

Elektronika/Osnove elektronike

- predavanja utorkom u 12.00 sati, predavaonica 152
- seminari i vježbe četvrtkom u 14.00 sati, predavaonica 152

Ocjenjivanje:

- Aktivnost i sudjelovanje u nastavi (5 bodova)
- Pismeni kolokvij (40 bodova – 2 kolokvija)
- Seminar (25 bodova)

Literatura

- D. L. Eggleston: Basic electronics for scientists and engineers, Cambridge University Press, 2011
- N. W. Aschcroft, N. D. Mermin: Solid state physics, Saunders College Publishing, 1996
- D. Kotnik-Karuz: Osnove elektronike s laboratorijskim vježbama, Filozofski fakultet u Rijeci, 2000
- P. Biljanović: Elektronički sklopovi, Školska knjiga Zagreb, 2001
- P. Biljanović: Mikroelektronika (Integrirani elektronički sklopovi), Školska knjiga Zagreb, 2001

Dopunska literatura:

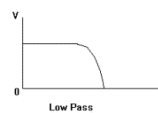
- B. Juzbašić: Elektronički elementi, Školska knjiga Zagreb, 1980
- D.V. Hall: Digital circuits and systems, McGraw-Hill, 1989
- D.L. Schilling, C. Belove: Electronic circuits, McGraw-Hill, 1989
- K. Seeger: Semiconductor physics, Springer 1991

Sadržaj

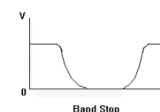
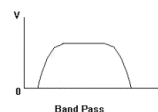
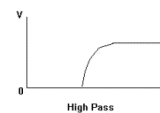
- RC krugovi (filteri)
- Poluvodička dioda i primjena
- Tranzistor (bipolarni, emiserski spoj, kolektorski spoj)
- Tranzistorsko pojačalo malih signala
- Operacijsko pojačalo
- Sklopovi s operacijskim pojačalom
- Digitalna elektronika

RC pasivni filteri

1. NISKOFREKVENTNI (NF) FILTER



2. VISOKOFREKVENTNI (VF) FILTER

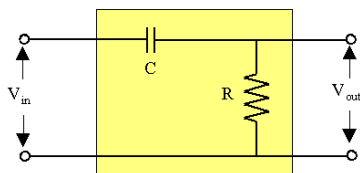


3. POJASNI FILTER

Fig. 3

Visokofrekventni (VF) filter

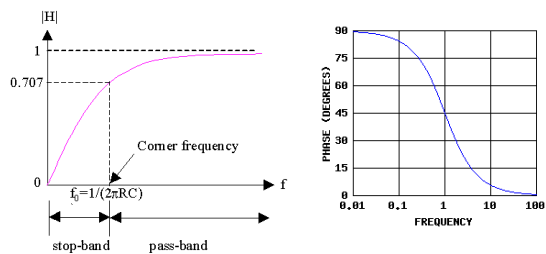
- Propušta visoke frekvencije, prigušuje niske frekvencije



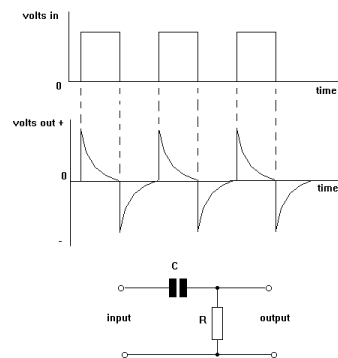
Visokofrekventni (VF) filter

- Propušta visoke frekvencije, prigušuje niske frekvencije
- Osnovna karakteristika: **GRANIČNA FREKVENCIJA** f_{gr}
- $f > f_{gr} \Rightarrow$ frekvencije više od granične frekvencije se propuštaju
- $f < f_{gr} \Rightarrow$ frekvencije niže od granične frekvencije se prigušuju
- $f \ll f_{gr} \Rightarrow A$ (pojačanje) = 0
- $f \gg f_{gr} \Rightarrow A = 1$ (maksimalno pojačanje)

Visokofrekventni (VF) filter

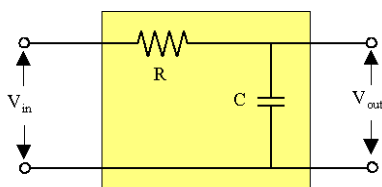


Derivator



Niskofrekventni (NF) filter

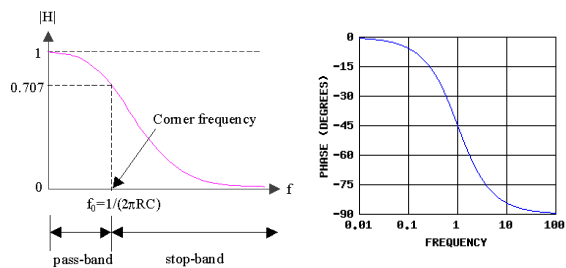
- Propušta niske frekvencije, prigušuje visoke frekvencije



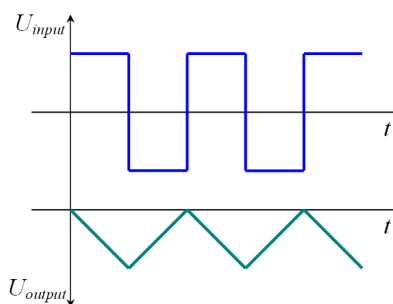
Niskofrekventni (NF) filter

- Propušta niske frekvencije, prigušuje visoke frekvencije
- Osnovna karakteristika: **GRANIČNA FREKVENCIJA** f_{gr}
- $f < f_{gr} \rightarrow$ frekvencije niže od granične frekvencije se propuštaju
- $f > f_{gr} \rightarrow$ frekvencije više od granične frekvencije se prigušuju
- $f \gg f_{gr} \rightarrow A$ (pojačanje) = 0
- $f \ll f_{gr} \rightarrow A = 1$ (maksimalno pojačanje)

Niskofrekventni (NF) filter

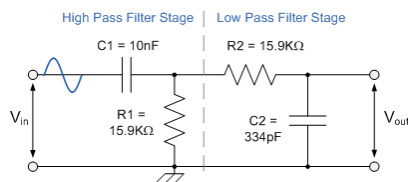


Integrator



Pojasni filter

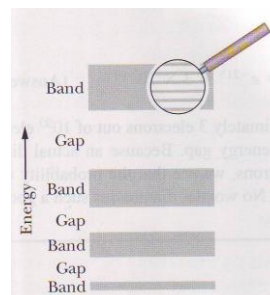
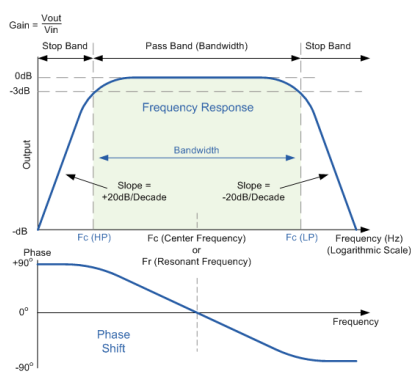
- Propušta frekvencije u nekom intervalu (frekventni pojas), od minimalne do maksimalne frekvencije
- Kombinacija VF i NF filtra → karakteristike određuju granične frekvencije VF filtra f (minimalna frekvencija pojasa) i NF filtra (maksimalna frekvencija pojasa)

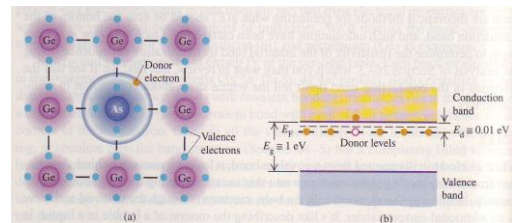
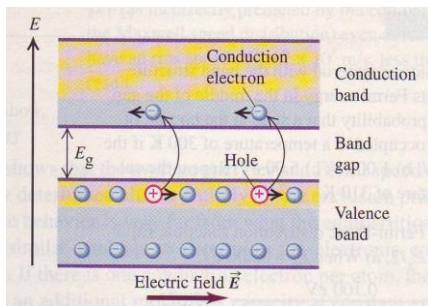
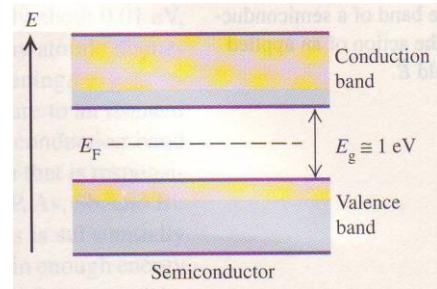
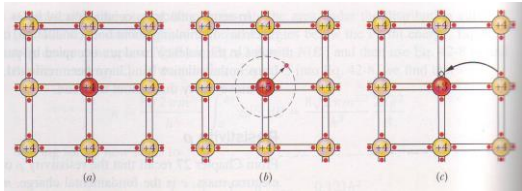


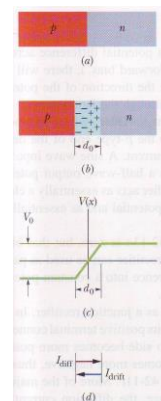
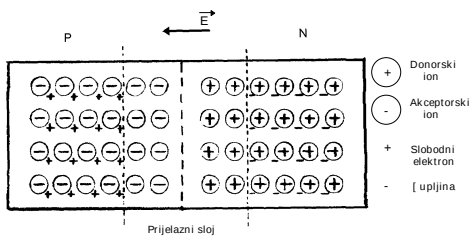
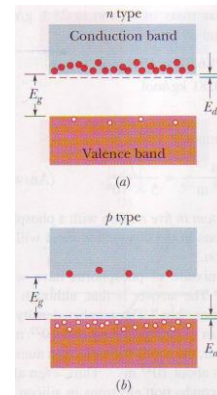
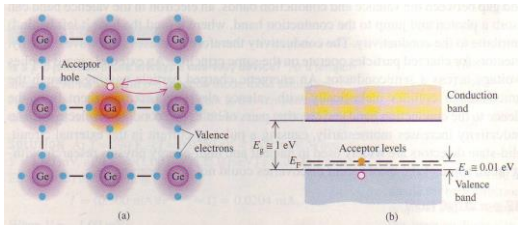
Pojasni filter

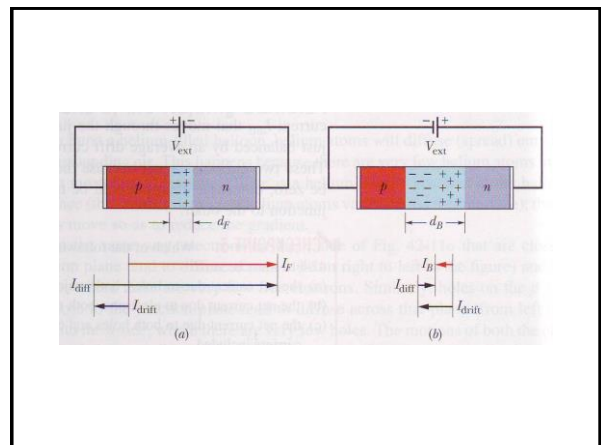
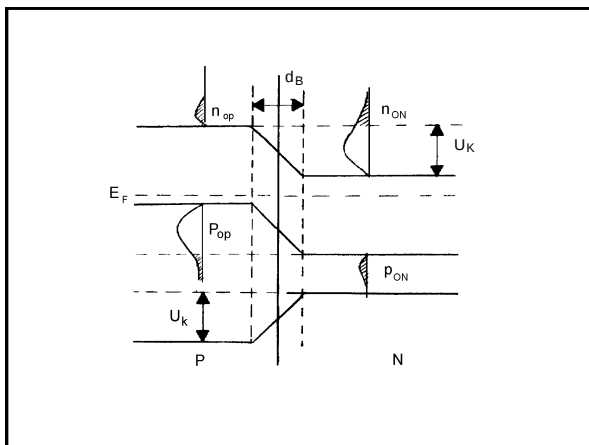
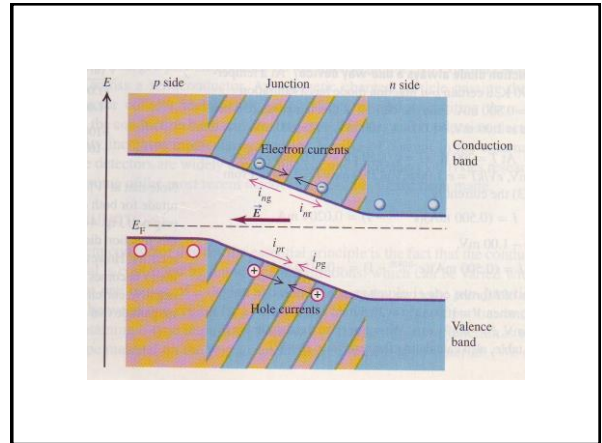
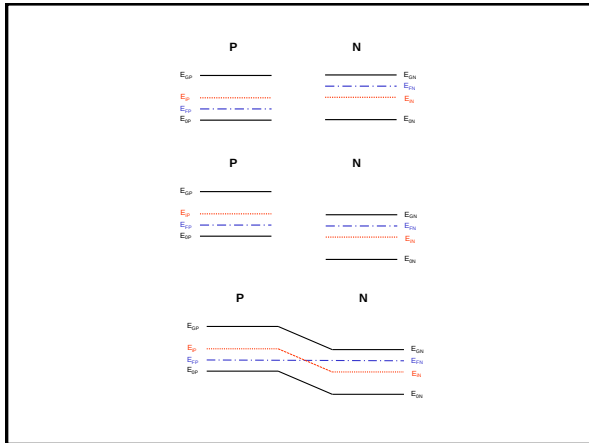
- Propušta niske frekvencije, prigušuje visoke frekvencije
- Osnovna karakteristika:
VF GRANIČNA FREKVENCIJA f_{gVF} i
NF GRANIČNA FREKVENCIJA f_{gNF}
- $f_{gVF} < f < f_{gNF} \rightarrow$ frekvencije između graničnih frekvencija za VF i NF se propuštaju
- $f_{gVF} > f > f_{gNF} \rightarrow$ frekvencije niže od granične VF frekvencije i više od granične NF frekvencije se prigušuju
- $f_{gVF} \gg f \gg f_{gNF} \rightarrow A$ (pojačanje) = 0

