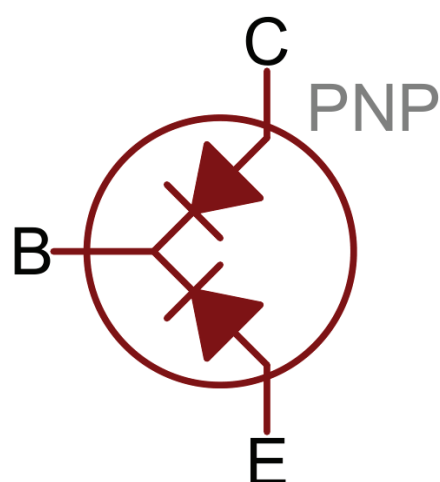
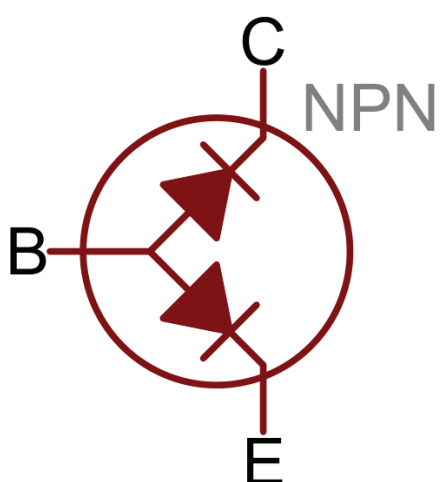




VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
Karlovac University of Applied Sciences



ELEKTRONIKA 1

Udžbenik za studente stručnog studija
Mehatronike Strojarskog odjela

Vladimir Tudić

ISBN (online) 978-953-8213-13-7

Izdavač: Veleučilište u Karlovcu

Za izdavača: dr. sc. Nina Popović, prof. v. š.

Recenzenti: prof. dr. sc. Martin Dadić
doc. dr. sc. Petar Mostarac
dr. sc. Marko Jurčević

Lektorica: Maja Kličarić

Objavljivanje ovog udžbenika odobrilo je Povjerenstvo za izdavačku djelatnost
Veleučilišta u Karlovcu Odlukom o izdavanju publikacije br. 7.5-13-2020-1

Copyright ©

Veleučilište u Karlovcu 2021

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
studij Mehatronike

Vladimir Tudić

ELEKTRONIKA 1

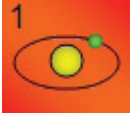
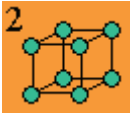
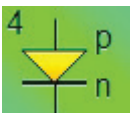
Karlovac, 2021.

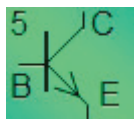


PREDGOVOR

Nastavni materijal iz područja elektronike i elektroničkih elemenata obuhvaćen ovim udžbenikom prvenstveno je napisan za studente stručnog studija Mehatronike na Strojarskom odjelu Veleučilišta u Karlovcu. Ovim je nastavnim materijalom obuhvaćen najveći dio tematskih cjelina potrebnih za savladavanje gradiva iz predmeta Elektronika 1 (5 ECTS) koji se predaje u trećem semestru stručnog studija Mehatronike na Strojarskom odjelu Veleučilišta u Karlovcu.

SADRŽAJ

	Uvod	7
	1. ČVRSTA TIJELA, STRUKTURA ATOMA	8
	1.1. Temeljna svojstva poluvodičkih materijala	8
	1.2. Strukturna svojstva	8
	1.3. Dijagrami energijskih pojaseva	9
	2. POLUVODIČI	16
	2.1. Intrinzični poluvodiči, energijski dijagram	16
	2.2. Ekstrinzični poluvodiči, energijski dijagram	17
	2.2.1. Poluvodič <i>n</i> -tipa	17
	2.2.2. Poluvodič <i>p</i> -tipa	19
	3. HETERO SPOJEVI METAL – POLUVODIČ	23
	3.1. Idealni ravnotežni spoj metal – poluvodič <i>n</i> -tipa.....	23
	3.2. Idealni neravnotežni spoj metal – poluvodič <i>n</i> -tipa	25
	3.3. Omski spoj metala i poluvodiča <i>n</i> -tipa	26
	4. P-N SPOJ, ENERGIJSKI DIJEGRAM	28
	4.1. Ravni dijagram, dodir kristala.....	28
	4.2. Termalna ravnoteža	29
	4.3. Kontaktni potencijal	31
	4.4. Propusna polarizacija <i>p-n</i> spoja	33
	4.5. Nepropusna polarizacija <i>p-n</i> spoja.....	34
	4.6. Strujno-naponska karakteristika <i>p-n</i> spoja	36



5. BIPOLARNI TRANZISTORI	45
5.1. Struktura PNP tranzistora	45
5.2. Struktura NPN tranzistora	47
5.3. Spojevi bipolarnih tranzistora	50
5.3.1. Spoj sa zajedničkom bazom	50
5.3.2. Spoj sa zajedničkim emiterom	51
5.3.3. Spoj sa zajedničkim kolektorom	52
5.4. Radna karakteristika NPN tranzistora	54
5.5. Radna karakteristika PNP tranzistora	58
5.6. Darlingtonov spoj tranzistora	60



6. TRANZISTORI S EFEKTOM POLJA – FET	63
6.1. JFET tranzistori	63
6.2. Naponi u spoju <i>n</i> -kanalnog JFETa	64
6.3. Načini rada i spajanja FETova	68
6.3.1. Spoj sa zajedničkim slijevom	68
6.3.2. Spoj sa zajedničkim gatom	69
6.3.3. Spoj sa zajedničkim dotokom	69
6.4. Pojačala s JFET tranzistorom	70
6.5. MOSFET tranzistori	71
6.5.1. Osnovna građa MOSFET-a	73
6.6. Pojačala s MOSFET tranzistorom	75
6.7. Pojačalo s <i>n</i> -kanalnim obogaćenim tipom MOSFET-a	76
6.8. MOSFET kao sklopka	77

LITERATURA	82
-------------------	-----------

UVOD

Elektronika je temeljna grana znanosti i tehnologije koja proučava efekte elektrona koji prolazi kroz vakuum, zrak, plinove, poluvodič, homo $p-n$ i hetero spojeve s metalom, a temelji se na osnovnim fizikalnim zakonima i klasičnoj teoriji. Dio gradiva predmeta Elektronika 1 odnosi se na opis osnovnih elektroničkih elemenata, njihovom principu rada i prepoznavanju osnovnih svojstava (dioda, fotodioda, bipolarni nnp i pnp tranzistori, unipolarni FET tranzistori, solarne ćelije, UV i IR $nc-Si:H$ fotodetektori). Kombinacijom elektroničkih elemenata dobivaju se složenije funkcije i karakteristike jednostavnih sklopova kao što su ispravljači napona, filtri signala, pojačala, tranzistorske sklopke, stabilizatori napona i slično.

1. ČVRSTA TIJELA, STRUKTURA ATOMA

1.1. Temeljna svojstva poluvodičkih materijala

Kemijski elementi iz skupine III., IV. i V. periodičkog sustava elemenata nazivaju se poluvodiči i posjeduju vrlo specifične osobine, odnosno kemijska, fizikalna i optička svojstva. Najkarakterističnije svojstvo je otpornost (R) ili inverzna vrijednost tzv. „specifična vodljivost” ($G=1/R$) koja se na sobnoj temperaturi ($T=300K$) kreće između 10^{-6} S/cm i 10^3 S/cm. U pravilu, vrijednost specifične otpornosti poluvodičkog materijala smanjuje se s porastom temperature, za razliku od metala i izolatora u slučaju kojih raste. Ukupna fizikalna svojstva poluvodičkih materijala mogu se mijenjati u znatnom spektru dodavanjem određene količine primjesa drugih poluvodičkih materijala. Na taj se način omogućuje tehnološko programiranje strukturnih te posljedično električnih i optičkih svojstava poluvodičkih materijala [1].

Najznačajniji poluvodički materijal danas je silicij (Si), ne samo zbog prevladavajuće planarne tehnologije izrade elektroničkih i mikroelektroničkih sklopova, memorija i mikroprocesora, već i zbog drugih vrsta specifičnih elektroničkih sklopova, opto-elektroničkih sklopova, optičkih detektora i solarnih ćelija. Osim silicija vrlo često se koristi i galij (Ga), galij-arsenid (Ga-Ar), indij (In) i dr. poluvodički materijali tzv. treće (III.) i pete skupine (V.), a u posljednje vrijeme i druge (II.) i šeste (VI.). U nastavnom materijalu najviše će biti riječi o elektroničkim elementima izrađenim od silicija i germanija. Elementarni silicij pročišćen za industrijsku uporabu predložen je na slici 1.

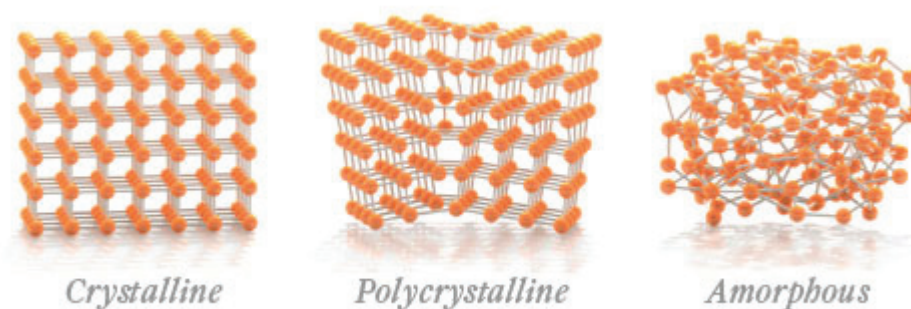


Slika 1. Predodžba kemijskog elementa silicija, polikristal kao industrijska sirovina

1.2. Strukturna svojstva

Općenito, sva čvrsta tijela mogu se strukturirati u dvije skupine. Prvu skupinu čine tijela s *kristaliničnom* strukturom, a drugu tijela s *amorfnom* strukturom (slika 2). Kristalinična tijela mogu se nadalje strukturirati na *monokristale* i *polikristale*. Monokristali su karakterizirani pravilnim

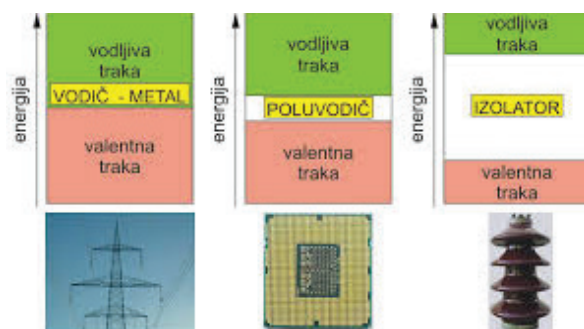
rasporedom atoma u kristalnoj rešetki s periodičnim ponavljanjem jedinične stanične strukture uzduž sve tri koordinatne osi. Polikristali imaju pravilan raspored atoma duž sve tri koordinatne osi u manjim dijelovima volumena. Te dijelove ili nakupine nazivamo *zrnima*. Amorfna struktura tijela karakterizirana je nepravilnim rasporedom atoma duž sve tri koordinatne osi. Takva struktura ima potpuno drugačija strukturna, električna i optička svojstva od kristalinične strukture. Osobitost amorfne strukture u odnosu na kristaliničnu je slabija specifična vodljivost za nekoliko redova veličine, ali je zato veća apsorpcija vidljivog spektra za nekoliko redova veličine [1, 2].



Slika 2. 3D Predodžba kristalinične strukture čvrstih tijela. Izvor: ResearchGate

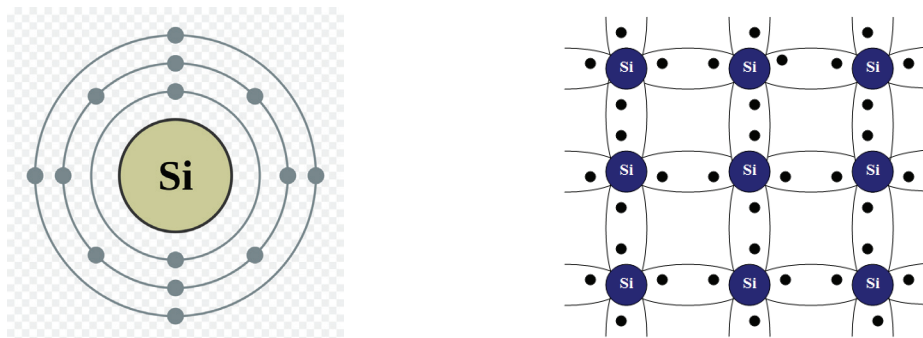
1.3. Dijagrami energijskih pojaseva

Temeljem zakona fizike poznato je da tzv. diskretne energijske nivoe ili pojaseve koje karakteriziraju atome određuju dopuštene energije elektrona u atomu silicija, na primjer kristalinični silicij ima znatan broj atoma periodički raspoređenih u strukturi. U kubičnom centimetru (cm^3) silicija gdje atomi tvore tetraedarsku strukturu, sadržano je $5 \cdot 10^{22}$ atoma. Upravo energijski pojasevi koje tvore elektroni određuju električna svojstva svih čvrstih tijela, pa tako i poluvodiča. Prema kvantnoj teoriji, energijska stanja elektrona tvore kontinuiranu raspodjelu stanja unutar energijskih pojaseva. Najznačajnija su tzv. vanjska elektronska stanja koja se protežu duž cijele vrpce. Takva stanja nazivaju se *delokalizirana* stanja. Općenito, u poluvodičima kvantna stanja valentnih elektrona tvore valentni energijski pojas koji je odvojen energijskim procjepom (engl. *band gap*), E_g , od vodljivog pojasa. Predodžba energijskih pojaseva čvrstih tijela nalazi se na slici 3.



Slika 3. Predodžba energijskih pojaseva: metala (lijevo), poluvodiča (sredina) i izolatora (desno)

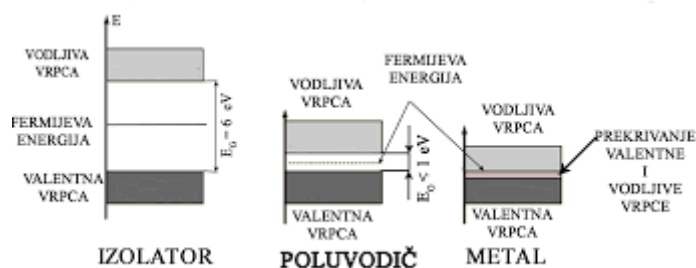
U tetraedarskoj kristalnoj rešetki atom silicija (Si_{14}) ima 14 protona i 14 neutrona u jezgri atoma i 14 elektrona u svojim ljuskama raspoređenih u energijske pojaseve. Prvih deset elektrona su u unutarnjim ljuskama atoma tzv. *unutarnja* ili bliska energijska stanja ($2+8=10$ elektrona), dok su četiri (4) vanjska elektrona u vanjskim ljuskama te tvore kovalentnu vezu sa susjednim atomima silicija (slika 4) u sve tri prostorne osi. Kovalentna veza je potpuna ako u njoj sudjeluju dva elektrona iz dva susjedna atoma. Elektroni koji se nalaze u vanjskoj ljusci atoma i čine kovalentnu vezu sa susjedima imaju najmanju količinu energije u matičnom atomu. Oni se nalaze u valentnom pojasu i nisu slobodni nosioci te nemaju utjecaj na električna svojstva materijala. Tetraedarska 3D struktura atoma silicija može se jednostavno preslikati na 2D rešetku. Kada se razmatra 2D model rasporeda atoma silicija u kristalnoj rešetki dobiva se potpuni dojam stvarnog stanja tom poluvodičkom materijalu (slika 4). Takav prikaz predočava kako jedan središnji atom silicija sa svoja 4 valentna elektrona tvori kovalentnu vezu sa susjedima iz 2D predodžbe. Ponekad valentni elektroni dobivanjem kvanta energije iskoče iz kovalentne veze u više energijsko stanje i oslobode svoje mjesto. Tada se takva veza zove nepotpuna kovalentna veza jer na mjestu elektrona ostaje šupljina suprotnog predznaka naboja. Dakle, 4 valentna elektrona iz atoma silicija imaju mogućnost mijenjati položaj i preskakivati iz pojasa u pojas, s atoma na atom ili u druga slobodna mjesta u svom neposrednom okolišu i tvoriti nove kovalentne veze, ako naravno imaju mobilnost i dovoljno energije da to učine. Upravo zbog velike mobilnosti valentnih elektrona u atomskoj rešetki silicija riječ je o obećanom materijalu za projektiranje električnih i optičkih svojstava poluvodičkih elemenata i sklopova [2, 3].



Slika 4. Lijevo: 2D Predodžba atoma silicija s ukupno 14 orbitalnih elektrona; 4 valentna u vanjskoj ljusci.
Desno: Kovalentna veza (zajednički elektronski par) u dvodimenzionalnoj kristalnoj rešetki silicija.

Pri temperaturi 0K najviši nivo energije koje elektroni u poluvodiču mogu imati je tzv. Fermijeva energija. Ta je energija zapravo maksimalna elektrokemijska energija koju elektron može imati pri 0K, a označava se oznakom E_F . Fermijeva energija poluvodiča i izolatora nalaze se u zabranjenom pojasu između energija vodljivog i valentnog pojasa atoma. Kod metala, njezina je vrijednost jednaka energiji na dnu vodljivog pojasa atoma. U bezprimjesnom poluvodiču na sobnoj temperaturi vjerojatnost da elektron ima Fermijevu energiju je 50 % (ili 0,5). Dodavanjem primjesa u čisti poluvodič Fermijeva se energija u poluvodiču *n*-tipa povećava, a u poluvodiču *p*-tipa smanjuje. Fermijeva energija važna je za razumijevanje električne vodljivosti i otpornosti poluvodičkih materijala.

Dio valentnih elektrona pri sobnoj temperaturi oblikuju i vodljivi pojas povećanih energija, oznake E_C , s obzirom na to da postoje dozvoljeni nivoi energije za takve elektrone. Na temperaturi 0 K taj je pojas potpuno prazan. Između valentnog, oznake E_V i vodljivog pojasa, E_C , je prostor tzv. zabranjenih energija ili energetski procjep (engl. *Energy gap*), oznake E_g . Upravo se prema veličini energetskog procjeka međusobno kvantitativno razlikuju kristalinične strukture čvrstih tijela i posljedično električna svojstva. U izolatoru je vrijednost $E_g > 3\text{eV}$, poželjno što veća ($E_g = 5\text{--}6\text{eV}$), dok je kod poluvodiča interval velik zbog raznolikosti vrsta poluvodiča i njihovih primjesa: $0,5 < E_g < 2,5\text{eV}$. U slučaju metala valentni i vodljivi pojas se djelomično prekrivaju i zbog toga ne postoji energetski procjep (slika 5).



Slika 5. 2D Predodžba energijskih pojaseva: izolatora (lijevo), poluvodiča (sredina) i metala (desno)

Koncentracija elektrona u poluvodiču

Gibanje struje kroz kristal poluvodiča s energijskim procjepom omogućuju elektroni povećanih energija koji prelaze iz valentnog u vodljivi pojas. To je moguće ako elektron primi dovoljnu količinu energije jednaku ili veću od procjeka, odnosno E_g . U slučaju prijelaza elektrona u vodljivi pojas u valentnom pojasu ostaje prazno mjesto ili šupljina, koja ima suprotni predznak naboja. Za prijelaz u vodljivi pojas elektron koji se nalazi u vrhu valentnog pojasa može se dobiti na više načina. Prvi je način tzv. „vanjskim utjecajem” - zračenjem, tj. djelovanjem *fotona* svjetlosti određene energije ($h\nu$), a drugi je način djelovanjem „iznutra” - pomoću *fonona* ili *kvanta* energije elastičnog vala nastalog vibriranjem kristalne rešetke porastom temperature. Najizgledniji način da elektron primi potrebnu energiju za kvantni prijelaz je termalna uzbuda *fononom*. Srednja energija ($\bar{E}$ izražena u džulima, J) na termodinamičkoj temperaturi T koju *fononi* predaju valentnim elektronima određena je izrazom (1):

$$\bar{E} = \frac{3}{2} kT = 1,5 E_T, \quad (1)$$

pri čemu je energijski ekvivalent E_T termodinamičke temperature određen relacijom $E_T = kT$, izražen u džulima (J) [1]. Ako se E_T želi izraziti u elektronvoltima (eV), može se proračunati nova relacija:

$$\frac{E_T}{q} = \frac{kT}{q} \approx \frac{T}{11605}, \quad (2)$$

pri čemu je k Boltzmannova konstanta ($1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}$), q je iznos naboja elektrona ($1,6 \cdot 10^{-19} \text{C}$), a T je apsolutna temperatura u kelvinima.

Na sobnoj temperaturi (300 K) energijski ekvivalent termodinamičke temperature $E_T \approx 0,026\text{eV} = 26\text{meV}$ što daje vrijednost prosječne energije predane elektronima od $\bar{E} \approx 39\text{meV}$. Uočljivo je da je riječ o iznosu energije zasigurno premalom za prijelaz elektrona u vodljivi pojas i prevladavanje procjepa E_g . Međutim, ovdje je riječ o statističkoj vrijednosti srednje energije i vjerojatnosti da pojedini elektron ima određenu energiju. Stanje treba razmatrati kroz postojanje znatnog broja elektrona u konačnom volumenu na određenoj temperaturi. Treba podsjetiti da se pri temperaturi 0 K kemijski potencijal elektrona označava kao vrijednost elektro-potencijalne energije ili Fermijeve energije (E_F). Vjerojatnost koncentracije elektrona energije E pri temperaturi T u odnosu na Fermijevu energiju u skladu s Fermi-Diracovom funkcijom raspodjele $f_{FD}(E, T)$ izražena je izrazom:

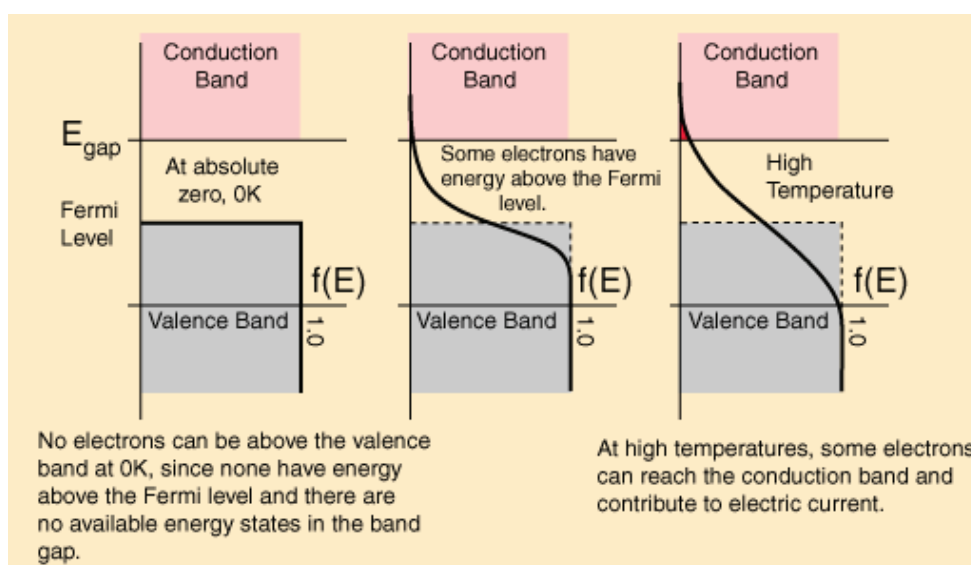
$$f_{FD}(E, T) = \frac{1}{1 + e^{\frac{E - E_F}{kT}}} \quad (3)$$

uz pretpostavku da je za kristalinični silicij $E_C - E_F = \frac{E_g}{2} \approx 0,56\text{eV}$ i da je razlomak $\frac{E_C - E_F}{kT} \gg 1$, što u pojednostavljenom izrazu ima oblik:

$$f_{FD}(E, T) = f(E, T) \approx e^{\frac{-E_g}{2kT}} = e^{\frac{-E_F}{kT}} \quad (4)$$

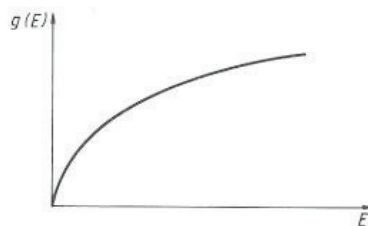
Ako su poznate funkcije gustoće raspodjele vodljivih naboja $g(E)$ (ili u nekoj literaturi označene sa $S(E)$ predočene na slici 7 i funkcija vjerojatnosti pojave $f(E, T)$ predočene na slici 6, s obzirom na količinu energije koju posjeduju, može se aproksimirati koncentracija elektrona povećanih energija koji se nalaze u vodljivom pojasu pomoću izraza:

$$n = \int f(E, T) \cdot g(E) \cdot dE \quad (5)$$



Slika 6. Predodžba Fermi-Diracove funkcije vjerojatnosti raspodjele $f(E, T)$ elektrona u energijskim pojasevima.

