V_T}$$

**zaključak:** dok dioda (P-N spoj) vodi, u njoj se nalazi nagomilano neko naelektrisanje

## KAPACITIVNOSTI U DIODI

Inverzno polarisan P-N spoj

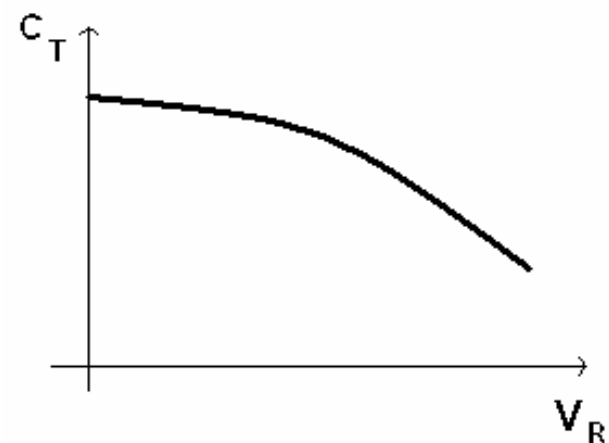
*kapacitivnost prostornog tovara*

$$C_T = \frac{C_{TO}}{\sqrt[3]{1 + \frac{V_R}{\psi_o}}}$$

$C_{TO}$  kapacitet pri naponu 0V

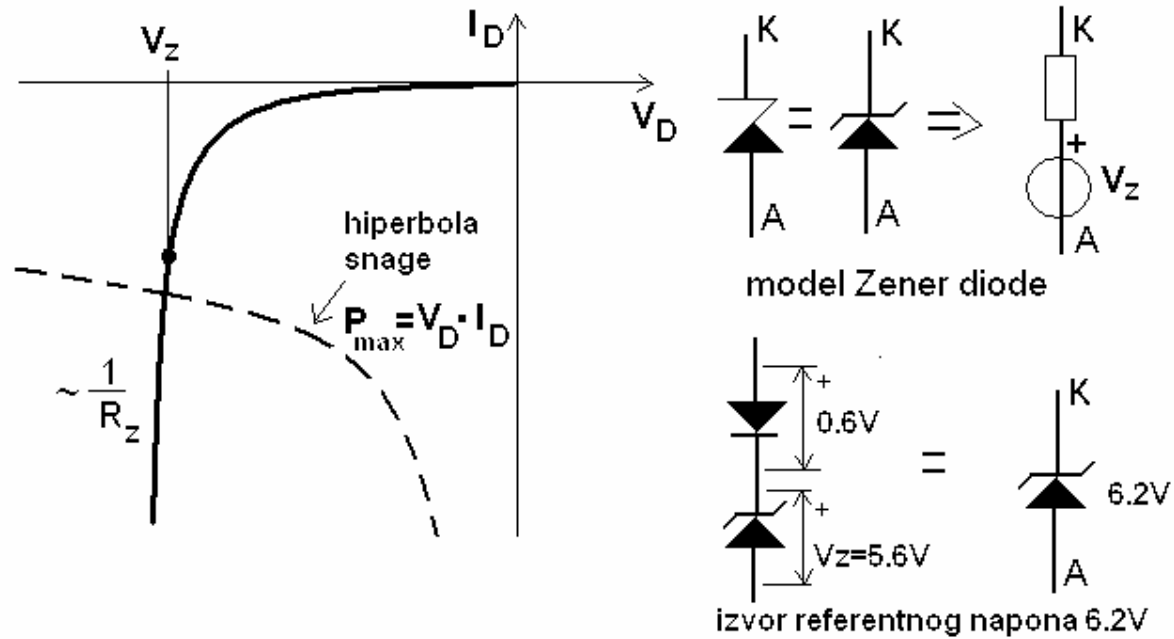
$V_R$  napon inverzne polarizacije

$\psi_o$  ugrađeni napon skokovitog P-N spoja (visina potencijalne barijere)

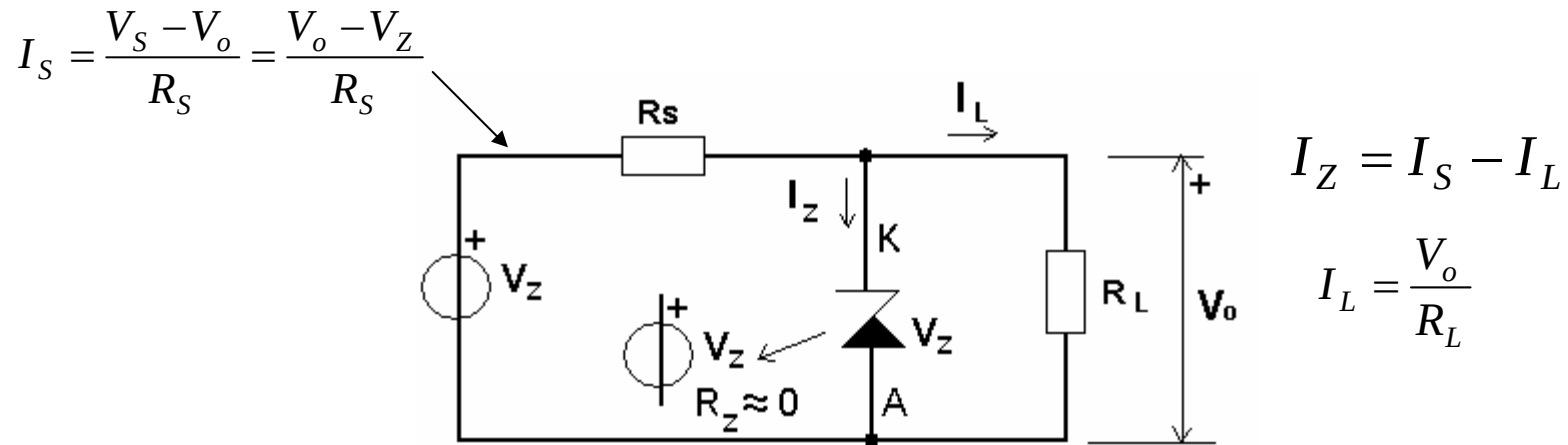


**zaključak:** *svaki inverzno polarisan P-N spoj poseduje neki kapacitet*

# PROBOJNE DIODE – Zener diode



## PROST STABILIZATOR NAPONA



$$I_Z > I_{Z \min}$$

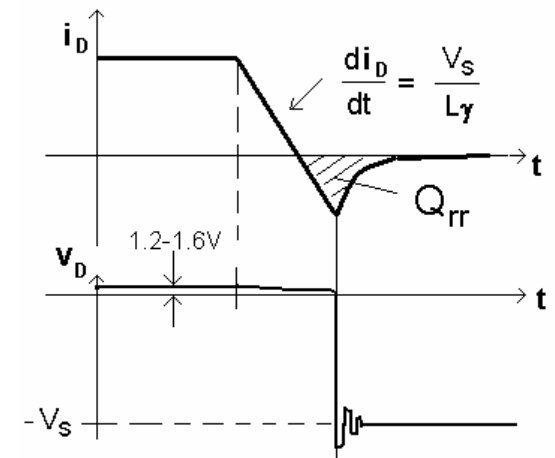
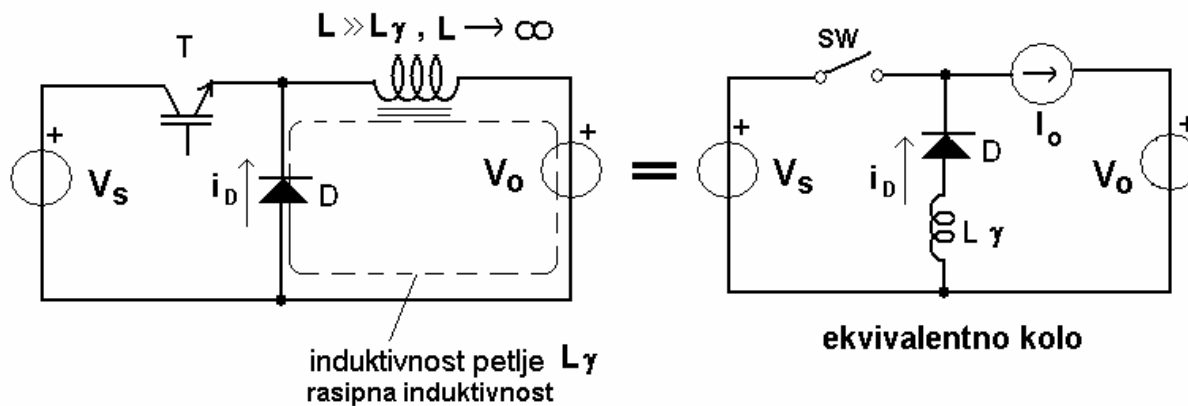
$$I_Z = \frac{V_S - V_Z}{R_S} - \frac{V_Z}{R_L}$$

uslov da bi stabilizator napona radio:

$$\frac{V_S - V_Z}{R_S} - I_{Z \min} > \frac{V_Z}{R_L}$$

# BRZE DIODE

Ove diode se koriste kao **zamajne diode** u jednosmernim pretvaračima, kolima za prenaponsku zaštitu i sl. Glavna karakteristika im je da mogu veoma brzo da pređu iz provodnog u neprovodno stanje (kada se inverzno polarišu).



Brza dioda u kolu spuštača napona  $V_s > V_o$

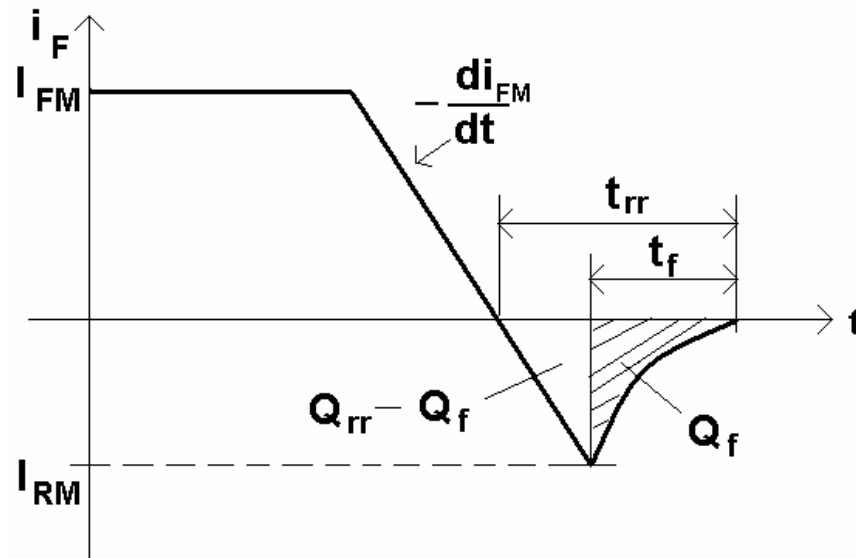
Povraćeno naelektrisanje  $Q_{rr}$

Vreme trajanja oporavka diode  $t_{rr}$

Inverzni oporavak brze diode

$$\frac{di_D}{dt} = \frac{V_s}{L_\gamma}$$

## POVRAĆENO NAELEKTRISANJE



vreme oporavka  $t_{rr}$

$$t_{rr} = g(I_{FM}, -\frac{di_F}{dt}, T)$$

$$Q_{rr} = f(I_{FM}, -\frac{di_F}{dt}, T)$$

$$t_{rr} = \frac{I_{RM}}{\left(-\frac{di_F}{dt}\right)} + t_f$$

$$I_{RM} \approx \frac{2Q_{rr}}{t_{rr}}$$

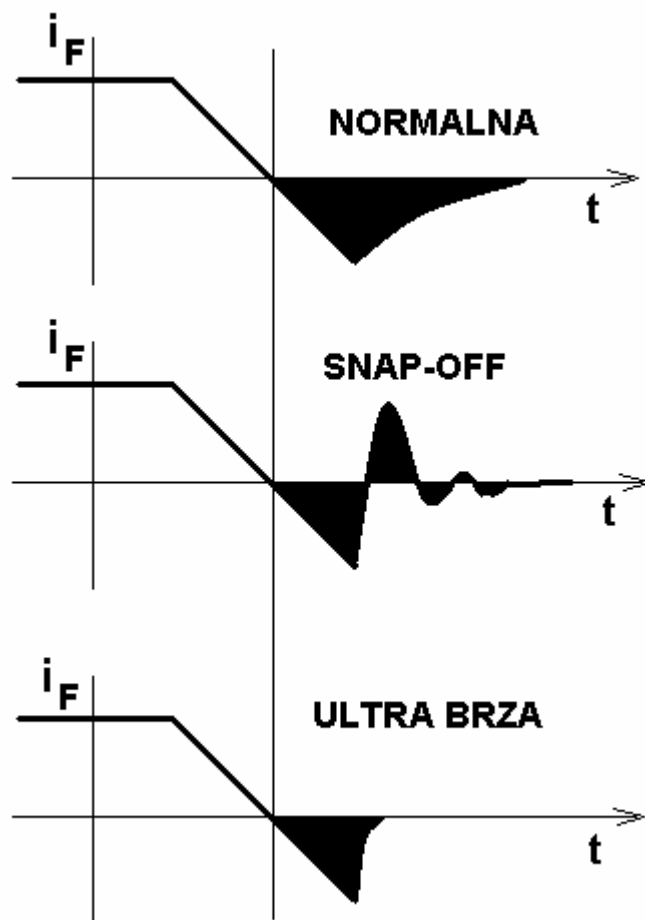
$$Q_f \approx \frac{I_{RM} t_f}{2}$$

$$t_{rr} = \frac{t_f}{2} + \sqrt{\frac{t_f^2}{4} + \frac{2Q_{rr}}{-\frac{di_F}{dt}}}$$

Disipirana energija u diodi u toku jednog gašenja

$$W_1 = Q_f \cdot V_R \approx (0.2 \dots 0.4) \cdot V_R \cdot Q_{rr}$$

## Tipovi brzih dioda prema talasnim oblicima struje oporavka



Dioda tipa *snap-off* je veoma brza dioda, ali zbog oscilatornog završetka procesa oporavka. Ova dioda se manje koristi u pretvaračima.

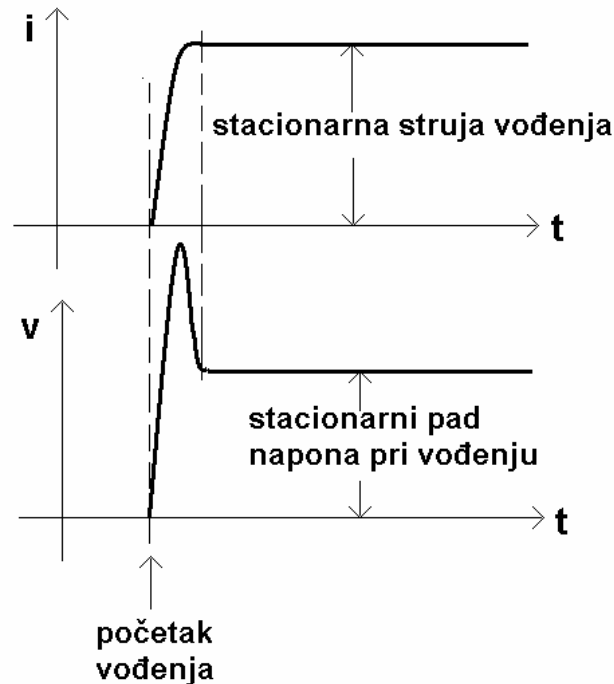
Ultrabrza dioda se preporučuje za korišćenje u visokofrekventnim pretvaračima

Postoje Šotki diode koje umesto P-N spoja imaju P-metal spoj. One u brže od najbržih dioda (pod uslovom da su od Si), imaju male probojne napone (50-100V) i mnogo velike inverzne struje zasićenja (2-10mA).