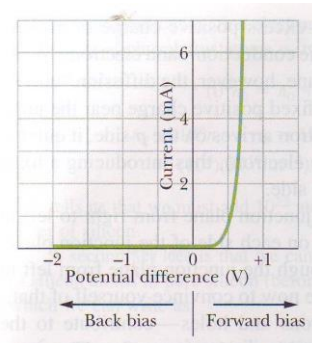
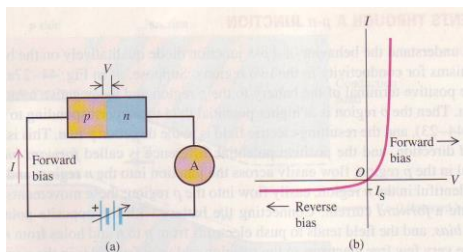
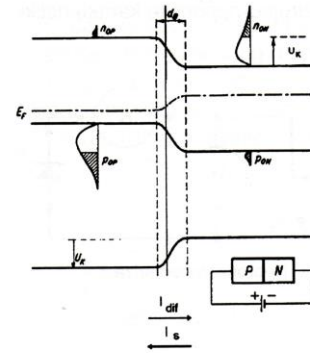
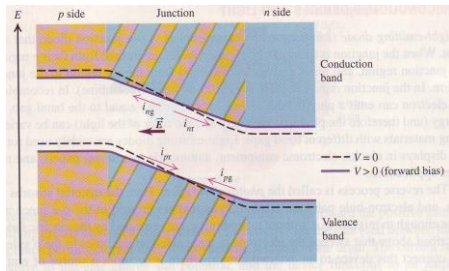
Pojasni filter











Dioda djeluje kao filter $\Rightarrow$ propušta struju samo u jednom smjeru

$I_{\max}$ – najveća dozvoljena diodna struja koja se ne smije prekoračiti

U_F – 'protočni' napon (propusna polarizacija)

$U = U_F$ za $I = 1/10 I_{\max}$

U_F – napon kod kojeg značajno poraste vodljivost diode

Ge: $U_F = 0.3 \text{ V}$

Si: $U_F = 0.7 \text{ V}$

Pojednostavljena karakteristika diode:

- Zanimamo inverznu struju
- Zanimamo direktnu struju dok direktni napon ne postane jednak naponu praga U_0
- U_0 se dobije na presjeku apcise i tangente u radnoj točki diode
- Porastom napona struja diode linearno raste kao da je u krugu otpor r_D
- P zatvoren kada je napon na diodi $U > U_0$ (za $U < U_0$ ne teče struja)
- Struja je u krugu određena naponom U , naponom unutrašnjeg izvora U_0 i otporom r_D

VRSTE PROBOJA

a) Zenerov proboj

b) lavinski proboj

Zenerov proboj

- Kod diode $|U_R| < 6 \text{ V}$
- Jako dopirani pn spoj $\rightarrow$ usko područje osiromašenja, veliki priključeni napon $\rightarrow$ još uže područje osiromašenja $\rightarrow$ jako električno polje 10^7 V/m
- Velika energija elektrona u električnom polju $\rightarrow$ pucaju kovalentne veze
- Električno polje u zoni osiromašenja je dovoljno veliko da uzrokuje direktnu ionizaciju $\rightarrow$ stvaranje parova elektron-šupljina

- Struja proboja naglo raste, napon ostaje gotovo konstantan (UP).
- Proboj ovisi o temperaturi $\rightarrow$ veća temperatura, veća struja proboja jer povišenje temperature uzrokuje lakše pucanje kovalentnih veza

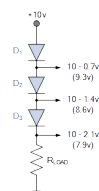
Lavinski proboj

- Kod diode $|U_R| > 6 \text{ V}$
- Električno polje je vrlo veliko
- Manjinski nosioci koji slobodno prelaze kroz barijeru su ubrzani na vrlo visoke kinetičke energije dovoljne za ionizaciju drugih atoma u području osiromašenja
- Novi elektroni se također ubrzavaju i vode do daljnje ionizacije → lavinski efekt
- Sudarna ionizacija, lavina nosilaca naboja, **struja snažno raste**

$$W = eE\lambda; \quad \lambda \ll d$$

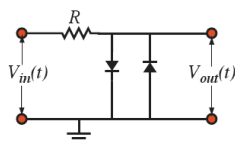
- Ovisnost o temperaturi: $\lambda = \lambda(T)$; temperatura pada, srednji slobodni put raste, kinetička energija raste
- Struja lavinskog proboja raste sniženjem temperature

Jednostavni krugovi s diodom



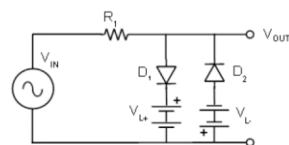
Umanjivač napona
(Voltage dropper)

Limitator (limiter/clipper)



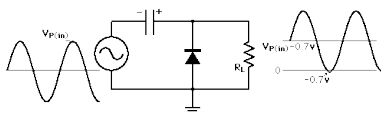
- Osigurava da izlazni napon nikada ne pređe određenu vrijednost
- Služi za zaštitu krugova od iznenadnih visokih napona ili fluktuacija
- Dioda vodi struju samo kada je propusno polarizirana → za napone veće od $\pm 0.6 \text{ V}$ → napon na diodi je tada bliski vrijednosti $\pm 0.6 \text{ V}$
- Za napone između $+0.6 \text{ V}$ i -0.6 V dioda je nepropusno polarizirana → ulazni napon se prenosi na izlaz, nema struje kroz diodu

Varijabilni limitator (variable limiter/clipper)



- Isto kao i diodni limitator, samo je dodana baterija kako bi se napon limitira između vrijednosti $-V_L - 0.6 \text{ V}$ i $V_L + 0.6 \text{ V}$

Spona (diode clamp)

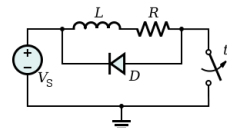


- Pomiče AC signal za neki konstantan iznos
- Kada je ulazni napon manji od -0.6 V → dioda je propusno polarizirana → kondenzator se nabija na napon $U_p - 0.6\text{ V}$ gdje je U_p maksimalni napon AC ulaznog signala
- Kondenzator se više ne može izbiti → kondenzator zadržava konstantan napon s prikazanim polaritetom

$$V_{\text{out}} = V_{\text{in}} + V_c$$

- Izlazni napon je pomaknut za konstantan iznos napona V_c

Zaštita prekidača

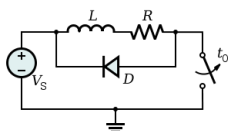


- Koristi se u induktivnim krugovima (npr. Krug sa elektromotor koji sadrži zavojnicu)
- Zatvoreni prekidač: struja prolazi kroz induktor, dioda je nepropusno polarizirana i predstavlja beskonačan otpor
- Otvoreni prekidač: naglo se mijenja struja u krugu → dolazi do indukcije u induktoru i inducira se vrlo veliki napon na krajevima induktora:

$$U_{\text{ind}} = L \frac{di}{dt}$$

→ napon je toliko veliki da može uzrokovati iskrenje na prekidaču i njegovo oštećenje

Zaštita prekidača



- Inducirani napon je takav da propusno polarizira diodu → induktor postaje kratko spojen, kroz njega teče struja, nema napona na otvorenom prekidaču

Digitalni krugovi:

OR
AND

Specijalne diode

Zenerova dioda

Si dioda koja radi kod napona $|U| > |U_p|$

$$U_p = U_{z0}$$

- Karakteristika proboja je približno **linearna i vrlo strma** (mali $\Delta U_z \Rightarrow$ veliki ΔI_z)

$$U_z = U_{z0} + \frac{\Delta U_z}{\Delta I_z} I_z$$

$$\frac{\Delta U_z}{\Delta I_z} = r_z \rightarrow \text{diferencijalni Zenerov otpor}$$

$$U_z = U_{z0} + r_z I_z$$

Ekvivalentna shema:

Zenerov diferencijalni otpor je vrlo mali $\rightarrow$ za velike promjene struje kroz diodu, promjene napona su male:

$$r_z = \frac{\Delta U_z}{\Delta I_z} \ll (\text{oko } 10 \Omega) \rightarrow \text{za dobivanje konstantnih istosmjernih napona}$$

Primjena Zenerove diode:

REGULATOR I STABILIZACIJA NAPONA

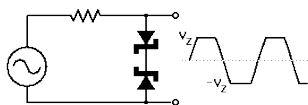
Ako je ulazni napon U_E nestabilan, kako stabilizirati izlazni napon $U_Z = U_Z(U_E)$?

RAČUN

Zaključak:

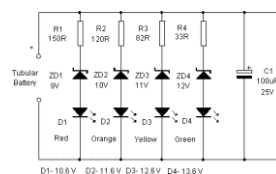
- Potrebna je Zenerova dioda sa što strmijom karakteristikom
- Stabilizacija napona!!

Limitator sa Zenerovom diodom

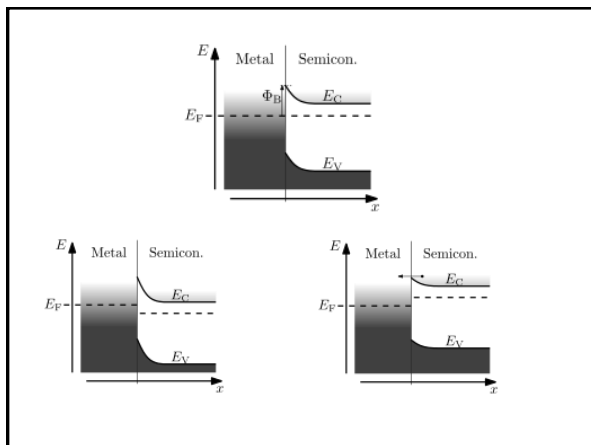


- Slično kao i limitator s običnom diodom $\rightarrow$ osigurava da izlazni napon nikada ne pređe određenu vrijednost
- Kada je ulazni napon veći od $U_p + U_F$ ($U_F = 0.7 \text{ V}$ za Si), obje diode vode struju: gornja dioda je propusno polarizirana, a donja je u proboju
- Daljnjim povećanjem ulaznog napona, izlazni napon ostaje konstantan (napon na krajevima obje diode)
- Kada je ulazni napon negativan i manji od $-(U_p + U_F)$: donja dioda je propusno polarizirana, a gornja u proboju
- Izlazni napon je uvijek između vrijednosti $-(U_p + U_F)$ i $U_p + U_F$

Indikator DC napona sa Zenerovom diodom



- Zenerove diode mogu biti izrađene s različitim naponima proboja
- Različite Zenerove diode – različiti naponi proboja (u gornjem primjeru 9 V, 10 V, 11 V, 12 V)
- Serijski su spojene LED diode koje zasvijetle kada kroz njih teče struja
- Kada ulazni napon raste, prva Zenerova dioda ZD1 neće voditi struju sve dok napon ne postigne vrijednost napona proboja (9 V) $\rightarrow$ ZD1 vodi struju, LED dioda D1 se pali
- Kako ulazni napon i dalje raste, ZD2 vodi struju jer ulazi u režim proboja, pali se LED dioda D2, itd.
- Često se koristi kao indikatori u mobilnim, na zvučnicima, itd.