Izvor: ResearchGate

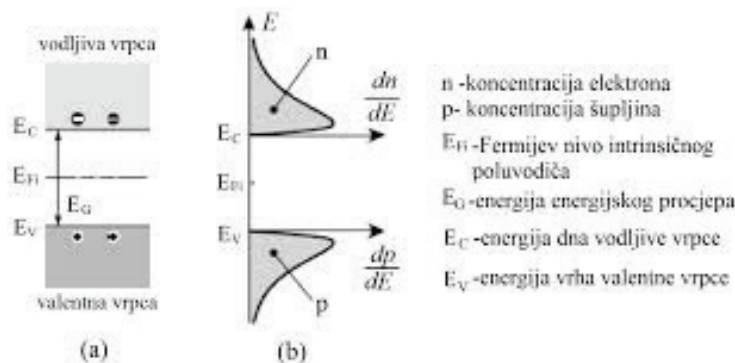


Slika 7. Predodžba funkcije gustoće stanja elektrona $g(E)$

Pomoću Maxwell-Boltzmannove funkcije razdiobe i parabolične funkcije gustoće stanja elektrona prema kojoj su slobodni elektroni raspoređeni po energijama, dobivamo izraz (6) za količinu slobodnih elektrona [2]:

$$n = N_C \cdot e^{\frac{-E_g}{2E_T}} = \frac{N_C}{e^{\frac{E_g}{2E_T}}} \quad (6)$$

pri čemu je N_C koncentracija valentnih elektrona povećanih energija koji se nalaze u vodljivom pojasu kako predočava slika 8.



Slika 8. Predodžba funkcije koncentracija nosilaca naboja u energijskim pojasevima
Izvor: Repozitorij PMF-a

Primjeri:

Zadatak 1.

- Za predodžbu realne fizikalne slike može se uzeti primjer kristaliničnog silicija s vrijednostima $E_g = 1,12 \text{ eV}$ i $E_T = 26 \text{ meV}$ pri vrijednostima temperature od 300 K, uz koncentraciju atoma $N = 5 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3}$. U skladu s izrazom (4) vjerojatnost koncentracije elektrona iznosi $f(E) = 3,9 \cdot 10^{-10}$, a koncentracija elektrona u skladu s izrazom (6) je $n = 2 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$. Dakle, uz pretpostavku da će jedan atom silicija dati samo jedan elektron, postoji $20 \cdot 10^{12}$ elektrona u svakom kubičnom centimetru.
- Isti izračun napraviti i za germanij ($E_g = 0,66 \text{ eV}$ i $E_T = 26 \text{ meV}$).

Zadatak 2.

- a) Ako se vrijednost temperature podigne za 10 % na vrijednost od 330 K, koliko se poveća koncentracija elektrona u siliciju uz $N = 5 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3}$?
- b) Isti izračun napraviti i za germanij: $T=330 \text{ K}$ ($E_g = 0,66 \text{ eV}$ i $E_T = 28,5 \text{ meV}$).

Rješenje:**a) Silicij:**

Uz $E_g = 1,12 \text{ eV}$ dobivamo $E_T = 28,5 \text{ meV}$,

vjerojatnost koncentracije je $f(E) = 2 \cdot 10^{-9}$

i

koncentracija elektrona proračunata je na $n = 1,4 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3} = 14 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$. Dakle, 7 puta više uz povećanje temperature za 30K.

b) Germanij:**Primjeri:****Zadatak 3.**

Za predodžbu realne fizikalne slike u izolatorskom materijalu može se uzeti primjer PVC-a s vrijednostima $E_g = 3 \text{ eV}$ i $E_T = 26 \text{ meV}$ pri vrijednostima temperature od 300K, uz koncentraciju atoma istu kao i kod silicija: $N = 5 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3}$. U skladu s izrazom (4) vjerojatnost koncentracije elektrona iznosi $f(E) = 6,3 \cdot 10^{-26}$, a koncentracija elektrona u skladu s izrazom (6) je $n = 6,3 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^{-3}$. Dakle, pri vrijednostima temperature od 300K nema slobodnih elektrona u izolatorskom materijalu.

Zadatak 4.

Ako se vrijednost temperature u izolatorskom materijalu podigne za 10 % na vrijednost od 330 K, koliko se poveća koncentracija elektrona u PVC- uz $N = 5 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3}$?

Rješenje:

Uz $E_g = 3 \text{ eV}$ dobivamo $E_T = 28,4 \text{ meV}$,

vjerojatnost koncentracije je $f(E) = 1,2 \cdot 10^{-23}$

i

koncentracija elektrona proračunata je na $n = 1,2 \cdot 10^{-1} \text{ cm}^{-3}$. Dakle, pri vrijednostima temperature od 330 K nema slobodnih elektrona u izolatorskom materijalu.

Zadatak 5.

Ako se vrijednost temperature u izolatorskom materijalu podigne za 20 % na vrijednost od 360K (približno 87°C), koliko se poveća koncentracija elektrona u PVC-u uz $N = 5 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3}$?

Rješenje:

Uz $E_g = 3\text{eV}$ dobivamo $E_T = 31,091\text{meV}$,

vjerojatnost koncentracije je $f(E) = 1,2 \cdot 10^{-23}$

i

koncentracija elektrona proračunata je na $n = 1 \cdot 10^1 \text{ cm}^{-3}$. Dakle, pri vrijednostima temperature od 360 K teoretski ima 10 slobodnih elektrona u izolatorskom materijalu.

Napomena:

Prethodni primjeri služe isključivo za dobivanje predodžbe koliko porast temperature i termalna uzbuda kristalne rešetke kao parametar utječe na povećanje broja slobodnih elektrona u poluvodiču i u izolatoru. Tu nije riječ o egzaktnom i sveukupno opisanom modelu generacije jer nije uključen kompletan model generacije kao ni model rekombinacije slobodnih elektrona i šupljina tijekom njihovih vremena života!

2. POLUVODIČI

2.1. Intrinzični poluvodiči, energijski dijagram

Čisti, bezprimjesni ili intrinzični poluvodič je materijal bez primjesa drugih poluvodiča iz skupina III.-V. U takvom materijalu s pravilnom tetraedarskom kristalnom rešetkom egzistiraju samo matični atomi poluvodiča s koncentracijama tehnoloških nečistoća (atomi dušika N, kisika O, vodika H i sl.) u dozvoljenim granicama od jednog atoma nečistoće na milijun atoma silicija ($1:10^6$).

Općenito, prihvaćena vrijednost intrinzične koncentracije kod silicija je da koncentracija slobodnih elektrona n u vodljivom pojasu i koncentracija šupljina p u valentnom pojasu ovisi samo o temperaturi te da je na konstantnoj temperaturi konstantan. Takva zakonitost vrijedi za svaki poluvodič. Intrinzična koncentracija označava se indeksom i pa tako vrijedi relacija: $n=p=n_i=p_i$ te je ukupni umnožak elektrona i šupljina određena relacijom [2]:

$$n_i = p_i = n_i^2 = f(T) . \quad (7)$$

Intrinzična koncentracija ovisi samo o temperaturi jer se upravo na račun toplinske energije stvaraju slobodni parovi nosilaca u intrinzičnom poluvodiču. Relacija (7) je matematička formulacija zakona o termodinamičkoj ravnoteži. Za silicij na sobnoj temperaturi (300 K) intrinzična koncentracija iznosi približno $n_i = 1,45 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$. Primjenom Maxwell-Boltzmanove funkcije gustoće energije dobiva se točnija teorijska relacija:

$$n_i^2 = N_c \cdot N_v \cdot e^{\frac{-E_g}{E_T}} = \frac{N_c N_v}{e^{\frac{E_g}{E_T}}} \quad \text{ili} \quad n_i = \sqrt{\frac{N_c N_v}{e^{\frac{E_g}{E_T}}}} , \quad (8)$$

gdje je veličina N_c efektivna gustoća stanja u vodljivom pojasu, a veličina N_v efektivna gustoća stanja u valentnom pojasu. Za još točniji izračun intrinzične koncentracije nekog poluvodiča koja je temperaturno ovisna koristi se empirijska matematička relacija (9):

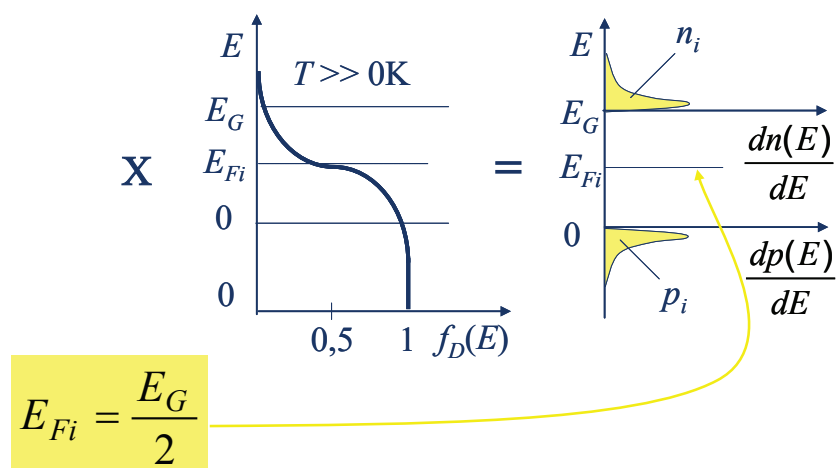
$$n_i^2 = 19,1 \cdot 10^{30} \cdot T^3 \cdot e^{\frac{-E_g}{E_T}} , \text{ cm}^{-3} . \quad (9)$$

Električna vodljivost silicija, oznake σ , povećava se s porastom temperature. Vodljivost poluvodiča općenito približno je eksponencijalna funkcija temperature:

$$\sigma = \frac{1}{e E_A} . \quad (10)$$

Veličina E_A određuje energiju koju moramo privesti nosiocu naboja da bismo ga doveli u vodljivo stanje. Naziva se aktivacijska energija i ona u pravilu mora biti veća od energetskog procjepa: $E_A > E_g$. Poznato je da je pri sobnim temperaturama vodljivost idealnog metala obrnuto proporcionalna s temperaturom. Nasuprot poluvodičima, u kojima porast temperature naglo povećava električnu vodljivost, zagrijavanjem metala električna vodljivost se smanjuje.

Na slici 9 predložena je koncentracija elektrona i šupljina u poluvodiču na temperaturama $>300\text{ K}$. Koncentracija $dn(E)/dE$ je koncentracija elektrona po energijama u vodljivom pojasu, a $dp(E)/dE$ je koncentracija šupljina po energijama u valentnom pojasu. Fermijev nivo u intrinzičnom poluvodiču je na sredini zabranjenog pojasa ($E_{Fi} = E_g/2$).



Slika 9. Predložba koncentracije elektrona i šupljina u intrinzičnom poluvodiču na temperaturama $>300\text{ K}$

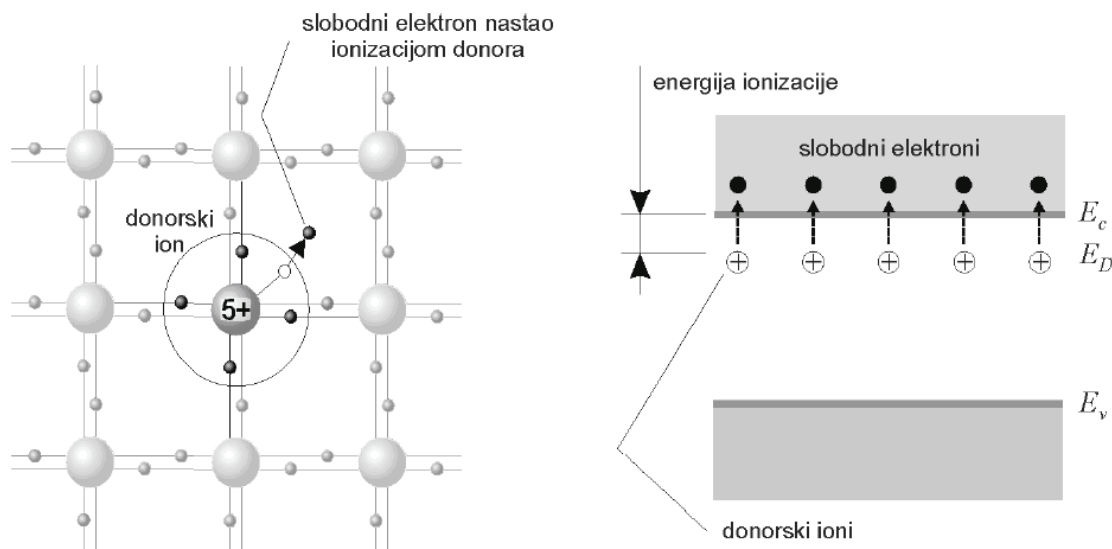
2.2. Ekstrinzični poluvodiči, energijski dijagram

Dodavanjem primjese u intrinzični poluvodič svjesno djelujemo na fizikalna svojstva. Svojstva poluvodiča ovise o količini dodanih primjesa. Takvi poluvodiči zovu se primjesni ili ekstrinzični poluvodiči. Atomi primjese najčešće zauzimaju tzv. supstitucijsko mjesto u tetraedarskoj kristalnoj rešetki jer zamjenjuju atom silicija. Tipične koncentracije primjese kreću se oko vrijednosti 10^{16} cm^{-3} do 10^{18} cm^{-3} . Koncentracije veće od 10^{19} cm^{-3} dovode do degeneriranih svojstava poluvodiča, a kada se dodaju koncentracije veće od 10^{21} cm^{-3} poluvodič se ponaša gotovo kao metal te ga nazivamo *pseudometalom*. U poluvodiče četvrte skupine (silicij i germanij) dodaju se najčešće primjese u vidu atoma iz treće i pete skupine.

2.2.1. Poluvodič *n*-tipa

Kada se siliciju ili germaniju koji u vanjskoj elektronskoj ljusci imaju po 4 valentna elektrona dodaju **peterovalentni** atomi-primjese iz pete skupine poluvodiča, nastaje poluvodič *n*-tipa. Najčešće su to atomi fosfora (P), arsena (As) ili antimona (Sb). Za te kemijske elemente je karakteristično da imaju 5 valentna elektrona u vanjskoj elektronskoj ljusci. Pri zaposjedanju supstitucijskog položaja u kristalnoj rešetki, fosfor, na primjer, sa svoja 4 valentna elektrona ostvarit će kovalentne veze s 4 susjedna atoma silicija, ali će jedan elektron ostati višak. Energija potrebna za odvajanje i bijeg tog elektrona je vrlo mala, puno manja od razbijanja kovalentne veze. Ta je energija poznata kao energija *ionizacije* ili *ionizacijska* energija i reda je veličine nekoliko desetaka meV (30-40 meV). To znači

da će svi primjesni atomi fosfora biti ionizirani na sobnoj temperaturi i **postat će pozitivni ioni** s koncentracijom iona od, na primjer, $N_D^+ = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. Ako, na primjer, dodamo takvu koncentraciju fosfora od 10^{18} cm^{-3} u silicij ili germanij dobivamo 10^{18} slobodnih elektrona na sobnoj temperaturi koji se nalaze u vodljivom pojasu. Podsjetimo se da intrinzični silicij daje $1,45 \cdot 10^{18}$ slobodnih elektrona na istoj temperaturi, pa je prema tome koncentracija donorskih-primjesnih elektrona puno veća.

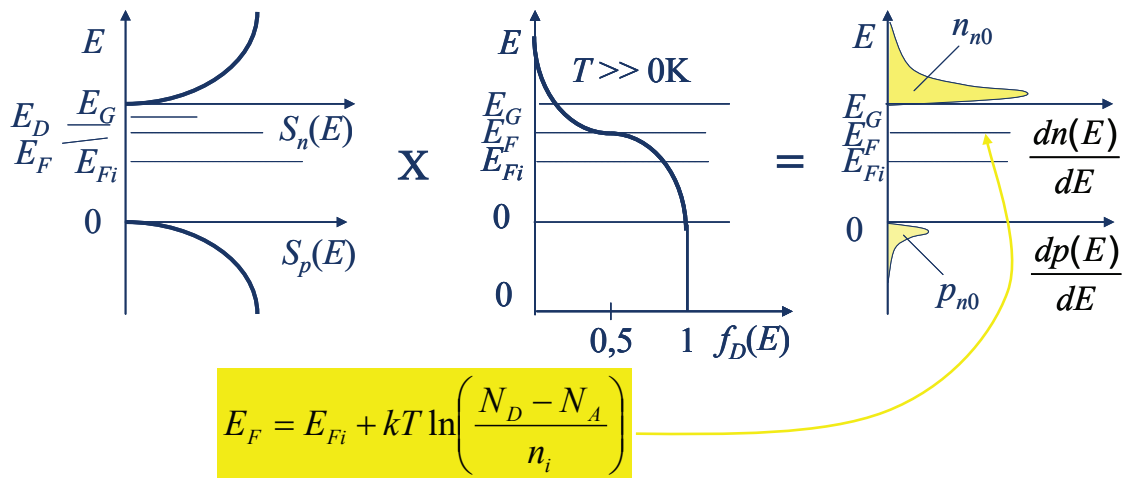


Slika 10. Predodžba strukture poluvodiča n -tipa; donorske plitke primjese s 5 valentnih elektrona u kristalu silicija (lijevo); energijski dijagram s atomima donora i ionizacijskom energijom E_D (desno).

S obzirom da je u poluvodič „donirana” velika koncentracija elektrona, primjesni elementi pete skupine nazivaju se *donori*. Donorska koncentracija označava se s N_D . Slika 10 predodžava diskretni donorski nivo-prostor energija oznake E_D koje unose donorski atomi, a nalaze se poviše zabranjenog pojasa i za vrijednost ionizacijske energije ispod donjeg dijela vodljivog pojasa. Iz tog razloga donorski atomi još se nazivaju i „plitke primjese”. Dakle, dolazi do blagog smanjenja vrijednosti E_g za najviše 40meV zbog prisutnosti značajnog broja donorskih atoma u kristalu silicija ili germanija [1, 3].

Zbog prisutnosti velikog broja ioniziranih i vodljivih elektrona u kristalnoj strukturi novonastalog poluvodiča n -tipa, dolazi do pomaka Fermijeve energije E_F „prema gore” bliže dnu vodljivog pojasa.

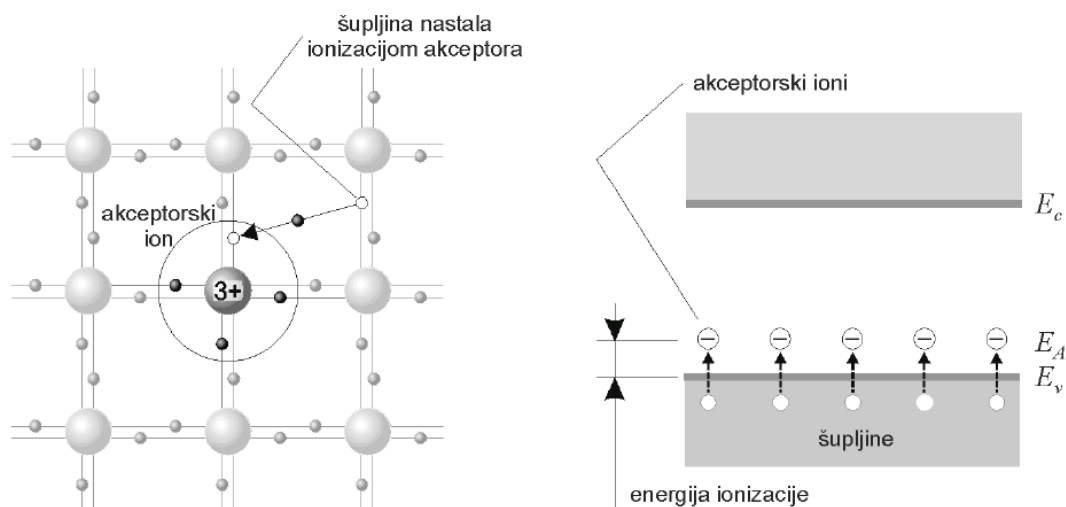
Sada se vjerojatnost od 50 % ($f_D(E)$) za mogućnost pojave elektrona nalazi na tom povišenom nivou $E_F > E_{Fi}$. Kao posljedica pojave koncentracije većinskih nosilaca naboja, tj. slobodnih elektrona $n = N_D$ i pomaka Fermijeve energije, mijenja se slika koncentracije elektrona u odnosu na intrinzičnu koncentraciju n_i . Dakle, kristal n poluvodiča ima u strukturi pozitivne donorske ione koji su donirali jedan elektron u vodljivi pojas. Predodžba energijskog stanja u poluvodiču n -tipa i koncentracija nosilaca naboja tipa predložena je na slici 11. Ionizirani elektroni su **većinski nosioci naboja** u kristalu n -tipa, a šupljine su manjinski nosioci naboja s koncentracijom $p (p = n_i^2 / N_D)$.



Slika 11. Predodžba koncentracije elektrona i šupljina u poluvodiču *n*-tipa na temperaturama $>300\text{ K}$

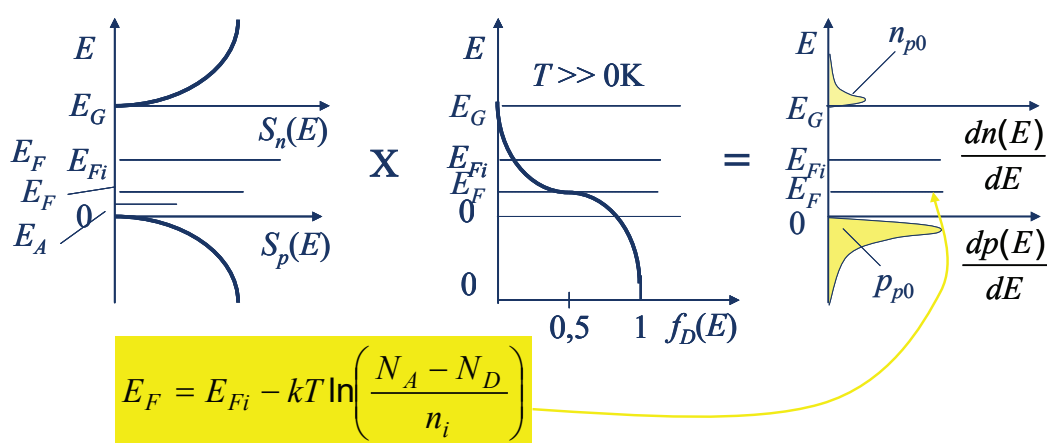
2.2.2. Poluvodič *p*-tipa

Pretpostavimo da se monokristalu silicija dodaju atomi treće skupine periodičnog sustava elemenata, dakle **trovalentni** atomi bora (B), aluminijsa (Al), galija (Ga) i indija (In). Na supstitucijskom mjestu u kristalnoj rešetki atom bora, na primjer, u siliciju tvori kovalentnu vezu s tri atoma silicija. Za četvrtu kovalentnu vezu nedostaje mu elektron pa preostaje na tom mjestu šupljina suprotnog predznaka naboja. Valentni elektroni iz kristalne rešetke će na sobnoj temperaturi popuniti taj prostor i primjesni atom bora postat će **negativni ion**. Atomi trovalentnih primjesa za popunjenje četvrte kovalentne veze uzimaju elektrone iz valentnog pojasa silicija pa ih iz tog razloga nazivamo **akceptorski atomi** ili **akceptorske primjese**. To znači da će svi primjesni atomi bora biti ionizirani na sobnoj temperaturi i **postat će negativni ioni** s koncentracijom akceptorskih iona od, na primjer, $N_A = 10^{17}\text{ cm}^{-3}$ (slika 12). Ako, na primjer, dodamo koncentraciju bora od 10^{17} cm^{-3} u silicij ili germanij dobivamo 10^{17} slobodnih šupljina koje akceptiraju elektrone iz valentnog pojasa na sobnoj temperaturi. Podsjetimo se da kod intrinzičnog silicija ima $n_i = 1,45 \cdot 10^{10}$ slobodnih šupljina ($T = 300\text{ K}$) pa je prema tome koncentracija akceptorskih šupljina puno veća ($N_A \gg n_i$). Zbog prisutnosti velikog broja ioniziranih šupljina u kristalnoj strukturi novonastalog poluvodiča *p*-tipa, dolazi do pomaka Fermijeve energije E_F „prema dolje” bliže vrhu valentnog pojasa (slika 13). Sada se vjerojatnost od 50 % ($f_D(E)$) za mogućnost pojave elektrona nalazi na nižem nivou $E_F < E_{Fi}$.