U poslednje vreme na tehnološkom tržištu poluprovodnika su se pojavile silicijum karbidne (SiC) diode koje rade na višim probojnim naponima.



## Brze diode pri prelasku iz stanja blokiranja u stanje vođenja



U neprovodnom stanju centralno područje oko P-N spoja je siromašno nosiocima naelektrisanja.

Kada se naponu izvora promeni polaritet, potrebno je konačno vreme da nosioci naelektrisanja stignu iz visoko-dopiranih područja do centralnog i da ga preplave.

**Zaključak:** otpor diode u početnim trenucima znatan, a pad napona na diodi je veći od stacionarnog

## Disipacija snage u brzim diodama

Ukupna snaga disipacije u energetske diodi

$$P_{TOT} = P_{FAV} + P_{RAV}$$

disipacije snage u provodnom stanju      disipacije snage u stanju inverzne polarizacije

PROVODNO STANJE:

Trenutna vrednost snage gubitaka usled vođenja  $p_F = (V_{TO} + r_d \cdot i_F) \cdot i_F$

Srednja vrednost snage gubitaka usled vođenja

$$P_{FAV} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T p_F(t) \cdot dt = \frac{1}{T} \cdot \left[ \int_0^T V_{TO} i_F dt + r_d \cdot \int_0^T i_F^2 dt \right]$$

$$P_{FAV} = V_{TO} \cdot I_{FAV} + r_d \cdot I_{FRMS}^2$$

## INVERZNA POLARIZACIJA

### GUBITCI

$$P_{RAV} = f \cdot V_R \cdot (Q_f + I_{RO} \cdot t_R)$$

$$t_R = T - t_p$$

$V_R$  - vršna vrednost inverznog napona pri oporavku diode

$Q_f$  - povraćeno naelektrisanje tokom vremena  $t_f$

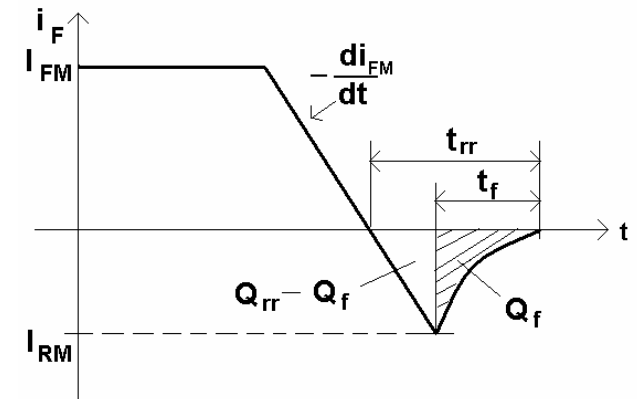
$I_{RO}$  - inverzna struja curenja ( $\approx 0$ , osim u slučaju Šotki dioda)

$f = 1/T$  - učestanost primenjenog inverznog napona na diodi

$T$  - perioda rada

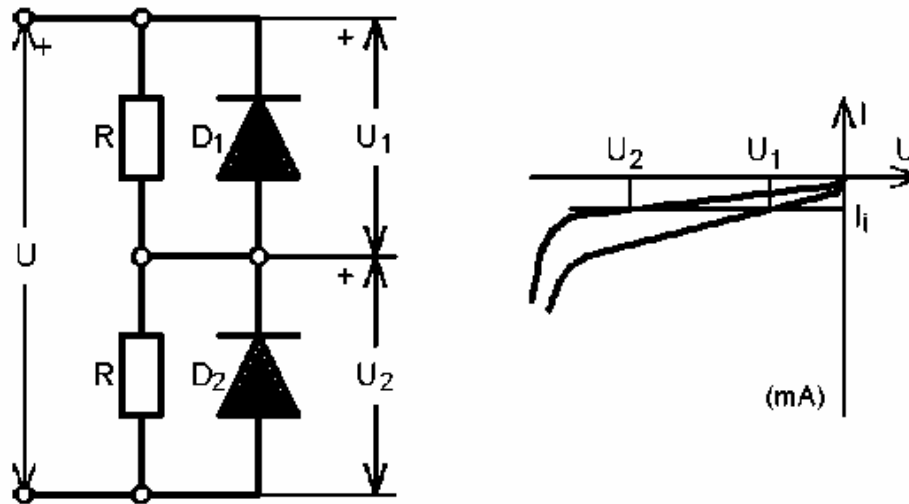
$t_R$  - vreme trajanja primenjenog inverznog napona  $V_R$  u toku periode rada

$t_p$  - vreme trajanja impulsa struje diode



$$Q_f = Q_{rr} - \frac{2Q_{rr}^2}{2(-\frac{di_F}{dt})} \approx (0.2 \dots 0.4) \cdot Q_{rr}$$

## Redno vezivanje dioda

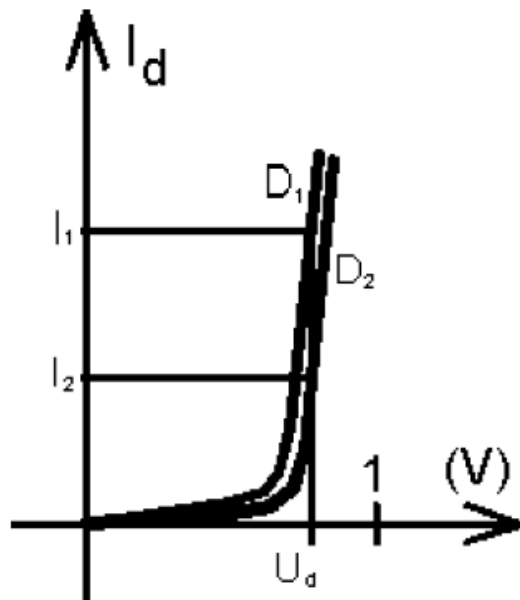


Diode se pri inverznoj polarizaciji ponašaju kao veoma velika otpornost (reda više  $M\Omega$ ). Zbog razlike u inverznih karakteristika dioda, ove otpornosti se mogu znatno razlikovati.

Ovaj problem se rešava paralelnim vezivanjem otpornika dovoljno visoke otpornosti da ne predstavlja problem njihovo zagrevanje, a opet i dovoljno niske, da se pravilno raspodele naponi na diodama

# PARALELNO VEZIVANJE DIODA

Paralelnim vezivanjem dioda postiže se rad sa višim direktnim strujama



U paralelnoj vezi imamo zajednički napon na diodama.

Zbog razlike karakteristika raspodela struja može biti veoma različita

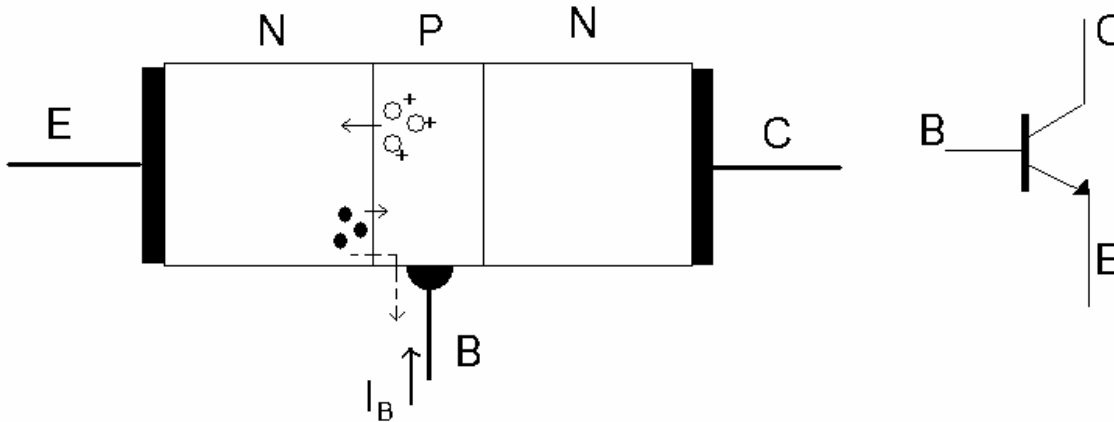
Problem bi se mogao rešiti vezivanjem malih otpornosti na red sa diodama, međutim zbog velikih gubitaka na otpornicima ta tehnika se samo delimično primenjuje

Rešenja:

- geometriji spojnih provodnika kojima se vezuju diode
- reaktanse u obliku pogodno oblikovanih spojnih vodova
- feritnih prstenova oko provodnika
- klasiranjem dioda prema direktnom padu napona

# Bipolarni tranzistori-BJT

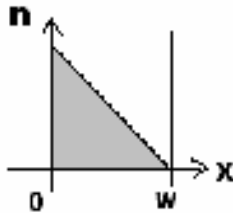
Bipolar Junction Transistor NPN ili PNP



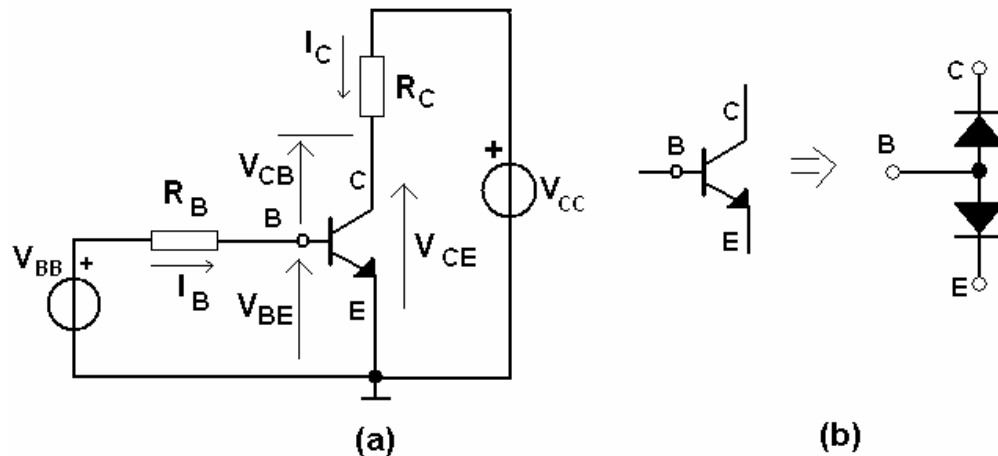
Tehnološki gledano, emitor je vrlo jako dopiran, baza nešto slabije, a kolektor dvojako - slabo u blizini BC spoja, a jače u blizini odvodne elektrode

Rad BJT-a zasniva se na injekciji naelektrisanja iz emitora u bazu

# OSNOVNI REŽIMI RADA TRANZISTORA

| REŽIM RADA | SPOJ E-B              | SPOJ C-B              | RASPODELA<br>KONCENTRACIJE<br>ELEKTRONA U<br>SLOJU BAZE                                                  |
|------------|-----------------------|-----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| AKTIVAN    | DIREKTNO<br>POLARISAN | INVERZNO<br>POLARISAN |  <p>W-širina baze</p> |
| ZAKOČEN    | INVERZNO<br>POLARISAN | INVERZNO<br>POLARISAN |                                                                                                          |
| ZASICE N   | DIREKTNO<br>POLARISAN | DIREKTNO<br>POLARISAN |                     |
| REVERZAN   | INVERZNO<br>POLARISAN | DIREKTNO<br>POLARISAN |                                                                                                          |

## BJT u režimu zasićenja



Osnovno kolo sa BJT, (a)-električna šema , (b)-električni simbol i njegov diodni ekvivalent

$$V_{CE} = V_{CC} - R_C I_C$$

$$I_B = \frac{V_{BB} - 0.7V}{R_B}$$

$$I_C = \beta \cdot I_B$$

Sa porastom struje baze , raste i struja kolektora , tako da u jednom trenutku napon B-E postaje

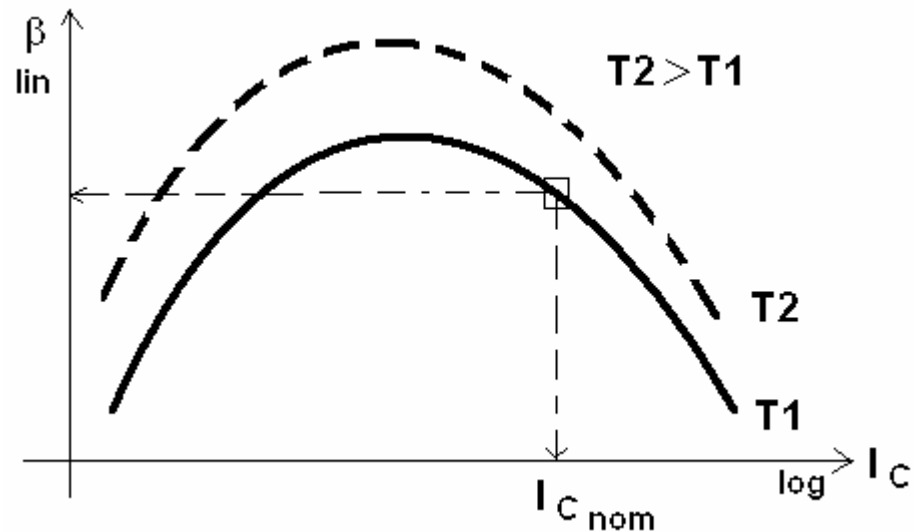
$$V_{BE} \geq V_{CC} - R_C I_C = V_{CC} - R_C \cdot \beta \cdot I_B$$

U tom slučaju spoj C-B postaje direktno polarisan i tranzistor ulazi u zasićenje



## Strujno pojačanje BJT

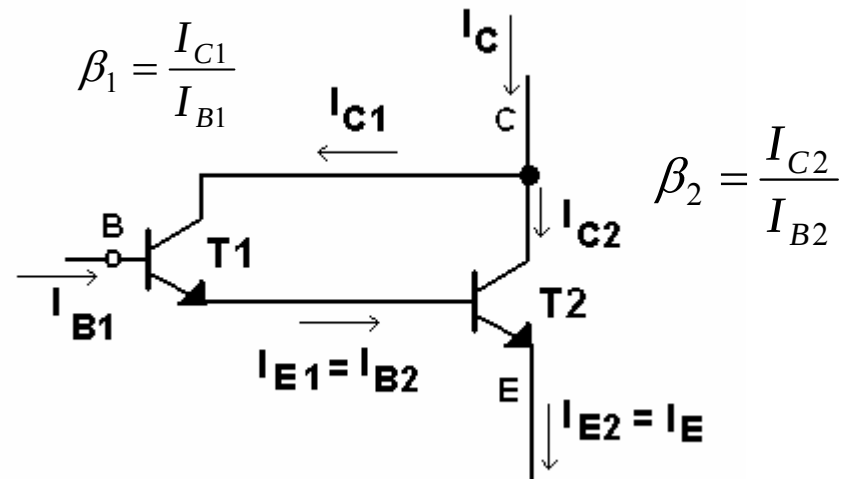
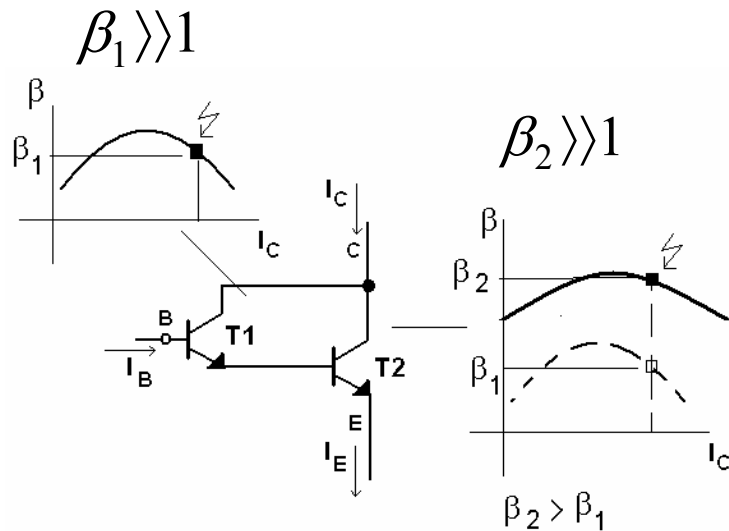
$$\beta = \frac{I_C}{I_B}$$