Specijalne diode

Schottky-jeva dioda

- Za ispravljanje visokofrekventnih (VF) izmjeničnih napona
- **VRLO BRZO** prelazi iz vodljivog (propusnog) u nepropusno stanje
- Transport struje se odvija kroz granični sloj metal-poluvodič

Propusni smjer: emisija elektrona iz poluvodiča u metal

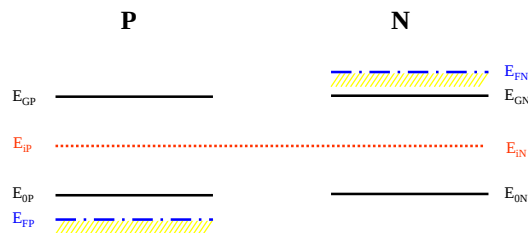
- Struju nose samo elektroni, **nema manjinskih nosilaca** (šupljina) koji bi se kod promjene polariteta morali ukloniti iz graničnog sloja

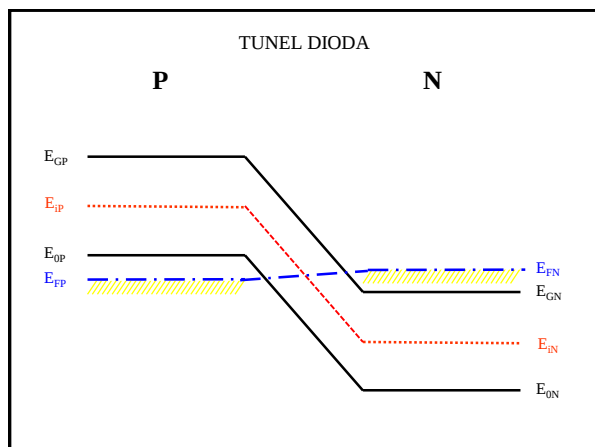
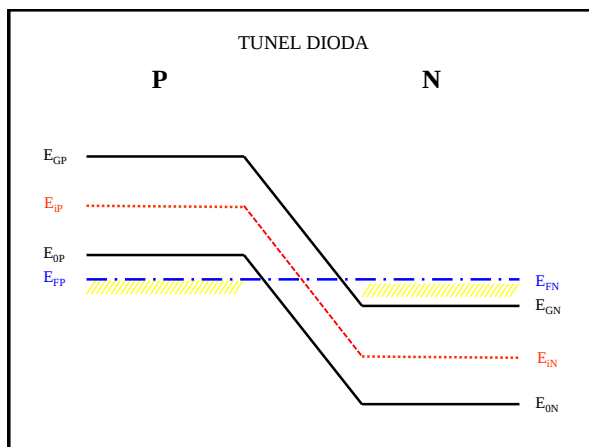
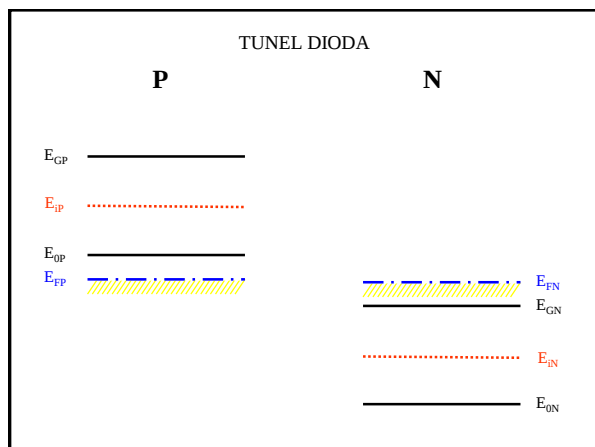
Specijalne diode

Tunel dioda (Esaki, Nobel 1973.)

- Uski zaporni sloj → kod malih napona dolazi do tuneliranja → slobodni elektroni i šupljine prelaze s jedne na drugu stranu pn spoja
- Veliko onečišćenje n i p dijela poluvodiča ($N_A, N_D > 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) ⇒ **DEGENERIRANI POLUVODIČ**
- Veće onečišćenje ⇒ jače savijanje vrpce, toliko jako da u n-poluvodiču Fermijev nivo ulazi u vodljiv pojas, a u p-poluvodiču u valentni pojas
- U ravnoteži se valentni pojas u p-poluvodiču preklapa sa vodljivim pojasom u n-poluvodiču
- Kod visokih onečišćenja barijera je vrlo uska

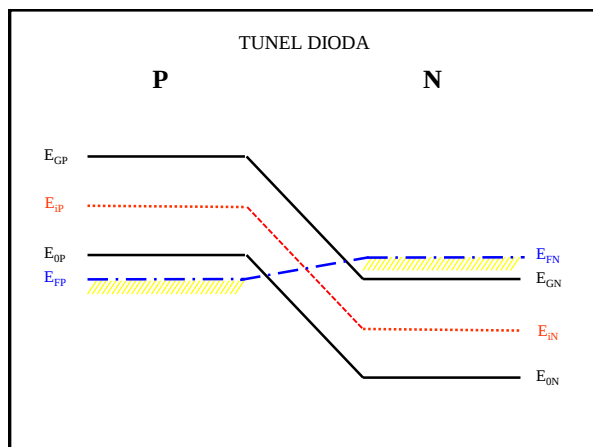
TUNEL DIODA



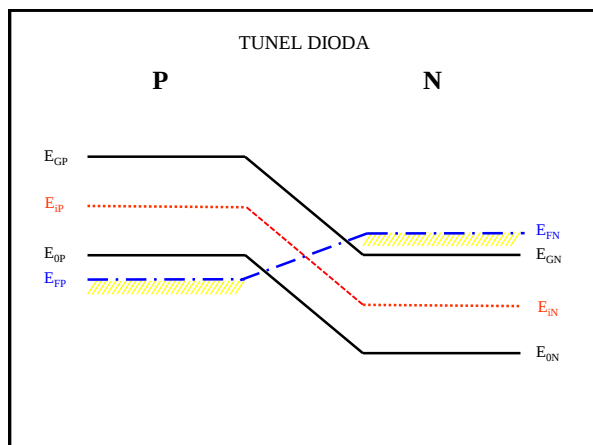


- Kod malih napona ($U < 80 \text{ mV}$) elektroni (vodljiva vrpca u n-poluvodiču) prelaze iz vodljive vrpce u valentnu vrpcu na p-strani poluvodiča → prolazak kroz usku barijeru (tunel efekt)
- Struja tuneliraja raste sve dok se Fermijev nivo n-poluvodiča ne poklopi sa vrhom valentne vrpce u p-poluvodiču:

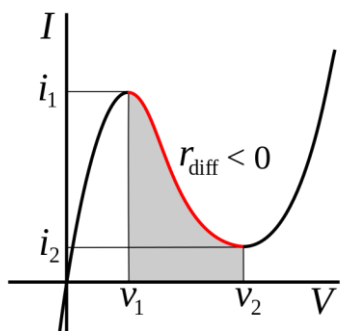
$$E_{FN} = E_{0P}$$
- Tunelska struja raste do neke vrijednosti I_H



- Daljnjim porastom napona sve manje elektrona iz n-poluvodiča pronalazi slobodna mjesta u valentnom pojasu p-poluvodiča
- Prelaskom na p-stranu poluvodiča, elektroni popunjavaju valentno područje, struja počinje padati kako barijera pada do neke vrijednosti $I_T \rightarrow$ područje **NEGATIVNOG OTPORA**



- Daljnjim porastom napona elektroni savladavaju potencijalnu barijeru i prelaze u p-poluvodič 'normalnim' putem
- započinje teći 'normalna' diodna struja:
 $E_{GN} = E_{0P}$



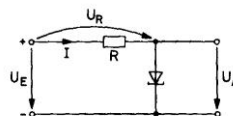
Primjena tunel diode:

Visokofrekventni uređaji (UHF) → televizija

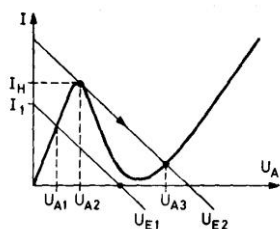
- Vrlo trajna dioda

Diskriminatori:

- Daju izlazni impuls samo kada ulazni napon prijeđe određenu vrijednost (prag)



$$U_A = U_E - IR$$



Radni pravac:

$$I = 0 \quad U_A = U_{E1}$$

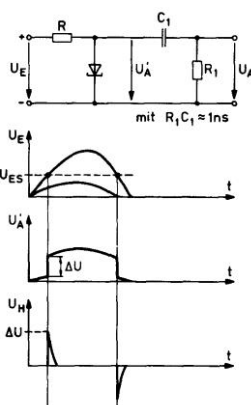
$$U_A = 0 \quad I_1 = \frac{U_{E1}}{R}$$

Koliko iznosi izlazni napon U_A kada ulazni napon U_E raste?

Za $U_E = U_{E2}$ skok: izlazni napon naglo pada sa U_{A2} na U_{A3}

$$\Delta U_A = U_{A3} - U_{A2} \sim 0.3 \text{ V u } t=1 \text{ ns}$$

- Na izlazu se kod prekoračenja U_{E2} javlja oštra promjena napona
- Stavimo li na izlaz **VF filter** koji djeluje kao derivator → oštra promjena napona postaje **IMPULS**



Na izlazu se preko VF filtra dobije impuls

Dolazi do deriviranja

izlaznog napona U_A ako je:

$$v \ll v_g$$

$$t_d \gg RC$$

Emisija i apsorpcija fotona

LED dioda

- pn spoj može stvoriti foton
- Apsorpcijom fotona se mogu promijeniti električna svojstva pn spoja
- Foton se emitira promjenom energijskog stanja elektrona

Propusna polarizacija:

- Elektroni i šupljine se gibaju u suprotnim smjerovima → elektroni mogu skočiti iz svog višeg stanja u niže stanje u šupljini → **EMISIJA FOTONA**
- Dioda kao izvor svjetlosti → **LED DIODA**

Emisija i apsorpcija fotona

Foto-dioda

- Foton se apsorbira u pn spoju → elektron prelazi iz valentne u vodljivu vrpcu apsorpcijom fotona → stvara se par elektron-šupljina
- Moguće je stvoriti veliki broj parova elektron-šupljina → mijenjaju se električna svojstva pn spoja → nastaje struja → **FOTO DIODA**

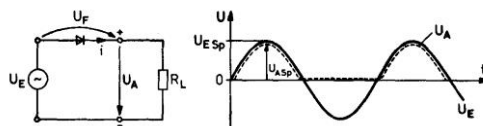
Primjena diode u složenijim krugovima

1. Ispravljači:

- Poluvalni ispravljač
- Punovalni ispravljač

2. Multiplikator napona

Poluvalni ispravljač



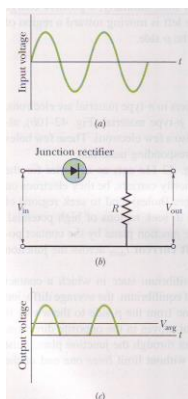
$U_E > 0 \rightarrow$ dioda je propusno polarizirana:

$$U_A = U_E - U_F$$

$$U_F = 0.3 \text{ V (Ge); } 0.7 \text{ V (Si)}$$

$U_E < 0 \rightarrow$ dioda je nepropusno polarizirana:

$$I_S \approx 0 \rightarrow U_A = I_S R_L \rightarrow U_A \approx 0$$

**Rezultat:**

- Na izlaz se prenosi samo pozitivna poluperioda ulaznog signala (propusna polarizirana dioda)
- Negativna poluperioda se ne prenosi (nepropusna polarizirana dioda)

Izgladivanje signala → CILJ: dobivanje istosmjernog napona iz izmjeničnog

- Paralelno se spaja kondenzator C
- Tijekom pozitivne poluperiode (propusna polarizacija diode) kondenzator se nabija na U_{Cmax} :

$$U_{Cmax} = U_{Emax} - U_F$$

- Negativna poluperioda (nepropusna polarizacija diode):