Slika 12. Predodžba strukture poluvodiča p -tipa; akceptorske plitke primjese s 3 valentna elektrona u kristalu silicija (lijevo); energijski dijagram s atomima akceptora i ionizacijskom energijom E_A (desno).

Kao posljedica pojave koncentracije većinskih nosilaca naboja, tj. šupljina $p=N_A$ i pomaka Fermijeve energije, mijenja se slika koncentracije elektrona u odnosu na intrinzičnu n_i . Dakle, kristal p poluvodiča ima u strukturi negativne akceptorske ione koji su zarobili jedan elektron iz valentnog pojasa. Predodžba energijskog stanja u poluvodiču p -tipa i koncentracija nosilaca naboja p -tipa predočena je na slici 13. Ionizirane šupljine N_A su **većinski nosioci naboja** u kristalu p -tipa, a elektroni su manjinski nosioci naboja s koncentracijom $p(n=n_i^2 / N_A)$.



Slika 13. Predodžba koncentracije akceptorskih šupljina u poluvodiču p -tipa na temperaturama >300 K

Općenito, za sve poluvodiče vrijedi pravilo o **ravnopravnosti prostornog naboja** (ili pravilo neutralnosti prostornog naboja kod nekih autora) bez razlike radi li se o bezprimjesnim ili primjesnim kristalima poluvodiča. Prema tome vrijedi relacija (11):

$$p + N_D = n + N_A. \quad (11)$$

Za čisti bezprimjesni poluvodič uz $N_D \approx 0$ i $N_A \approx 0$ vrijedi: $n = p = n_i = p_i = f(E, T)$.

Za primjesni poluvodič n -tipa gdje je $N_D \gg N_A$ vrijedi: $p + (N_D - N_A) = n$ gdje su šupljine p manjinski nosioci, a elektroni n su većinski nosioci. Još je precizniji zapis $p_{n0} + (N_D - N_A) = n_{n0}$, gdje su p_{n0} i n_{n0} ravnotežne koncentracije nosilaca između kojih vrijedi zakonitost: $p_{n0} = \frac{n_i^2}{n_{n0}}$. Analogno vrijedi za poluvodič p -tipa gdje je $N_A \gg N_D$ i $p_{p0} = (N_A - N_D) + n_{p0}$, gdje su p_{p0} većinski nosioci, a n_{p0} manjinski nosioci poluvodič p -tipa uz relaciju: $n_{p0} = \frac{n_i^2}{p_{p0}}$.

Primjeri:

Zadatak 1.

Izračunaj koncentraciju slobodnih nosilaca naboja u poluvodiču n -tipa s koncentracijom donora od $N_D = 5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ u slučaju:

- Silicija
- Germanija.

Rješenje:

- Silicij ($n_i^2 = 19,1 \cdot 10^{30} \cdot T^3 \cdot e^{\frac{-E_g}{E_T}}, \text{ cm}^{-3}$), $k_B = 1,38 \cdot 10^{23} \text{ J/K}$
Uz $n_i = 1,45 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ i uz $N_D = 5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
Elektroni su većinski nosioci (donori): $n = N_D = 5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
Šupljine su manjinski nosioci: $p = n_i^2 / N_D = \dots$
- Germanij ($n_i^2 = 1,66 \cdot 10^{15} \cdot T^3 \cdot e^{\frac{-E_g}{E_T}}, \text{ cm}^{-3}$)
Uz $n_i = 2,45 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ i uz $N_D = 5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
Elektroni su većinski nosioci (donori): $n = N_D = 5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
Šupljine su manjinski nosioci: $p = n_i^2 / N_D = \dots$

Zadatak 2.

Izračunaj koncentraciju slobodnih nosilaca naboja u poluvodiču p -tipa s koncentracijom akceptora od $N_A = 2 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ u slučaju:

- Silicija
- Germanija.

Zadatak 3.

Proračun položaja Fermijevog nivoa u poluvodiču n-tipa!

Pretpostavka: ravnotežna koncentracija u nedegeneriranom ekstrinzičnom poluvodiču n -tipa - koncentracija slobodnih elektrona jednaka je koncentraciji donora: $n = N_D$.

Iz dane relacije proizlazi: $N_C \cdot e^{\frac{E_F - E_g}{E_T}} = N_D$, nakon logaritmiranja dobivamo odnos energija, odnosno:

$$E_F = E_g - E_T \ln \frac{N_C}{N_D}.$$

Drugi prošireni način prikaza Fermijeve energije je: $E_F = E_{Fi} + \left(\frac{E_g}{2} - E_T \ln \frac{N_C}{N_D} \right) > E_{Fi}$. Uz nužno pojednostavljenje ravnotežnih efektivnih vrijednosti u vodljivom i u valentnom pojasu $N_C = N_V = 4,83 \cdot 10^{15} \cdot T^{\frac{3}{2}}, \text{cm}^{-3}$

Rješenje:

Na temperaturi 300K dobiva se:

$$N_C = N_V = 2,51 \cdot 10^{19}, \text{cm}^{-3}.$$

Ako je u siliciju $N_D = 10^{15} \text{cm}^{-3}$, tada je $E_F = E_{Fi} + 0,3 \text{ eV}$.

Dakle, Fermijev nivo leži 0,3 eV iznad sredine zabranjenog pojasa.

Ako se pod istim uvjetima N_D poveća za dva reda veličine na vrijednost $N_D = 10^{17} \text{cm}^{-3}$, dobiva se $E_F = E_{Fi} + 0,42 \text{ eV}$.

Zadatak 4.

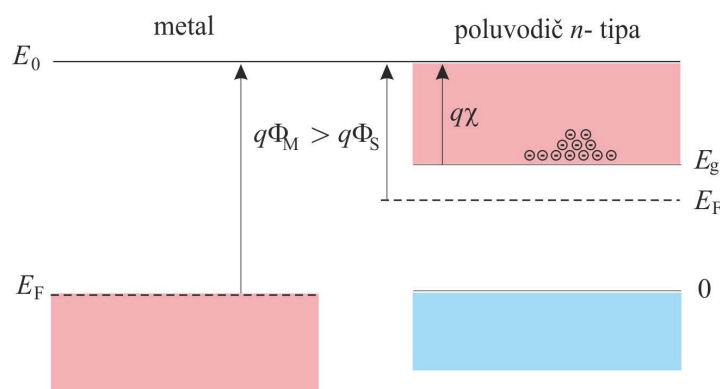
Proračunaj položaj Fermijevog nivoa u poluvodiču n -tipa uz ravnotežne uvjete i koncentraciju donora $N_D = 10^{18} \text{cm}^{-3}$ i $N_D = 10^{19} \text{cm}^{-3}$.

3. HETEROSPOJEVI METAL-POLUVODIČ

Spojevi metal-poluvodič (M-S) su od velike važnosti jer su prisutni u svakom poluvodičkom uređaju. Oni se mogu karakterizirati kao Schottky spoj ili kao **Schottky barijera**, imenovano prema Walteru Schottkyju ili kao omski kontakt, ovisno o karakteristikama međuspoja. U ovom dijelu prvenstveno ćemo se usredotočiti na Schottkyevu barijeru. Ovo poglavlje sadrži analizu elektrostatike spoja M-S, uključujući izračunavanje naboja, polja i raspodjele potencijala unutar uređaja. Također, u ovom će poglavlju biti izvedene strujno-naponske karakteristike sukladno postojanju difuzije, termioničke emisije i tuneliranja u spojevima metal-poluvodič, nakon čega slijedi rasprava o M-S kontaktima i kasnije u poglavljima o MOSFET-u [4, 5].

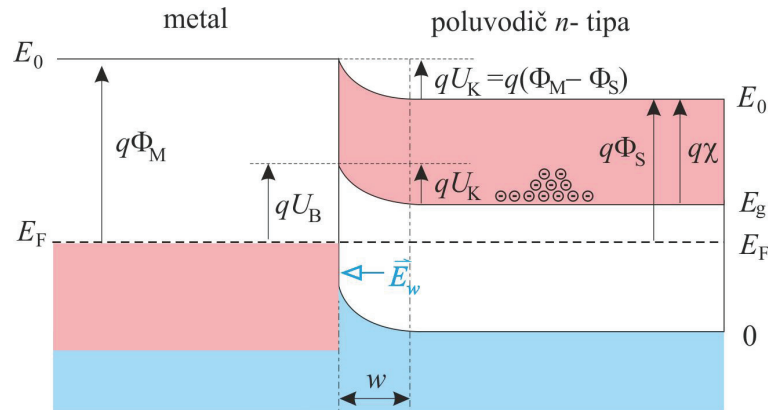
3.1. Idealni ravnotežni spoj metal-poluvodič n -tipa

Idealnim spojem metal-poluvodič smatra se bliski kontakt metala i poluvodiča bez postojanja površinskih energetske stanja. Kada metal i poluvodič nisu u bliskom kontaktu, sustav kojeg čine nije u ravnoteži. Takvo stanje se može vidjeti iz energijskog dijagrama metala i poluvodiča (slika 14). Referentni energijski nivo u tom slučaju je energija elektrona E_0 ili E_{vac} koji se oslobodio iz oba materijala. Energijski dijagram metala opisan je Fermijevom energijom koji se nalazi na vrhu vodljivog pojasa, a riječ je o najvećoj količini energije koju elektron može imati u metalu na termodinamičkoj nuli. Na sobnoj temperaturi njihov broj nije toliko značajan da se u prvoj aproksimaciji može zanemariti.



Slika 14. Skica neravnotežnog stanja metala i poluvodiča n -tipa. Vrijednost $q\Phi_M$ je izlazni rad elektrona iz metala, a $q\Phi_S$ je izlazni rad elektrona iz poluvodiča. Predočen je slučaj kada je $\Phi_M > \Phi_S$. Referentni energijski nivo u tom slučaju je energija E_0 .

Razlika energija slobodnog elektrona i Fermijeve energije označava se sa $q\Phi_M$ i naziva se izlazni rad. Rad se kao i energija izražava u eV, a naponski ekvivalent rada Φ_M izražava se u voltima. U većini metala izlazni rad je u granicama 3,5-5 eV.



Slika 15. Skica ravnotežnog stanja metala i poluvodiča n -tipa. Vrijednost $q\Phi_M$ je izlazni rad elektrona iz metala, a $q\Phi_S$ je izlazni rad elektrona iz poluvodiča. Predočen je slučaj kada je $\Phi_S < \Phi_M$. Referentni energijski nivo u ovom slučaju je energija E_F . Širina osiromašenog područja označena je sa w , a plava strelica pokazuje usmjerenost ugrađenog električkog polja $\vec{E}_w$ u tom uskom području.

Na slici 15. predložen je spoj metala i poluvodiča n -tipa. Veličina označena kao Φ_S je izlazni rad poluvodiča i on ovisi o vrsti poluvodiča, ali i o primjesama. Za idealizirani spoj na slikama 14. i 15. uzet je odnos $\Phi_S < \Phi_M$. Veličina $q\chi$ definirana je kao razlika energija oslobođenog elektrona i dna vodljivog pojasa, a riječ je o vrijednosti elektronskog afiniteta. Bliskim kontaktom dvaju materijala zbog zadržavanja termodinamičke ravnoteže dolazi do izjednačavanja Fermijeveg nivoa. Kao što predločuje energijski dijagram, elektroni iz vodljivog pojasa poluvodiča imaju difuznu tendenciju gibanja u metal. Tome se snažno suprotstavlja novoformirano električko polje $\vec{E}$ koje je usmjereno iz poluvodiča u metal. Rezultat izjednačavanja Fermijeveg nivoa u oba materijala je pojava energetske barijere visine qU_B . Tu prepreku „vide” elektroni koji imaju tendenciju gibanja u metal, a naziva se *Schottkyjeva* barijera. Djelovanjem električkog polja, koje zbog velike vodljivosti ne prodire dublje u metal i djeluje samo u poluvodiču, slobodni elektroni migriraju dublje u volumen poluvodiča. U kontaktnom površinskom sloju stvara se osiromašeno područje (nepokretni ionizirani atomi primjesa). Širina tog područja označava se sa w , a relacija predločuje ovisnost o ostalim parametrima kontakta i poluvodiča:

$$w = \sqrt{\frac{2\varepsilon U_K}{qN_D}}, \quad (15)$$

gdje je U_K kontaktni potencijal, a N_D je koncentracija donorskih primjesa u poluvodiču. Najveći iznos električkog polja E_M na samoj je granici metal-poluvodič i dan je izrazom:

$$E_M = -\frac{q}{\varepsilon} N_D w. \quad (16)$$

Vrijednost kontaktnog potencijala U_K ovisi o odnosu izlaznih radova materijala u spoju:

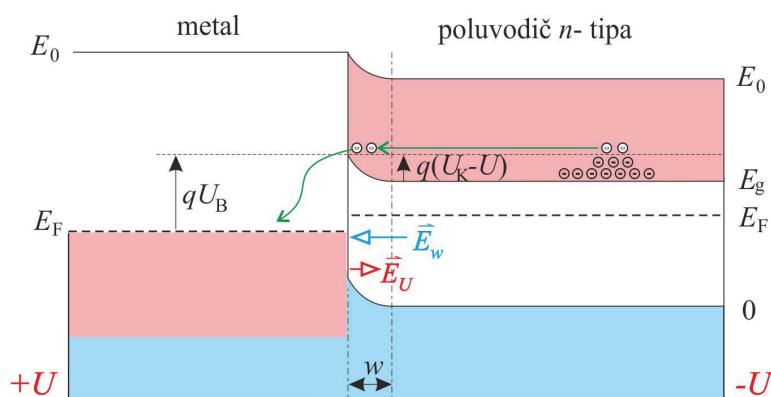
$$U_K = \Phi_M - \Phi_S, \quad (17)$$

a naponski ekvivalent barijere može se iskazati kao

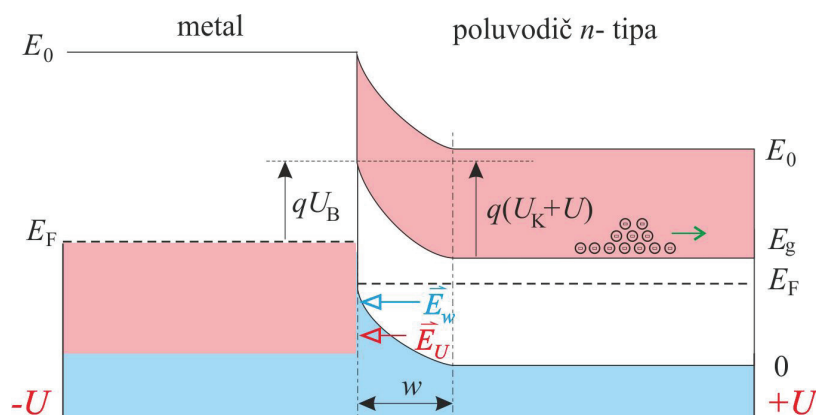
$$U_B = U_K + \Phi_S - \chi. \quad (18)$$

3.2. Idealni neravnotežni spoj metal-poluvodič n -tipa

Ako se na idealizirani spoj metal-poluvodič n -tipa dovede **vanjski istosmjerni napon** dolazi do promjena u energijskim odnosima. Slika 16 predočava takav spoj s priključenim pozitivnim polom napona na strani metala. U osiromašenom području na površini poluvodiča inducira se električno polje usmjereno od metala prema poluvodiču, te se suprotstavlja ugrađenom električnom polju. Rezultat je slabije ukupno električno polje, što znači i manju barijeru za slobodne elektrone u poluvodiču. Inducirano električno polje postoji samo u poluvodiču pa se visina barijere ne mijenja za elektrone u metalu. Dio slobodnih elektrona koji energijom premašuje vrijednost barijere prelaze u metal (zeleni strelica na slici 16), što znači da postoji protok šupljina (struje) u suprotnom smjeru. Ti naboji u metalu ne podliježu zakonu rekombinacije tako da nema gomilanja naboja. Iz ovog opisa proizlazi da je u ovom slučaju spoj propusno polariziran. Kada se polaritet priključenog vanjskog napona U promijeni, barijera za elektrone u metalu ostaje ista. Međutim, visina barijere u poluvodiču za elektrone sada je viša i iznosi $q(U_K + U)$. To je inverzna ili nepropusna polarizacija spoja metal-poluvodič n -tipa (slika 17).



Slika 16. Skica energijskog dijagrama propusno polariziranog spoja sa spojenim pozitivnim polom napona U na strani metala. Širina osiromašenog područja w se smanjila, a crvena strelica pokazuje usmjerenost induciranog električnog polja $\vec{E}_U$ koje umanjuje ugrađeno električno polje $\vec{E}_w$. Barijera u poluvodiču sada je niža i iznosi $q(U_K - U)$.

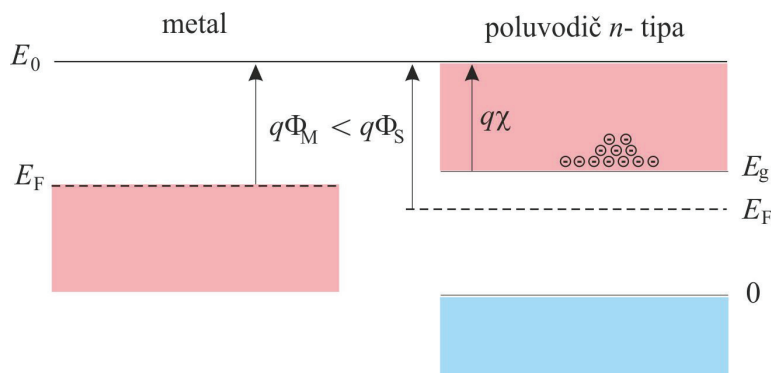


Slika 17. Skica energijskog dijagrama nepropusno polariziranog spoja sa spojenim negativnim polom napona U na strani metala. Širina osiromašenog područja w se povećala, a crvena strelica pokazuje usmjerenost induciranog električnog polja $\vec{E}_U$ koje pomaže ugrađenom električkom polju $\vec{E}_w$. Barijera u poluvodiču sada je viša i iznosi $q(U_K + U)$.

U realnom slučaju zbog utjecaja *Schottky efekta* (sila slike iz metala i Coulombova sila iz poluvodiča) dolazi do djelomičnog smanjenja visine energetske barijere koju „vide” slobodni elektroni u poluvodiču. Taj slučaj u ovim nastavnim materijalima neće biti pobliže opisan zbog opširnosti.

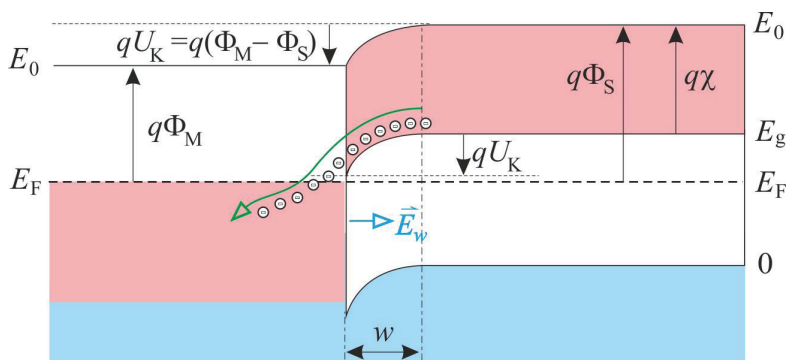
3.3. Omski spoj metala i poluvodiča n -tipa

Omski spoj metala i nedegeneriranog poluvodiča n -tipa ili neispravljački spoj može se postići i bez tuneliranja nosilaca kroz vrlo usku barijeru. To je slučaj kada je izlazni rad metala manji od izlaznog rada poluvodiča ($\Phi_M < \Phi_S$). Tada je kontaktni potencijal negativan ($U_K = \Phi_M - \Phi_S$) i dolazi do formiranja električnog polja usmjerenog od spoja metala prema volumenu poluvodiča. Slika 18 predočava takav slučaj neravnotežnog stanja metala i poluvodiča n -tipa.



Slika 18. Skica energijskog dijagrama neravnotežnog stanja metala i poluvodiča n -tipa.

Predodan je slučaj kada je $\Phi_M < \Phi_S$. Referentni energetska nivo je energija E_0 .



Slika 19. Skica energijskog dijagrama bliskog kontakta metala i poluvodiča n -tipa. Materijali su u kontaktu u termodinamičkoj ravnoteži izjednačenjem Fermijeveg nivoa. Svi slobodni elektroni iz poluvodiča mogu prijeći u metal (zelena strelica pokazuje smjer gibanja slobodnih elektrona).

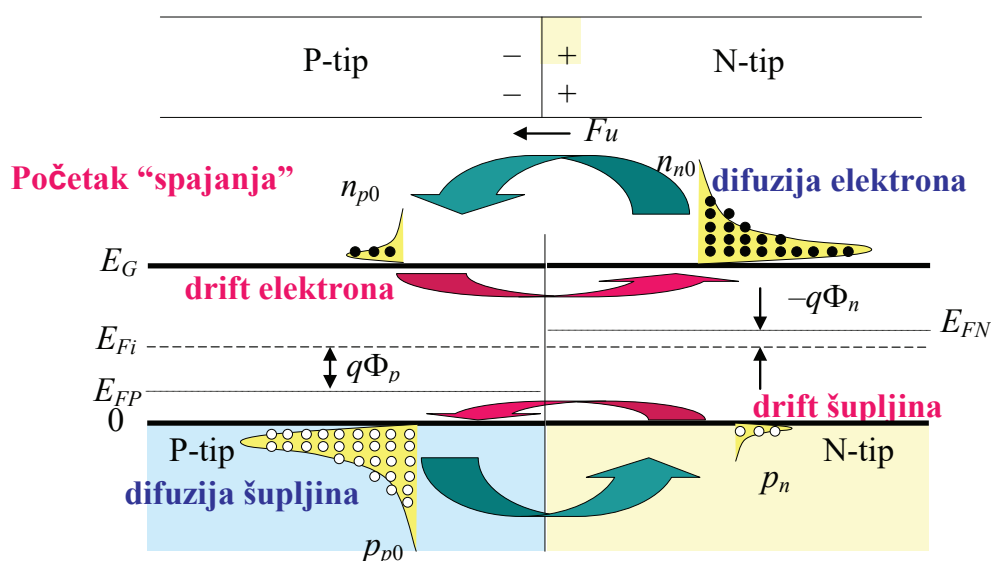
Djelovanjem električnog polja povećava se koncentracija slobodnih elektrona u površinskom sloju poluvodiča s obzirom na koncentraciju u neutralnom volumenu poluvodiča. U ovakvom spoju područje označeno kao w naziva se obogaćeni sloj. Zbog električne neutralnosti spoja, ta povećana koncentracija slobodnih elektrona u površinskom kontaktnom sloju poluvodiča mora biti uravnotežena odgovarajućim pozitivnim nabojem u tankom sloju na površini metala. Taj pozitivni naboj stvara se povlačenjem slobodnih elektrona dublje prema volumenu metala. To je također **omski** ili neispravljački spoj jer **za slobodne elektrone ne postoji barijera u spoju s metalom**, naravno uz pretpostavku da je izlazni rad metala manji od izlaznog rada poluvodiča ($\Phi_M < \Phi_S$).