*Kako postići veće strujno pojačanje pri većim strujama?*

**Jedan od načina je korišćenje tranzistora u tzv. Dralington spoju**

## Darlington spoj BJT



$$I_{E1} = \beta_1 I_{B1} + I_{B1} = (\beta_1 + 1) \cdot I_{B1}$$

$$I_{E1} = I_{C1} + I_{B1}$$

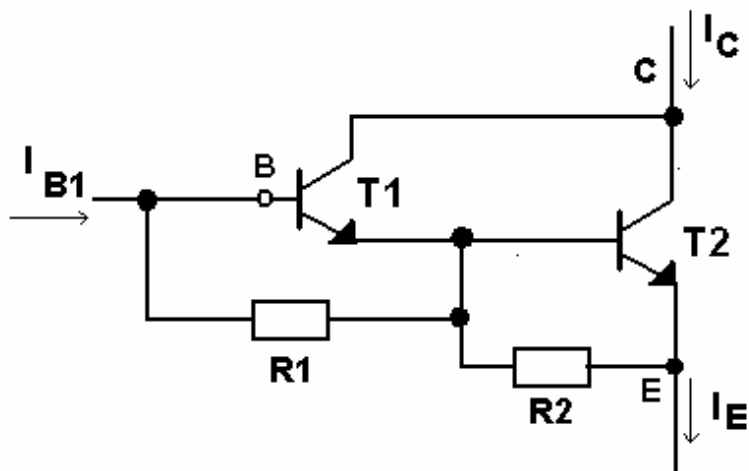
$$I_C = I_{C1} + I_{C2}$$

$$I_{E1} = I_{B2} \quad I_{C2} = \beta_2 (\beta_1 + 1) I_{B1}$$

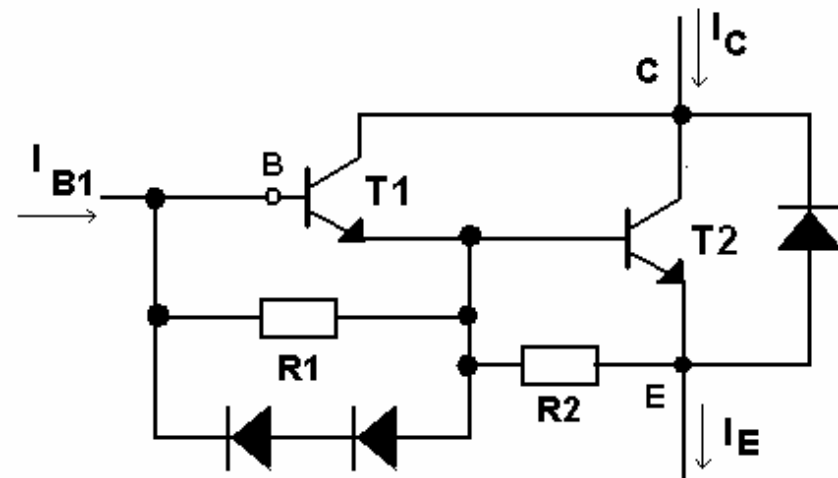
$$I_C = \beta_1 I_{B1} + \beta_2 (\beta_1 + 1) I_{B1}$$

$$\beta_D = \frac{I_C}{I_{B1}} \approx \beta_1 \beta_2$$

## Praktična realizacija Darlington sprege



(a)

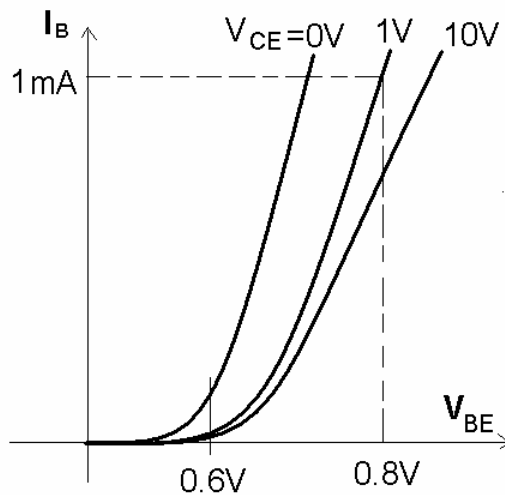


(b)

(a)-otpori za zatvaranje struja curenja, (b)-ubrzavanje gašenja.

## Statičke karakteristike BJT

### Ulazna statička karakteristika BJT



Ulazno kolo tranzistora (spoj B-E) je poluprovodnička dioda, pa su i statičke krive

$$I_B = I_B(V_{BE})$$

slične volt-amperskim krivama diode, ali je važan i uticaj parametra  $V_{CE}$

$$|V_{BE}| \gg |V_{CE}|$$

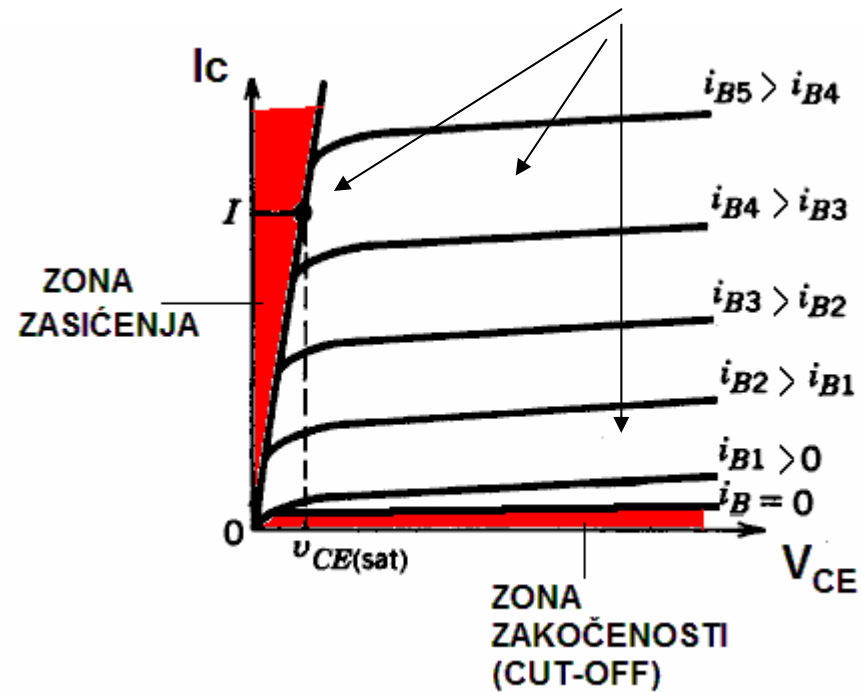
spoj BC je propusno je polarisan, što znači da i kolektor injektira naelektrisanje u bazu, te time dobijamo velike struje baze

$$|V_{BE}| \ll |V_{CE}|$$

spoj B-C polarisan je nepropusno, te  $I_B = I_B(V_{BE})$  slabo zavisi od  $V_{CE}$

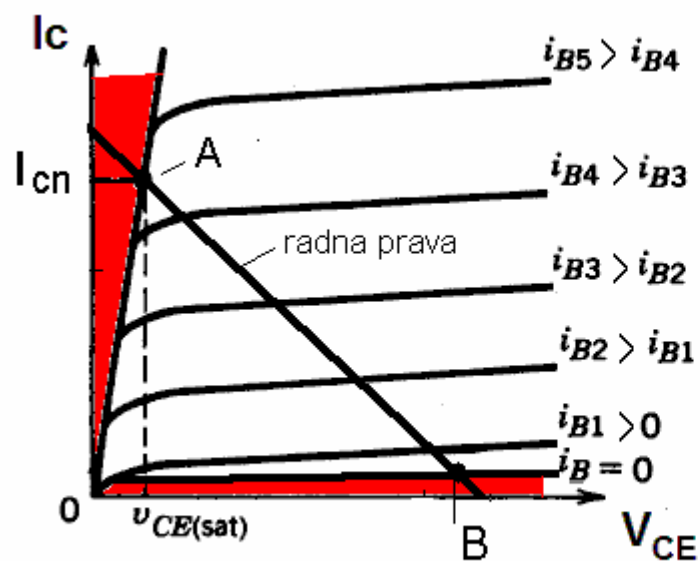
## Izlazne karakteristike BJT

zona aktivnog režima rada.



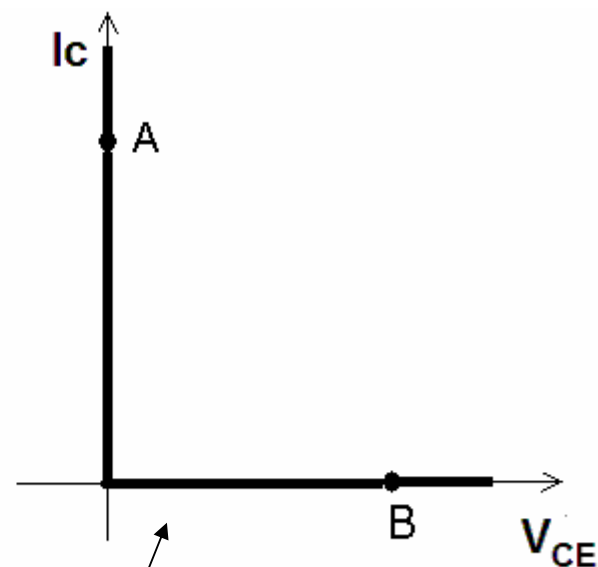
*Izlazna statička karakteristika BJT*

## PREKIDAČKA KARAKTERISTIKA BJT



(a)

(a)-realna,



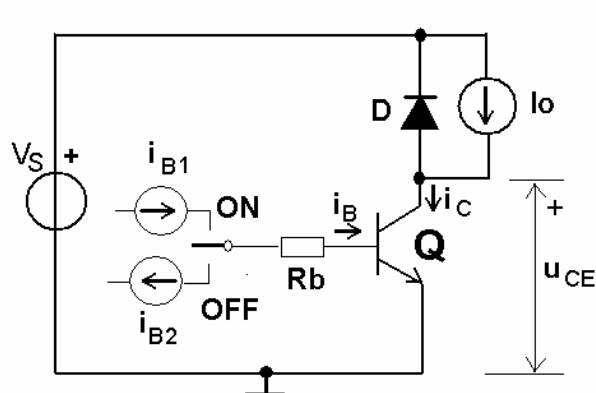
(b)

(b)-idealna

$$I_C > 0 \Rightarrow V_{CE} = 0$$

$$V_{CE} > 0 \Rightarrow I_C = 0$$

# Analiza prekidačkog režima BJT (UKLJUČENJE)



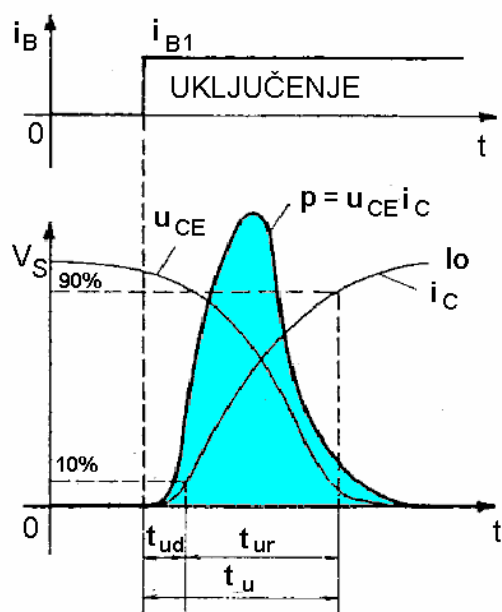
U STANJU VOĐENJA

$$u_{CE} = u_{CE(SAT)}$$

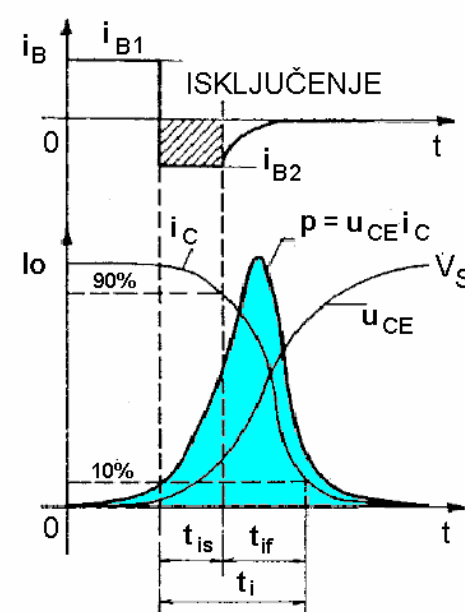
$$i_C = i_o$$

$$p = u_{CE} i_C = u_{CE(SAT)} \cdot i_o$$

(a)



(b)



(c)

(a)-prekidačko kolo, (b)-uključenje, (c)-isključenje

$t_{ud}$  vreme kašnjenja (*delay time*)

U toku ovog vremena se puni kapacitet spoja B-E, pa je ovo vreme određeno strujom punjenja i veličinom datog kapaciteta  $C_{BE}$

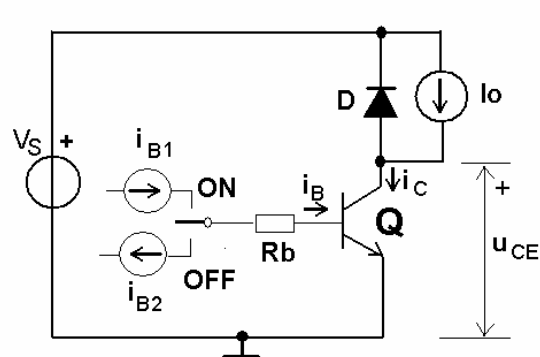
$t_{ur}$  vreme porasta struje pri uključenju (*rising time*)

Ovo vreme je upravo potrebno da manjinski nosioci na putu kroz bazu stignu do kolektorskog spoja

U toku ovog vremena dakle dolazi do akumulacije manjinskih nosilaca u bazi i do porasta njihovog gradijenta koncentracije, pa tako i raste struja kolektora do svoje ustaljene vrednosti

$t_u$  vreme uključenja =  $t_{ud} + t_{ur}$

# Analiza prekidačkog režima BJT (ISKLUČENJE)



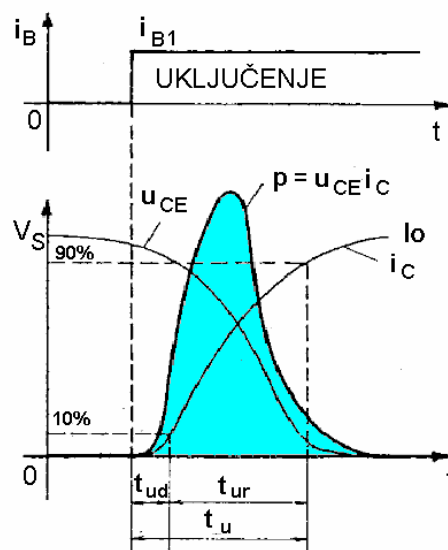
U STANJU VOĐENJA

$$u_{CE} = u_{CE(SAT)}$$

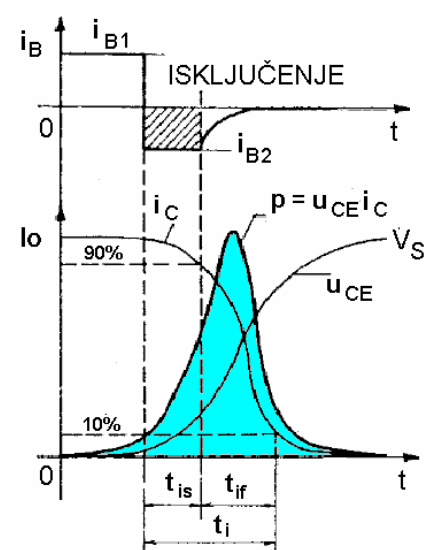
$$i_C = i_o$$

$$p = u_{CE} i_C = u_{CE(SAT)} \cdot i_o$$

(a)



(b)



(c)

(a)-prekidačko kolo, (b)-uključenje, (c)-isključenje

$t_{is}$  -vreme nagomilavanja (*storage time*)

U ovom intervalu dolazi do evakuacije nagomilanih akumuliranih naelektrisanja. Obično se u ovom intervalu vrši prvo rasterećenje baze odvođenjem viška nosilaca naelektrisanja.