- Izbijanje kondenzatora koji se ne može istovremeno izbiti
- Izbijanje se odvija kroz otpor R_L kojim teče struja i_A :

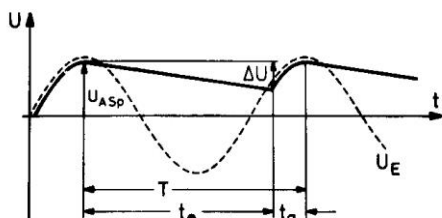
$$i_A = -C \frac{dU_C}{dt} = -C \frac{dU_A}{dt}; \quad i_A = \frac{U_A}{R_L}$$

$$-C \frac{dU_A}{dt} = \frac{U_A}{R_L}$$

$$\frac{dU_A}{U_A} = -\frac{dt}{CR_L}$$

$$U_A = U_{Amax} e^{-t/CR_L}$$

$$U_A = U_{Amax} e^{-t/CR_L}$$



$\Delta U = ?$

Koliko iznosi pad napona koji je poluvalno ispravljen? ⇒ Mjera za **kvalitetu izgladivanja napona**

→ pad napona za vrijeme izbijanja kondenzatora C, t_e vrijeme izbijanja kondenzatora (dioda nepropusno polarizirana)

Uvjet: $R_L C \gg T$; vrijedi: $t_e < T$

Ako vrijedi gornji uvjet, razvoj u red:

$$u_A = U_{Amax} \left(1 - \frac{t}{R_L C} \right)$$

$$\Delta U = U_{Amax} - u_A(t_e) = U_{Amax} - U_{Amax} \left(1 - \frac{t_e}{R_L C} \right)$$

$$\Delta U = U_{Amax} \frac{t_e}{R_L C} = \frac{I_A}{fC} \quad \left(\text{uz } I_A \approx \frac{U_{Amax}}{R_L}; t_e \approx T = \frac{1}{f} \right)$$

Izlazni napon u_A :

→ superpozicija glatkog istosmjernog napona $\overline{U_A}$
+ izmjenična komponenta ΔU

Punovalni ispravljač

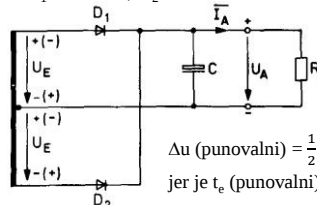
Prednosti pred poluvalnim ispravljačem:

1. Veće istosmjerne struje
2. Bolje izgladivanje, manja izmjenična komponenta ΔU

Koriste se oba poluvala ulaznog signala U_E (+ i -)

a) 2 poluvalna ispravljača koji rade naizmjenično:

- D_1 vodi, D_2 zatvorena
- D_1 zatvorena, D_2 vodi



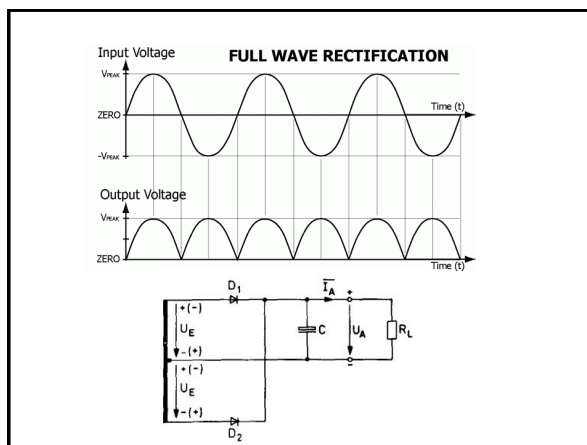
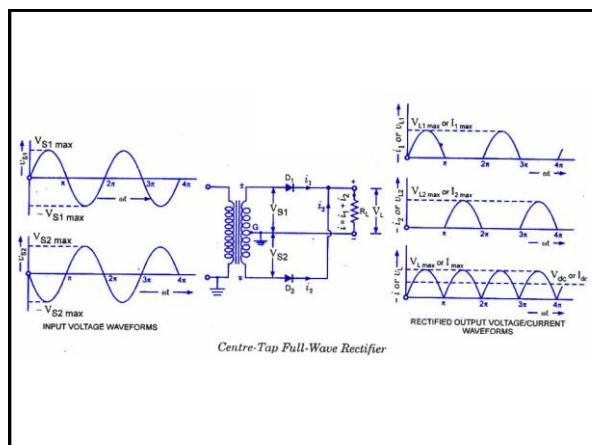
$$\Delta u \text{ (punovalni)} = \frac{1}{2} \Delta u \text{ (poluvalni)}$$

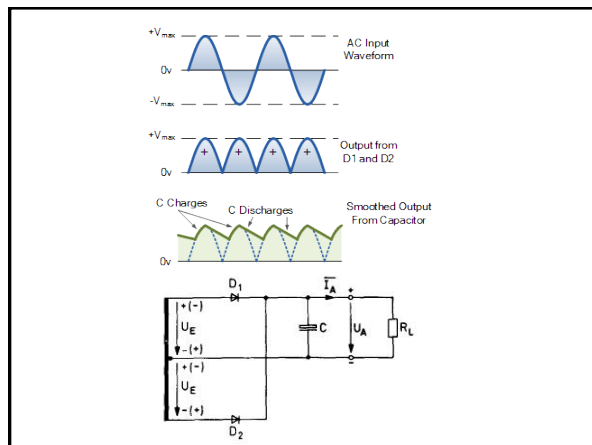
$$\text{jer je } t_e \text{ (punovalni)} = \frac{1}{2} t_e \text{ (poluvalni)}$$

$$\overline{I_A} = 2\overline{I_D} \text{ jer doprinos daje svaka dioda}$$

Problem efikasnosti → maksimalna vrijednost struje je:

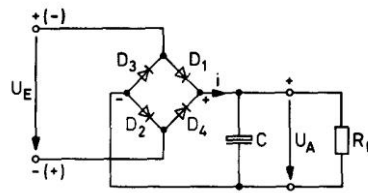
$$I_{Amax} = \left(\frac{1}{2} 2U_{Emax} - U_F \right) / R_L \text{ jer se koristi samo polovica transformatora}$$



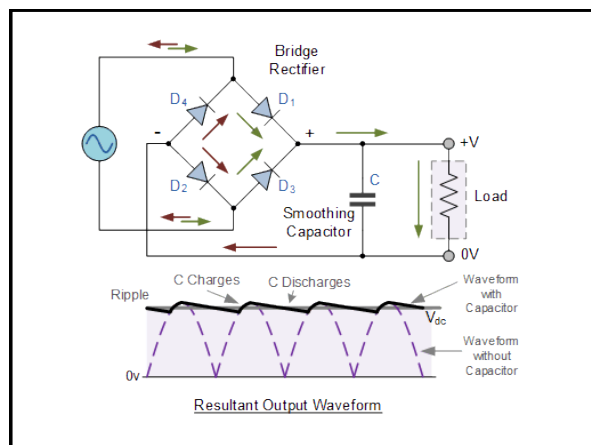
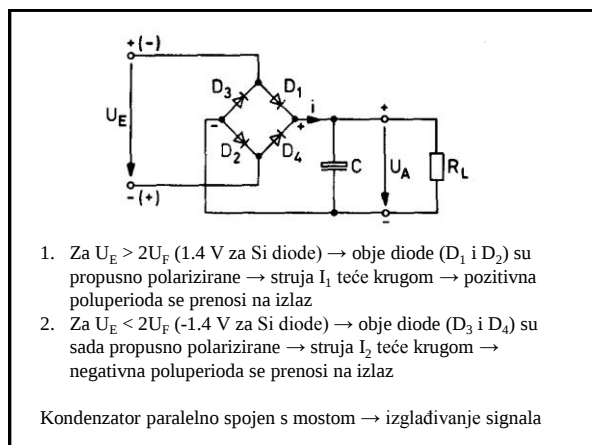


b) Graetzov spoj – mostni spoj za punovalno ispravljanje

- D_1, D_2 serijski spoj
- D_3, D_4 serijski spoj



- Koristi se cjelokupni ulazni napon (velika prednost)



$$\Delta U = U_{Amax} \frac{t_e}{R_L C} = \frac{I_A}{2fC} \left(\text{uz } I_A \approx \frac{U_{Amax}}{R_L}; t_e \approx T/2 = \frac{1}{2f} \right)$$

Graetzov spoj se najčešće koristi kao ispravljač

Regulacija: mjera kvalitete izvora napona → idealni naponski izvor daje konstantni napon bez obzira na struju

Problem Graetzovog spoja kao filter za istosmjerno napajanje:

Valovitost ΔU je ovisna o izlaznoj struji I_A → izlazni napon i njegova kvaliteta ovisni su o izlaznoj struji

Moguće rješenje: povećati frekvenciju f ulaznog signala i kapacitet kondenzatora C

Graetzov spoj je slabo reguliran.

Drugi nedostaci:

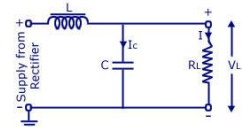
- Zahtjeva 4 diode
- Gubitak od 1.4 V potreban za propusnu polarizaciju dviju dioda

Druge vrste filtera za napajanje:

LC filter → $\Delta U = 0$

$$U_A = \frac{2}{\pi} U_{Emax}$$

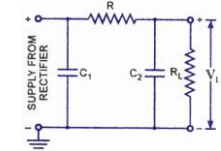
Dobra regulacija: napon je neovisan o struji



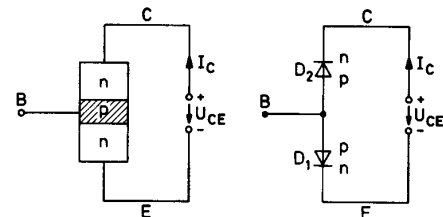
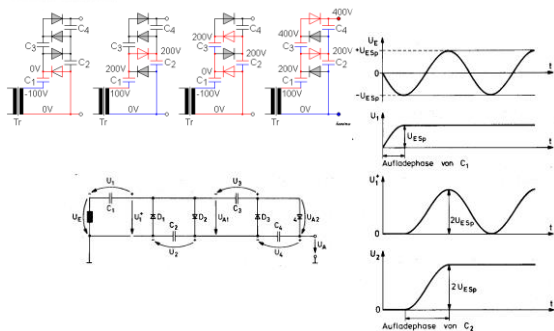
RC π filter

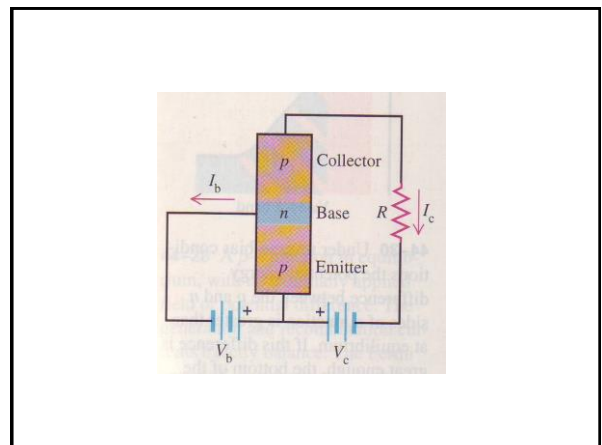
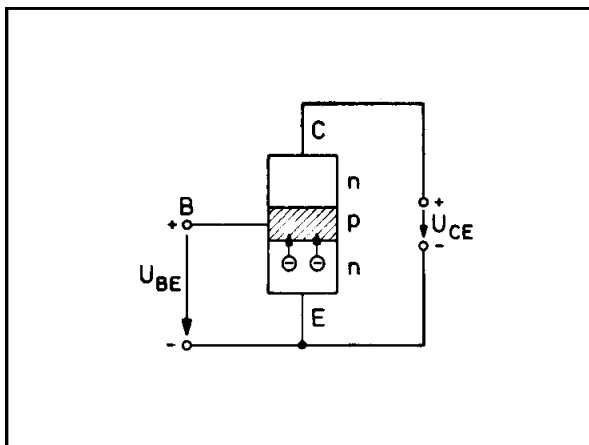
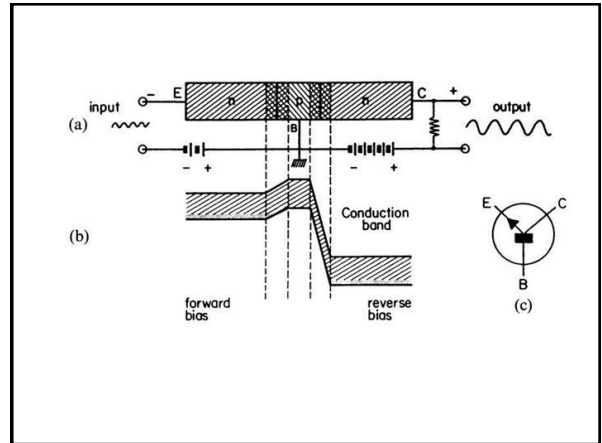
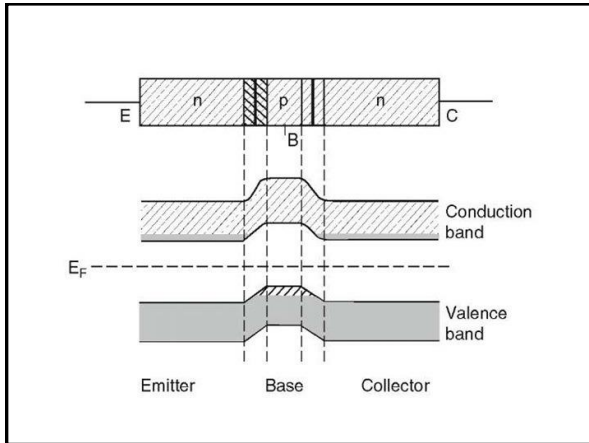
$$\Delta U = \left(\frac{1}{2fC_1} + R \right) I_A$$