4. P-N SPOJ, ENERGIJSKI DIJAGRAM

Svaka dioda, unipolarni ili bipolarni tranzistor funkcioniraju zahvaljujući *p-n spoju*. To je temeljni spoj koji će se u ovom udžbeniku razmatrati iz svih područja i perspektiva s obzirom na to da je prisutan u svim elektroničkim uređajima i čije radne karakteristike upravo determinira takav spoj dvaju ekstrinzičnih poluvodičkih kristala. Potrebno je razumjeti kako tehnologija izrade spoja nije obuhvaćena ovim pisanim materijalom.

4.1. Ravni dijagram, dodir kristala

Pretpostavit ćemo, ako nije drukčije navedeno, da su primjesni kristali poluvodiča jednolično dopirani s donorskim i akceptorskim primjesama, i da je prijelaz između dvije regije skokovit, odnosno suprotan od kontinuiran. Dakle, prvo razmatramo skokoviti *p-n dodir*. Često ćemo razmatrati p-n spojeve u kojima je jedna strana izrazito više dopirana od druge. Razumjet ćemo da se u takvom slučaju treba razmotriti samo područje s niskim dopiranjem, budući da taj materijal prvenstveno određuje karakteristike uređaja. Takvu strukturu nazivamo idealni skokoviti *p-n spoj* ili *p-n dodir*.



Slika 22. Predodžba idealnog *p-n spoja* flatband dijagramom; tendencije gibanja većinskih nosilaca naboja zbog drifta i difuzije u trenutku dodira

Princip rada može se objasniti pomoću teoretskog pokusa, odnosno eksperimenta koji je načelno moguć, ali ne i nužno izvediv u praksi. Zamislamo da se mogu oba poluvodička područja dovesti u bliski kontakt, poravnavajući energije vodljivog i valentnog pojasa svakog poluvodičkog kristala. Takvo stanje energije može se predočiti tzv. *flatband* ili ravnim dijagramom predočenom na slici 22. Koncentracija p_{p0} su većinski nosioci, tj. šupljine u *p*-tipu kristala, a koncentracija n_{n0} su većinski nosioci, tj. elektroni u *n*-tipu kristala. Modra i ljubičasta strelica na slici 22 predstavljaju predodžbu

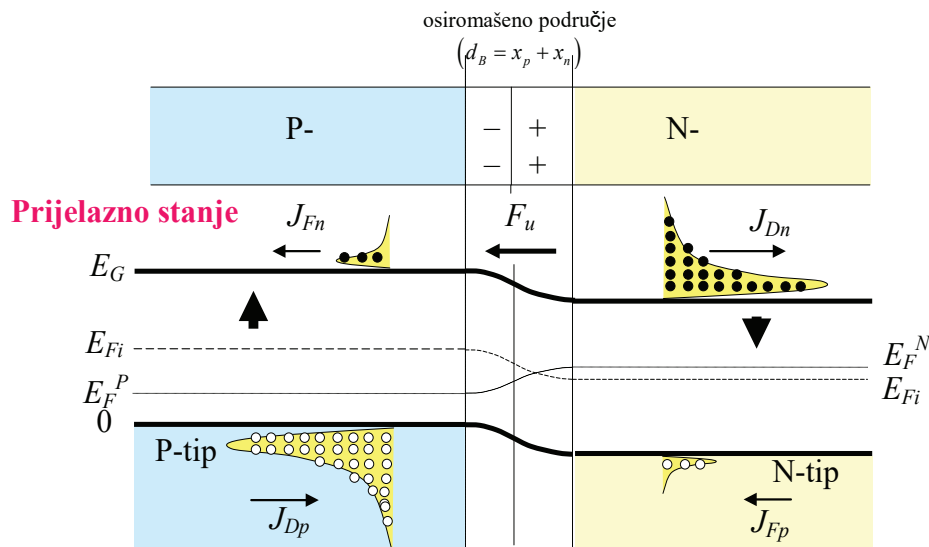
tendencije gibanja većinskih nosilaca naboja zbog drifta (utjecaj električnog polja) i difuzije (utjecaj razlike koncentracija nosilaca naboja) u trenutku dodira.

Treba imati na umu da u ovom slučaju „idealnog kontakta” ne dolazi automatski do izjednačavanja Fermijeve energije, E_{Fn} i E_{Fp} . Također, treba uočiti da *flatband* dijagram nije ravnotežni dijagram, jer oba nosioca naboja, elektroni i šupljine u dodiru, ne mogu izjednačiti svoju energiju prelaskom kroz spoj. Dakle, u spoju se očekuje kretanje elektrona i šupljina sve do postizanja termalne ravnoteže. Upravo iz tog razloga dijagram prikazan na slici 22 naziva se ravnim dijagramom. Ovo se ime odnosi na vodoravne rubove energijskih pojaseva. Ta teoretska postavka pretpostavlja kako u dodiru nema ugrađenog električnog polja i nema ionskog naboja u poluvodičima.

4.2. Termalna ravnoteža

Da bi se postigla termalna ravnoteža, elektroni i šupljine blizu metalurškog spoja difundiraju preko spoja u *p*-tip i *n*-tip u spojno područje u kojima se njihovi naboji poništavaju. Ovaj proces ostavlja ionizirane donore i akceptore bez slobodnih nosilaca naboja, stvarajući područje oko spoja koje je osiromašeno od slobodnih nosilaca naboja. To područje nazivamo osiromašeno područje, ili područje prostornog naboja, a koje se proteže od $x=-x_p$ do $x=x_n$ s ukupnom širinom oznake d_B ($d_B = x_p + x_n$). Područje bogato ioniziranim donorima (+naboj) i akceptorima (-naboj) stvara jako električno polje $\vec{E}$, što ujedno onemogućuje gibanje drugih naboja iz dubine oba kristala prema spoju. Gibanje slobodnih nosilaca naboja nastavlja se dok struja ugrađenog polja (engl. *drift*) ne poništi struju slobodnih nosilaca koji prodiru kroz spoj (*difuzija*) [2].

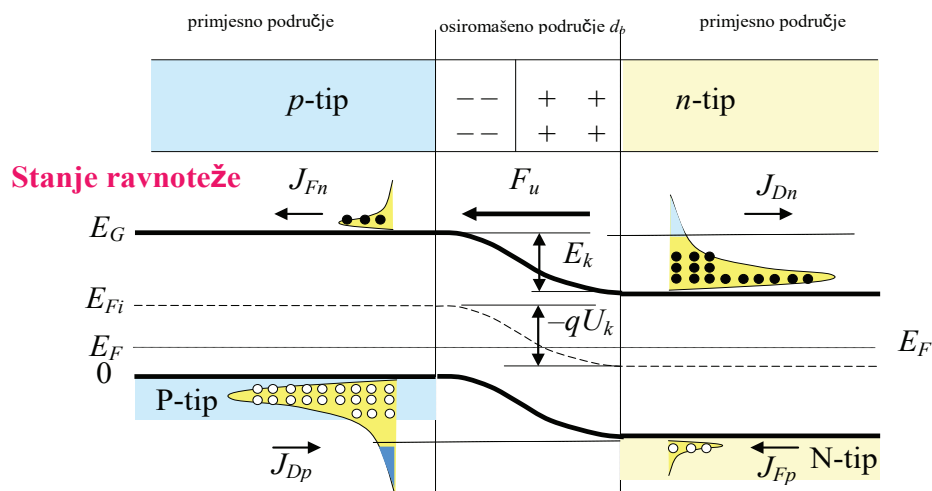
Dakle, izjednačenjem Fermijeve energije u oba primjesna kristala postiže se termalna ravnoteža. Izjednačenje Fermijeve energije odvija se brzo, ali se u mislima može odrediti jedan trenutak tzv. prijelaznog stanja u kojem je evidentan prijelaz samo onih većinskih nosilaca koji imaju energiju veću od potencijalne barijere. Energijski pojasevi intrinzičnih koncentracija E_{Fi} kao i rubovi pojaseva tada se iskrivljuju, a kako nosioci nastavljaju gibanje dolazi do sve većeg krivljenja energijskih pojaseva. Ova prijelazna situacija predložena je na slici 23.



Slika 23. Predodžba prijelaznog stanja p - n spoja: evidentan je prijelaz samo onih većinskih nosilaca koji imaju energiju veću od potencijalne barijere. Energijski pojasevi se iskrivljuju.

Vrijednosti gustoće površinskih struja u materijalima su označene na sljedeći način: J_{Dp} potječe od većinskih šupljina s lijeve p strane, J_{Fn} potječe od manjinskih elektrona s lijeve p strane, J_{Dn} potječe od većinskih elektrona s desne n strane, J_{Fp} potječe od manjinskih šupljina s desne n strane. Treba uočiti da su značajnije komponente upravo gustoće površinskih struja J_{Dp} i J_{Dn} , tj. struje većinskih nosilaca naboja u dubini oba kristala. Struje manjinskih nosilaca naboja u ovom razmatranju mogu se zanemariti. Također, smjer ukupne struje kroz p - n spoj dvaju kristala je smjer struje J_{Dp} , dakle struja većinskih šupljina.

Na slici 24 predočeno je stanje konačne termalne ravnoteže spoja dva ekstrinzična kristala poluvodiča s formiranom Fermijevom razinom koja je konstantna u cijeloj novoj strukturi. Većinski nosioci ostaju zarobljeni kao u potencijalnim jamama čije gibanje sprječava energetska potencijalna barijera oznake $-qU_k$ i to uslijed postojanja ugrađenog električnog polja E_k unutar osiromašenog područja.



Slika 24. Predodžba izjednačenja driftne i difuzijske komponente struje većinskih nosilaca naboja J_{Dn} i J_{Dp} . Fermijeva razina je konstantna u cijeloj novoj strukturi.

Ako se u termalnoj ravnoteži spoja ne priključuje vanjski napon, na vanjskim krajevima p - n spoja pojavljuje se unutarnji potencijal ili napon, $U_k = \phi$, koji je uzrokovan razlikom Fermijevih energija u primjesama E_{Fn} i E_{Fp} , odnosno u termalnoj ravnoteži izjednačavanjem Fermijeve energije dolazi do savijanja vodljivog i valentnog pojasa. Ova razlika ekstrinzičnih Fermijevih energija jednaka je ugrađenom potencijalu o čemu će biti riječi u nastavku.

4.3. Kontaktni potencijal

Ugrađeni ili kontaktni potencijal $U_k = \phi$ u poluvodičkom spoju prostire se cijelom širinom osiromašenog područja širine nekoliko desetaka nanometara i oznake d_B bogatog ionima primjesa, koje formiraju interno ili ugrađeno električno polje $\vec{E}$. Polje je usmjereno od pozitivnih iona iz n -kristala prema negativnim ionima p -kristala, dakle polje $\vec{E}$ kao da „gleda” iz n u p područje. Može se napisati i relacija za kontaktni napon: $U_k = \vec{E} \cdot d_B$, izraženo u voltima, naravno, gdje je viši potencijal na strani gdje su akceptorski atomi (p strana). Budući da termalna ravnoteža podrazumijeva da je Fermijeva energija konstantna kroz p - n spoj, ugrađeni potencijal jednak je razlici između Fermijeve energije E_{Fn} i E_{Fp} , podijeljen elektronskim nabojem q . Također je jednak zbroju ukupnog potencijala svakog područja, f_n i f_p , budući da najveći potencijal kvantificira udaljenost između primjesne Fermijeve energije i intrinzične Fermijeve energije. To daje sljedeći izraz za ugrađeni ili kontaktni potencijal:

$$U_k = E_T \ln \frac{N_D \cdot N_A}{n_i^2}, \text{ V.} \quad (12)$$

Primjer 1.

Skokoviti p - n spoj **silicija** u p -tipu poluvodiča ima koncentraciju akceptora od $N_A = 2 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, dok u n -tipu poluvodiča postoji i složena koncentracija akceptora od $N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, ali i koncentracija donora od $N_D = 10^{17} \text{ cm}^{-3} = 10 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$.

Izračunaj:

- koncentraciju elektrona i šupljina u oba kristala
- ugrađeni kontaktni potencijal na 300 K
- ugrađeni kontaktni potencijal na 400 K.

Rješenje:

- Koncentracije elektrona i šupljina su:

$$\begin{aligned} \text{U kristalu } p\text{-tipa:} \quad p &= N_A = 2 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}; \\ n &= n_i^2 / N_A = 2,1 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3} / 2 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3} \approx 1 \cdot 10^4 \text{ cm}^{-3}. \end{aligned}$$

U kristalu n -tipa: $n = N_D - N_A = 9 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$;
 $p = n_i^2 / N_D = 2,1 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3} / 9 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3} \approx 2,3 \cdot 10^3 \text{ cm}^{-3}$.

b) Ugrađeni kontaktni potencijal na 300K

Podsjetnik: $U_k = E_T \ln \frac{N_D \cdot N_A}{n_i^2}$, $T = 300\text{K}$, $E_T = 0,026\text{meV}$, $(n_i)_{Si} = 1,45 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$

Izračun: $U_k = 0,026 \cdot \ln \frac{2 \cdot 10^{16} \cdot 9 \cdot 10^{16}}{2,1 \cdot 10^{20}} = 0,774\text{V}$.

c) Ugrađeni kontaktni potencijal na 400K

Podsjetnik: $n_i^2 = 19,1 \cdot 10^{30} \cdot T^3 \cdot e^{\frac{-E_g}{E_T}}$, cm^{-3} , $k_B = 1,38 \cdot 10^{23} \text{ J/K}$, $\frac{E_T}{q} = \frac{kT}{q} \approx \frac{T}{11605} = 0,0345\text{eV}$

daje: $n_i = 4,52 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}$, $n_i^2 = 20,4 \cdot 10^{24} \text{ cm}^{-3}$,

što daje: $U_k = 0,0345 \cdot \ln \frac{2 \cdot 10^{16} \cdot 9 \cdot 10^{16}}{20,4 \cdot 10^{24}} = 0,631\text{V}$.

Zaključak: Pri povišenim temperaturama vrijednost kontaktnog napona se smanjuje!

Primjer:

Zadatak 2.

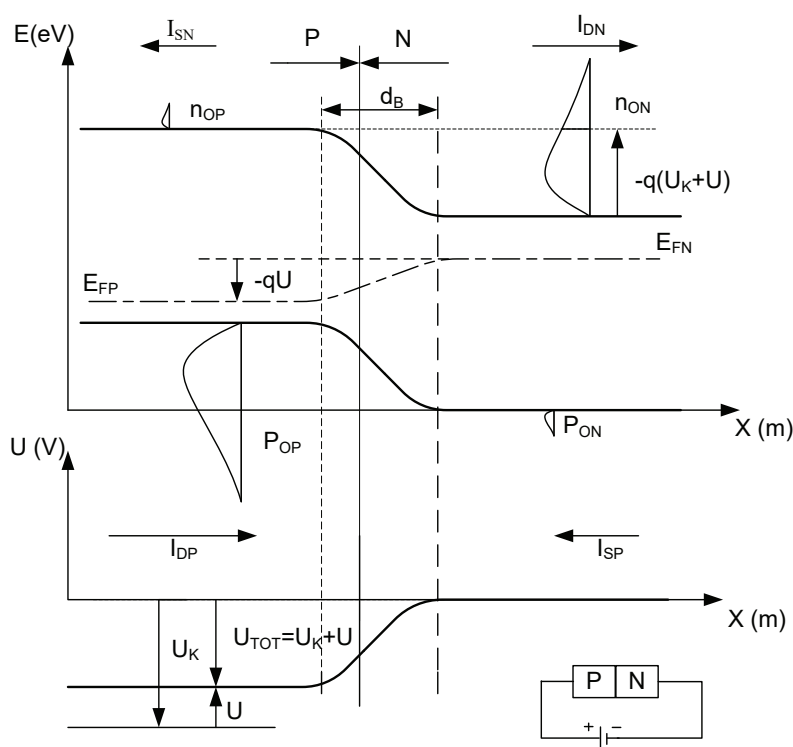
Skokoviti p - n spoj **germanija** u p -tipu poluvodiča ima koncentraciju akceptora od $N_A = 2 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, dok u n -tipu poluvodiča postoji i koncentracija akceptora od $N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, ali i koncentracija donora od $N_D = 10^{17} \text{ cm}^{-3} = 10 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$.

Pomoć:

Teoretska relacija za germanij: $n_i^2 = 3,1 \cdot 10^{32} \cdot T^3 e^{\frac{-0,66}{k_B T}}$, $(n_i(T = 300\text{K}))_{Ge} = 2,33 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$.

4.4. Propusna polarizacija p - n spoja

U ovom dijelu teksta bit će razmatrana situacija u kojoj se na dva kristala koji se u spoju priključuje vanjski istosmjerni napon U . Na slici 25 predložen je slučaj priključenja pozitivnog pola istosmjernog napona U na lijevu p stranu. Sukladno tome, negativni pol istosmjernog napona U priključen je na desnu n stranu spoja. Rezultat takvoga spoja najlakše je objasniti pomoću energijskih dijagrama. Priključenjem pozitivnog pola istosmjernog napona U na lijevu p stranu povećava koncentraciju većinskih nosilaca naboja koji dolaze iz izvora napona u velikom broju.



Slika 25. Predložba p - n spoja u stanju neravnoteže, propusna polarizacija

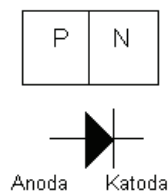
Upravo takve koncentracije dovode do smanjenja osiromašenog područja, smanjenja ugrađenog električnog polja, smanjenja kontaktnog potencijala i krivljenja energijskih pojaseva. U ovom slučaju vanjska energija naponskog izvora, ako se kontinuirano povećava, kao da djelomično poništava stanje p - n spoja i omogućuje protok struje istog smjera kao što je bio smjer i tendencija gibanja većinskih nosilaca naboja na p strani koji je razmatran ranije. Dakle, dolazi do značajnog krivljenja energijskih pojaseva u poluvodiču.

Daljnijim povećanjem vanjskog istosmjernog napona U dolazi do gotovo potpunog poništenja kontaktnog napona p - n spoja. Struje koje su naznačene na slici 25 imaju sljedeća značenja: I_{DP} označava struju šupljina iz izvora, I_{DN} označava struju elektrona sa n strane, a I_{SN} i I_{DP} oznake označavaju struje manjinskih nosilaca u kristalima p i n . Evidentno je da se formira ukupna struja kroz p - n spoj, tj. kroz poluvodičku diodu spoja koja prolazi kroz materijal. Ukupni napon na p - n spoju

je: $U_{TOT} = U_K + U$. Evidentno je i krivljenje Fermijeve energije za iznos vanjske priključene energije $E_F = E = -qU$ i sužavanje prostora d_B .

Ukupna struja koja protječe kroz $p-n$ spoj, tj. kroz poluvodičku diodu je: $I_D = I_{DP} + I_{DN}$. Zbog protoka struje kroz diodu priključenjem vanjskog napona s pozitivnim polom na p strani ovakav spoj naziva se „propusna polarizacija” ili propusni spoj. Rijetko se koristi i naziv „neispravljački spoj”.

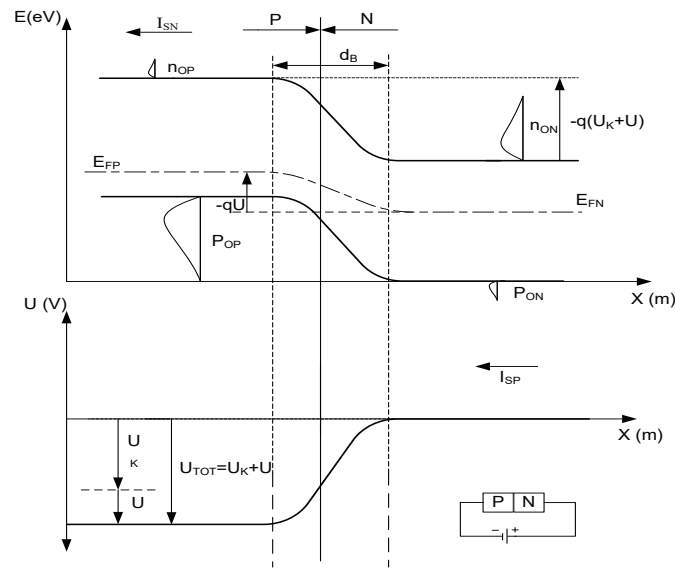
Propusna polarizacija $p-n$ spoja može se rastumačiti čak i na nešto lakši način ako se sagledaju samo vrijednosti i smjerovi električnog polja. Naime, u $p-n$ spoju postoji ugrađeno električno polje $\vec{E}$ koje kao da „gleda” iz n -tipa poluvodiča u p -tip. Priključenjem vanjskog napona kao da smo na $p-n$ spoj spojili vanjski kondenzator s beskonačno velikim brojem naboja na svojim kontaktima koji stvara svoje „vanjsko” električno polje $\vec{E}_v$. U slučaju kada je metalna kontaktna elektroda pozitivnog pola vanjskog napona spojena na p stranu (anoda) kao da se s vanjske (p strane) strane dodaje električno polje suprotnog smjera koje smanjuje djelovanje ugrađenog električnog polja jer je suprotnog smjera. Istovremeno, metalna kontaktna elektroda negativnog pola vanjskog napona spojena na n stranu (katoda). Općepoznata oznaka za takav spoj je predložena na slici 28, a svojim izgledom naznačava protok struje kroz spoj od anode prema katodi.



Slika 26. Predodžba $p-n$ spoja specifičnom oznakom za poluvodičku diodu s anodom i katodom (slika lijevo).
 Silicijeva dioda s crtom koja označava mjesto katode ili n strane (slika desno).

4.5. Nepropusna polarizacija $p-n$ spoja

Nepropusna polarizacija $p-n$ spoja ili tzv. „zaporna” ili „inverzna polarizacija” spoja ili uređaja koju nazivamo poluvodička dioda dobiva se u slučaju priključenja negativnog pola istosmjernog napona na lijevu p stranu. Sukladno tome, pozitivni pol istosmjernog napona priključen je na desnu n stranu spoja. Rezultat takvoga spoja je inverzna polarizacija od prethodno pojašnjene, i koja ima zaporni karakter, odnosno dolazi do zapiranja protoka struje. Takva je situacija predložena na slici 27. Priključenje pozitivnog pola istosmjernog napona na desnu n stranu povećava se koncentracija šupljina koje dolaze iz izvora napona u velikom broju.



Slika 27. Predodžba p - n spoja, inverzna ili nepropusna polarizacija

Upravo takve koncentracije šupljina suprotne su domicilnim većinskim elektronima na kontaktnoj n strani što dovodi do povećanja odnosno proširenja osiromašenog područja u spoju kristala. Kao posljedica toga dolazi do povećanja ugrađenog električnog polja, povećanja ukupnog potencijala i krivljenja energijskih pojaseva.

U ovom slučaju, ako se vanjska energija naponskog izvora kontinuirano povećava, kao da povećava energetska barijeru p - n spoja i onemogućuje protok struje kroz spoj. Dakle, dolazi do značajnog krivljenja energijskih pojaseva u poluvodiču, ali u ovom slučaju u zapornom smislu. S obzirom na to da takav nepropusno polarizirani p - n spoj ne omogućuje protok struje iz vanjskog izvora kroz materijal, u ovom tipu spoja koristi se naziv „zaporni spoj” ili „ispravljački spoj” diode. Stanje energijskih pojaseva i ukupnog napona naznačenog spoja predložen je na slici 27.