$t_{if}$  -vreme opadanja (*fall time*)

Nakon evakuacije viška nosilaca naelektrisanja se menja gradijent manjinskih nosilaca, odnosno sa njegovim padom opada i struja kolektora. Drugim rečima bazno područje se skuplja do svojih metalurških granica

$$t_i \text{ vreme isključenja} = t_{is} + t_{if}$$



U režimu vođenja (*on-state*)

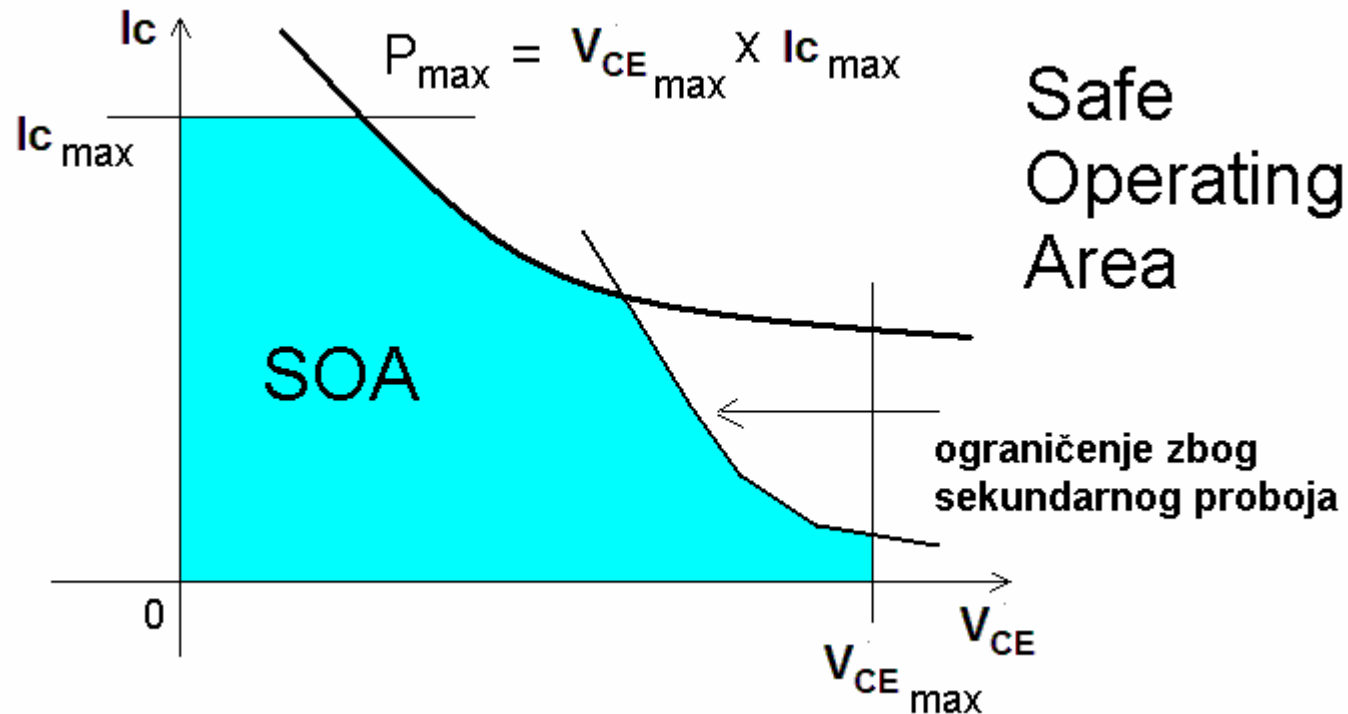
napon na spoju C-E je jednak  $u_{CE(SAT)}$

struja kolektora  $I_C = I_o$

**Snaga gubitaka u ovom slučaju je jednaka**

$$P_{ON} = u_{CE(SAT)} \cdot I_o$$

## OBLAST SIGURNOG (BEZBEDNOG RADA TRANZISTORA)



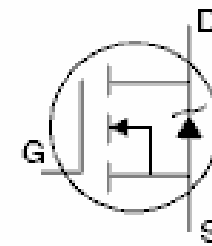
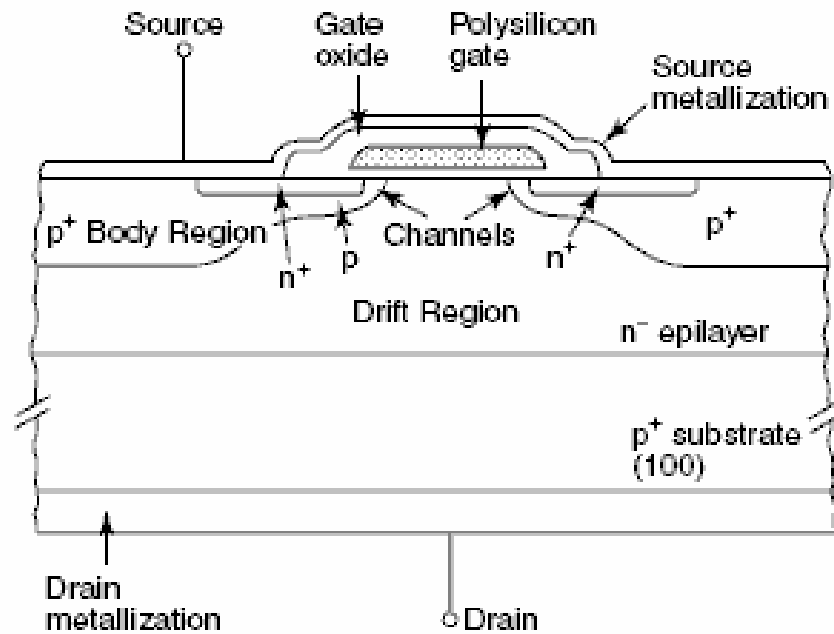
Oblast dozvoljenog rada BJT odnosno SOA (*Safe Operating Area*)

Ograničenja maksimalne snage disipacije

Ograničenje zbog sekundarnog proboja

(kada dolazi do lokalnog fokusiranja struje i uništenja kolektorskog spoja)

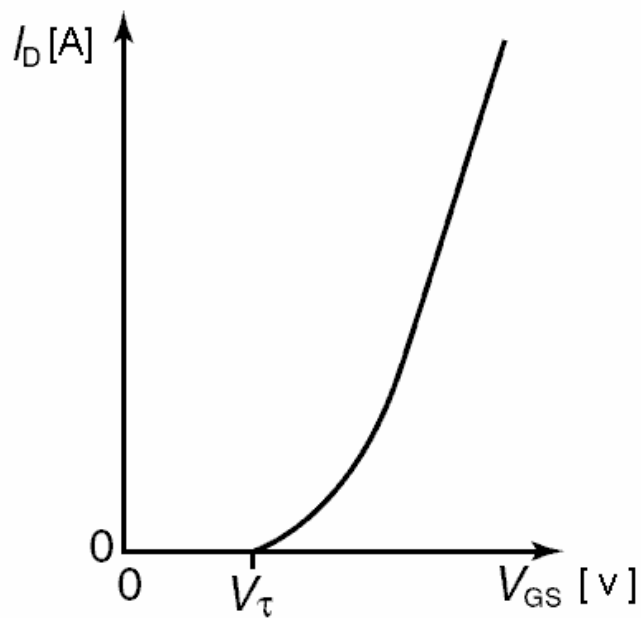
# MOSFET- tranzistori



SIMBOL

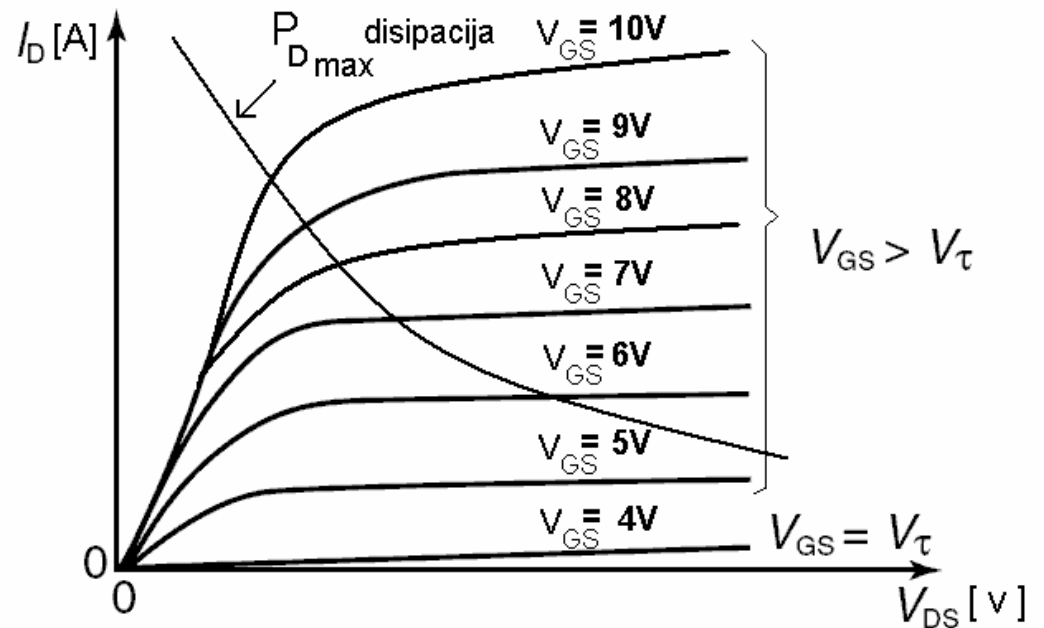
# STRUKTURA N-KANALNOG MOSFET-a

# KARAKTERISTIKE MOSFET-a



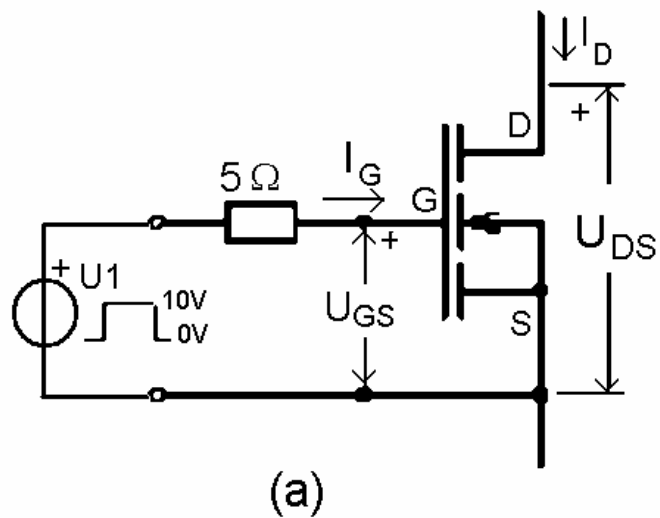
(a)

(a)-ulazna karakteristika,

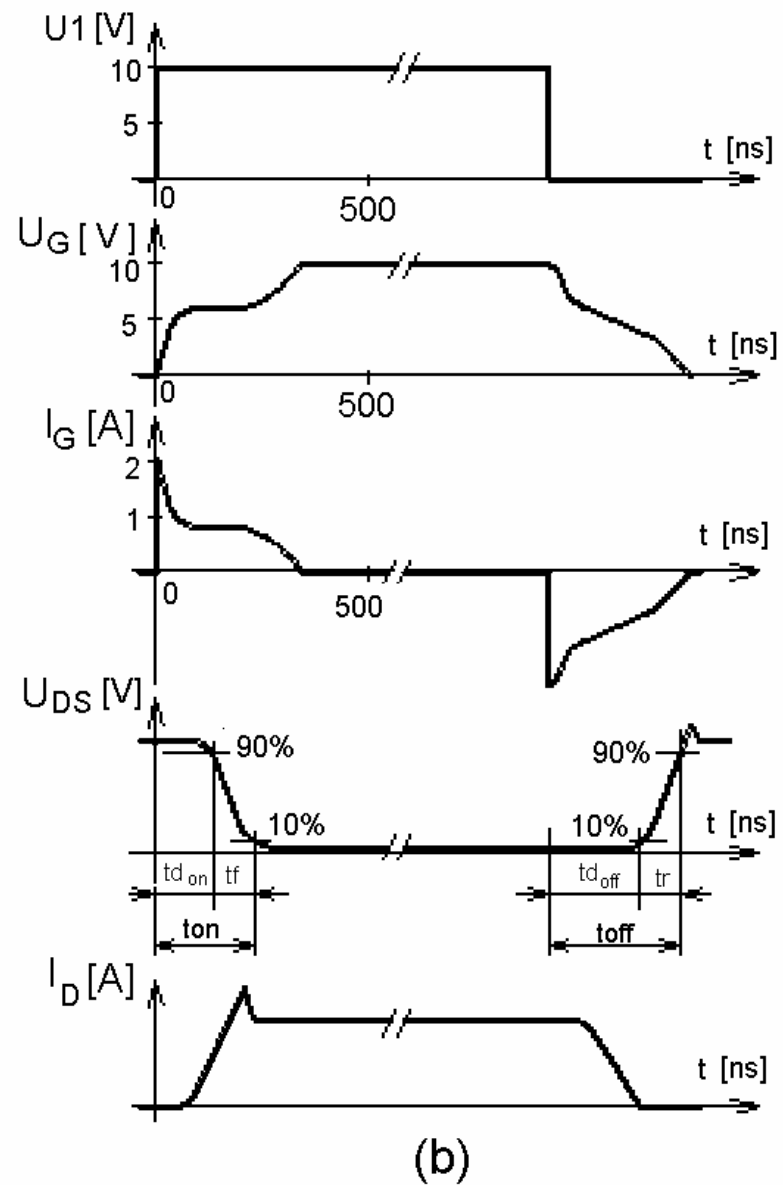


(b)