Za signale visoke frekvencije (npr. agregate/generatore na naftu)



Multiplikator napona





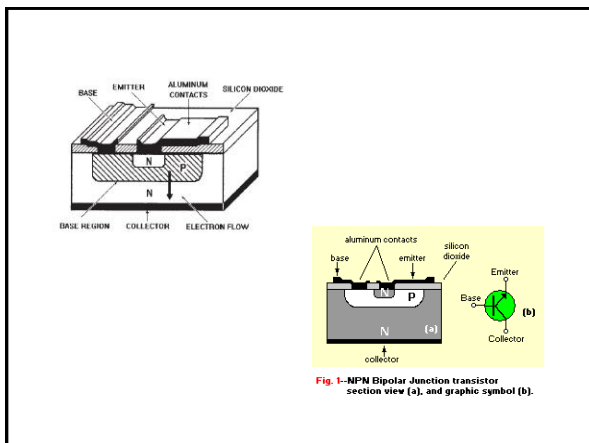
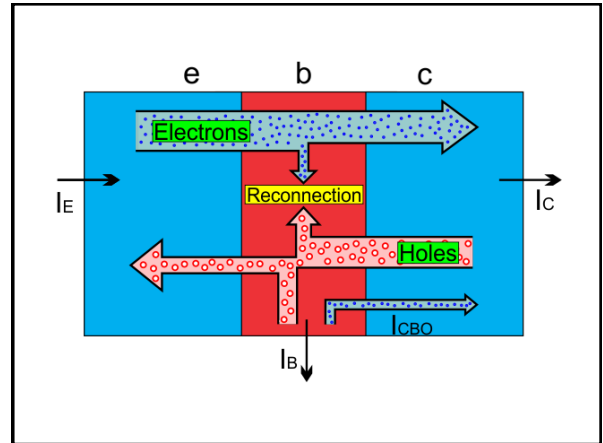
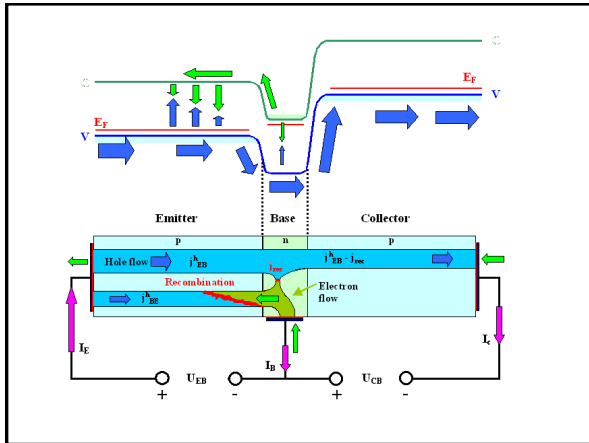
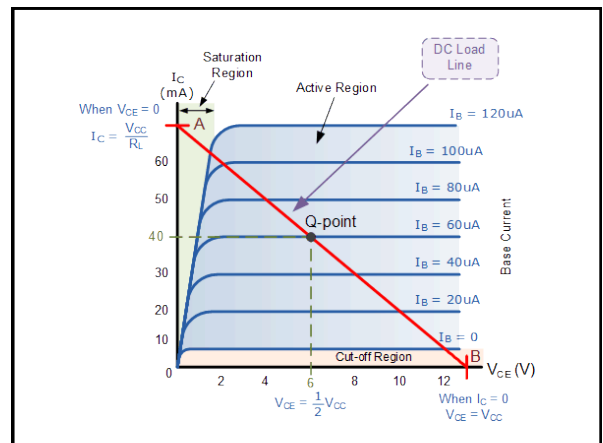
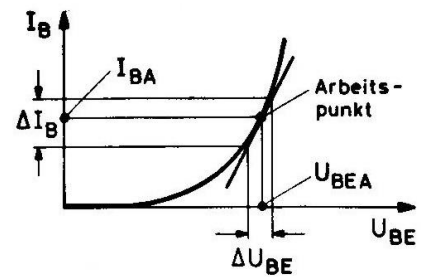
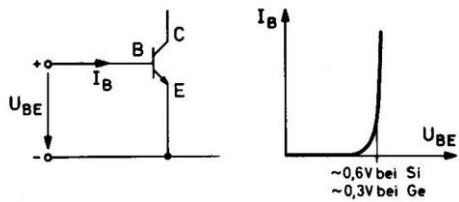
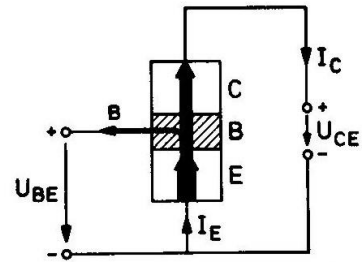
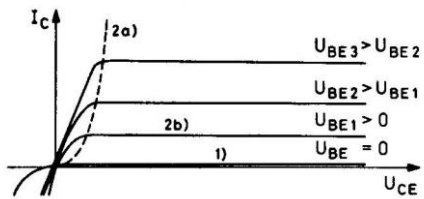
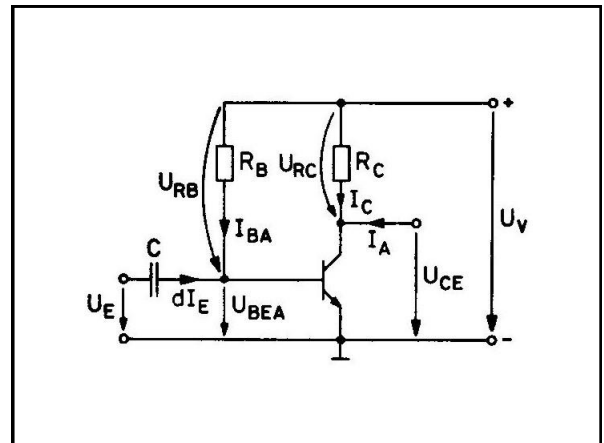
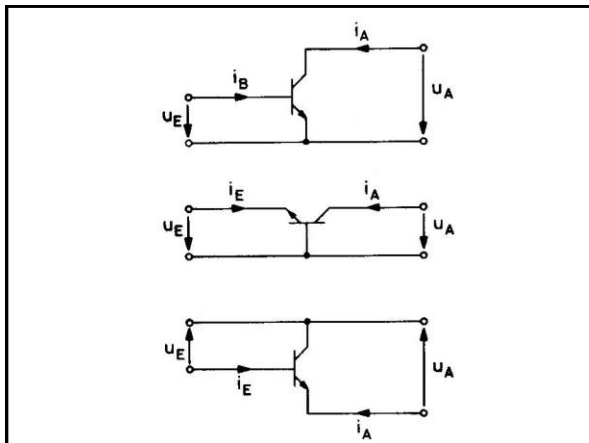
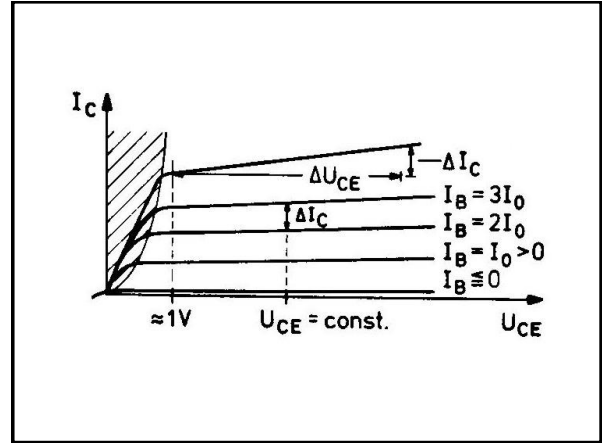
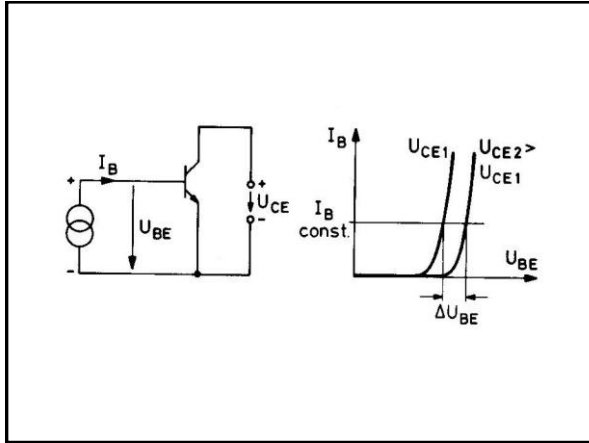
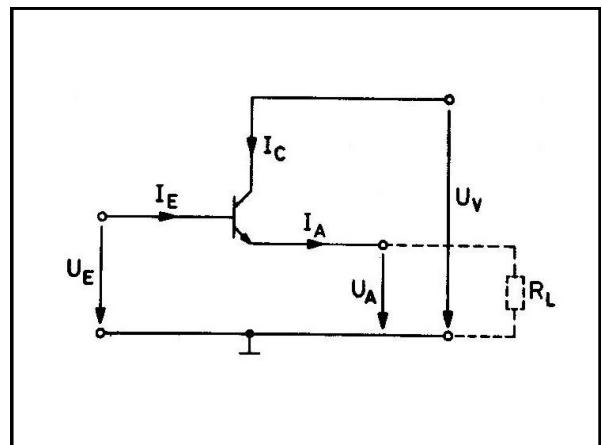
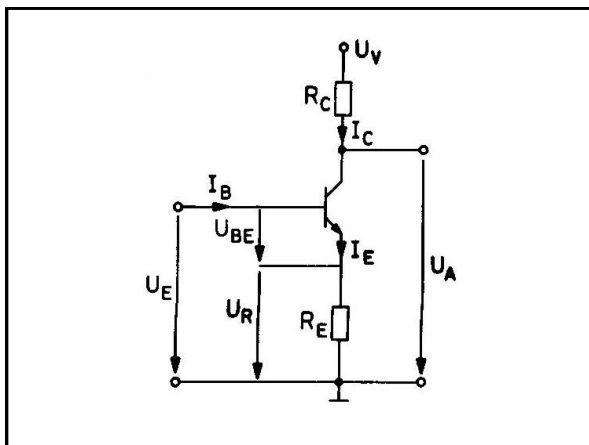
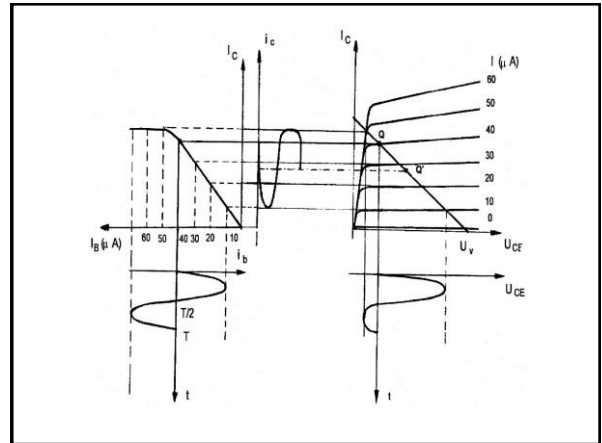
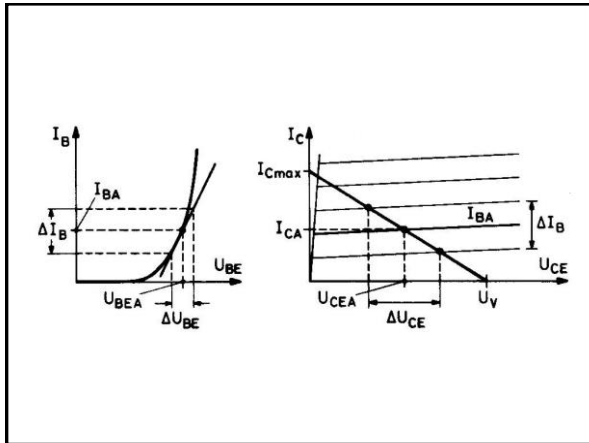