Sada se osiromašeno područje d_B širi, a visina barijere raste sukladno povećanju vanjskog napona jer polaritetom vanjski napon podržava kontaktni potencijal. Dolazi do velikog krivljenja linije Fermijeve energije za iznos vanjskog priključenog napona koji povećava kontaktni potencijal i energetska barijeru. Posljedica te situacije je da kroz p - n spoj ne može teći struja većinskih nosilaca naboja te takvu polarizaciju spoja nazivamo **nepropusna polarizacija** ili **zaporna polarizacija (reverzna polarizacija)**. U ovoj situaciji samo može teći **reverzna struja** (Schokley) ili struja manjinskih nosilaca (slika 28) naboja koja je suprotna struji vanjskog izvora napona: $I = -I_{Sn} - I_{Sp} = -I_S$. Jednadžba za reverznu Schokleyjevu struju je:

$$I = I_S \left(e^{\frac{qU}{nkT}} - 1 \right) = I_S \left(e^{\frac{U}{nU_T}} - 1 \right), \quad (15)$$

gdje je n koeficijent idealnosti p - n diode, a U_T je tzv. termalni napon (na 300 K $U_T = 25,9$ mV).

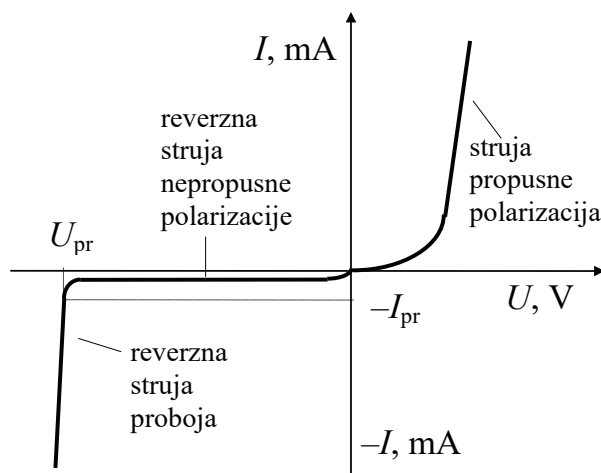
Jednadžba (15) još se naziva jednadžba idealne diode ($I = I_D$).

Sagledano iz perspektive električnog polja, priključenjem vanjskog izvora napona kao da smo na p - n spoj spojili vanjski kondenzator s beskonačno velikim brojem naboja na svojim kontaktima koji stvara svoje „vanjsko” električno polje $\vec{E}_v$ kroz p - n spoj. U slučaju kada je metalna elektroda pozitivnog pola vanjskog napona spojena na n stranu kao da se s vanjske (n strane) dodaje električno polje istog smjera koje povećava djelovanje ugrađenog električnog polja i energetske barijere jer je istog smjera. Istovremeno, metalna elektroda negativnog pola vanjskog izvora napona spojena je na p stranu (slika 27).

4.6. Strujno-naponska karakteristika p - n spoja

Sukladno prethodnoj spoznaji u potpoglavlju 4.4. možemo govoriti o strujno-naponskoj karakteristici poluvodičke diode, tj. možemo govoriti o odnosima veličina I i U . Na strujno-naponskom dijagramu predloženom na slici 27 u I. kvadrantu može se uočiti eksponencijalni odnos struje i napona. Kao što je naznačeno u potpoglavlju 4.4., priključenjem vanjskog napona i u slučaju njegovog povećavanja dolazi do smanjivanja energetske barijere i blagog porasta struje kroz p - n spoj. Daljnjim porastom napona dolazi do savladavanja kontaktnog napona p - n spoja ili tzv. napona koljena u iznosu od približno 0,7 V te nakon te točke dolazi do gotovo linearnog porasta struje u odnosu na promjenu napona. Taj podatak govori o vrlo dobroj ili čak izvrsnoj vodljivosti spoja (odnos I/U u simensima - S), odnosno recipročno o vrlo malom ili neznatnom dinamičkom otporu spoja (odnos U/I u omima - Ω). U tom dijelu karakteristike, dioda vodi struju uz vrlo mali utrošak napona i snage.

Na predloženoj karakteristici poluvodičke diode na slici 28 u III. kvadrantu, kako je naznačeno u potpoglavlju 4.5., priključenjem vanjskog reverznog napona ($-U$) i u slučaju njegovog povećavanja dolazi do povećavanja energetske barijere p - n spoja. U tom dijelu može se uočiti prvi ravni dio I - U funkcije i vrijednost vrlo male reverzne struje $-I_{pr}$ od nekoliko desetaka mikroampera i gotovo nepromjenjivi odnos struje i napona. Otpor takvog spoja gotovo je beskonačno velik ($>100 \text{ k}\Omega$). Daljnjim porastom reverznog napona dolazi do popuštanja materijala p - n spoja i do tzv. napona proboja ($-U_{pr}$). Nakon te točke dolazi do gotovo okomitog porasta reverzne struje u odnosu na promjenu napona. U materijalu p - n spoja dolazi do kombinacije preklapanja energijskih pojaseva i lavinskog proboja elektrona kroz vrlo usku barijeru (kroz tunel) što dovodi do uništenja, odnosno rastapanja poluvodičkog materijala i tzv. „proboja diode”.

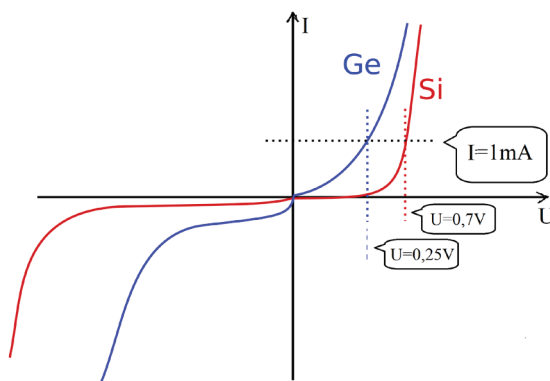


Slika 28. Predodžba strujno-naponske karakteristike $p-n$ spoja

Napon proboja $-U_{pr}$ je viši što je slabije dopirana n i/ili p strana, a u nesimetričnom spoju, što je niža koncentracija primjesa manje dopirane strane.

Dakle, s gledišta vodljivosti, poluvodički $p-n$ spoj ili dioda u slučaju propusne polarizacije provedu većinske nosioce naboja u vidu diodne struje, kada vanjski napon svojim vanjskim poljem savlada ugrađeno polje unutar osiromašenog područja i na taj način poništi efekt kontaktnog potencijala i kontaktne energije $p-n$ spoja. U slučaju silicija riječ je o naponu od približno 0,6 V - 0,8 V, dok je kod germanijeve diode potreban gotovo upola manji napon od približno 0,2 V - 0,4 V. Vanjski izvor napona utrošio je, dakle, iznos od približno 0,7 V u slučaju silicijeve diode na vodljivost i savladavanje tog poluvodičkog spoja. U svim budućim proračunima strujno-naponskih karakteristika elektroničkih sklopova koji sadrže diodu kao element u mreži taj se iznos napona mora uzeti u obzir.

Na slici 29 nalazi se predodžba tipične struje poluvodičkih dioda od silicija i germanija. U prvom kvadrantu se nalazi tzv. strujno-naponska ($I-U$) karakteristika diode, a u IV. kvadrantu je tzv. probojna karakteristika.

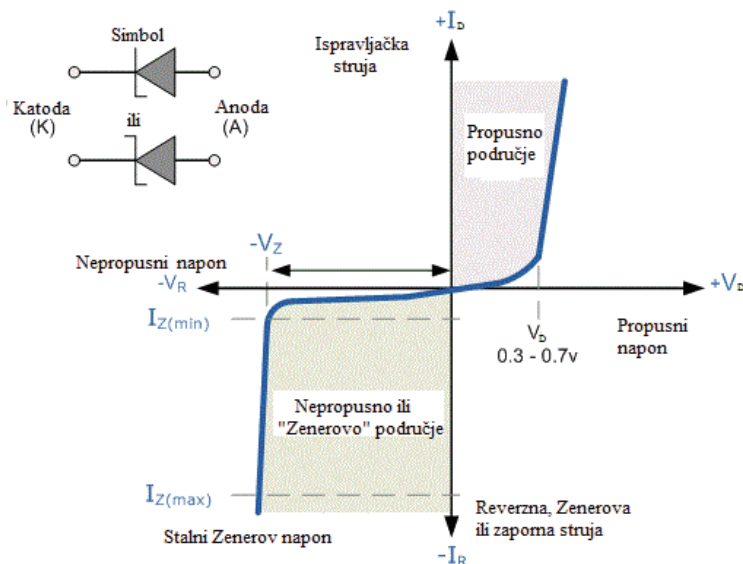


Slika 29. Predodžba tipične strujno-naponske karakteristike silicijeve i germanijeve diode

Proboj p - n spoja, tuneliranje

Pojava električnog polja kao posljedica priključenja vanjskog napona u osiromašenom području iskrivljuje energijske pojaseve u poluvodičima. Povećanjem napona nepropusne polarizacije ($U < 0$) pojasevi se još više iskrivljavaju sve dok se kod nekog određenog iznosa razine valentnog i vodljivog pojasa ne preklope. Elektroni zbog velike vodljivosti i uskog prostora energetske barijere tada mogu izvršiti „proboj” ili „tuneliranje” kroz takav uski p - n spoj na p stranu. Taj se tunelski efekt zbog valne prirode elektrona iskazuje preko **vjerojatnosti tuneliranja**, a naziva se još i **Zenerov efekt**. Dakle, s porastom napona u reverznom smjeru dolazi do tunelskog proboja i daljnjim porastom napona dioda vodi struju suprotnog smjera tzv. struju manjinskih nosilaca naboja. Napon proboja ili **Zenerov napon** oznake U_Z , ovisi o mnogo parametara, ali prvenstveno je određen koncentracijom akceptora, temperaturom, karakterističnim brzinama elektrona u osiromašenom području i, naravno, širinom zabranjenog energetskeg pojasa.

Na slici 30 predložena je oznaka i strujno-naponske karakteristike tzv. Zenerove diode koja se u I. kvadrantu ponaša kao „normalna” dioda i ima tipičnu I-U karakteristiku s pragom vodljivosti. Međutim, u IV. kvadrantu predloženo je kako porast reverznog napona iznad vrijednosti od $-U_Z$ zapravo nije moguć zbog velike vodljivosti takve diode za manjinske nosioce. Zapravo, dioda kao da ne „dopušta” formiranje većeg napona od Zenerovog, odnosno na svojim kontaktima održava vrijednost Zenerovog napona za koji je projektirana. Riječ je o vrlo korisnom elektroničkom elementu i kao naponskom dijelilu i kao zaštitnom elementu.



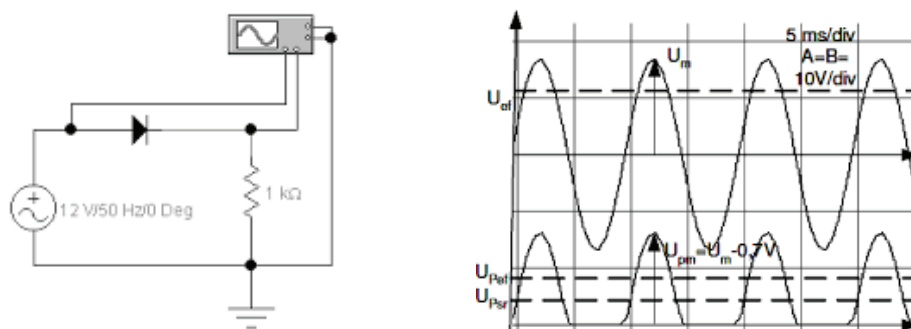
Slika 30. Predložba tipične strujno-naponske karakteristike Zenerove diode

Poluvodička dioda - ispravljač napona

Poluvalno ispravljačko djelovanje

S obzirom na to da poluvodička dioda (p - n spoj) u slučaju propusne polarizacije (+ pol vanjskog napona spojen na p stranu) i podizanja takvog napona počinje polako propuštati struju većinskih nosilaca napona (šupljine) do vrijednosti tzv. **napona koljena** U_γ (približno 0,6V), a zatim naglo daljnjim povećanjem napona, možemo to svojstvo koristiti kod **poluvalnog** ispravljanja izmjeničnog napona frekvencije f .

Za dokazivanje ispravljačkog djelovanja diode potrebno nam je nekoliko elemenata prikazanih na slici 31.: izvor izmjeničnog napona 12 VAC, otpornik od 1 k Ω kao trošilo, Si dioda i osciloskop. Predočenim strujnim krugom ili konturom teći će struja samo u slučaju kada je dioda polarizirana propusno, tj. kada se lijeva anoda nalazi na pozitivnom naponu u odnosu na katodu. To je opet samo u slučaju pozitivne poluperiode izmjeničnog napona na izvoru. Za vrijeme negativne poluperiode struja neće teći kroz elemente strujnog kruga zbog ispravljačkog djelovanja diode. Na trošilu, tj. na otporniku od 1 k Ω mjerimo napon i prikazujemo ga na osciloskopu gdje ga kompariramo s naponom izvora koji se također vidi na osciloskopu (slika 31). Pretpostavit ćemo da je riječ o idealnoj diodi ($n=1$) i da je vrijednost $U_\gamma = 0,7V$ ujedno i napon koji izvor mora utrošiti na rad diode (pad napona na diodi). Napon izvora glasi: $u(t) = U_{\max} \cdot \sin(\omega t)$.



Slika 31. Predodžba poluvalnog ispravljanja napona: lijevo strujni krug, desno prikaz na osciloskopu

S obzirom na to da strujnim krugom teku samo pozitivne poluperiode napona, možemo izračunati srednju vrijednost ispravljenog napona. Izraz glasi:

$$U_{sr} = \frac{1}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} U_{\max} \cdot \sin(\omega t) \cdot dt = \frac{U_{\max}}{\pi} = 0,45 \cdot U_{ef} = U_{DC} . \quad (16)$$

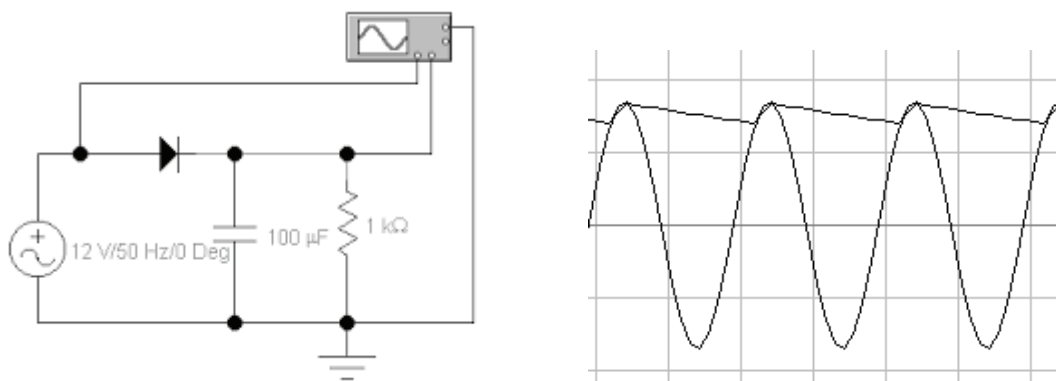
Efektivna vrijednost napona dana je izrazom:

$$U_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} [U_{\max} \cdot \sin(\omega t)]^2 \cdot dt} = \frac{U_{\max}}{\sqrt{2}} . \quad (17)$$

Kada govorimo o ispravljačima napona, kvaliteta ispravljenog istosmjernog napona mjeri se faktorom valovitosti ili **faktorom brujanja** (engl. *ripple factor*). Izraz za faktor brujanja glasi:

$$r = \frac{(u(t) - U_{sr})_{ef}}{U_{sr}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T (u(t) - U_{sr})^2 \cdot dt}}{U_{sr}} = 1,211. \quad (18)$$

Prvo poboljšanje oblika napona na trošilu, a ujedno i povećanje istosmjerne komponente napona, kao i bitno smanjenje valovitosti napona, može se postići postupkom filtriranja (glađenja) pomoću kondenzatora koji se spaja paralelno trošilu (slika 32). U našem primjeru dodan je kondenzator kapaciteta $100 \mu\text{F}$ koji s otporom u paralelnom spoju ima karakteristiku tzv. niskopropusnog filtra (s konstantom $\tau = R \cdot C = 0,1\text{s}$).



Slika 32. Predodžba poluvalnog ispravljanja napona: lijevo strujni krug, desno prikaz na osciloskopu

Iznos napona brujanja može se očitati na osciloskopu kao razlika napona između dvije poluperiode, tj. između „+” „i” vrha ili između pikova - engl. „*peak to peak*”. Veličina napona brujanja može se izračunati prema izrazu (19):

$$(U_{rip})_{\text{peak to peak}} = \frac{U_{\max}}{f_{rip} \cdot \tau} = \frac{U_{\max}}{f_{rip} \cdot R \cdot C} = 3,38\text{V}, \quad (19)$$

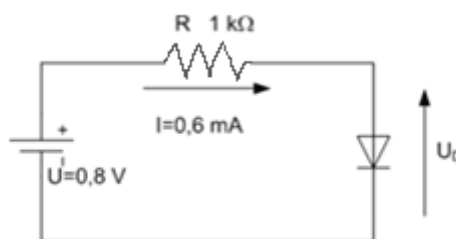
gdje je frekvencija brujanja, odnosno izvora napona, a u ovom slučaju standardnih 50 Hz.

Primjeri:

Zadatak 1.

Strujni krug prema slici ima zadane elemente i konturnu struju $I=0,6\text{mA}$. Ako je poznata Shockleyeva struja zasićenja $I_S = 20\text{nA}$, odredite o kojoj diodi je riječ i odredite veličine termalnog napona i ambijentalne temperature (U_T i T).

Pomoć: $q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{As}$, $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{J/K}$.



Skica 33. Strujni krug iz primjera zadatka 1.

Rješenje:

Naponska jednadžba kruga (II KZN):

$$U = I \cdot R + U_D \Rightarrow U_D = 0,2\text{V}.$$

Shockleyeva jednadžba:

$$I = I_S \left(e^{\frac{U_D}{U_T}} - 1 \right) \Rightarrow \frac{I}{I_S} = e^{\frac{U_D}{U_T}} - 1,$$

$$\frac{I}{I_S} + 1 = e^{\frac{U_D}{U_T}} \ln,$$

$$\frac{U_D}{U_T} = \ln \left(\frac{I}{I_S} + 1 \right) = 10,31,$$

$$U_T = \frac{U_D}{\ln \left(\frac{I}{I_S} + 1 \right)} = \frac{0,2\text{V}}{10,31} = 19,4\text{mV},$$

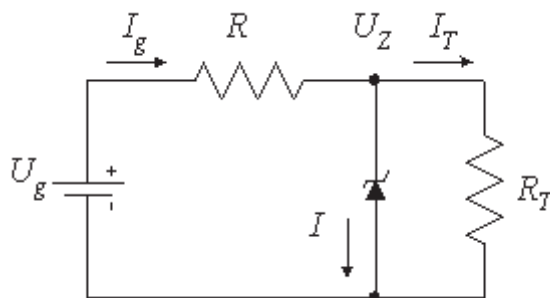
$$U_T = \frac{k \cdot T}{q} \Rightarrow T = \frac{U_T \cdot q}{k} = 253\text{K}.$$

Dodatak zadatku:

Ako bi se temperatura povećala za 47 K, bi li to dovelo do promjene konturne struje I ?

Zadatak 2. (Naponski regulator sa Zener diodom)

Strujni krug prema slici ima zadane elemente i smjerove struja. Struja uništenja Zener diode je $I_{Z,max} = 20 \text{ mA}$ uz Zenerov napon $U_Z = 12 \text{ V}$ i napon izvora $U_g = 30 \text{ V}$. Koliki mora biti otpor R da ne bi došlo do uništenja Zener diode?



Skica 34. Strujni krug iz primjera zadatka 2.

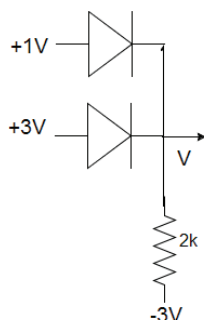
Rješenje:

Naponska jednačba kruga sa Zener diodom glasi: $U_g = I_g \cdot R + U_Z = 30 \text{ V}$, $I_g = I_Z + I_T$.

Najnepovoljniji slučaj bio bi kada bi sva struja izvora prolazila kroz Zener diodu iako uvijek jedna komponenta struje teče i kroz teret R_T : $I_g = I_Z \Rightarrow I_T \approx 0$, tada bi bilo $I_g = \frac{U_g - U_Z}{R} \leq I_{Z,max}$ a to zahtijeva projektiranu vrijednost otpora u krugu od $R \geq \frac{U_g - U_Z}{I_{Z,max}}$. Znači, izračun daje minimalnu vrijednost od $R \geq 900 \Omega$.

Zadatak 3.

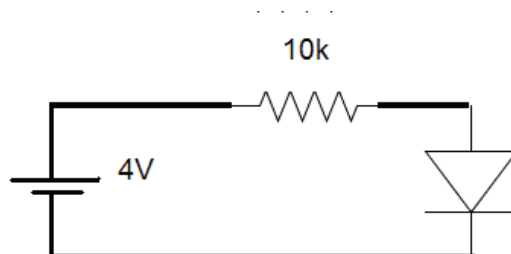
Prema slici dvije identične diode imaju na anodama priključene različite iznose napona. Shockleyeva struja zasićenja obje diode je $I_s = 10^{-12} \text{ A}$, faktor idealnosti je $n=1$, a temperatura je sobna ($T = 300 \text{ K}$). Odredite napon koljena diode koja vodi jakost struje kroz otpornik od $2 \text{ k}\Omega$ te potencijal spojne točke elemenata (oznake V). O kojoj je diodi riječ?



Skica 35. Strujni krug iz primjera zadatka 3.

Zadatak 4.

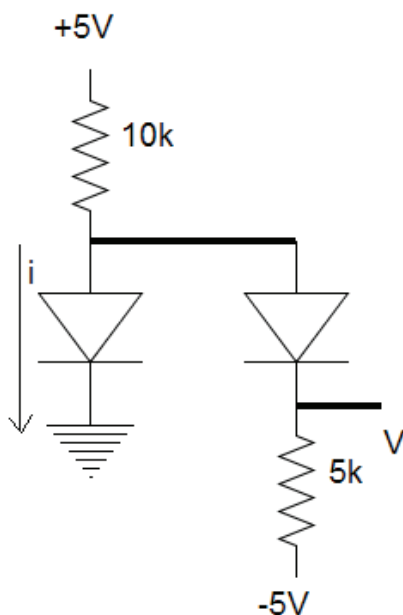
Strujni krug prema slici ima zadane elemente. Shockleyeva struja zasićenja diode je $I_s = 10^{-11} \text{ A}$, faktor idealnosti je $n=1$, temperatura je sobna ($T=300 \text{ K}$), a napon koljena diode je $0,65 \text{ V}$. Izračunaj jakost struje kroz otpornik.



Skica 36. Strujni krug iz primjera zadatka 4.

Zadatak 5.

Prema slici dvije identične Si diode s naponom koljena $U_D = 0,7 \text{ V}$ u spoju su s dva otpornika. Izračunaj jakost svih struja spoja (struja kroz obje diode i kroz oba otpornika) i potencijale spojnih točaka. Što bi bilo u slučaju spoja Schottky dioda ($U_D = 0,25 \text{ V}$)?



Skica 37. Strujni krug iz primjera zadatka 5.

In Memoriam

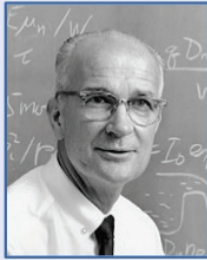
Sjećanje na:

Ideal Diode Equation

Often called the Shockley equation:

$$J = J_0 \left[\exp \left(\frac{eV}{k_B T} \right) - 1 \right]$$

J_0 – Dark saturation current.
 V – applied voltage across the terminals of the diode
 e – Electronic charge
 k_B – Boltzmann's constant
 T – Absolute temperature (K)



William Shockley:
 Co-inventor of the transistor
 with Bardeen and Brattain 1948
 Nobel Prize: **1956**

Slika 38. William B. Shockley (1910 - 1989). Američki fizičar i izumitelj.

In Memoriam

Sjećanje na:

Walter H Schottky



Schottky effect

Schottky barrier

Schottky diode

Slika 39. Walter H. Schottky (1886 - 1976). Njemački fizičar i izumitelj.