b)-izlazna karakteristika

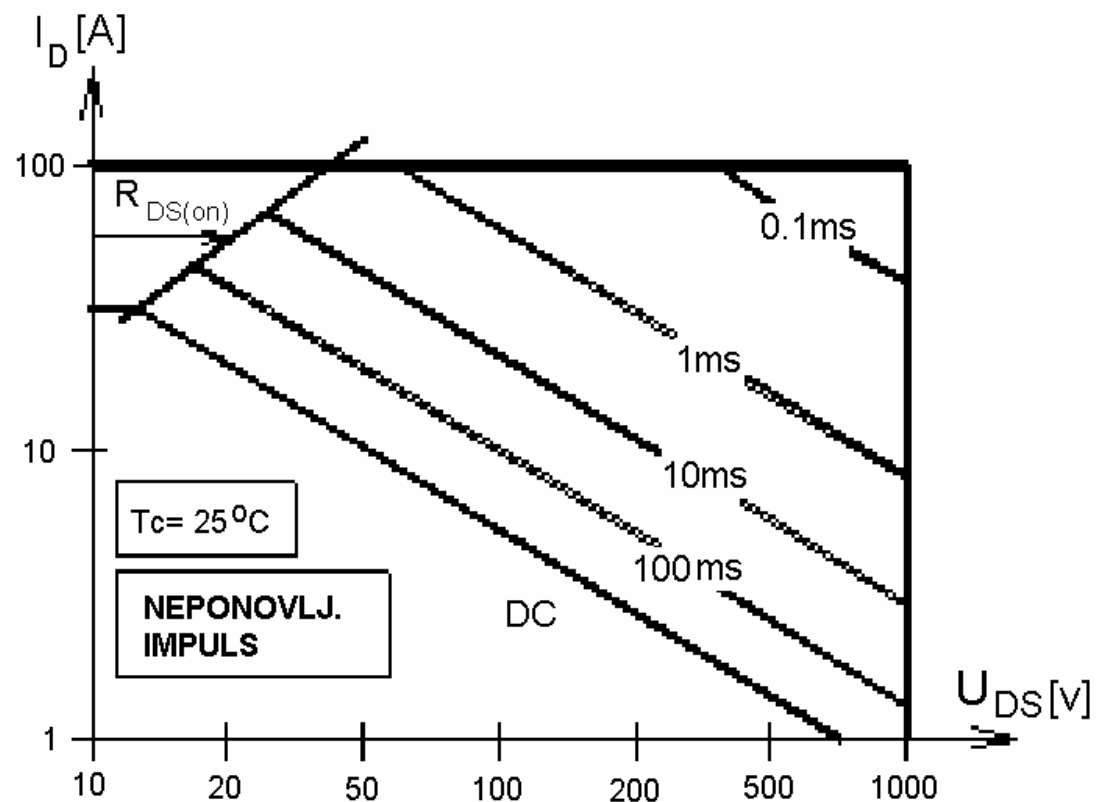


Osnovno prekidačko  
kolo sa MOSFET-ima



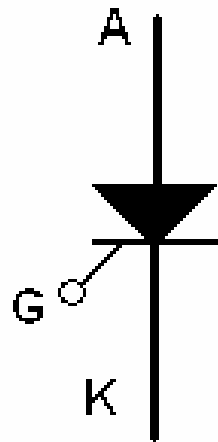
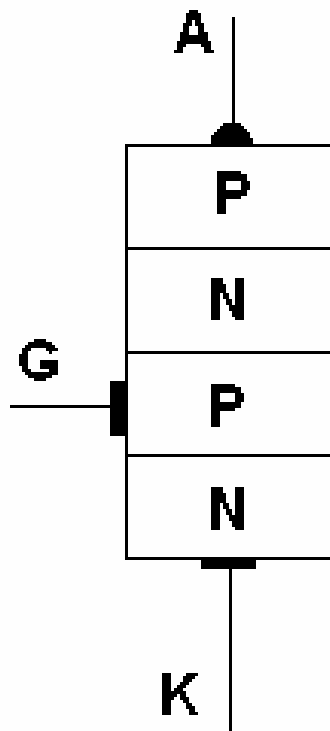
talasni oblici pri uključenju i isključenju

## ***Oblast bezbednog rada jednog tipičnog energetskog MOSFET-a***



# TIRISTOR– SCR (Silicon Controlled Rectifier)

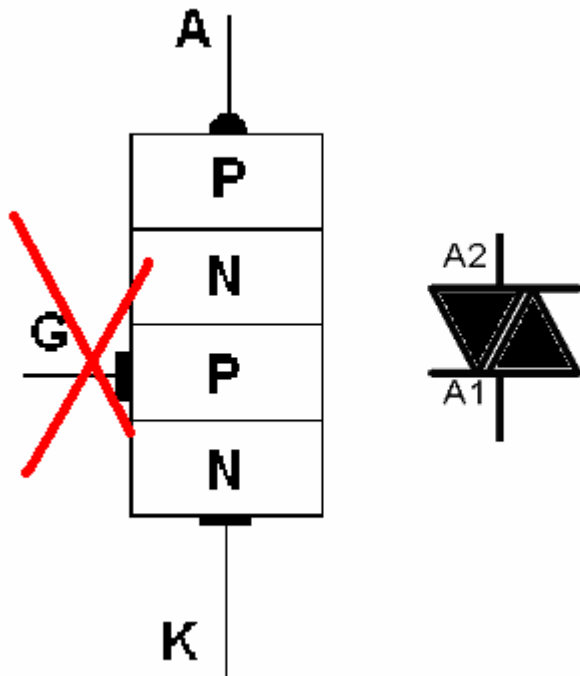
Tiristor je četvoroslojna poluprovodnička upravljiva komponenta sa izvedene tri elektrode : pored anode (A) i katode (K) postoji i upravljačka elektroda - gejt (G).



Osnovu predstavlja  
četvoroslojna  
P-N-P-N struktura

Pojava tiristora, krajem pedesetih godina (1956. Belove laboratorije), omogućila je izradu regulisanih ispravljača i drugih vrsta pretvarača, tako da su veoma brzo potisnuli do tada korišćene prekidače - *transduktore*

## DIAC- Diode Alternating Current



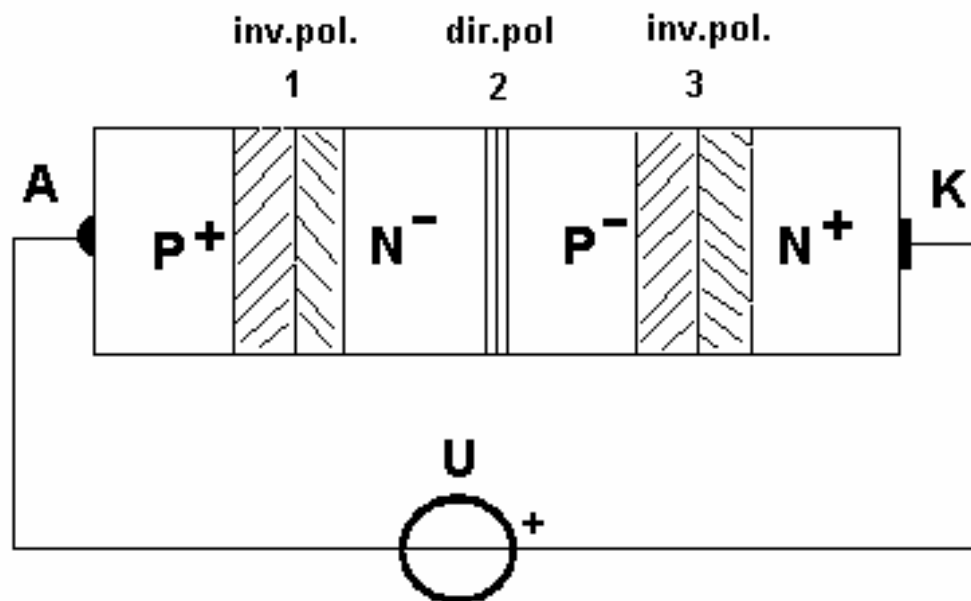
Dijak je petoslojna P-N-P-N poluprovodnička komponenta sa izvedene dve elektrode (A1 i A2).

Naponsko strujna karakteristika mu je takva da praktično ne provodi struju do probojnog napona (oko 30 V).

Probojni napon je približno jednak za oba polaritetanapona.



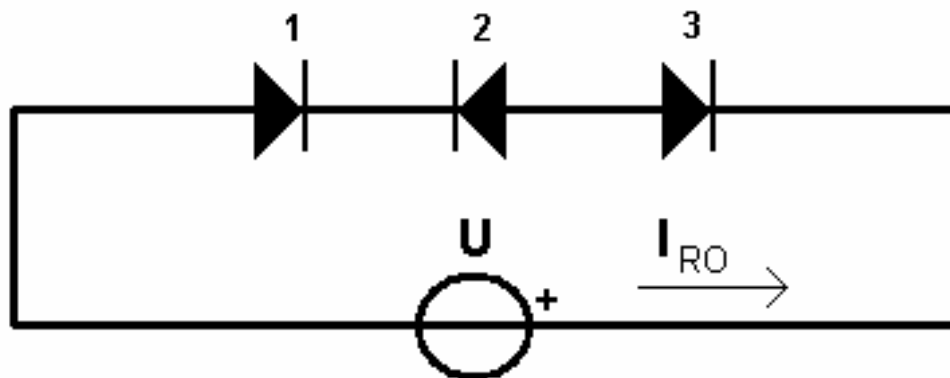
# INVERZNO POLARISANA P-N-P-N STRUKTURA



$$U_{AK} < 0$$

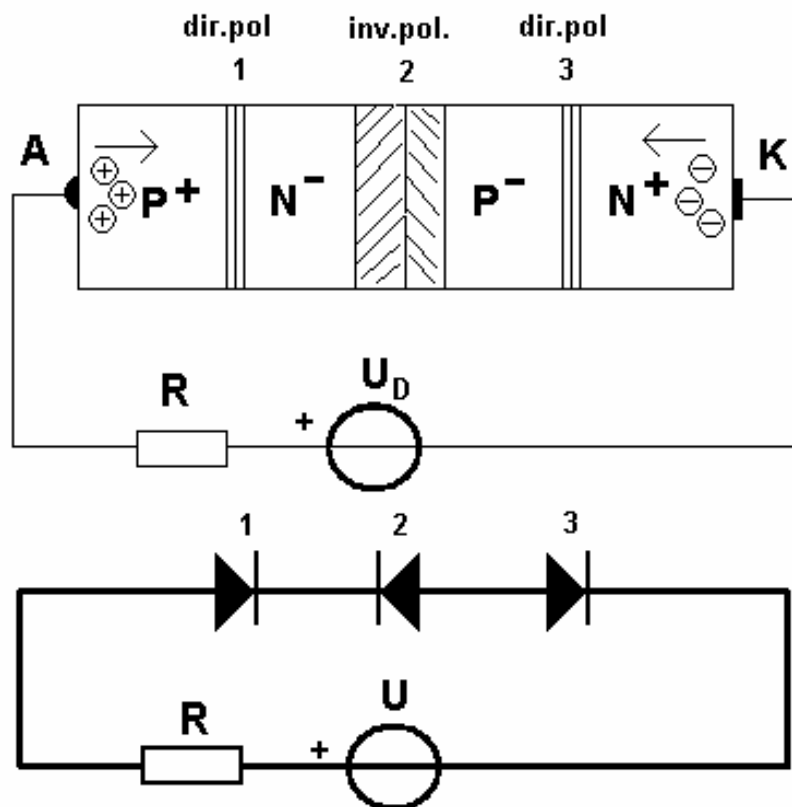
kroz strukturu teče veoma mala inverzna struja

$$I_{RO} \approx 0.$$



unutrašnji P-N spoj 2 je direktno polarisan, ali u na njemu nema nosioca naelektrisanja.

# DIREKTNO POLARISANA P-N-P-N STRUKTURA



Direktno polarisani tiristor može da se nalazi u dva stabilna stanja: **provodnom i neprovodnom**

Ako napon  $U_D$  poraste do vrednosti probojnog napona u direktnom smeru

$$U_{D(BR)}$$

dolazi do lavinske multipilkacije parova elektron-šupljina u ispražnjenoj zoni oko centralnog P-N spoja.

## Tiristor se prevodi u provodno stanje tako što se:

- direktno polariše
- dovede impuls struje na gejt
- dok traje impuls struje na gejt, struja tiristora mora da postane veća od struje hvatanja (*latching current*)  $\rightarrow I_L$

Tiristor ostaje u provodnom stanju sve dok je njegov struja veća od struje držanja (*holding current*)  $\rightarrow I_H$

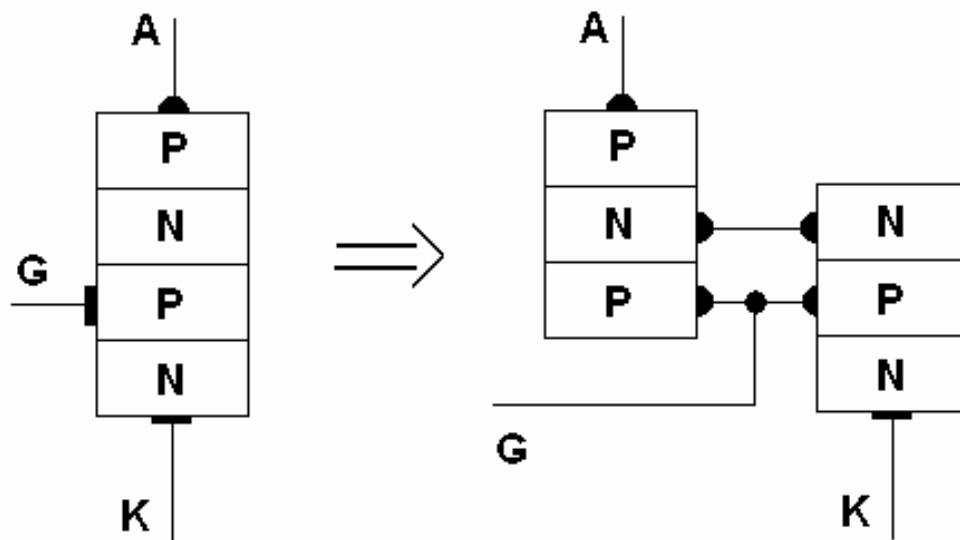
Dok tiristor vodi, oko centralnog P-N spoja postoji nagomilano neko naelektrisanje koji je jednako:

$$Q = Q_p + Q_n$$

tiristor može prevesti u provodno stanje i osvetljavanjem centralnog P-N,

Pravilan način prevođenja tiristora u provodno stanje je ubrizgavanjem struje u gejt