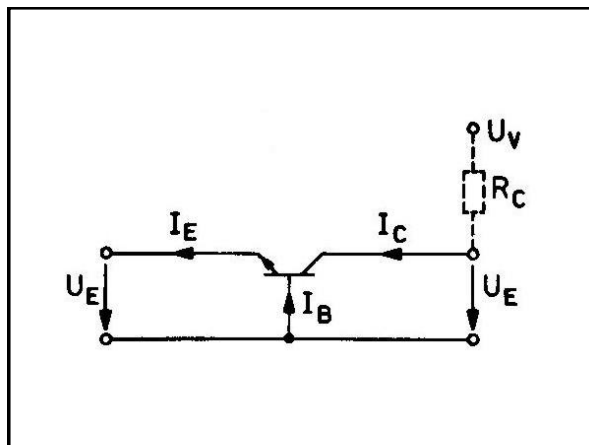
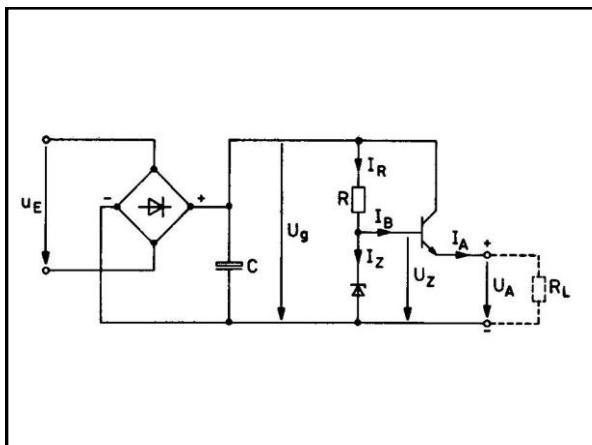
Fig. 1-NPN Bipolar Junction transistor section view (a), and graphic symbol (b).











Theveninov teorem

Svaki linearni električki krug (mreža) sa naponskim i strujnim izvorima i samo otporima može se zamijeniti s ekvivalentnim naponskim izvorom serijski spojenim s ekvivalentnim otporom na krajevima terminala.

Ekvivalentni napon jednak je naponu na krajevima terminala kada su ti krajevi OTVORENI.

Ekvivalentni otpor jednak je otporu na krajevima terminala kada su svi naponski izvori KRATKO SPOJENI a strujni izvori OTVORENI.

Nortonov teorem

Svaki linearni električki krug (mreža) sa naponskim i strujnim izvorima i samo otporima može se zamijeniti s ekvivalentnim strujnim izvorom paralelno spojenim s ekvivalentnim otporom na krajevima terminala.

Ekvivalentna struja jednaka je struji KRATKO SPOJENIH krajeva terminala.

Ekvivalentni otpor jednak je otporu na krajevima terminala kada su svi naponski izvori KRATKO SPOJENI a strujni izvori OTVORENI.

UNIPOLARNI TRANZISTORI

FET – Field Effect Transistor Tranzistor s efektom polja

- Samo VEĆINSKI NOSIOCI sudjeluju u vođenju struje
Field Effect Transistor → **struja kroz tranzistor regulirana pomoću električnog polja**

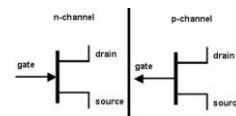
Vrste FET tranzistora:

- JFET** (Junction FET) → spojni FET
- MOSFET** (Metal Oxide Semiconductor FET) → metal-oksido-poluvodič FET, FET s izoliranom upravljačkom elektrodom

JFET – spojni FET

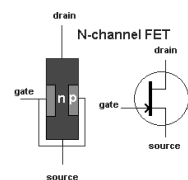
Sastoji se od:

- Supstrata (Silicijev kristal)
- Kanala
- Vratiju (gate)



Prema tipu poluvodiča u kanalu razlikujemo:

- p-kanalni JFET
(n-supstrat, p-kanal, n-vrata)
- n-kanalni JFET
(p-supstrat, n-kanal, p-vrata)



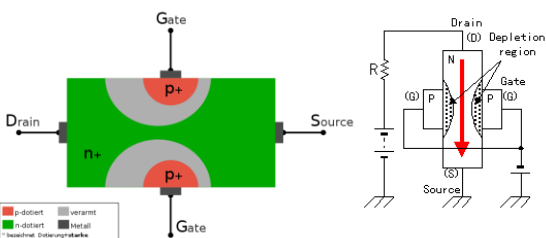
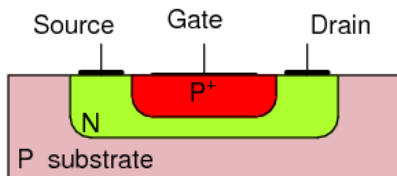
Elektrode tranzistora:

- Izvor (source)
- Odvod (drain)
- Vrata (gate)

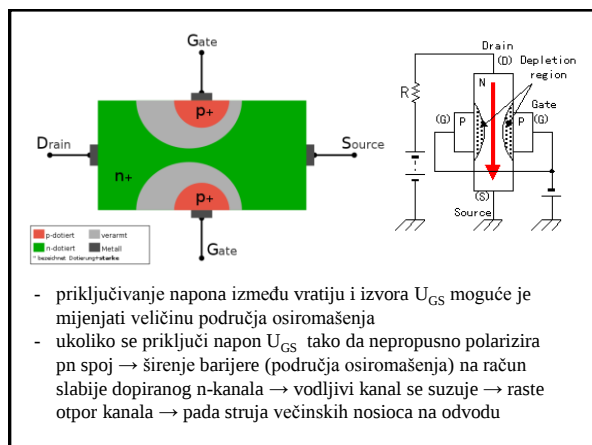
JFET – spojni FET

Tehnička izvedba:

- u p-supstrat udifundira se n-kanal
- u n-kanal se udifundira p-zona → elektroda G (vrata)
- na krajeve n-kanala nanese se metalni kontakti za elektrode izvora (S) i odvoda (D)



- priključivanje napona između izvoda i odvoda $U_{DS} > 0$ ($U_G = 0$) većinski nosioci (elektroni) gibaju se kroz kanal → struja teče kroz kanal (omski otpor)
- na pn spoju između p-vratiju i n-kanala nastaje područje osiromašenja

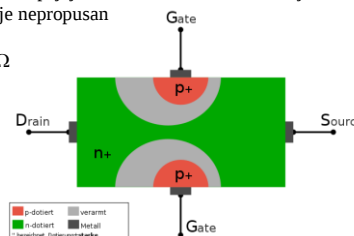


REKAPITULACIJA

U_{GS} raste ⇒ kanal se sužava ⇒ otpor kanala raste ⇒ struja opada
REGULACIJA otpora kanala pomoću napona nepropusne polarizacije vratiju U_{GS}

Za dovoljno visoke napone nepropusne polarizacije U_{GS}
 ⇒ područja osiromašenja se spajaju ⇒ zatvara se kanal ⇒ struja $I_{DS} = 0$ ⇒ tranzistor postaje nepropusan

Otpor kanala $R_{off} > 10 \text{ M}\Omega$

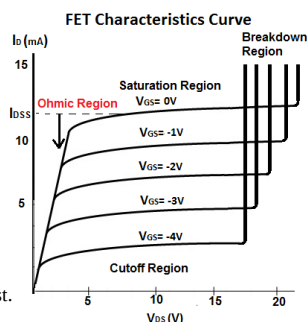


STRUJNO-NAPONSKA KARAKTERISTIKA JFET TRANZISTORA

KARAKTERISTIKU

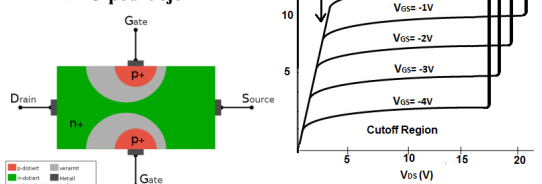
- Posjeduje samo IZLAZNU KARAKTERISTIKU
- Struju tvore samo većinski nosioci
- Promatramo ovisnost struje odvoda I_D o naponu odvoda U_{DS} za danu vrijednost napona vratiju U_{GS}

$$I_D = f(U_{DS}) \text{ za dati } U_{GS} = \text{const.}$$



Porast napona vratiju U_{GS} ⇒ porast nepropusne polarizacije pn spoja
 ⇒ širi se područje osiromašenja u kanal ⇒ sužava se vodljivi kanal
 ⇒ otpor kanala raste ⇒ manje struje odvoda I_D

Za dovoljno visoke napone nepropusne polarizacije vratiju U_{GS} ⇒ kanal se zatvara ⇒ struja odvoda I_D vrlo mala ⇒ **PREKIDNO područje**



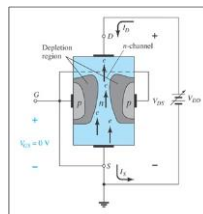
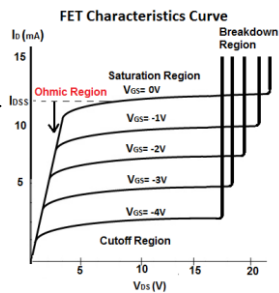
$$U_{GS} = 0$$

$I_D \sim U_{DS} \Rightarrow$ linearni porast kao omski otpor $\Rightarrow$ **OMSKO**

PODRUČJE karakteristike

- linearni porast do $U_{DS} = U_K$
- za $U_{DS} = U_K \rightarrow I_D = I_{DSS} = \text{const.}$
- nestaje linearnog porasta $I_D \rightarrow$ područje **SATURACIJE**

Zašto više struja odvoda I_D ne raste s povećanjem napona odvoda U_{DS} ?

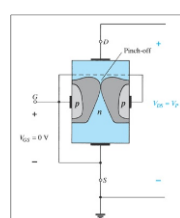
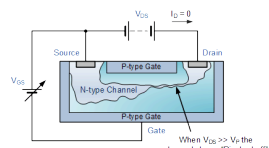
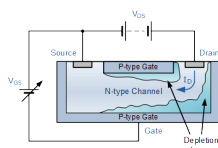
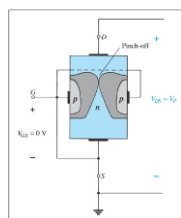
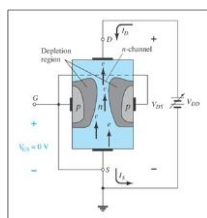
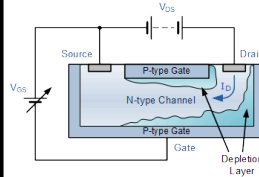


$U_A = 0$ jer je spojeno na uzemljenje (negativni potencijal)

$U_B > U_A$ zbog postojanja pada napona na omskom otporu kanala

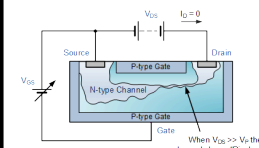
$U_B > U_{GS} = 0 \Rightarrow$ jača nepropusna polarizacija uzduž kanala

raste napon odvoda $U_{DS} \Rightarrow$ jača nepropusna polarizacija $\Rightarrow$ širi se područje osiromašenja $\Rightarrow$ jače suženje kanala $\Rightarrow$ raste otpor $\Rightarrow$ struja odvoda I_D više ne raste linearno već postaje konstantna

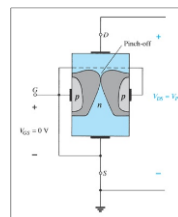
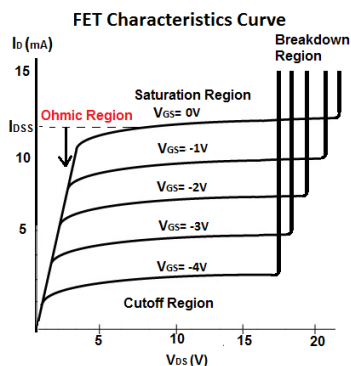


dovoljno visok napon odvoda $U_{DS} \Rightarrow$ kanal se zatvara $\Rightarrow$ otpor kanala R postaje vrlo velik $\Rightarrow$ struja kroz zatvoreni kanal $I_D = I_{DSS}$ postaje konstantna i ne raste s porastom napona odvoda $U_{DS} \Rightarrow$ **SATURACIJSKO** područje u karakteristici tranzistora

$U_K = U_{DS}$ napon odvoda kod kojeg su se barijere spojile a kanal zatvorio za $U_{GS} < 0$ do spajanja barijera dolazi ranije, pri nižem naponu odvoda $U_{DS} \Rightarrow$ Zašto??