5. BIPOLARNI TRANZISTORI

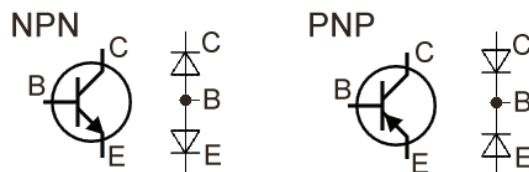
Što je tranzistor?

Spoj engleskih riječi *transfer* (prijelazni) i *resistor* (otpornik) tvori skupnu riječ *tranzistor* koja naznačuje aktivni elektronički uređaj u čvrstom stanju, a koji je upravljan strujnim tokom. Tranzistori se izrađuju od poluvodičkih materijala, kao što su silicij ili germanij, a sastoje se od tri poluvodička kristala, odnosno od tri elektrode s dva međusobna spoja. Otuda i naziv bipolarni (ili dvojni spoj) jer posjeduju dva poluvodička homo-spoja. Poluvodička područja su različito dopirana donorskim i akceptorskim primjesama tako da se jedno dopirano područje nalazi u sendviču između suprotno dopiranih područja. Jedna vanjska poluvodička elektroda služi kao kolektor (sakupljač naboja), unutarnji dio kao baza (upravljački ventil protoka), a druga vanjska poluvodička elektroda kao emiter (odašiljač naboja). Kolektorski krug prikuplja energiju iz vanjskog izvora napajanja, baza djeluje kao kontrolno-upravljačka elektroda, a odašiljač kao da emitira izlazni signal iz cijelog uređaja. Strujni signali malih amplituda i napona određenih frekvencija koji se dovode na bazu, upravljaju većim strujama i snagom na kolektoru tranzistora, uz malu promjenu signala dovedenog na bazu koja stvara veliku i brzu promjenu struje koja teče kroz cijeli uređaj. Dakle, možemo općenito reći kako je bipolarni tranzistor elektronički uređaj koji je upravljan strujom, a najčešće se koristi u analognoj elektronici kao pojačalo, a u digitalnoj elektronici kao logička sklopka. Tranzistor može raditi linearno - kontinuirano, poput audiopojačala ili kao sklopka, koji brzo otvara i zatvara elektronička vrata brzinom koja se iskazuje u megahercima. Razni tipovi tranzistora mogu raditi na razne načine i obavljati različite funkcije kao što su pojačanje, ispravljanje, modulacija ili demodulacija.

Tranzistor su izumili William Shockley, John Bardeen i Walter Britain iz AT&T Bell Telephone Laboratories, 1947. godine i brzo je zamijenio jedini elektronički uređaj koji se do tada koristio - elektronsku cijev ili vakuumsku cijev.

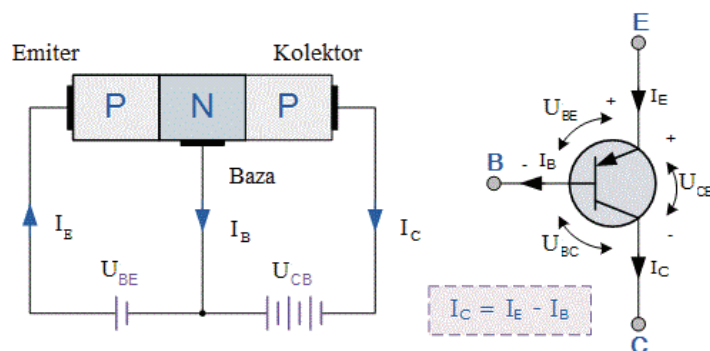
5.1. Struktura PNP tranzistora

U slučaju korištenja bipolarnih spojnih tranzistora daleko najpoznatije su dvije strukture ili dva spoja tzv. PNP i NPN spoj. Prvi opis tranzistora bit će s PNP strukturom. PNP tip tranzistorske konstrukcije dva PN spoja čine dvije PN diode koje su obrnuto postavljene i usmjerene prema središnjoj elektrodi, odnosno prema bazi oznake B. Podsjetimo se kako diode mogu biti polarizirane propusno i nepropusno. U pravilu, jedna dioda će u radu tranzistora biti propusno a druga nepropusno polarizirana. Smjer struje je uvijek određen strelicom tako da u PNP spoju struja izlazi iz *p*-tipa poluvodičkog kristala prema *n*-tipu jer je riječ o propusnoj polarizaciji dvaju poluvodičkih kristala. U PNP spoju strelica ujedno definira priključak-terminal emitera i smjer struje kroz cijeli uređaj, a ova struktura pokazuje smjer struje prema bazi, odnosno prema unutra u simbolu tranzistora (slika 40).



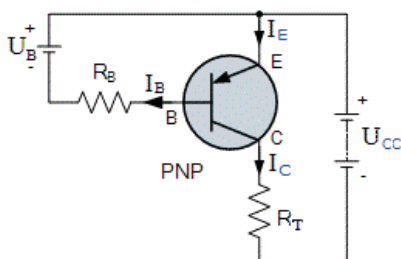
Slika 40. Simboli tranzistora i zamjenska shema pomoću dioda

Struktura PNP tranzistora predložena je na slici 41. Sastoji se od dva p -tipa poluvodičkih kristala s obje strane n -tipa kristala koji je u sredini.



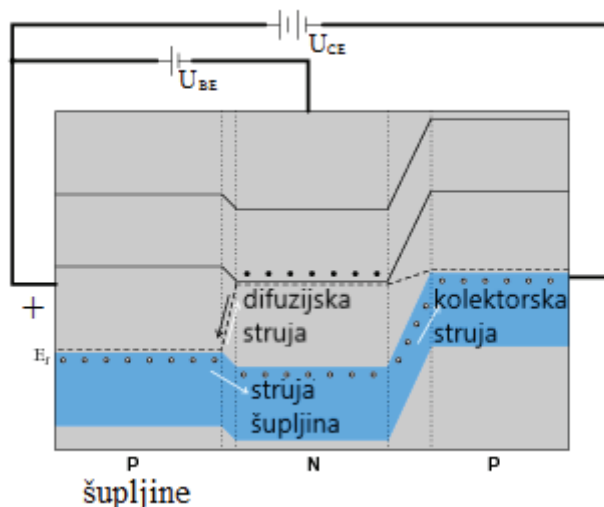
Slika 41. Strukture PNP tranzistora i smjerovi struja predloženi strelicama te naponi elektroda

Sukladno predodžbi, napon između baze i emitera (U_{BE}) je negativan na bazi i pozitivan kod emitera, jer za PNP tranzistor bazni spoj B je uvijek negativan u odnosu na emiter E (struja teče iz emitera). Također, napon napajanja emitera je pozitivniji (viši) u odnosu na kolektor (U_{CE}). Dakle, da bi PNP tranzistor vodio struju, emiter je uvijek na višem potencijalu u odnosu na bazu i kolektor, tako da je na najvišoj naponskoj (potencijalnoj) točki (slika 41 desno).



Slika 42. Spoj PNP tranzistora s naponima napajanja i otpornicima na ulazu i izlazu

Izvori napona i radni otpori spojeni su na PNP tranzistor kao što je predloženo na slici 42. Emiter je priključen na plus pol napona napajanja U_{CC} , otpornik tereta oznake R_T prema kolektoru, koji ograničava maksimalnu struju I_C . Napon U_B koji je negativan u odnosu na emiter priključen je na bazni otpornik R_B , koji služi za ograničenje maksimalne vrijednosti bazne struje I_B .



Slika 43. Energijski dijagram spoja PNP tranzistora s obzirom na priključene napone napajanja sa slike 42

Dakle, struju PNP tranzistora čine većinski slobodni nosioci u emitterskom kristalu (šupljine u p -tipu) koji u slučaju propusne polarizacije baza-emiter ulaze u bazu (kristal n -tipa) gdje su manjinski nosioci (slika 43). Kao manjinski nosioci prolaze bez gubitaka kroz tanki sloj baznog kristala prema drugom p - n spoju i prolaze kroz njega u kristal p -tipa (kolektor) jer propusni spoj za njih ne predstavlja barijeru (desni dio slike 43).

Kako bi se omogućio protok bazne struje u PNP tranzistoru, baza mora biti negativnija od emitera (struja mora izlaziti iz baze) za iznos približno 0,7 V u slučaju silicija ili za 0,3 V u slučaju germanija, a odnos bazne struje i kolektorske struje identičan je kao i kod NPN tranzistora te glasi:

$$I_E = I_B + I_C \Rightarrow I_C = I_E - I_B . \quad (20)$$

Još vrijede odnosi među strujama koji se definiraju s parametrima *alfa* i *beta*:

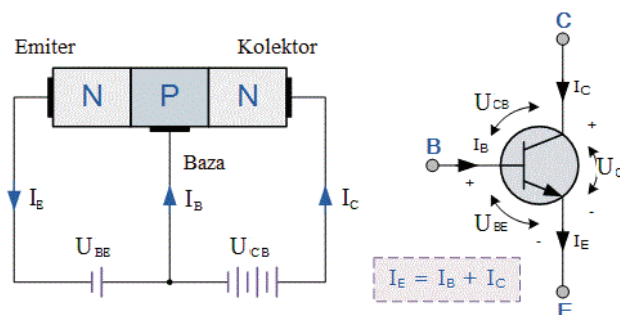
$$\beta = \frac{I_C}{I_B}, \quad \alpha = \frac{I_E}{I_C} . \quad (21)$$

5.2. Struktura NPN tranzistora

Najčešće korištena tranzistorska konfiguracija je NPN tranzistor. Sastoji se od dva n -tipa poluvodičkih kristala postavljenih s vanjske strane te jedan p -tip poluvodičkog kristala u sredini. Također je opće-poznato da se spojevi bipolarnog tranzistora mogu koristiti na jedan od tri različita načina - u spoju zajedničke baze, u spoju zajedničkog emitera i u spoju zajedničkog kolektora. U ovom dijelu poglavlja o bipolarnim tranzistorima pobliže ćemo se upoznati s konfiguracijom „zajedničkog emitera” koristeći bipolarni NPN tranzistor.

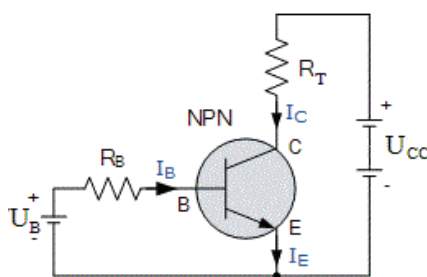
Podsjetimo se, u ovom tipu tranzistorske konstrukcije dva PN spoja čine dvije PN diode koje su obrnuto postavljene i usmjerene od središnje elektrode, odnosno od baze oznake B. Naravno, diode

mogu biti polarizirane propusno i nepropusno. I u ovom tipu tranzistora jedna dioda će u radu biti propusno a druga nepropusno polarizirana. Smjer struje je uvijek određen strelicom tako da u *npn* spoju struja izlazi iz *p*-tipa poluvodičkog kristala prema *n*-tipu jer je riječ o propusnoj polarizaciji dvaju poluvodičkih kristala. I u NPN tranzistoru strelica definira terminal emitera (i PN diodu) i smjer struje kroz cijeli uređaj, a ova struktura pokazuje smjer struje od baze prema van u simbolu tranzistora (slika 40 i 44). Struktura NPN tranzistora predložena je na slici 44.



Slika 44. Predložba strukture NPN tranzistora i smjerova struja predloženih strelicama te napona nožica

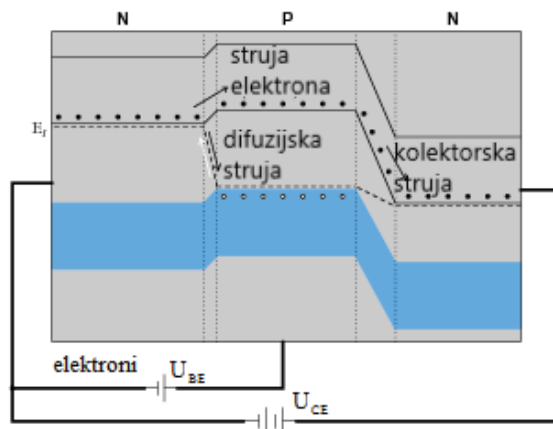
Sukladno predložbi, napon između baze i emitera (U_{BE}) je pozitivan na bazi i negativan kod emitera, jer za NPN tranzistor bazni spoj (nožica) B je uvijek pozitivan u odnosu na emiter (struja teče prema emiteru). Također, napon napajanja kolektora je pozitivniji (viši) u odnosu na emiter (U_{CE}). Dakle, da bi NPN tranzistor vodio struju, kolektor je uvijek na višem potencijalu u odnosu na bazu i na emiter, kao da je na najvišoj naponskoj (potencijalnoj) točki (slika 44 desno).



Slika 45. Predložba spoja NPN tranzistora na napone napajanja

Kolektor je priključen na napon napajanja U_{CC} (slika 45) s otpornikom tereta oznake R_T koji također djeluje tako da ograničava maksimalnu struju koja prolazi kroz uređaj. Bazni napon napajanja U_B priključen je na bazni otpornik R_B , koji služi za ograničenje maksimalne vrijednosti bazne struje.

Dakle, struju NPN tranzistora čine većinski slobodni nosioci (elektroni u *n*-tipu) koji u slučaju propusne polarizacije baza-emiter ulaze u bazu (kristal *p*-tipa) gdje su manjinski nosioci. Kao manjinski nosioci prolaze bez gubitaka kroz tanki bazni kristal prema drugom *p-n* spoju i prolaze kroz njega jer isti za njih ne predstavlja barijeru. Na taj se način predložava rad tranzistora, budući da ovi mobilni elektroni osiguravaju vezu između kolektora i emitera. Ova veza između ulazne (C) i izlazne (E) nožice glavna je osobina rada tranzistora jer su svojstva pojačanja tranzistora proizašla iz posrednog upravljanja pomoću napona (i struje) baze B kojom se određuje vrijednost struje kolektor-emiter.



Slika 46. Energijski dijagram spoja NPN tranzistora s obzirom na priključene napone napajanja

U bipolarnom NPN tranzistoru omjer dviju struja (I_C/I_B), naziva se istosmjerno strujno pojačanje (engl. *DC Current Gain*) i dano je simbolom h_{fe} ili danas češće oznakom **beta**, (β). Vrijednost β može biti velika, do 200 za standardne tranzistore, a to je veliki omjer između struja I_C i I_B koje tvore takav bipolarni NPN tranzistor korisnim instrumentom pojačanja kada se koristi u aktivnom području rada. Veličina I_B je ulazna i I_C je izlazna. Treba imati na umu da beta (β) nema jedinica jer je riječ o omjeru dviju vrijednosti struja.

Također, strujno pojačanje tranzistora od kolektorskog terminala do emitorskog terminala, I_C/I_E , naziva se **alfa**, (α), i funkcija je samog tranzistora (elektronska difuzija preko spoja). Budući da je emitorska struja I_E suma vrlo male bazne struje i vrlo velike kolektorske struje, vrijednost alfa (α) vrlo je blizu jedinice, a za tipični tranzistor s malom snagom ova vrijednost kreće se od oko 0,950 do 0,999.

Kombinirajući dva parametra α i β možemo iskazati dva matematička izraza koji prikazuju odnos između različitih struja koje teku u tranzistoru:

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} = \frac{I_C}{I_E(1-\alpha)} = \frac{\alpha}{1-\alpha}, \quad (20)$$

$$\alpha = \frac{\beta}{\beta+1}. \quad (21)$$

5.3. Spojevi bipolarnih tranzistora

Budući da je bipolarni tranzistor uređaj s tri terminala, postoje tri moguća načina povezivanja u elektroničkom krugu s jednim terminalom koji je zajednički i za ulaz i za izlaz. Svaka metoda spajanja ima različiti odziv na ulazni signal, budući da statičke karakteristike tranzistora variraju s određenim načinom povezivanja.

To su spojevi s:

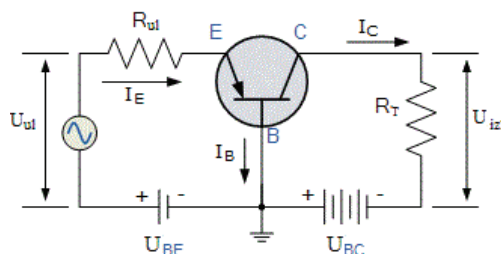
- zajedničkom bazom - spoj ima naponsko pojačanje, ali nema strujno pojačanje
- zajedničkim emiterom - spoj ima i strujno i naponsko pojačanje
- zajedničkim kolektorom - spoj ima strujno pojačanje, ali nema naponsko pojačanje.

Upravo ta tri spoja će se nadalje pobliže razmatrati kao karakteristični načini povezivanja bipolarnih tranzistora bez obzira radi li se o PNP ili o NPN varijanti.

5.3.1. Spoj sa zajedničkom bazom

Kao što kazuje ime, u spoju zajedničke baze ili u spoju s uzemljenom bazom, baza je zajednička i ulaznom i izlaznom krugu, odnosno i ulaznom i izlaznom signalu. Ulazni signal se dovodi između baze i emitera tranzistora, dok je odgovarajući izlazni signal definiran između baze i konektora kolektora kao što je prikazano na slici 47 s PNP varijantom tranzistora. Kontaktni terminal baze je uzemljen ili može biti spojen na neku fiksnu naponsku točku.

Ulazna struja koja teče u emiter je prilično velika, budući da je riječ o zbroju bazne struje i kolektorske struje, naravno, a izlazna struja kolektora je manja od emitterske ulazne struje što rezultira iznosom pojačanja ovakvog spoja manjim od jedan. Drugim riječima, zajednička osnovna konfiguracija „prigušuje” ulazni signal.



Slika 47. Predodžba PNP tranzistorskog spoja sa zajedničkom bazom

Ovakav spoj pojačala naziva se ne-invertirajuće pojačalo jer su ulazni i izlazni naponi U_{ul} i U_{izl} „u fazi”. Ova vrsta tranzistorskog spoja nije česta s obzirom na vrlo visoko naponsko pojačanje. Karakteristike

spoja naznačuju kao da se na ulazu nalazi propusna dioda s malim naponom na ulazu, dok izlazne karakteristike naznačuju kao da se radi o foto-diodi.

Također, ovakva vrsta tranzistorskog spoja ima veliki odnos ulazno-izlaznog otpora ili točnije rečeno veliki odnos otpora „tereta” (R_T) prema „ulaznom” otporu (R_{ul}) dajući vrijednost omjera ili vrijednost tzv. „otporničkog pojačanja”. Tada se naponsko pojačanje (A_V) za spoj zajedničke baze iskazuje izrazom:

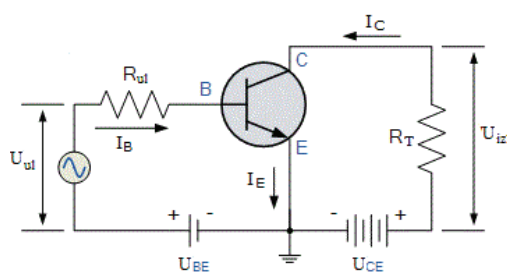
$$A_V = \frac{U_{ul}}{U_{izl}} = \frac{I_C \cdot R_T}{I_E \cdot R_{ul}} = \alpha \cdot \frac{R_T}{R_{ul}}, \quad (22)$$

gdje je I_C/I_E strujno pojačanje oznake α , a R_T/R_{ul} je otporničko pojačanje.

Spoj zajedničke baze općenito se najviše koristi u jednostupanjskim pretpojačalima kao što su mikrofonska pojačala ili radio frekvencijska pojačala zahvaljujući svojem vrlo dobrom visoko frekvencijskom (R_f) odzivu, tj. velikoj brzini rada.

5.3.2. Spoj sa zajedničkim emiterom

U spoju zajedničkog emitera ili u spoju uzemljenog emitera, emiter je zajednički i ulaznom signalu i izlaznom signalu. Ulazni signal se dovodi između baze i emitera tranzistora, dok je odgovarajući izlazni signal definiran između konektora i emitera kao što je prikazano na slici 48 u NPN varijanti tranzistora. Ovakva vrsta tranzistorskog spoja je najčešće korištena za pojačala i predstavlja uobičajeni spoj za spajanje bipolarnih tranzistora.



Slika 48. Predodžba NPN tranzistorskog spoja sa zajedničkim emiterom

Spoj zajedničkog emitera daje najveće strujno pojačanje, a time i najveće pojačanje snage od svih triju tranzistorskih spojeva. To je uglavnom zbog toga što je ulazna impedancija niska i stoga što je povezana s propusno polariziranim $p-n$ spojem, dok je izlazna impedancija vrlo velika zato što je sagledana kao nepropusno polarizirani $p-n$ spoj.

U ovoj vrsti spoja struja koja izlazi iz tranzistora mora biti jednaka strujama koje ulaze u tranzistor, jer je emitorska struja dana kao:

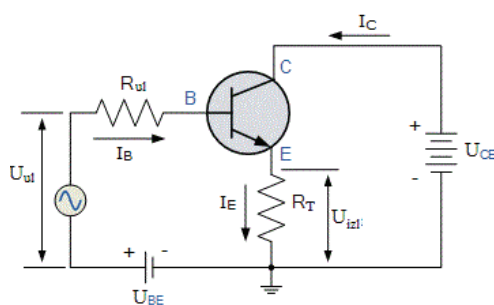
$$I_E = I_C + I_B. \quad (23)$$

S obzirom na to da je otpor tereta (R_T) povezan s kolektorom u serijskom spoju, strujno pojačanje u spoju zajedničkog emitera prilično je velik jer je riječ o omjeru I_C/I_B . Strujno pojačanje tranzistora označava se grčkim simbolom beta (β). Budući da je emitera struja u spoju zajedničkog emitera definirana kao $I_E = I_C + I_B$, omjer I_C/I_E se naziva alfa, a označava se grčkim simbolom α . Napomena: vrijednost alfa uvijek će biti manja od jedinice ($\alpha < 1$).

Ova vrsta tranzistorskog spoja ima povećanu ulaznu impedanciju, strujno pojačanje i pojačanje snage veću od spoja zajedničke baze, ali pojačanje napona je znatno niže. Spoj zajedničkog emitera je zapravo pojačalo za invertiranje signala. To znači da rezultirajući izlazni signal ima fazni pomak od 180° u odnosu na ulazni naponski signal.

5.3.3. Spoj sa zajedničkim kolektorom

U spoju zajedničkog kolektora ili u spoju uzemljenog kolektora, kolektor je zajednički spojni terminal za napajanje. Ulazni signal je priključen izravno na bazu, a izlaz je preuzet iz emitorskog tereta kao što je predloženo na slici 49. Ova vrsta konfiguracije obično je poznata kao sljedilo napona ili emitorsko sljedilo. Spoj zajedničkog kolektora ili emitorsko sljedilo vrlo je koristan u slučaju kada je potrebno usklađivanje impedancije zbog vrlo visoke ulazne impedancije spoja, reda veličine tisuće oma, dok je istovremeno izlazna impedancija spoja relativno niska.



Slika 49. Predložba NPN tipa tranzistora u spoju zajedničkog kolektora

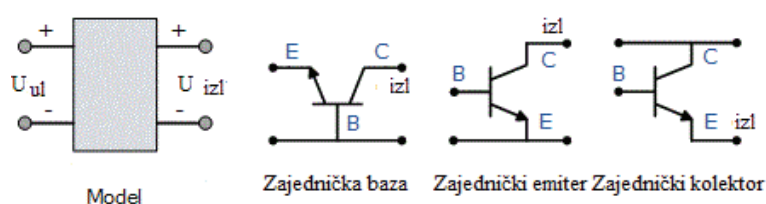
Spoj zajedničkog kolektora ima strujno pojačanje približno jednako β , odnosno jednako vrijednosti pojačanja samog tranzistora. U spoju zajedničkog kolektora otpor tereta nalazi se u serijskom spoju s emiterom tako da je njegova struja jednaka emitorskoj struji. Budući da je struja emitera sumarna kombinacija kolektorske i bazne struje, otpor tereta u ovom tipu tranzistorskog spoja također ima i struju kolektora i ulaznu struju baze koja teče kroz nju. Tada je strujno pojačanje spoja A_I dano izrazom:

$$A_I = \frac{I_E}{I_B} = \frac{I_C + I_B}{I_B} = \frac{I_C}{I_B} + 1 = \beta + 1, \quad (24)$$

odnosno emitera struja jednaka je izrazu $I_E = I_C + I_B = I_B(\beta + 1)$.