## Tranzistorska analogija tiristora



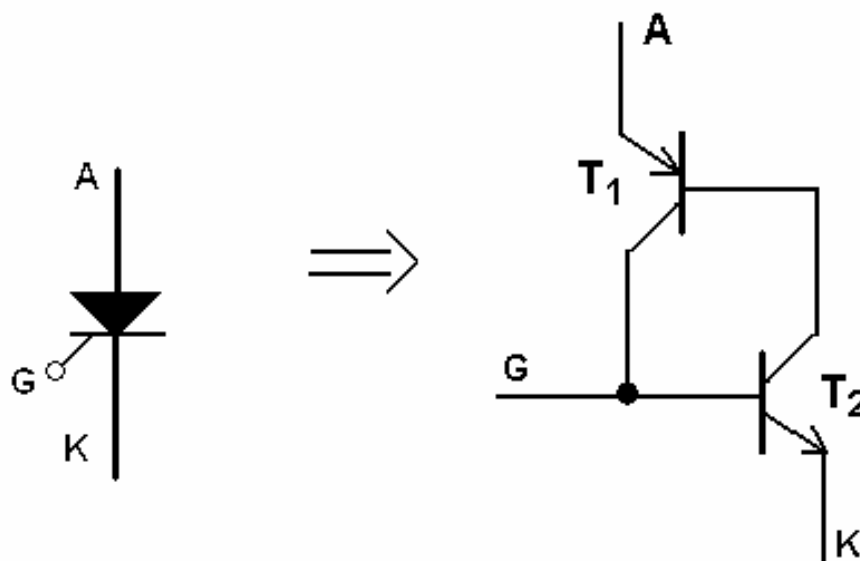
$$\alpha = I_C / I_E$$

$$\beta = I_C / I_B$$

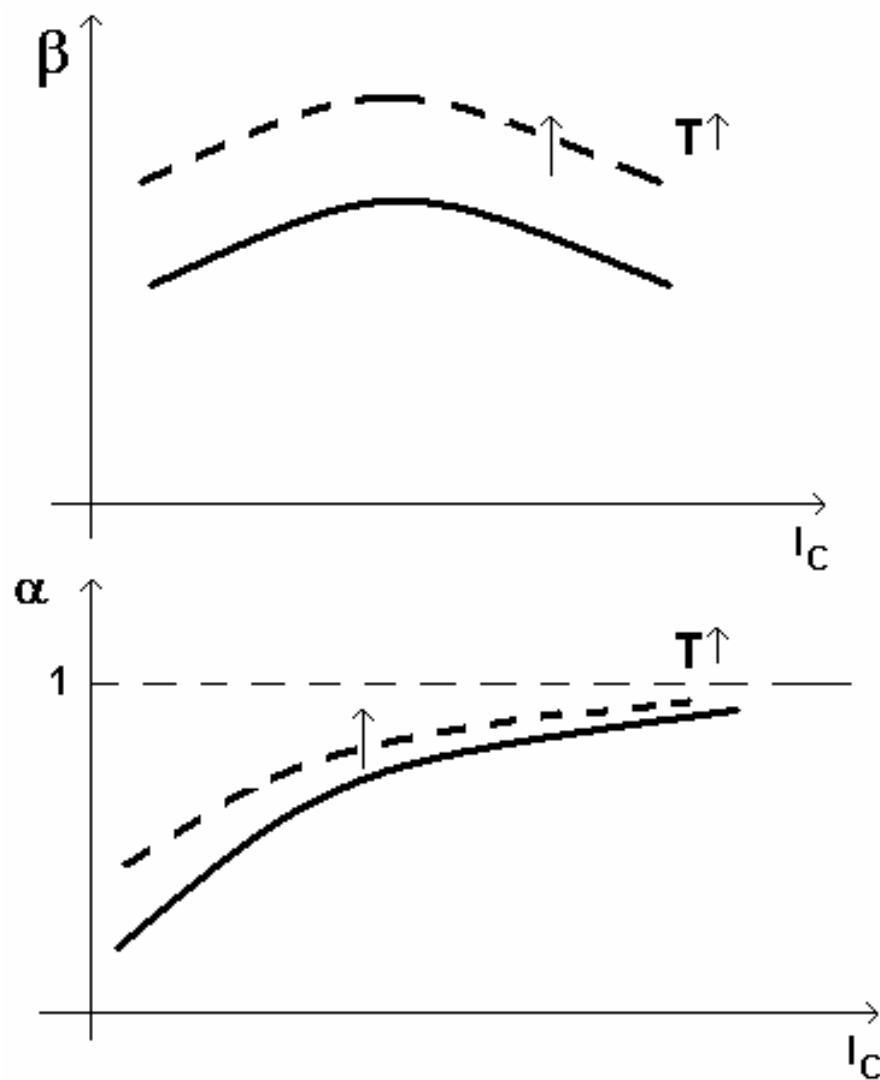
$$I_E = I_C + I_B$$

$$\alpha = \frac{I_E}{I_C} = 1 + \frac{1}{\beta}$$

$$\alpha = \frac{\beta}{1 + \beta}$$

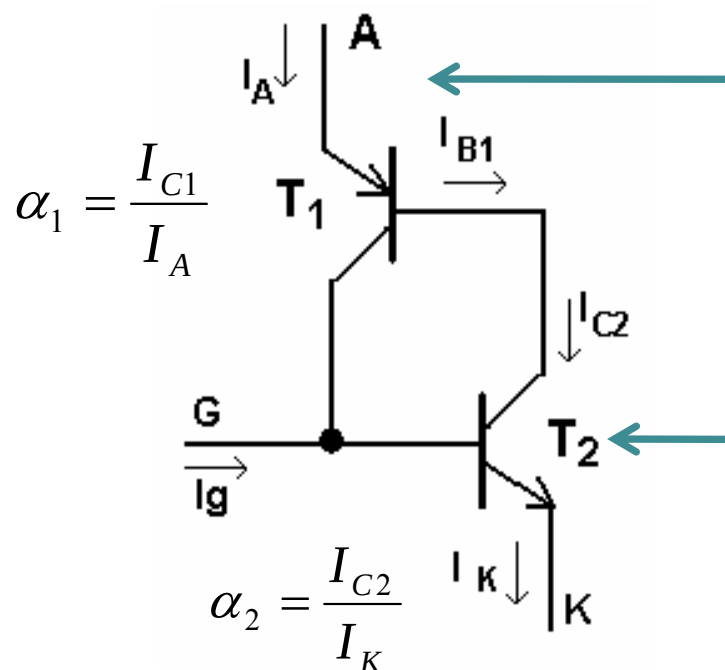


Zavisnost strujnih pojačanja  $\beta$  i  $\alpha$  od temperature i struje kolektora



$$\alpha = \frac{\beta}{1 + \beta}$$

# Tranzistorska analiza tiristora



$$I_A = I_{C1} + I_{B1} + I_{CBO1}$$

$$I_A = \alpha_1 I_A + I_{B1} + I_{CBO1}$$

$$I_A(1 - \alpha_1) - I_{CBO1} = I_{B1} = I_{C2}$$

$$I_{C2} = \alpha_2 I_K + I_{CBO2}$$

$$I_A(1 - \alpha_1) - I_{CBO1} = I_{C2} = \alpha_2 I_K + I_{CBO2}$$

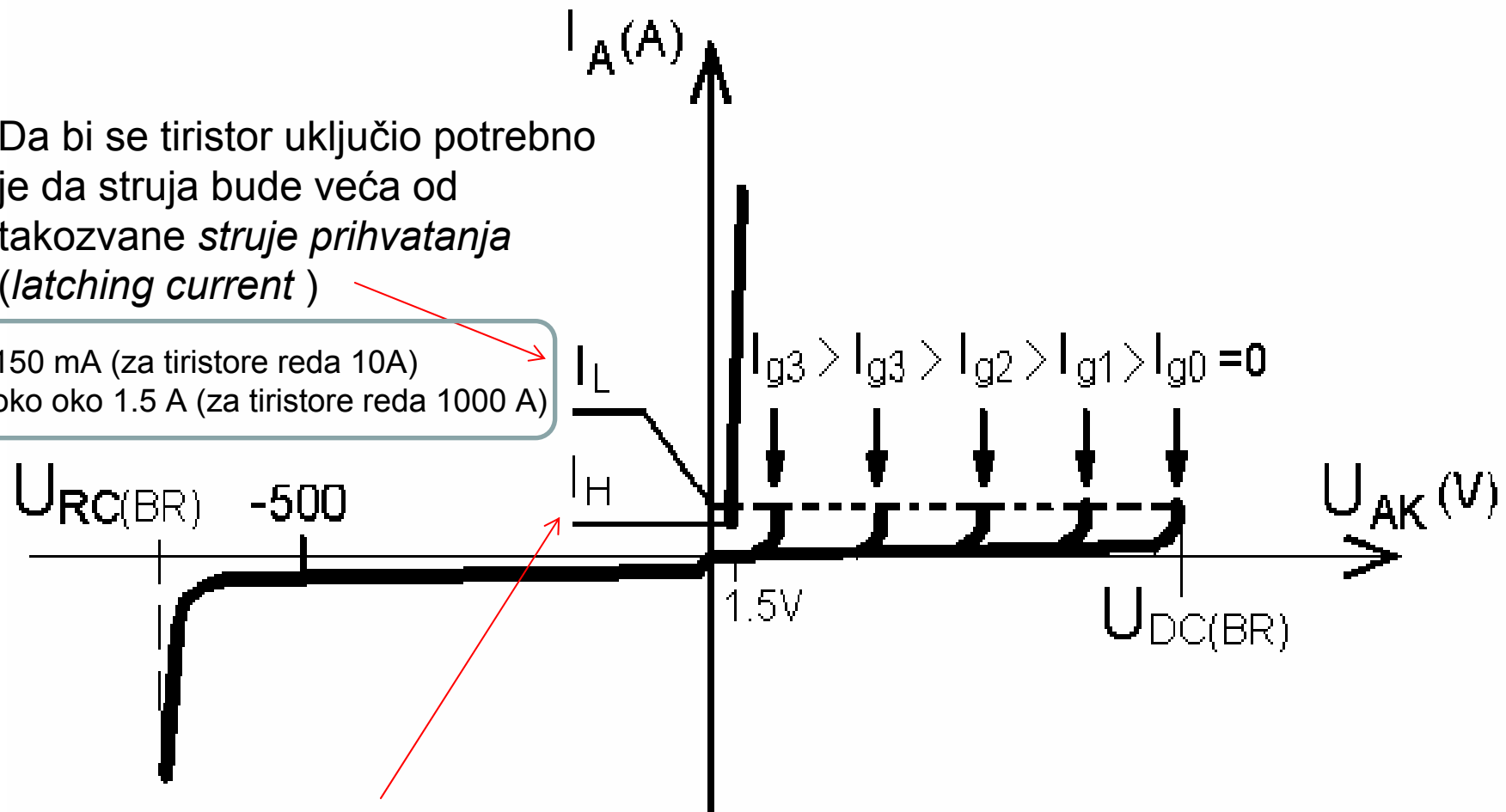
$$I_K = I_A + I_G \rightarrow I_A(1 - \alpha_1) = \alpha_2 I_A + \alpha_2 I_G + I_{CBO1} + I_{CBO2}$$

$$I_A = \frac{\alpha_2 I_G + I_{CBO}}{1 - \alpha_1 - \alpha_2}$$

# Volt-Amperska karakteristika tiristora

Da bi se tiristor uključio potrebno je da struja bude veća od takozvane *struje prihvatanja* (*latching current*)

150 mA (za tiristore reda 10A)  
oko oko 1.5 A (za tiristore reda 1000 A)

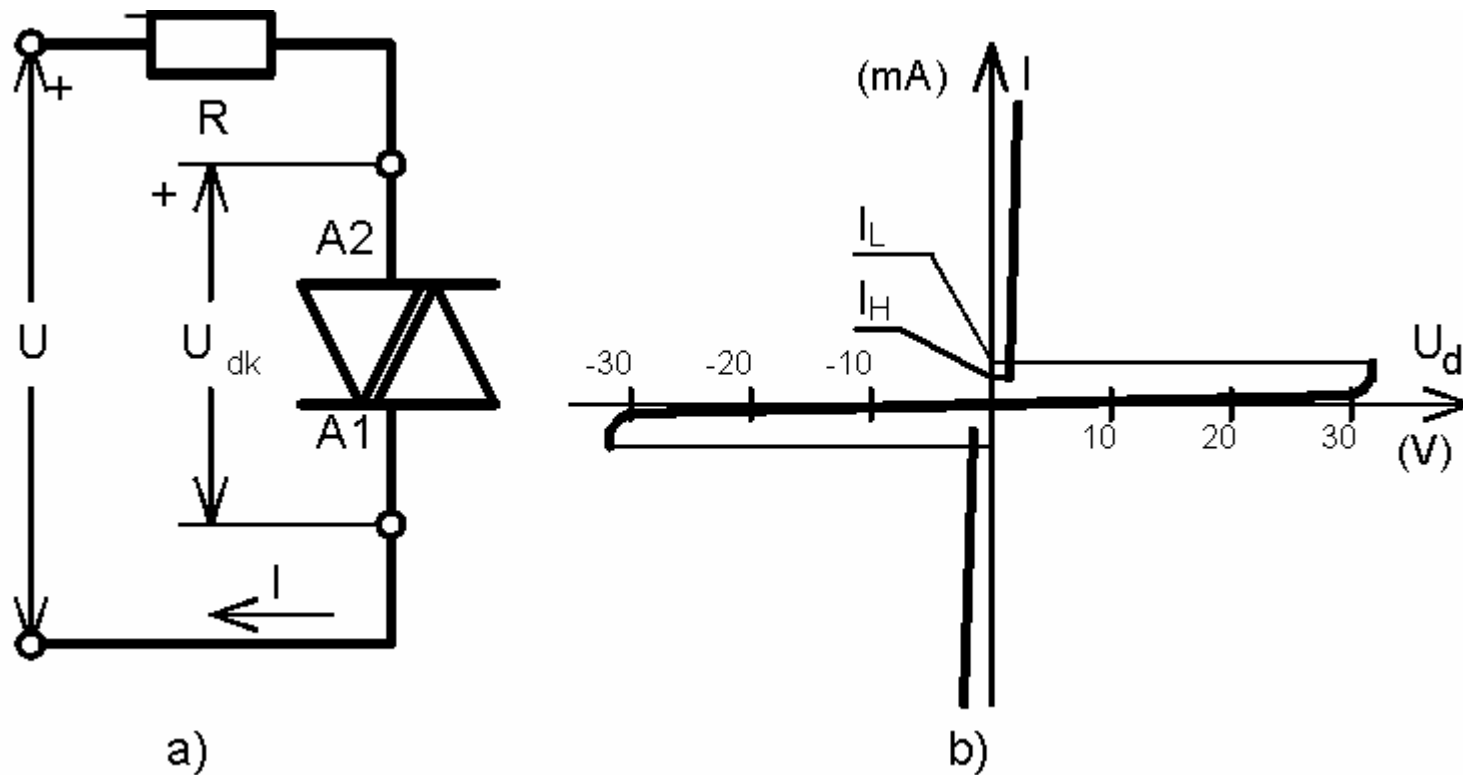


Pri smanjenju struje, u jednom trenutku tiristor ponovo postaje neprovođan. Ova minimalna struja naziva se i *struja držanja* (*holding current*)

80 mA (za tiristore reda 10 A) do  
oko oko 0.5 A (za tiristore reda  
1000 A)

# Volt-Amperska karakteristika DIAC-a

Probojni napon je približno jednak za oba polariteta napona.  
Prestanak vođenja struje nastaje kad ona padne ispod struje držanja