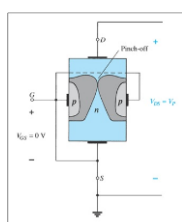
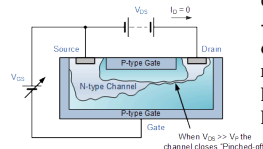


U_{GS} je napon nepropusne polarizacije $\Rightarrow$ pomaže širenju područja osiromašenja $\Rightarrow$ pri nižim U_{GS} dolazi do zatvaranja kanala za manje napone odvoda $U_{DS} = U_K$



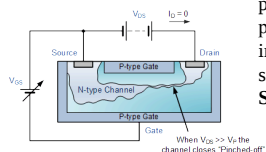
Što se događa pri zatvaranju kanala na naponu odvoda $U_{DS} = U_K$ i struji $I_D = I_{DSS}$? Struja ne bi trebala teći?

- Nosioci naboja bivaju injektirani u zonu osiromašenja, slično injektiji nosioca u bazu iz emitera kod BJT
- Struja teče zonom osiromašenja i zaobilazi izravni put od izvora do odvoda.
- Struja preko zone osiromašenja ograničena je brojem injektiranih nosilaca u zonu osiromašenja (slično kao i struja preko zone osiromašenja kolektor-baza)



Daljnje povećanje napona odvoda $U_{DS} > U_K \Rightarrow$ daljnje preklapanje zone osiromašenja i pomicanje točke kontakta prema izvoru

- U području osiromašenja nema slobodnih nosioca naboja $\Rightarrow$ struja je ograničena injektiranim nosiocima iz kanala $\Rightarrow$ bez obzira na daljnje preklapanje zone osiromašenja povećanjem napona U_{DS} , broj injektiranih nosioca se ne mijenja i struja ostaje konstantna: $I_D = I_{DSS} \Rightarrow$ **SATURACIJA**

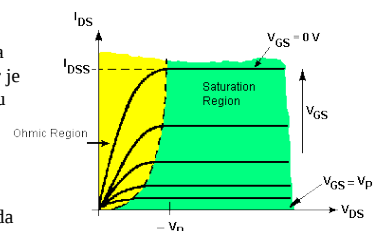


Omsko (linearno) područje:

- $U_{DS} = R I_D$
- Napon vratiju U_{GS} kontrolira otpor kanala
- Struja kroz tranzistor je proporcionalna naponu

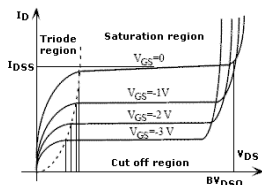
Područje saturacije:

- $I_D = I_{DSS} = \text{const.}$
- Napon vratiju U_{GS} kontrolira struju odvoda kroz tranzistor I_D
- Struja kroz tranzistor je konstantna



$U_{GS} = 0$; $R_{on} < 200 \Omega \Rightarrow$ JFET vodi struju i kada nije uključen upravljački napon vratiju U_{GS}
 $\Rightarrow$ 'samovodljivi' JFET

- Vrata (G) su u odnosu na kanal (S i D) nepropusno polarizirana
 $\Rightarrow$ iz kanala prema G teče vrlo mala struja nepropusne polarizacije
 $\Rightarrow$ Struja vratiju I_G je vrlo mala: $I_G \approx nA$
 $\Rightarrow$ Nema gubitka snage kod regulacije otpora kanala



Karakteristike i parametri FET-a

(izlazna i prijenosna karakteristika)

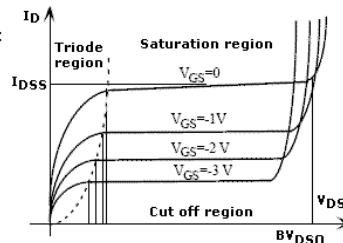
Izlazna karakteristika: $I_D = I_D(U_{DS})|_{U_{GS}}$

Parametri: $I_D = f(U_{DS}, U_{GS})$

$$dI_D = \frac{\partial I_D}{\partial U_{DS}}|_{U_{GS}} dU_{DS} + \frac{\partial I_D}{\partial U_{GS}}|_{U_{DS}} dU_{GS}$$

Unutarnji (izlazni) otpor:

$$R_u = \frac{\partial U_{DS}}{\partial I_D}|_{U_{GS}}$$

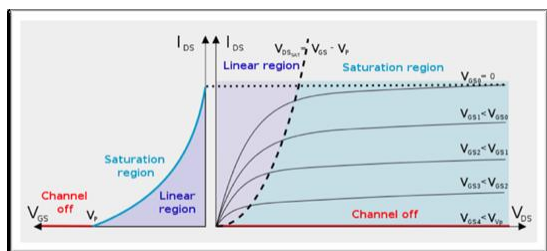


Prijenosna karakteristika (za $U_{DS} = \text{const.}$)

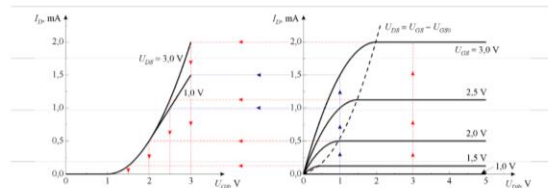
Strmina: $S = \frac{\partial I_D}{\partial U_{GS}}|_{U_{DS}}$

$$\mu = -R_u S$$

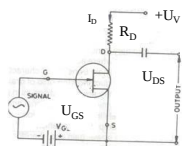
Pojačanje: $\mu = -\frac{\partial U_{DS}}{\partial U_{GS}}|_{I_D}$



Prijenosne karakteristike mogu se konstruirati iz izlaznih karakteristika



Pojačalo s FET-om



G: gate – vrata
S: source – izvor
D: drain – odvod

n-kanalni JFET

$$U_{DS} = U_V - I_D R_D$$

$$\Delta I_D \Rightarrow \Delta U_{DS}$$

$$\Delta U_{DS} = -R_D \Delta I_D$$

$$\Delta U_{DS} = -R_D S \Delta U_{GS}$$

$$v_u = \frac{\Delta U_{DS}}{\Delta U_{GS}} = -R_D S$$

$$S = \frac{\Delta I_D}{\Delta U_{GS}} \approx \left(\frac{dI_D}{dU_{GS}} \right)_{U_{DS}}$$

$$\Delta I_D = S \Delta U_{GS}$$

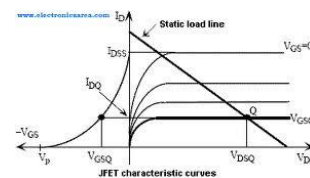
Pojačalo s FET-om

$$\frac{\Delta v_u}{v_u} = \frac{U_E}{U_{GSQ} - U_p}$$

$$U_E \ll U_{GSQ} - U_p \Rightarrow \frac{\Delta v_u}{v_u} \ll 1$$

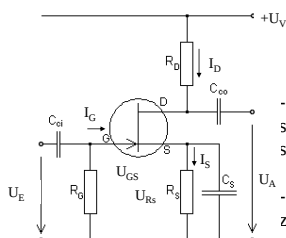
$$v_u = v_{uQ} + \Delta v_u$$

$$\Delta v_u \approx 0 \Rightarrow v_u \approx v_{uQ} = -S_Q R_D$$



- ulazni napon U_E linearno pojačan može biti do oko 10 puta veći nego kod bipolarnog tranzistora

Pojačalo s FET-om: podešavanje radne točke



$$I_G \approx 0 \Rightarrow I_D \approx I_S$$

- kroz otpornik R_S prolazi struja $I_S \approx I_D$ i na njemu stvara pad napona U_{RS}

- pad napona na R_G je zanemariv jer je $I_G \approx 0$

$$I_G R_G = U_{GS} + U_{RS}$$

$$I_G \approx 0 \Rightarrow I_G R_G \approx 0$$

$$U_{GS} + U_{RS} \approx 0 \Rightarrow U_{GS} \approx -U_{RS}$$

- ovo pokazuje da je potencijal vratiju (G elektrode) niži od potencijala izvora (S elektrode), što je osnovni uvjet za funkciju n-kanalnog FET-a

Kako odabrati vrijednost otpora R_S ?

$$R_S = \frac{U_{RS}}{I_D} = -\frac{U_{GSQ}}{I_{DQ}} \quad \text{u odabranoj radnoj točki Q (} I_{DQ}, U_{SDQ}, U_{GSQ} \text{)}$$

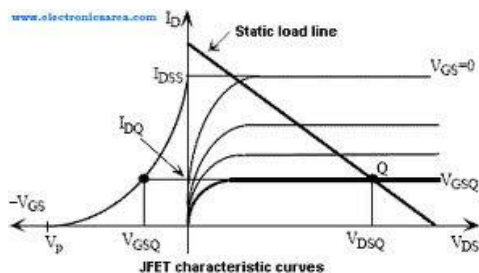
Radna točka se odabire iz karakteristika JFET tranzistora, a mora se nalaziti na radnom pravcu (postoji samo jedan radni pravac i jedan krug – izlazni):

$$U_V = I_D R_D + U_{DS} + I_S R_S; \quad I_S \approx I_D$$

$$U_V = I_D (R_D + R_S) + U_{DS}$$

$$\text{napon praznog hoda: } I_D = 0 \Rightarrow U_{Vph} = U_{DS}$$

$$\text{struja kratkog spoja: } U_{DS} = 0 \Rightarrow I_{Dks} = \frac{U_V}{R_D + R_S}$$



Treba izbjeći djelovanje strujne povratne veze na otpor izvora R_S kada se na ulaz priključi promjenjivi signal U_E :

$$\Delta U_{RS} = R_S \Delta I_D \Rightarrow \Delta U_{GS} = -R_S \Delta I_D \neq 0 \text{ jer je } \Delta I_D \neq 0$$

$$U_E \rightarrow \Delta U_G \rightarrow \Delta I_D$$

$\Delta U_{GS} \neq 0 \Rightarrow$ dolazi do pomaka radne točke zbog postojanja otpornika R_S na kojem dolazi do strujne povratne veze

Ovaj pomak treba izbjeći: stabiliziranje radne točke tako da je $U_{GS} = \text{const.}$

Rješenje: priključivanje kondenzatora C_S paralelno otporniku R_S (slično stabilizaciji radne točke kod bipolarnog tranzistora)

Kondenzator C_S propušta izmjeničnu komponentu signala i sprječava strujnu povratnu vezu na izmjenični signal.

Kondenzator C_S treba predstavljati kratki spoj za izmjenični signal $\rightarrow$ otpor mora biti što manji za izmjenični signal frekvencije f :

$$X_{C_S} = \frac{1}{2\pi f C_S}$$

Potrebno je odabrati što veći kapacitet kondenzatora C_S tako je X_{C_S} dovoljno malen i za niže frekvencije f .

Ovim se postupkom izbjegava strujna povratna veza na izmjenični signal i destabilizacija radne točke u širokom opsegu frekvencija.