Ova vrsta spoja bipolarnog tranzistora je neinvertirajući spoj zbog toga što su naponi signala U_{ul} i U_{izl} „u fazi”. Spoj ima naponsko pojačanje koji je uvijek manji od „1” (jedinice). Otpor tereta u spoju zajedničkog kolektora dobiva i baznu i kolektorsku struju stvarajući veliko strujno pojačanje (kao u spoju zajedničkog emitera), stoga osigurava dobro strujno pojačanje s vrlo malim naponskim pojačanjem.

Sada možemo načiniti sažetak različitih odnosa između pojedinačnih istosmjernih struja tranzistora koje teku kroz svaku nogu tranzistora i sagledati njihova istosmjerna strujna pojačanja koja su dana u tablici 1. Na slici 50 simbolično su predložena sva tri tranzistorska spoja prema modelu s dva kontakta.



Slika 50. Predložba tranzistorskih spojeva modelom s dva kontakta

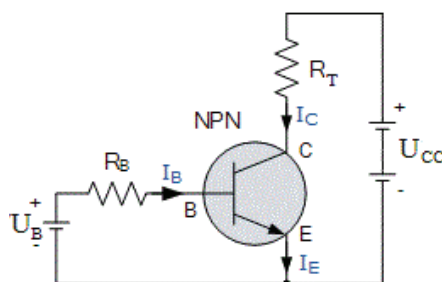
Sažeto, može se kazati da je ponašanje bipolarnog tranzistora u svakoj od gore navedenih konfiguracija vrlo različito i da postoje različite karakteristike strujnih krugova s obzirom na ulaznu impedanciju, izlaznu impedanciju i pojačanje, bez obzira radi li se o pojačanju napona, strujnom pojačanju ili pojačanju snage. Ti podaci su sažeti u donjoj tablici.

Tablica 1.

Karakteristika tranzistora	Zajednička baza	Zajednički emiter	Zajednički kolektor
ulazna impedancija	nisko	srednje	veliko
izlazna impedancija	vrlo veliko	veliko	nisko
fazni pomak	0°	180°	0°
naponsko pojačanje	veliko	srednje	nisko
strujno pojačanje	nisko	srednje	veliko
pojačanje snage	nisko	vrlo veliko	srednje

5.4. Radna karakteristika NPN tranzistora

U potpoglavlju ranije (5.2.) predložena je struktura i osnovni princip rada NPN tranzistora te su kasnije predstavljena tri načina ili tri spoja na koji se NPN tranzistor može koristiti. Također su pobliže opisana i objašnjena takva tri spoja. U ovom će se dijelu teksta više objašnjenja usmjeriti ka principu rada NPN tranzistora i njegovim radnim područjem, tj. njegovim ulazno-izlaznim karakteristikama i parametrima. Za lakše razumijevanje ponovno ćemo se vratiti malo unatrag prema opisu NPN tranzistora i pogledati sliku 51.



Slika 51. Predložba spoja NPN tranzistora na napone napajanja i teret u kolektorskom krugu

Spojevi nožica NPN tranzistora kao njegovih spojnih terminala na napone napajanja predloženi su na slici 51. Napon između baze i emitera (U_{BE}) je pozitivan na bazi i negativan na emiteru, jer za NPN tranzistor baza (p -kristal silicija) mora uvijek biti pozitivna u odnosu na emiter (n -kristal silicija). Na taj se način stvara propusna polarizacija i dioda B-E (p - n spoj) koja može voditi struju iz baze u emiter. Također, napon napajanja kolektora mora uvijek biti pozitivan u odnosu na emiter (U_{CE}). Dakle, za vođenje struje bipolarni NPN tranzistor mora imati veći potencijal kolektora u odnosu na bazu i emiter. Kolektor je priključen na napon napajanja U_{CC} preko otpora tereta, R_T koji djeluje na način da ograničava maksimalnu struju koja prolazi kroz uređaj. Napon napajanja baze U_B priključen je na bazni otpornik R_B , koji se ponovno koristi za ograničavanje maksimalne bazne struje.

Sada možemo vidjeti da je tranzistor uređaj za pojačanje struje (beta model) i da velika struja (I_C) struji slobodno kroz uređaj između kolektora i emitera kada je tranzistor „u aktivnom području rada”. Međutim, ne smije se zaboraviti da se to događa samo u slučaju kada mala struja prednapona (I_B) istodobno teče u bazni terminal tranzistora kroz propusnu PN diodu, čime se omogućuje da baza djeluje kao neka vrsta upravljačkog ventila za upravljanje izlazom odnosno izlaznom strujom I_C .

Odnos struja u bipolarnom tranzistoru, tj. omjer struja I_C / I_B naziva se DC Current Gain ili strujno pojačanje uređaja i označava se simbolom h_{fe} ili danas uglavnom oznakom beta (β). Vrijednost β može biti velika sve do 200 za standardne tranzistore, a to je veliki omjer između I_C i I_B koji čini bipolarni NPN tranzistor korisnim instrumentom pojačanja kada se koristi u svom aktivnom području, sve dok I_B predstavlja ulaz a I_C predstavlja izlaz. Treba imati na umu da omjer beta nema mjernu jedinicu jer je riječ o omjeru jakosti struja.

Primjer izračuna br. 1. - NPN tranzistor

Bipolarni NPN tranzistor ima vrijednost istosmjernog strujnog pojačanja (β) od 200. Izračunajte baznu struju I_B potrebnu za napajanje tereta strujom od 4 mA (I_C).

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{4 \cdot 10^{-3} \text{ A}}{200} = 20 \cdot 10^{-6} \text{ A} = 20 \mu\text{A}.$$

Jednu bitnu stvar treba naglasiti o bipolarnim NPN tranzistorima: napon kolektora (U_C) mora biti veći i pozitivniji u odnosu na napon emitera (U_E) kako bi naboji strujili kroz tranzistor između spojeva C-E (kolektor-emiter). Također, dolazi do pada napona između baze i emitera od približno 0,7V (napon vođenja PN diode) za silicijeve kristale i približno 0,3V za germanijeve kristale. Iz tog razloga, bazni napon (U_B) NPN tranzistora mora biti veći od iznosa 0,7V jer inače tranzistor neće voditi.

Primjer izračuna br. 2. - NPN tranzistor

NPN tranzistor ima napon napajanja U_B od 10 V i ulazni otpor R_B od 100 k Ω . Kolika će biti vrijednost struje baze u tranzistoru?

$$I_B = \frac{U_B - U_{BE}}{R_B} = \frac{10 \text{ V} - 0,7 \text{ V}}{100 \cdot 10^3 \Omega} = \frac{9,3 \text{ V}}{10^5 \Omega} = 93 \cdot 10^{-6} \text{ A} = 93 \mu\text{A}$$

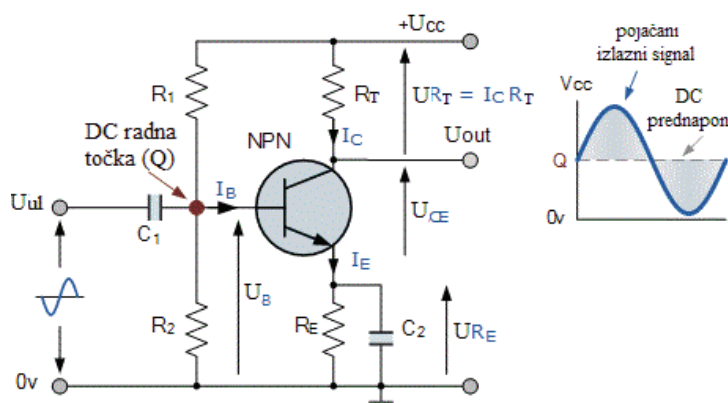
Spoj zajedničkog emitera

Bipolarni NPN tranzistori mogu se koristiti u aktivnom području gdje će pojačati bilo koji mali izmjenični (AC) signal koji se dovodi na baznu nožicu s emitorskim uzemljenjem. Osim toga, bipolarni NPN tranzistor koristi se kao poluvodička sklopka za uključivanje „ON” ili za isključivanje „OFF” upravljanjem signala na bazi tranzistora i dovođenjem u dva područja znana kao područje „zasićenja” ili područje „zapiranja”. Ako se na bazu tranzistora prvo dovede odgovarajući istosmjerni (DC) prednapon i na taj način se tranzistoru omogući da djeluje unutar svog linearnog aktivnog područja, nastaje inverzno pojačalo koje se još naziva i jednostupanjsko pojačalo u spoju zajedničkog emitera.

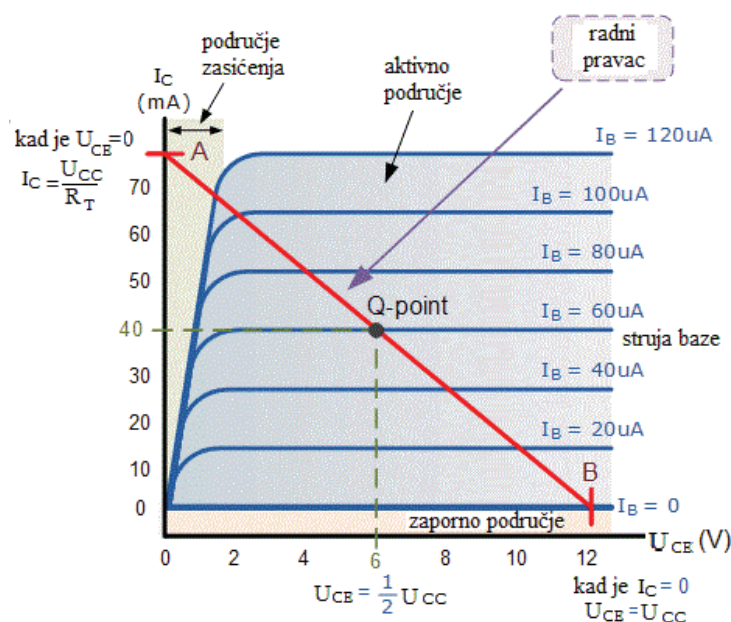
Jedna od takvih pojačala u spoju zajedničkog emitera s NPN tranzistorom zove se pojačalo klase A. „Pojačalo klase A” je takva vrsta pojačala u kojem se baza tranzistora nalazi na naponu koji je jednak propusnom naponu baza-emiter (p - n dioda). Rezultat toga je da tranzistor radi na sredini područja između svojih rubnih područja (zapiranja i zasićenja), omogućujući tako tranzistorskom pojačalu da točno reproducira i pozitivne i negativne poluperiode bilo kojeg AC ulaznog signala superponiranog (pridodanog) ovom istosmjernom prednaponu. Bez ovakvog iznosa DC prednapona (engl. *DC Bias Voltage*) samo bi polovica ulaznog valnog oblika bila pojačana. Ovaj uobičajeni spoj zajedničkog emitera NPN tranzistora ima mnoge primjene, ali se uobičajeno upotrebljava u audio sustavima, kao što je pretpojačalo i završna faza pojačanja snage.

Slijedom dolje prikazanog spoja zajedničkog emitera (slika 52), skupina krivulja poznata kao krivulje izlaznih karakteristika tranzistora dovode u odnos izlaznu struju ili struju kolektora (I_C) prema naponu kolektora (U_{CE}) kada se primjenjuju različite vrijednosti ulazne struje baze (I_B). Krivulje izlaznih karakteristika odnose se na tranzistor za iste vrijednosti β , naravno na ekvivalentnoj temperaturi.

Radni pravac izlaznog DC strujnog kruga ili tzv. „pravac tereta” također se može iščitati s krivulja izlaznih karakteristika tranzistora kako bi se iskazale sve moguće radne točke kada variraju vrijednosti struje baze. Potrebno je pravilno podesiti početnu vrijednost U_{CE} kako bi izlazni napon varirao prema gore i prema dolje klizeći po radnom pravcu kod pojačavanja AC ulaznih signala. Taj se postupak naziva postavljanje DC radne točke ili kraće Q-točke (engl. *Quiescent Point*), što je predloženo na slici 52.



Slika 52. Predložba jednostupanjskog pojačala s NPN tranzistorom u spoju zajedničkog emitera



Slika 53. Predložba izlazne karakteristike tipičnog NPN tranzistora

Najvažnija činjenica na koju se mora obratiti pozornost je učinak napona U_{CE} na kolektorsku struju I_C kada je U_{CE} veći od približno 1,0V. Možemo vidjeti da na struju I_C ne utječu promjene napona

U_{CE} iznad ove vrijednosti, a umjesto toga gotovo je u cijelosti kontrolirana strujom baze, I_B . Kada se to dogodi možemo reći da se tada izlazni krug ponaša kao „izvor stalne struje”. Također se može vidjeti iz gornje slike da je u spoju sa zajedničkim emiterom emitorska struja I_E zbroj struje kolektora I_C i struje baze I_B , dodane zajedno tako da možemo reći da za spoj sa zajedničkim emiterom vrijedi: $I_E = I_C + I_B$.

Prikazom krivulja izlaznih karakteristika u gornjem primjeru i poznavanjem Omovog zakona, možemo reći da je struja koja teče kroz otpornik tereta (R_T) jednaka kolektorskoj struji, I_C koja ulazi u tranzistor i koja ovisi o naponu napajanja (U_{CC}) umanjenim za iznos pada napona između kolektora i emitera, (U_{CE}) i dan je izrazom:

$$I_C = \frac{U_{CC} - U_{CE}}{R_T}. \quad (25)$$

Također, ravna crta koja predstavlja dinamičku liniju terećenja tranzistora može se izravno nacrtati na prikazu krivulja iznad točke „zasićenja”, točka (A) kada je $U_{CE} = 0$, do točke „zapiranja”, točka (B) kada $I_C = 0$. Na taj način dobivamo „radnu točku” ili Q-točku tranzistora. Ove dvije točke (A i B) povezane su ravnom linijom, a bilo koji položaj duž ove ravne linije predstavlja „aktivno područje” tranzistora. Stvarni položaj krivulje terećenja (radnog pravca) tranzistora može se izračunati na sljedeći način:

$$\begin{aligned} \text{kad je } U_{CE} = 0, I_C &= \frac{U_{CC}}{R_T}; \\ \text{kad je } I_C = 0, U_{CC} &= U_{CE}. \end{aligned}$$

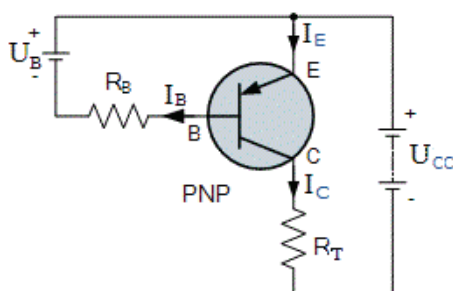
U tom se slučaju krivulje kolektora ili izlaznih karakteristika za spoj zajedničkog emitera NPN tranzistora mogu koristiti za računanje kolektorske struje I_C , kada su dani iznosi napona U_{CE} i struje baze, I_B . Linija radnog pravca također se može oblikovati na grafu kako bi se odredila odgovarajuća radna ili Q-točka koja se može namjestiti podešavanjem struje baze. Nagib radnog pravca jednak je recipročnoj vrijednosti otpora tereta u izrazu: $-1/R_L$. Ta je vrijednost zapravo vodljivost tereta ili vodljivost u izlaznom stupnju ($1/\Omega = S$).

Sada možemo definirati NPN tranzistor kao normalno isključen ili „zatvoren” na naponu $U_{CE} = U_{CC}$, ali već mala ulazna struja i mali pozitivni napon na bazi u odnosu na emiter će ga uključiti i dovesti u aktivno stanje („ON”) dopuštajući mnogo većoj kolektorsko-emitorskoj struji da teče. NPN tranzistori „vode” kada je potencijal U_C mnogo veći od potencijala U_E .

U sljedećem poglavlju o bipolarnim tranzistorima razmatrat ćemo suprotni ili komplementarni oblik NPN tranzistora koji se naziva PNP tranzistor i pokazati da PNP tranzistor ima vrlo slične karakteristike s bipolarnim komplementarnim parom - NPN tranzistorom, osim što su polaritet napona (ili prednapona na bazi) i smjerovi struja u tom slučaju obrnuti.

5.5. Radna karakteristika PNP tranzistora

Prvo ćemo ukratko ponoviti osnovne značajke strukture PNP tranzistora kako bismo mogli lakše spoznati radnu karakteristiku. PNP tranzistori za vođenje struje koriste struju baze i mali negativni napon koji je priključen na srednju nogu baze, a koja čini spoj na N kristal silicija, te se na taj način omogućuje upravljanje mnogo većom strujom emiter-kolektor. Drugim riječima, u slučaju PNP tranzistora emiter je pozitivan u odnosu na bazu i također u odnosu na kolektor, kao što predočava slika 54.



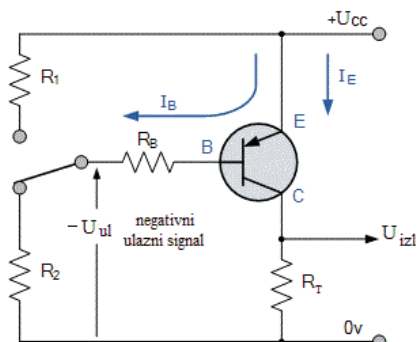
Slika 54. Predodžba spoja PNP tranzistora na napone napajanja

Da bi potekla struja baze u PNP tranzistoru, baza mora biti negativnija od emitera (struja mora izlaziti iz baze) za približno 0,7 V za kristale od silicija ili za približno 0,3 V za kristale od germanija. Formule koje se koriste za izračunavanje otpora baze, struje baze ili struje kolektora jednake su kao u slučaju NPN tranzistora. Dakle, vrijedi izraz:

$$I_C = I_E - I_B \quad \text{ i } \quad I_C = \beta \cdot I_B \quad . \quad (26)$$

Može se lako vidjeti kako su temeljne razlike između NPN tranzistora i PNP tranzistora pravilno postavljanje prednapona na priključke tranzistora jer su smjerovi struje i polariteti napona uvijek međusobno suprotni. Dakle, za strujni krug iznad vrijedi jednadžba (26) s obzirom na to da struja izlazi iz baze.

Općenito, PNP tranzistor se gotovo uvijek može zamijeniti NPN tranzistorom u većini elektroničkih sklopova, a jedina razlika među njima je polaritet napona i smjer struje. PNP tranzistori se također mogu koristiti kao digitalne sklopke, a primjer je sklopka s PNP tranzistorom predočena na slici 55.

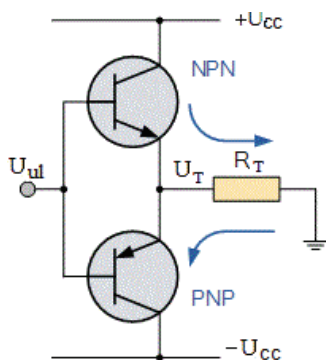


Slika 55. Predodžba PNP tranzistorskog spoja u digitalnom modu rada

Krivulje izlaznih karakteristika PNP tranzistora izgledaju vrlo slične onima za ekvivalentni NPN tranzistor, osim što su okrenute za 180° . Također, može se ucrtati radni pravac na strujno-naponsku (I-U) karakteristiku kako bi se odabrala radna točka Q PNP tranzistora.

Mogli bismo se priupitati iz kojeg razloga koristimo PNP tranzistor kada postoji obilje dostupnih NPN tranzistora koji se mogu koristiti kao pojačalo ili kao digitalna sklopka. Činjenica je da korištenje dva različita tipa tranzistora PNP i NPN, može biti velika prednost pri projektiranju pojačala za pojačanje snage kao što je pojačalo klase B.

Pojačala klase B upotrebljavaju „komplementarni” ili „podudarni par” tranzistora (to jest, jedan PNP i jedan NPN povezani zajedno u sklop) u izlaznoj fazi ili se koriste u reverzibilnim upravljačkim krugovima s H-mosnim spojem (engl. *H-Bridge*), gdje se želi upravljati protokom struje ravnomjerno s, na primjer motorom, u oba smjera, u različitim vremenima, za funkciju rotacije naprijed i natrag ili lijevo i desno.



Slika 56. Predodžba spoja komplementarnog para NPN i PNP tranzistora sa spojem u B klasi

Primjerice, par odgovarajućih NPN i PNP tranzistora s međusobno gotovo identičnim karakteristikama zovu se komplementarni tranzistori. Na primjer, NPN tranzistor TIP3055 i PNP tranzistor TIP2955 su dobri primjeri komplementarnog ili podudarnog para tranzistora silicija. Oba tipa imaju istosmjerno strujno pojačanje β koji se podudaraju s najviše 10 % odstupanja i imaju veliku kolektorsku struju od oko 15A, što ih čini idealnim za funkciju upravljanja motorom ili za razne robotske aplikacije i pokretanje aktuatorskih motora.

Isto tako, audiopojačala klase B koriste komplementarni par u svom izlaznom stupnju. NPN tranzistor vodi samo za vrijeme pozitivne polovice signala na bazi dok PNP tranzistor vodi za vrijeme negativne polovice ulaznog signala.

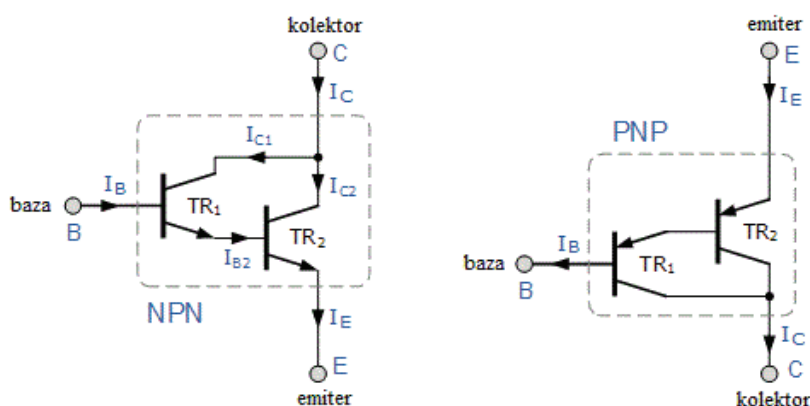
To omogućuje da audiopojačalo daje potrebnu snagu teretu (zvučniku) u oba smjera na naznačenoj nominalnoj impedanciji i snazi, što rezultira izlaznom strujom koja će vjerojatno biti red veličine nekoliko ampera ravnomjerno podijeljenih između dva komplementarna tranzistora.

5.6. Darlingtonov spoj tranzistora

Darlingtonov spoj tranzistora nazvan po svom izumitelju Sidneyu Darlingtonu, američkom elektroničaru, karakterističan je spoj dvaju standardnih bipolarnih NPN ili PNP tranzistora koji su međusobno spojeni. Emiter jednog tranzistora je povezan s bazom drugog da bi stvorio osjetljiviji tranzistor s mnogo većom izlaznom snagom koja se koristi u aplikacijama gdje je potrebno strujno pojačanje ili strujno prebacivanje (engl. *switching power supply*).

Darlingtonov tranzistorski par može biti izrađen od dva povezana identična bipolarna tranzistora u jednom standardnom komercijalnom kućištu. Darlingtonovi parovi dostupni su u širokom rasponu izvedbi kućišta i napona (i struje, naravno) izvedena u objim verzijama s NPN i s PNP tranzistorima.

Darlingtonov spoj tranzistora, također poznat kao „Darlingtonov par” ili „Super-Alfa krug” ili „ β^2 krug” ili „Duo Beta” (kao u slučaju audiopojaačala LUXMAN M-02), sastoji se od dva NPN ili PNP tranzistora koji su međusobno povezani tako da emitera struja prvog tranzistora TR1 postaje struja baze drugog tranzistora TR2. Zatim je tranzistor TR1 spojen kao emitera sljedilo i TR2 kao pojačalo u spoju zajedničkog emitera, kao što je prikazano na slici 57.