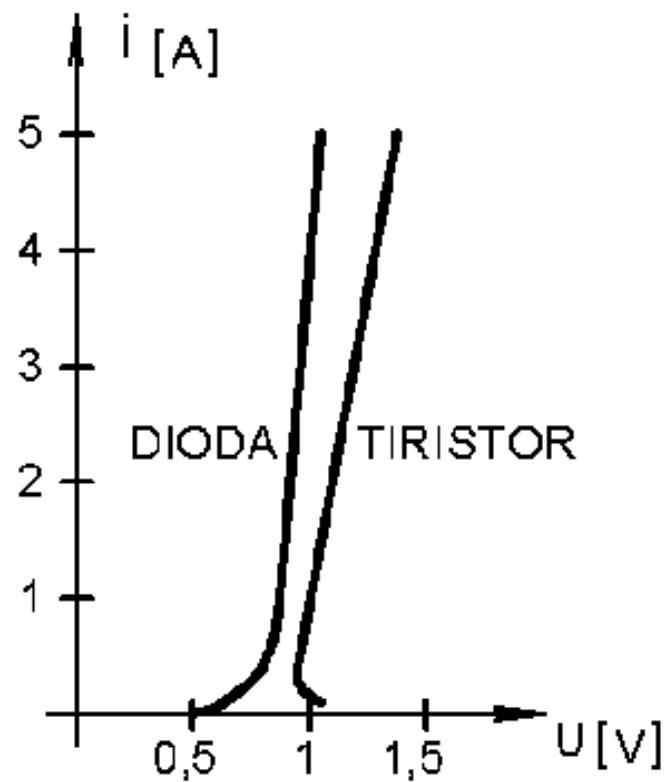


(a)-strujno kolo, (b)-strujno naponska karakteristika

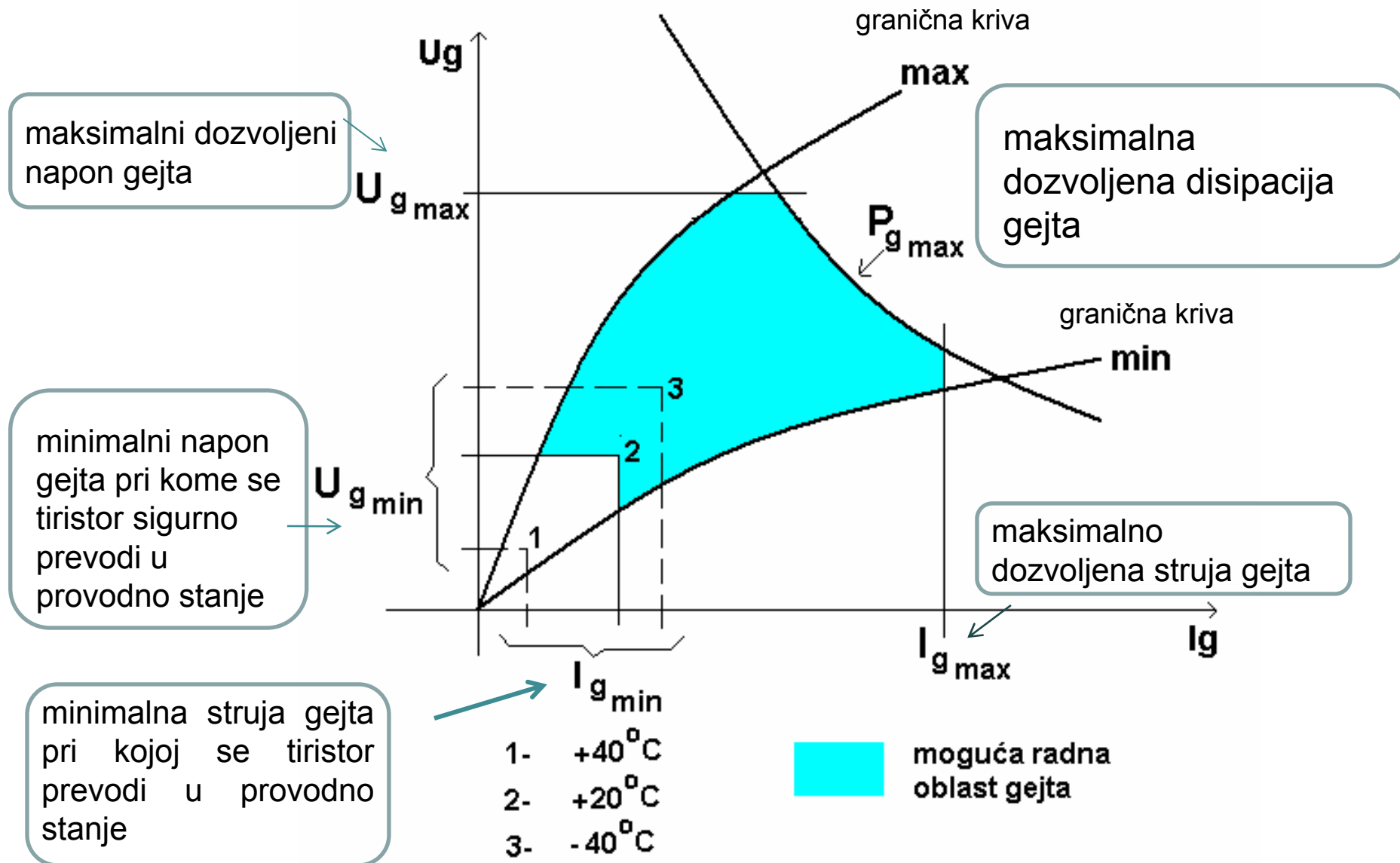


**Kada tiristor pređe u stanje vođenja, struja tiristora praktično zavisi od spoljnog kola (opterećenja).**

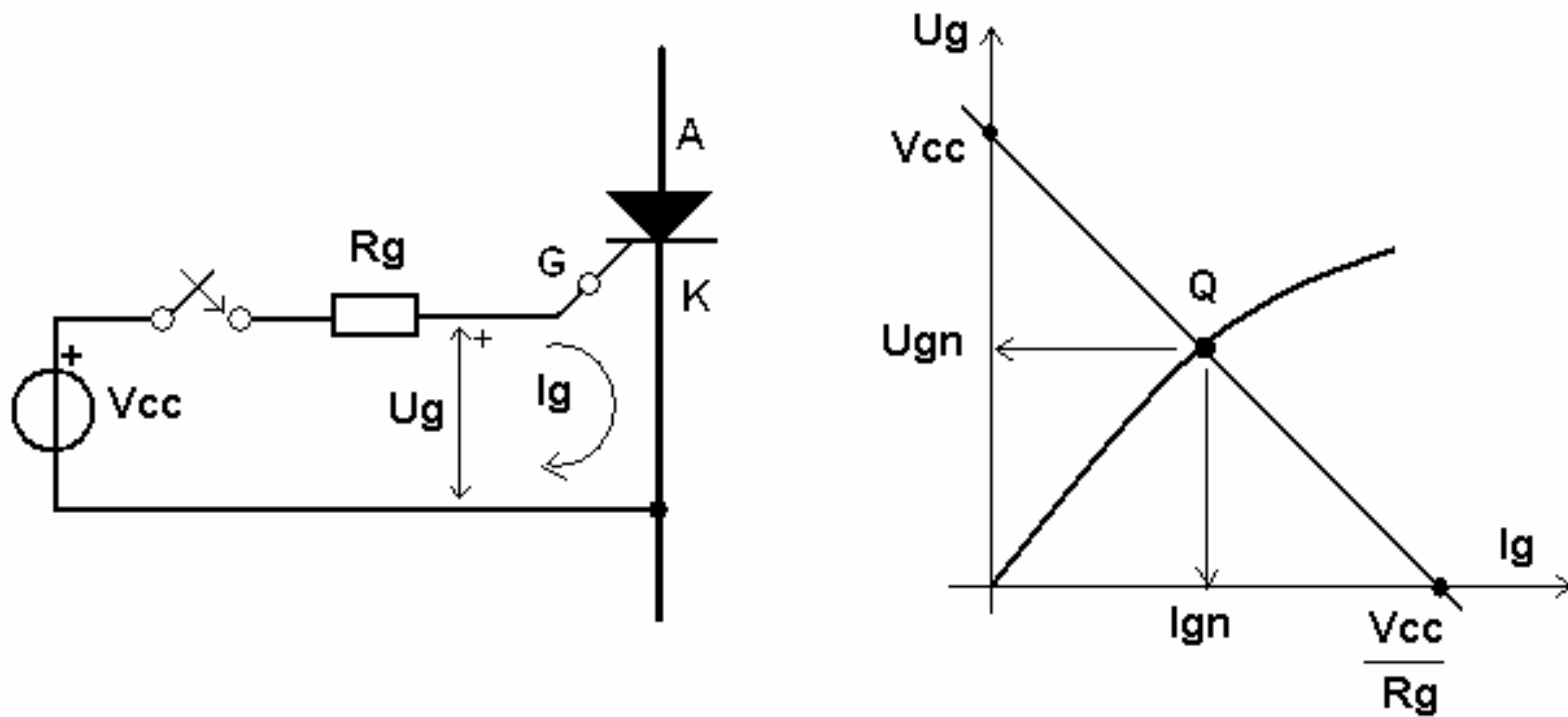
U tom slučaju njegova volt-amperska karakteristika se može približno predstaviti pravom linijom (slično kao kod energetske diode ili DIAC-a).



# Volt-Amperska karakteristika gejta

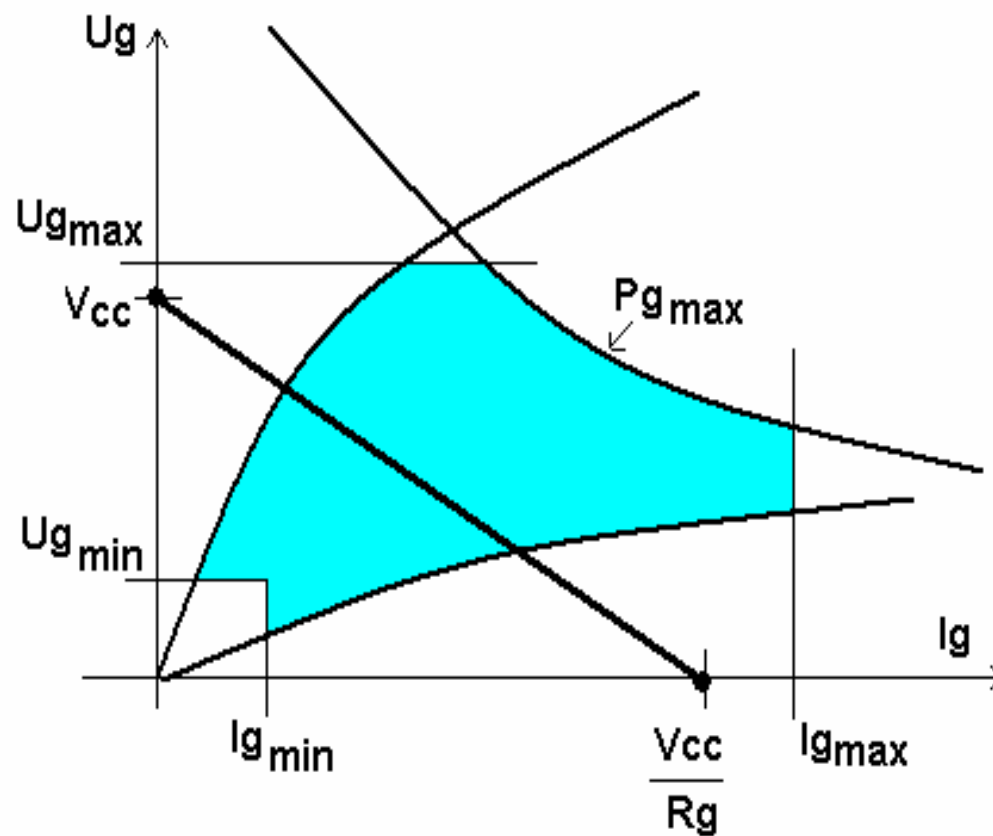
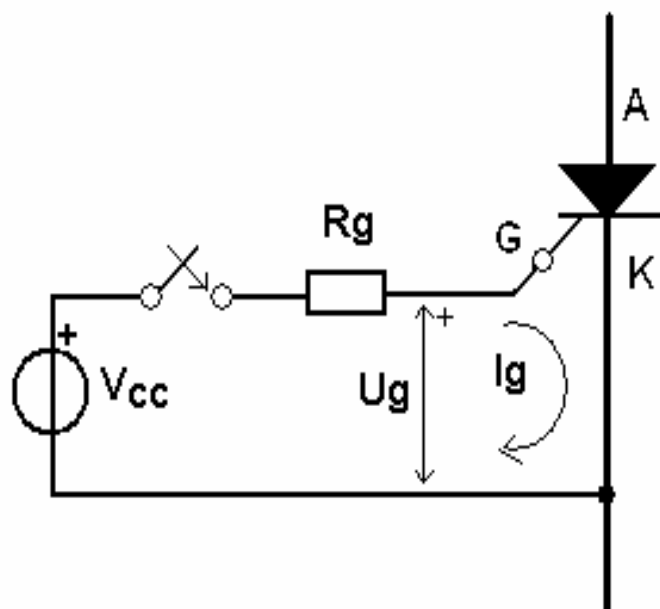


## Koncept radne prave primenjen na kolo gejta tiristora



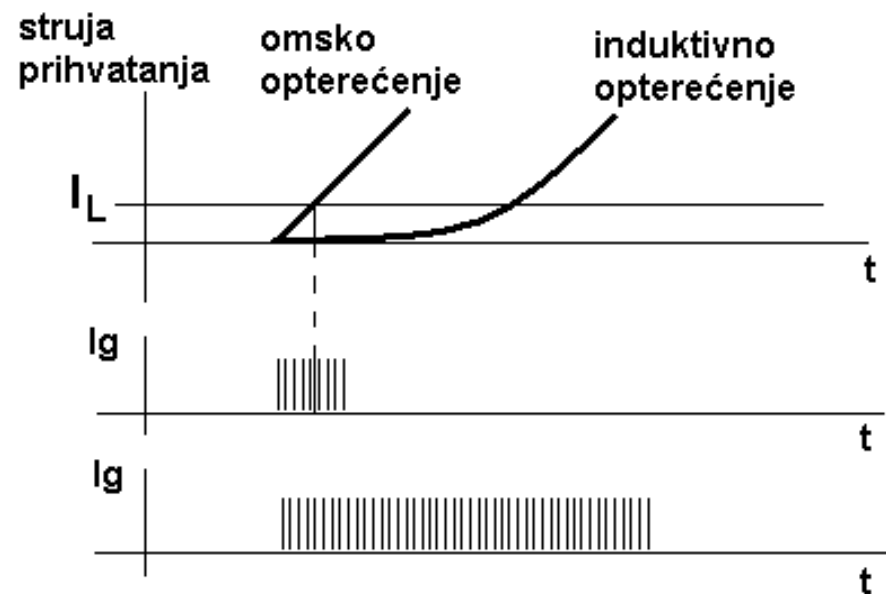
$$I_g = \frac{V_{CC} - V_g}{R_g}$$

## Radna prava u mogućoj radnoj oblasti gejt

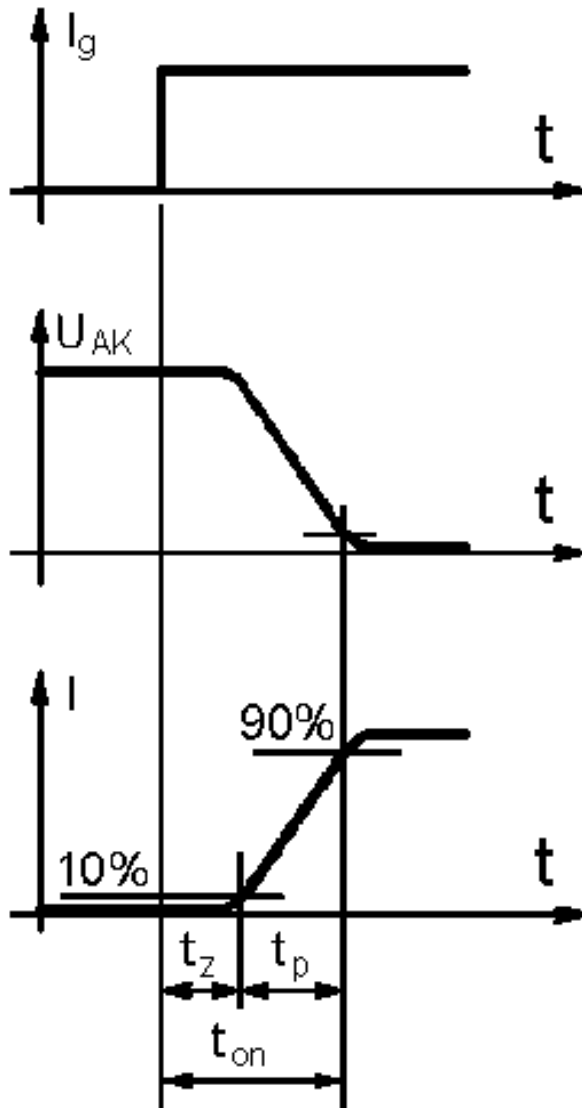


## Potrebno vreme trajanja upravljačkog impulsa kod različitih strmina struje opterećenja

- Struja gejta, obično je reda 50 mA za male tiristore, dok je za velike tiristora 300-400mA.
- Trajanje impulsa treba da bude nekoliko desetima mikrosekundi.
- Kod uključenja omskog opterećenja trajanje impulsa na gejtu je znatno kraće nego u slučaju induktivnog opterećenja.
- U slučaju induktivnog tereta (struja se sporo uspostavlja), impuls treba da traje sve dok struja opterećenja ne premaši vrednost struje prihvatanja