Kondenzatori na ulazu i izlazu služe za odvajanje izmjeničnog signala od istosmjernog napona polarizacije pn spojeva u tranzistoru (jednako kao i kod bipolarnog tranzistora)

MOSFET

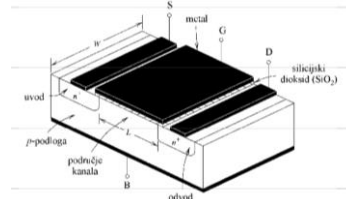
MOSFET – Metal Oxide Semiconductor FET
MESFET – Metal Semiconductor FET

M – metalne elektrode

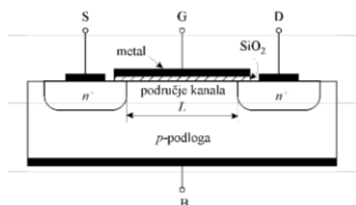
O – oksid (SiO_2) između metala i poluvodiča

S – poluvodič (semiconductor)

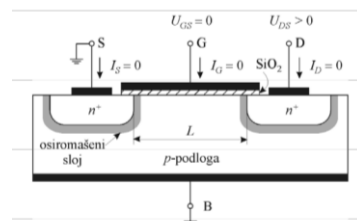
Upravljačka elektroda G (vrata) izolirana je od poluvodiča oksidom SiO_2



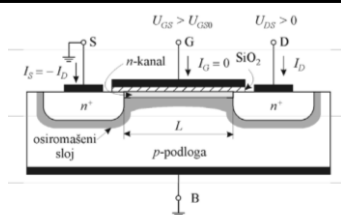
n-kanalni MOSFET



- u p-supstrat (podlogu) ugrađene su 2 n zone povezane s izvorom (S) i odvodom (D)
- dvije n zone NISU povezane n-kanalom kao kod JFET tranzistora

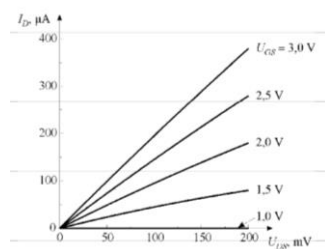


Napon $U_{DS} > 0$ nepropusno polarizira pn spoj za napon vratiju $U_{GS} = 0$
 $\Rightarrow$ nastaje područje osiromašenja u pn spoju
 Tranzistor još uvijek ne vodi struju jer NEMA kanala



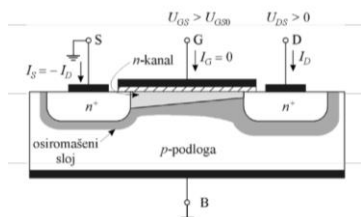
- Napon $U_{GS} > 0$ na površinu p-podloge ispod oksida privlači elektrone i odbija šupljine
- Uz dovoljno veliki $U_{GS} > 0$ površina uz oksid postaje n-tip $\Rightarrow$ OTVARA se n-kanal koji povezuje izvor (S) i odvod (D)!
- Stvaranje n-kanala $\Rightarrow$ formira se poluvodički otpornik n-tipa (jednako kao i kod JFET-a)
- Za razliku od JFET-a, potreban je minimalni napon (napon praga) $U_{GS} = U_{GS0}$ potreban za otvaranje kanala

U_{GS} je upravljački napon $\Rightarrow$ formiranje n-vodljivog kanala u p-podlozi
 kanalna zona ispod upravljačke elektrode obogaćuje se slobodnim nabojima – 'obogaćeni' tip MOSFET-a

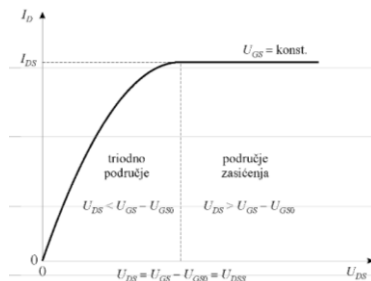


Mali napon $U_{DS} >$ pad napona $\Rightarrow$ MOSFET je linearni otpornik (kao i JFET)

Povećanjem napona $U_{GS} > 0$ raste koncentracija elektrona u kanalu i vodljivost kanala $\Rightarrow$ MOSFET je naponom upravljani linearni otpornik



- Povećanjem napona U_{DS} nastaje pad napona u kanalu
- Kanal se prema odvodu (D) sužava (kao i kod JFET-a) $\Rightarrow$ otpor kanala raste
- Za dovoljni veliki napon $U_{DS} = U_{DSS}$ kanal se zatvara, struja postiže maksimalnu vrijednost $I_D = I_{DSS}$
- Zatvoreni kanal $\Rightarrow$ struja više ne raste (kao i kod JFET-a) $\Rightarrow$ područje ZASIČENJA
- Struja I_D je određena naponom $U_{GS} \Rightarrow$ MOSFET je naponom upravljani strujni izvor



$$I_{G, MOSFET} \sim \frac{I_{G, JFET}}{1000}$$

Ulazni otpor MOSFET-a: $\sim 10^{15} \Omega$

Ulazni otpor JFET-a: $\sim 10^9 \Omega$

Prednosti MOSFET-a u odnosu na JFET:

- Veći ulazni otpor (milijun puta)
- Bolje naponsko upravljanje
- Manja struja I_G (1000x)

Prednosti FET-a (oba tipa):

- Veliku ulazni otpor
- Naponsko upravljanje
- Unipolarni tranzistor – tok struje ovisi samo o gibanju većinskih nosoca naboja
- Mala struja I_G u odnosu na struju baze kod bipolarnog tranzistora
- Manji šum $\Rightarrow$ koristi se u uređajima osjetljivim na šum poput radio prijemnika, niskošumnih pojačala, VHF pojačala, satelitskih prijemnika
- Bolja termička stabilnost u odnosu na bipolarni tranzistor

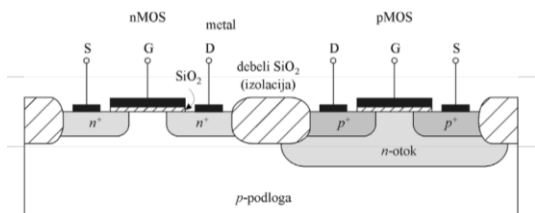
Nedostaci FET-a (oba tipa):

- Osjetljiv na veliku promjenu napona (posebno MOSFET)
- Osjetljivost na elektrostatsko oštećenje zbog prisustva osjetljivog sloja oksida kod MOSFET-a

Upotreba FET-a:

1. Pojačala
2. Naponska sljedila (strujna pojačala): veliki ulazni otpor, mali izlazni otpor
3. Uređaji za brzo paljenje/gašenje (motori s unutarnjim sagorijevanjem)
4. Prekidači ('mikseri')
5. Digitalni integrirani krugovi – CMOS

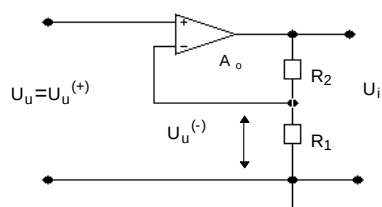
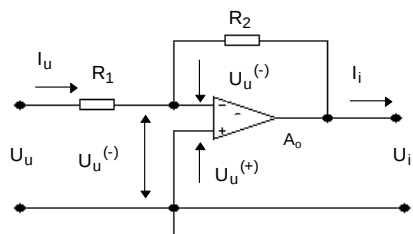
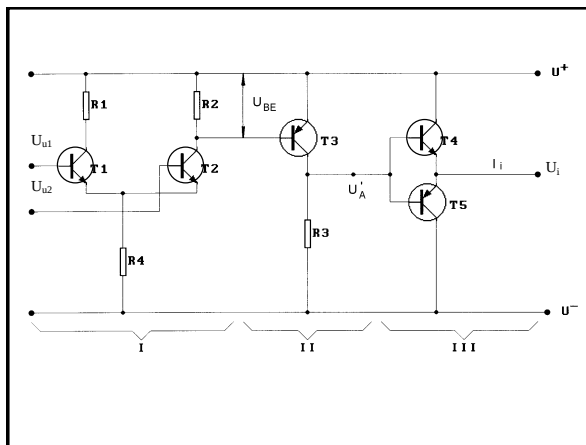
CMOS

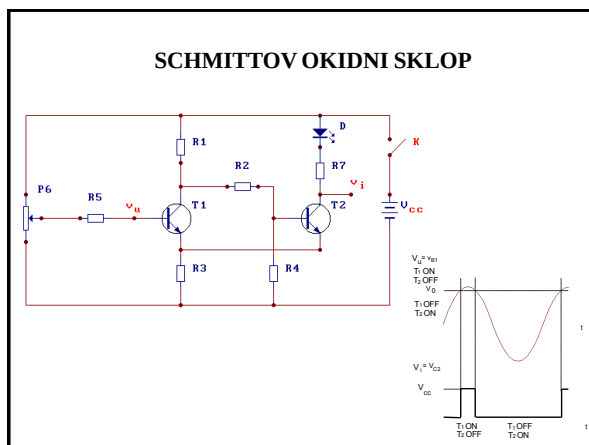
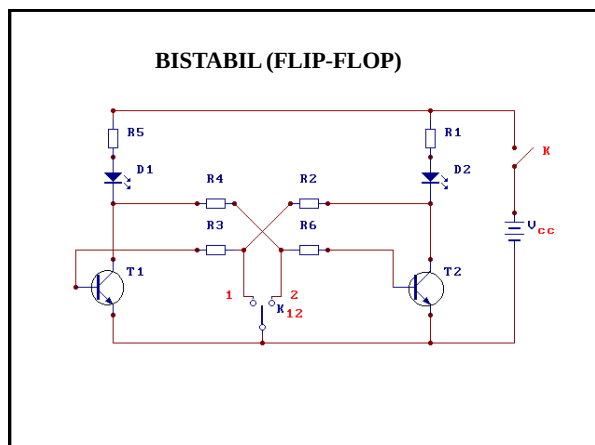
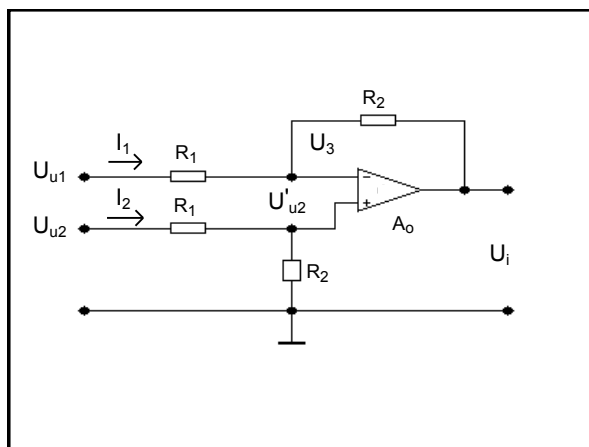
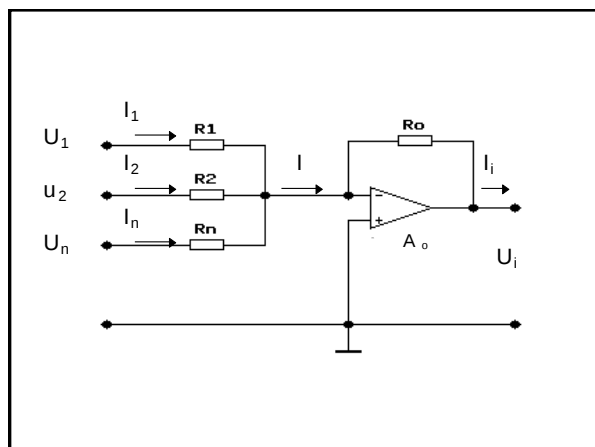


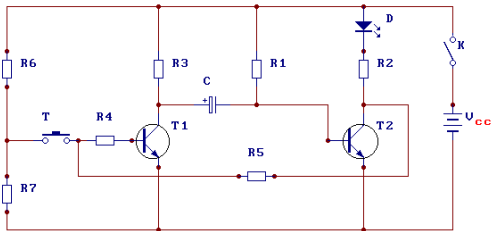
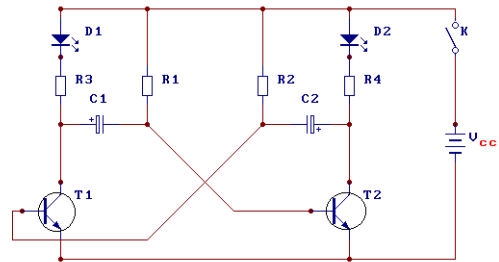
CMOS: Complementary Metal Oxide Semiconductor FET
Dva komplementarna MOSFET tranzistora spojena u niz:

1. nMOS na p-podlozi
2. pMOS na zasebnom udifundiranom n-otoku

Idealno za izradu u integriranim krugovima – osnova današnje računalne industrije





MONOSTABIL**ASTABIL****MEISSNEROV OSCILATOR**