# Dinamičke karakteristike tiristora-uključenje



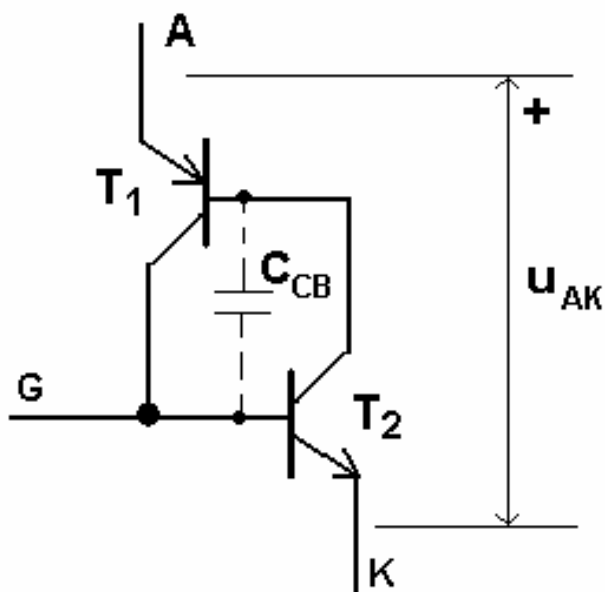
$t_z$  vreme kašnjenja uključenja (reda 1us)

$t_p$  vreme porasta struje (nekoliko us)

$t_{on}$  vreme uključenja

## Parazitna kapacitivna struja koja može uključiti tiristor

Tiristor u provodno stanje može da prevede i brzi porast napona u direktnom smeru



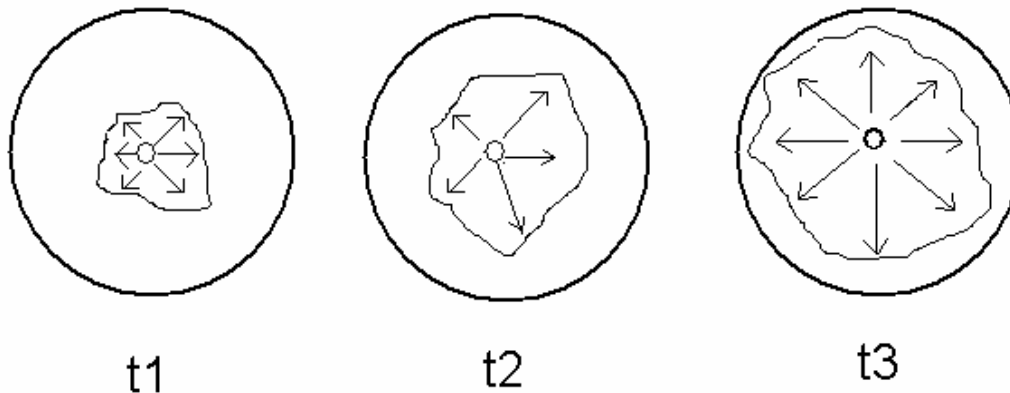
Ustvari kapacitet inverzno polarisanog sentralnog P-N spoja može da propusti struju čija je jačina

$$C_{CB} \frac{dU_{AK}}{dt}$$

Tipične vrednosti su u opsegu od 200 ... 1000 V/us

## Prevelika brzina porasta struje $di/dt$ može neželjeno uključiti tiristor

Impuls na gejtu aktivira određenu zonu na kristalu tiristora. Ova zona se vremenom širi na celu površinu



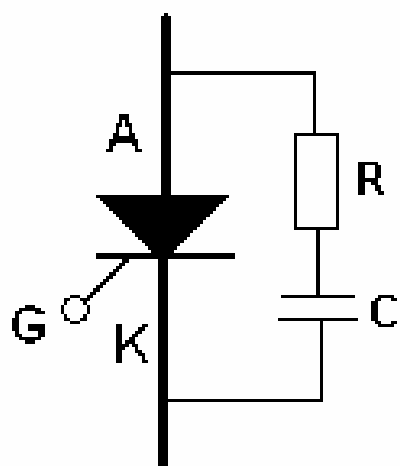
Tipične vrednosti su u opsegu od 200 ... 1000 V/ $\mu$ s

Potrebno je određeno vreme da se provodna zona proširi od kontakta gejta po celoj površini tiristora.

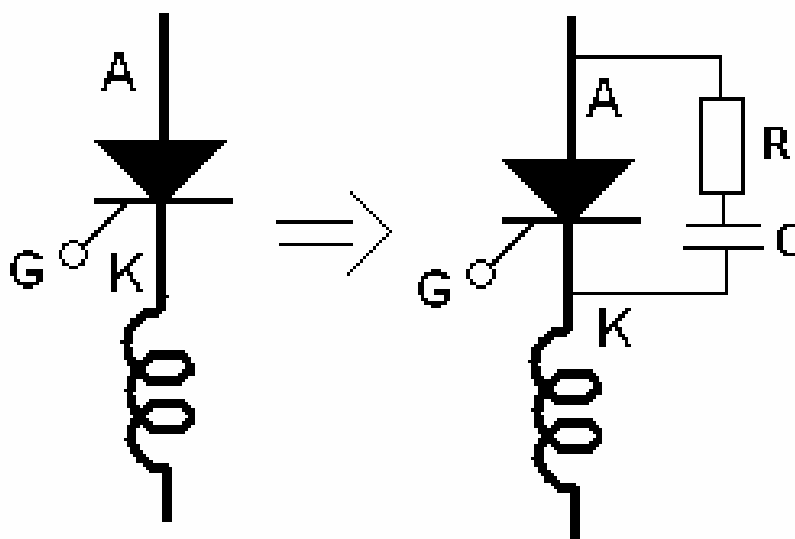
Ako je opterećenje čisto omsko ili kapacitivno, struja pri uključanju veoma brzo raste i njena gustina na aktiviranom delu površine može biti previsoka tako da može doći do razaranja tog dela kristala i trajnog oštećenja tiristora, zbog lokalnog pregrevanja



## Zaštite protiv prevelikog porasta struje i napona na tiristoru



zastita od  
prevelikog  $dU/dt$



zastita od  
prevelikog  $dI/dt$

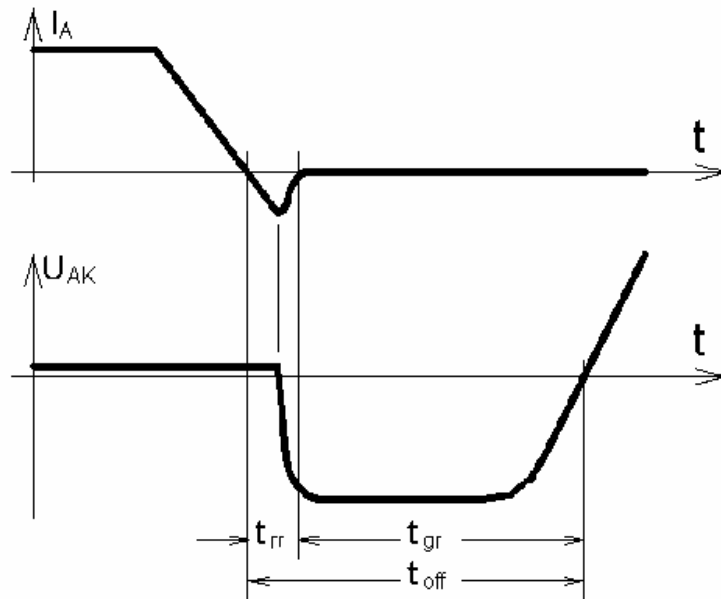
# ISKLUČENJE TIRISTORA

Najčešći način isključivanja tiristora je promena polariteta anodnog napona.

Pri tome treba sačekati određeno vreme koj se u stručnoj praksi naziva "vreme odmaranja", a obeležava se sa  $t_q$

To je vreme koje je potrebno da se rekombinuju naelektrisanja u okolini centralnog P-N spoja tiristora, koji je bio u stanju vođenja

Ovo vreme se računa od trenutka prolaska struje tiristora kroz nulu, do trenutka kada može ponovo da primi direktan napon



$$t_q = t_{rr} + t_{off}$$

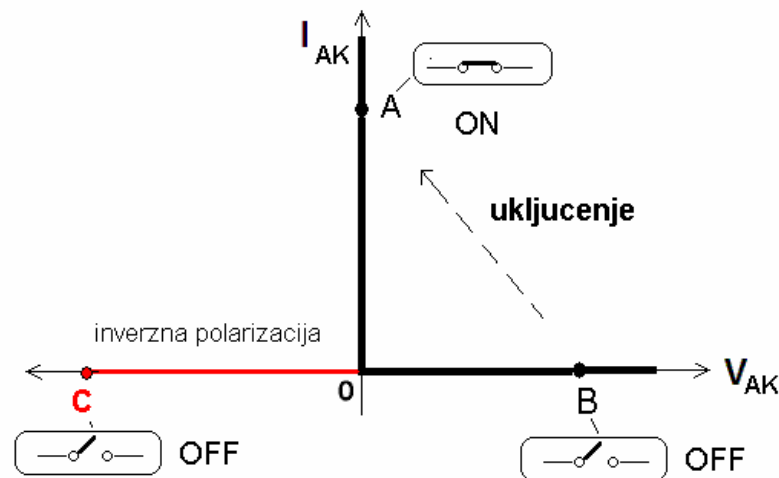
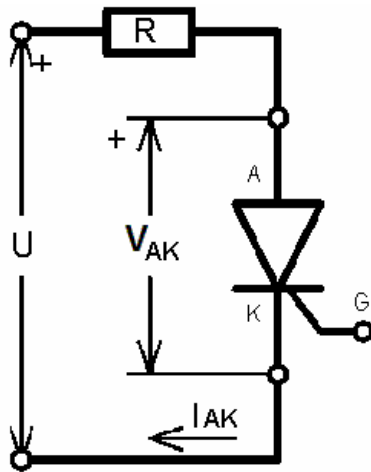
Kod brzih tiristora koji se koriste u invertorima i čoperima deklariše se *gornja granična vrednost* za  $t_q$  i ona iznosi od 20μs....60μs.

Kod sporih tiristora koji se koriste u ispravljačima, za  $t_q$  se daje tipična vrednost i obično iznosi 100μs....300μs.

## TIRISTOR- kao idealan prekidač

### Pretpostavke:

- U analizama rada pretvarača tiristor će biti posmatran kao bistabilni prekidački element koji može biti u stanju uključenosti ili isključenosti
- Struja prihvatanja i struja držanja jednake nuli  $I_L=0$  i  $I_H=0$
- Inverzna struja i napon u provodnom stanju jednaki nuli
- Vremena uključenja i isključenja jednaka nuli
- Idealizovana karakteristika tiristora



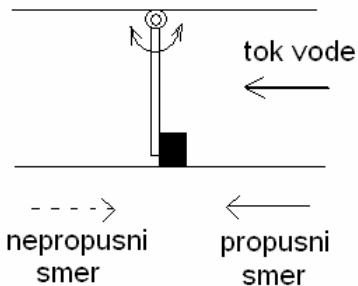
# HIDRAULIČKE ANALOGIJE PREKIDAČKIH ELEMENTA

-dioda

-tiristor

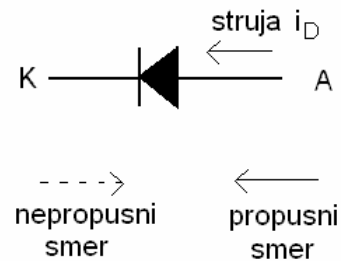
-tranzistor

## HIDRAULIKA

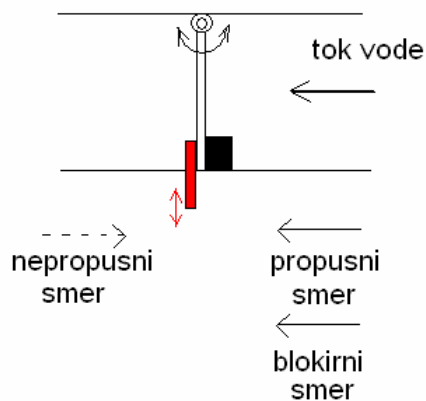


=

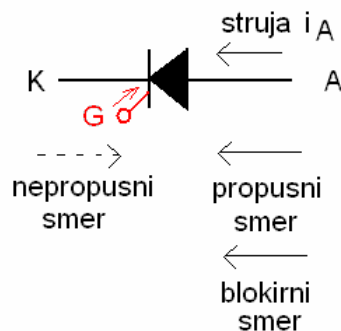
## ELEKTRONIKA



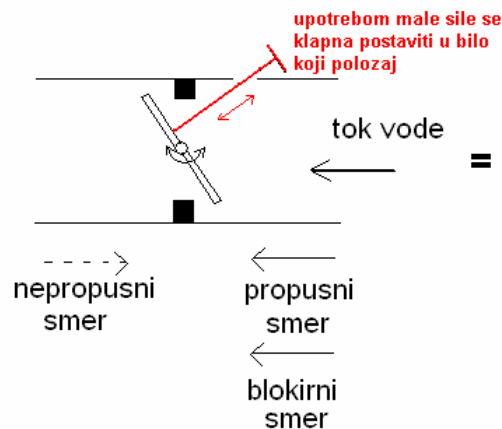
DIODA



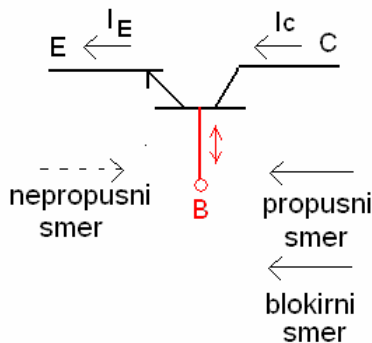
=



TIRISTOR



=



TRANZISTOR

# Osnovno prekidačko kolo sa tiristorom

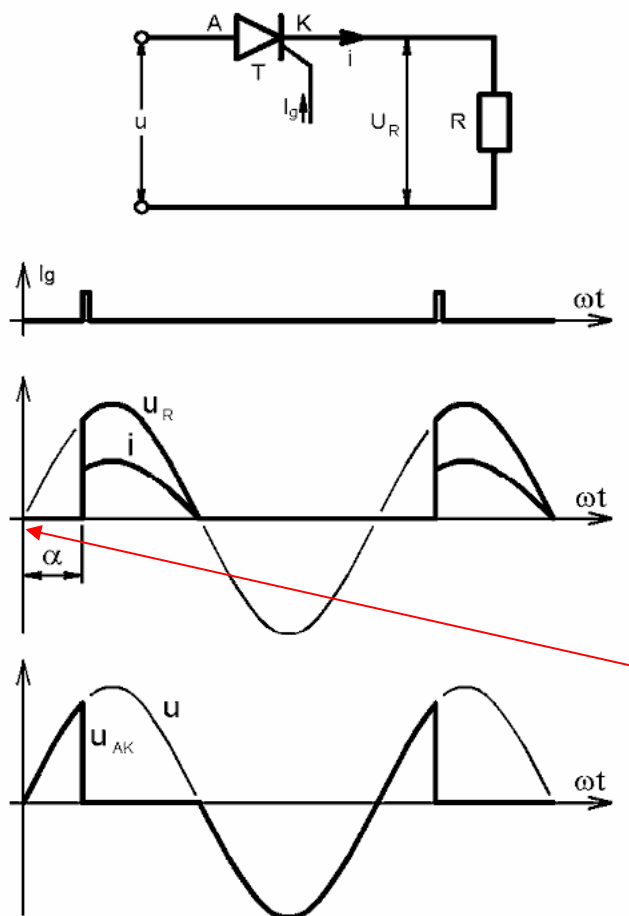
Okidni impulsi na gejtju  $i_g$   
sinhronizovani su sa mrežnim  
naponom  $u$

Kontrolna veličina je ugao uključenja

$\alpha$

Ugao  $\alpha$  se računa od trenutka  
kada su se stekli uslovi da provede tiristor

a to je prolazak mrežnog napona kroz nulu



## ISPITIVANJE TIRISTORA