Slika 57. Predodžba spoja Darlingtonovnog para s NPN (lijevo) i PNP tranzistorima (desno)

Ovdje treba imati na umu da je u ovakvom Darlingtonovom spoju kolektorska struja prvog ili „upravljačkog tranzistora” oznake TR1 „u fazi” s onom sljedećeg ili drugog tranzistora oznake TR2.

Koristeći NPN Darlingtonov par kao primjer, lako se može vidjeti kako su kolektori dvaju tranzistora spojeni zajedno, a emiter od TR1 spojen je na bazu TR2. Ova konfiguracija postiže tzv. super-beta pojačanje („ β^2 ”), jer za baznu struju I_B , kolektorska struja jednaka je $\beta \cdot I_B$ gdje je strujno pojačanje veće od jedan (1) ili jedinice i definirano je kao:

$$I_C = I_{C1} + I_{C2} = \beta_1 \cdot I_{B1} + \beta_2 \cdot I_{B2} . \quad (27)$$

Bazna struja, I_{B2} jednaka je tranzistorskoj emitera struji od TR1, I_{E1} , s obzirom na to da je emiter od TR1 povezan s bazom TR2. Stoga vrijedi:

$$I_{B2} = I_{E1} = I_{C1} + I_B = \beta_1 \cdot I_B + I_B = I_B (\beta_1 + 1) . \quad (28)$$

Uvrštavanjem u prvu jednadžbu dobiva se:

$$\begin{aligned}I_C &= \beta_1 I_B + \beta_2 (\beta_1 + 1) I_B \\I_C &= \beta_1 I_B + \beta_2 \beta_1 I_B + \beta_2 I_B \\I_C &= I_B (\beta_1 + (\beta_1 \beta_2) + \beta_2) ,\end{aligned}\tag{29}$$

gdje su β_1 i β_2 strujna pojačanja tranzistora TR1 i TR2.

Prema tome, ukupno strujno pojačanje spoja je dano izrazom: $\frac{I_C}{I_B} = \beta = \beta_1 \beta_2 + \beta_1 + \beta_2 \approx \beta_1 \beta_2$.

To znači da je ukupno strujno pojačanje β dobiveno umnoškom pojačanja prvog i pojačanja drugog tranzistora, a drugi i treći član u jednadžbi (29) se u prvoj aproksimaciji mogu zanemariti s obzirom na to da su manji za približno dva reda veličine. Drugim riječima, par bipolarnih tranzistora koji su spojeni u jedinstveni Darlingtonov par može se smatrati jednim tranzistorom s vrlo velikom vrijednošću strujnog pojačanja β i posljedično tome visokim ulaznim otporom. Ako se radi o dva tranzistora identičnih vrijednosti strujnih pojačanja ($\beta_1 = \beta_2$), onda se ukupno strujno pojačanje sklopa može kraće napisati kao: $\beta = \beta_1 \cdot \beta_2 = \beta^2$.

Primjer zadatka s Darlingtonovim parom

Dva NPN tranzistora spojena su zajedno u obliku Darlingtonovog para za prebacivanje napona za halogeno svjetlo na lampi nazivnog napona 12 V i nazivne (radne) snage 75 W. Strujno pojačanje prvog tranzistora je 25, a strujno pojačanje drugog tranzistora je 80. Zanemarujući pad napona na PN spojevima oba tranzistora, izračunajte maksimalnu struju baze potrebnu za rad lampe na nazivnoj snazi.

Prvo, struja koju troši lampa jednaka je kolektorskoj struji drugog tranzistora, stoga pišemo:

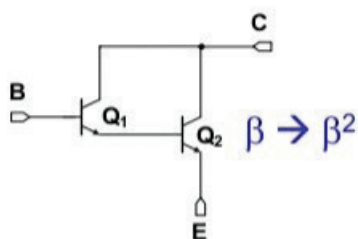
$$I_C = I_{LAMPE} = \frac{P}{U} = \frac{75W}{12V} = 6,25A.$$

Sukladno jednadžbi (29) struja baze može se iskazati kao:

$$I_B = \frac{I_C}{\beta_1 + \beta_2 + \beta_1 \beta_2} = \frac{6,25A}{2105} = 3mA.$$

In memoriam

Sidney Darlington 1906-1997 [1]



Bell Labs (1953)
Pat. No. 2,663,806

Slika 58. Sidney Darlington (1906. – 1997.)

6. TRANZISTORI S EFEKTOM POLJA - FET

6.1. JFET tranzistori

Tranzistor s efektom električnog polja (*engl. Field Effect Transistor*), koji je upravlján poljem ili jednostavnije rečeno FET, koristi napon koji se spaja na ulazni terminal nazvan Gat (*engl. Gate*) ili vrata za upravljanje strujom koja teče kroz tranzistor, rezultirajući proporcionalnost izlazne struje priključenom ulaznom naponu. Budući da se upravljanje radom sklopa postiže pomoću električnog polja uzrokovanog priključenim potencijalom (otuda i naziv „poljem upravlján” tranzistor), odnosno ulaznim naponom na gatu, takvu vrstu tranzistora s efektom polja nazivamo „naponski upravljanim sklopom”.

Field Effect Transistor je „tronožni” jednopolarni poluvodički uređaj (jedan p - n spoj) koji ima vrlo slične karakteristike onima svojih bipolarnih tranzistorskih rođaka (BJT), kao na primjer, velika učinkovitost, velika brzina rada, robusnost i povoljna cijena, ali i činjenica da se mogu koristiti u većini elektroničkih aplikacija kao zamjena svojim ekvivalentnim bipolarnim rođacima.

Tranzistor upravlján poljem može biti mnogo manji od ekvivalentnog BJT tranzistora, a sklonost niskoj potrošnji energije s osobinom male disipacije (potrošnje) snage čini ih idealnim za upotrebu u integriranim krugovima poput CMOS proizvoda digitalnih logičkih sklopova.

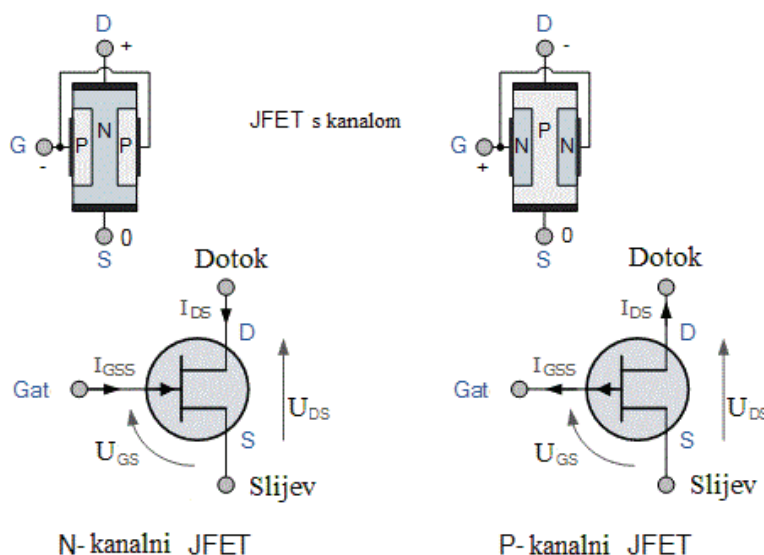
Podsjetimo se iz prethodnih poglavlja da postoje dva osnovna tipa bipolarnih tranzistora, NPN i PNP, koji u osnovi opisuju fizikalna svojstva poluvodičkih kristala p i n -tipa od kojih su izrađeni. To pravilo vrijedi i za FET-ove jer postoje i dvije osnovne klasifikacije tranzistora upravljanih poljem, a nazivaju se FET s vodljivim n -kanalom ili FET s vodljivim p -kanalom.

Tranzistor s efektom polja je tronožni uređaj koji je, u biti, izrađen bez klasičnog p - n spoja između nožica dotoka (D ili uvoda) i slijeva (S ili odvoda). Ovi spojevi odgovaraju funkciji kolektora i emitera, naravno u slučaju bipolarnih tranzistora. Put kojim prolazi struja kroz FET nalazi se između ova dva D i S spoja i naziva se „kanal” koji može biti izrađen od p -tipa ili n -tipa poluvodičkog kristala.

Struja koja teče u ovom kanalu upravljána je promjenom napona koji se dovodi na gat. Kao što im ime govori, bipolarni tranzistori su „bipolarni” uređaji jer rade s obje vrste nosilaca naboja, šupljinama i elektronima. Tranzistor s efektom polja s druge strane je „unipolarni” uređaj koji ovisi samo o koncentraciji i vodljivosti elektrona u slučaju n -kanalnog tipa ili šupljina u slučaju p -kanalnog tipa.

FET ima jednu veliku prednost u odnosu na svoje standardne bipolarne rođake, s obzirom na to da je njihova ulazna impedancija (R_{IN}) vrlo velika (tisuće oma), dok je BJT-ova relativno mala. Ova vrlo velika ulazna impedancija čini ih vrlo osjetljivim na ulazne naponske signale, ali cijena visoke osjetljivosti također znači da ih se može lako oštetiti statičkim elektricitetom.

Uglavnom postoje dvije glavne vrste tranzistora upravljanih poljem i to su spojni FET ili JFET i FET s izoliranim gatom IGFET, koji je u žargonu poznatiji kao metal-oksidni poluvodički tranzistor (engl. *Metal Oxide Semiconductor*) s efektom polja ili kraće MOSFET.



Slika 59. Struktura i simboli JFET tranzistora

Poluvodički „kanal” JFET-a je put struje kroz *otpornički* poluvodički kristal kroz koji napon U_{DS} „gura” struju I_D te kao takav tranzistor s efektom polja može upravljati strujom u bilo kojem smjeru. Budući da je kanal otpornički po prirodi, pad napona je tako formiran niz duljinu kanala, pri čemu taj napon „pada” od dotoka (viši potencijal) prema slijevu (niži potencijal). Rezultat toga je da p - n spoj (DG ili GD) ima veliku vrijednost nepropusnog napona bliže kontaktu dotoka i manju vrijednost nepropusnog napona bliže kontaktu slijeva. Ovakav prednapon uzrokuje stvaranje „osiromašenog sloja” unutar kanala čija se širina povećava s povećanjem vrijednosti prednapona.

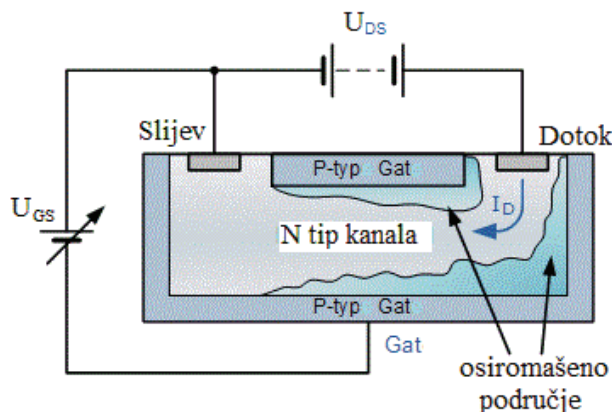
Jakost struje koja teče kroz vodljivi kanal između dotoka i slijeva upravljana je naponom koji se priključuje na kontakt gat-vrata, a koji je nepropusno polariziran. U n -kanalnom JFET-u ovaj napon gata je negativan, dok je za p -kanalni JFET napon gata pozitivan.

Glavna razlika između JFET i BJT tranzistora je u slučaju kada je JFET nepropusno polariziran, struja tranzistora je praktički nula, dok je u slučaju BJT-a struja baze uvijek neka vrijednost veća od nule.

6.2. Naponi u spoju n -kanalnog JFET-a

Dijagram poprečnog presjeka na slici 60 predoduje n -tip poluvodički kanal s p -tipskim područjem zvanim gat (vrata) koje je ugrađeno u kanal n -tipa, i to s obje strane vodljivog kanala. Takva struktura tvori nepropusno polarizirani p - n spoj i posljedično spoj čini osiromašeno područje bez slobodnih nosilaca naboja u kanalu oko područja gata, naravno u slučaju bez priključenog vanjskog napona. JFET-ovi su, dakle, poznati kao uređaji s osiromašenim područjem. Napon U_{GS} koji se priključuje

na gat upravlja protokom struje između terminala dotoka i slijeva. U_{GS} se odnosi na napon koji se priključuje između gata i slijeva, a U_{DS} se odnosi na napon primijenjen između dotoka i slijeva.



Slika 60. Predodžba JFET-a s n -tipom poluvodičkog kanala

Ovo osiromašeno područje stvara potencijalni gradijent (razliku napona) koji zbog nejednolike debljine kanala uokolo p - n spoja (gat-kanal) ograničava protok struje kroz kanal smanjenjem njezine jakosti i istovremeno povećavanjem ukupne vrijednosti otpora vodljivog kanala koji postaje sve uži.

Lako se može vidjeti na predodžbi na slici 60 da je najveći dio osiromašenog područja između gata i dotoka, dok je područje s najmanje osiromašenih nosilaca naboja između gata i slijeva. Zapravo, JFET kanal najbolje vodi s nultim naponom, tj. s nultim nepropusnim naponom (tada osiromašeno područje uopće nema). Bez vanjskog napona na gatu ($U_{GS}=0V$) i s malim vrijednostima napona U_{DS} koji se spaja između dotoka i slijeva, struja I_D prolazi kroz kanal iz dotoka prema slijevu ograničena samo malim osiromašenim područjem oko spojeva kristala različitih primjesa te ima linearnu ovisnost o naponu U_{DS} . Daljnjim povećanjem vrijednosti napona U_{DS} postiže se maksimalna struja zasićenja (I_{DSS}) koja prolazi kroz vodljivi kanal. Napon nepropusne polarizacije tada je relativno visok u blizini kontakta dotoka ($U_{GD}=-U_{GS}$) gdje je najdeblji dio osiromašenog sloja koji se gotovo spojio i zatvorio vodljivi kanal na strani kontakta dotoka. Takav napon nazivamo napon **dodira** i označavamo s $U_{DS}=U_P$. Struja više ne može biti linearno ovisna o naponu te se područje naziva **triodno** područje rada. Pri daljnjem porastu vrijednosti napona U_{DS} vodljivi kanal je toliko uzak, tj. „stisnut” odnosno „stegnut” (*engl.* pinch-off) da struja kanala I_D ne može više rasti te je nazivamo strujom zasićenja. Takva struja se uz predočene naponske vrijednosti ne mijenja već ostaje konstantna sve do velikih vrijednosti napona U_{DS} koji bi uzrokovali tunelski proboj kanala (U_{DS0} = napon proboja je od 30 V do 50 V) i beskonačno povećanje probojne struje.

Nadalje, ako se na gat spoji mali negativni napon ($-U_{GS}$), veličina osiromašenog područja oko drugog kontakta-slijeva počinje se također povećavati istovremeno smanjujući ukupnu radnu širinu preostalog dijela kanala, a time smanjujući i struju koja teče kroz njega. Dakle, povećavanjem vrijednosti nepropusnog napona povećava se širina osiromašenog područja koja posljedično smanjuje ukupnu vodljivost kanala. Povećanjem vrijednosti negativnog napona ($-U_{GS}$) do maksimalne vrijednosti,

vodljivi kanal se zatvara i tu vrijednost označavamo s $(-U_{GS0})$ i nazivamo napon *zapiranja ili isključenja*.

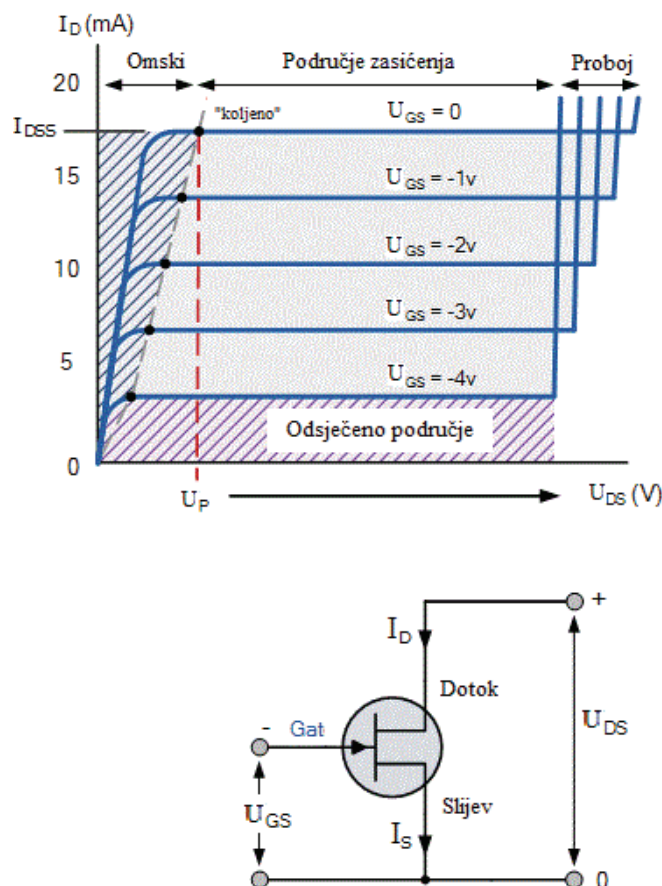
U takvom aktivnom modu rada (slika 61), napon U_{GS} upravlja strujom kanala I_D , a napon U_{DS} ima mali ili nikakav učinak.

Rezultat toga stanja je da FET djeluje više poput naponom upravljanog linearnog otpornika koji ima nultu vrijednost otpornosti kada je $U_{GS}=0$ i maksimalni otpor („uključni ON” tzv. ulazni dinamički otpor R_{GS}) kada je napon gata vrlo negativan. U normalnim radnim uvjetima, gat JFET-a uvijek je negativno polariziran u odnosu na slijev.

Ključno je da napon gata nikada nije pozitivan, jer ako je obrnuto, struja kanala će teći do gata, a ne na slijev, a rezultat će biti oštećenje JFET-a. Za zatvaranje kanala vrijedi stanje:

- Nema napona na gatu (U_{GS}) i U_{DS} je veći od nule.
- Nema napona U_{DS} i napon gata se smanjuje na vrijednosti ispod nule.
- U_{DS} i U_{GS} su varijabilni.

Izlazne karakteristike n -kanalnog JFET-a s gatom kratko spojenom na slijev predložene su na slici 61.



Slika 61. Predložba izlaznih I-U karakteristika JFET-a s n -tipom kanala

S obzirom na to da je tranzistor s efektom polja naponom upravljani uređaj i da struja ne teče u gat, tada znamo da je struja slijeva (I_S) koja prolazi i izlazi iz uređaja jednaka struji dotoka (I_D) koja ulazi u uređaj te stoga pišemo: $I_D = I_S$.

Predodžba gore naznačenih karakteristika (I-U krivulja) prikazuje četiri različita područja rada JFET-a, a riječ je o sljedećim područjima:

- Omsko područje - u slučaju kada je $U_{GS}=0$, osiromašeni sloj u kanalu je vrlo mali, a JFET djeluje poput naponski kontroliranog otpornika (kanal kao vodljivi otpornik).
- Odsječeno područje - ovo je također poznato kao „isključeno” područje, a napon gata U_{GS} je dovoljan da uzrokuje rad JFET-a kao otvorenog kruga jer je otpor kanala maksimalan (kanal ne može voditi struju).
- Zasićenje ili aktivno područje - JFET postaje dobar vodič i upravlja se naponom gat-slijev (U_{GS}) dok napon dotok-slijev (U_{DS}) ima mali ili nikakav učinak.
- Probojno područje - napon između dotoka i slijeva (U_{DS0}) je dovoljno velik da uzrokuje da u JFET-ovom „otporničkom” kanalu dođe do proboja nosilaca naboja i do protoka nekontrolirano velike struje.

Karakteristične I-U krivulje za p -kanalni FET su jednake onima iznad za n -kanalni, osim što se struja I_D dotoka smanjuje s povećanjem pozitivnog napona gat-slijev, U_{GS} .

Općenito, u omskom načinu rada vrijed izraz:

$$I_D = K \left[(U_{GS} - U_{GS0}) \cdot U_{DS} - \frac{1}{2} U_{DS}^2 \right] \quad \text{za} \quad U_{DS} < U_{GS} - U_{GS0} \quad (30)$$

gdje je $K = \mu_n \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} \cdot \frac{W}{L}$, μ_n površinska pokretljivost slobodnih elektrona u kanalu, ϵ_{ox} je dielektrička konstanta, t_{ox} je debljina sloja silicij-dioksida iznad kanala, W je širina a L je duljina kanala. Za područje zasićenja vrijedi:

$$I_D = K (U_{GS} - U_{GS0})^2 \quad \text{za} \quad U_{DS} \geq U_{GS} - U_{GS0}, \quad (31)$$

a u situaciji kada je $U_{GS}=0$ možemo napisati:

$$I_{DSS} = \frac{K}{2} (-U_{GS0})^2 \quad \text{i} \quad I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_{GS0}} \right)^2. \quad (32)$$

Struja dotoka je nula kada je $U_{GS} = U_{GS0}$. Za normalan rad FET-a U_{GS} je formiran da bude između vrijednosti U_{GS0} i 0 V. Tada možemo izračunati struju dotoka I_D za bilo koju radnu točku u području zasićenja ili u aktivnom području kako je naznačeno u jednadžbi: (32). Na granici između omskog područja rada FET-a i područja zasićenja napon U_{DS} iznosi $U_{DS} = U_{GS} - U_{GS0}$.

Treba uočiti kako će vrijednost struje dotoka biti između 0A (isključeno ili odsječeno područje) i I_{DSS} (maksimalna struja). Uz poznatu struju I_D dotoka i napon U_{DS} dinamički otpor kanala (R_{DS}) je dan izrazom:

$$R_{DS} = \frac{\Delta U_{DS}}{\Delta I_D} = \frac{1}{g_m} = \frac{-U_P^2}{2I_{DSS}(U_P - U_{GS})}, \quad (33)$$

gdje je g_m (obrnuto proporcionalna vrijednost dinamičkom otporu) određen kao „specifična vodljivost kanala od kristala silicija” budući da je JFET naponom upravljan uređaj i taj parametar predstavlja brzinu promjene struje odvoda u odnosu na promjenu napona gat-slijev. Još se naziva i **strmina** jer se može iskazati kao parcijalna derivacija struje i_D po u_{GS} :

$$g_m = \left. \frac{\partial i_D}{\partial u_{GS}} \right|_{u_{GS} = konst.} = \frac{\Delta I_D}{\Delta U_{DS}}. \quad (34)$$

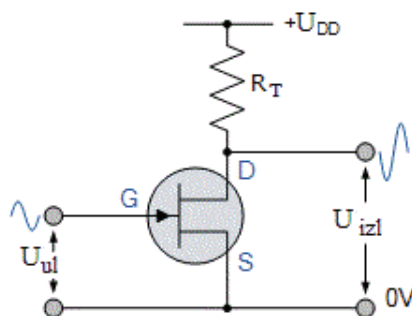
6.3. Načini rada i spajanja FET-ova

Kao i bipolarni rođaci, tranzistori s efektom polja koji su tronožni uređaji s tri spojne nožice mogu se spojiti na tri različita načina ili vrste rada i stoga razlikujemo nekoliko konfiguracija koje će biti pobliže opisane.

6.3.1. Spoj sa zajedničkim slijevom

U spoju zajedničkog slijeva (slično kao spoj sa zajedničkim emiterom kod BJT), ulaz se priključuje na gat, a izlaz je preuzet iz dotoka kao što je predloženo na slici 62. To je najčešći način rada FET-a sukladno velikoj vrijednosti ulazne impedancije i dobrog naponskog pojačanja te kao takvi FET pojačala u spoju zajedničkog slijeva su u širokoj uporabi.

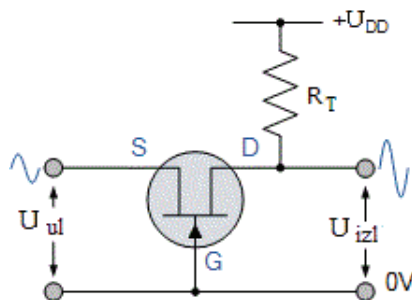
FET u spoju zajedničkog slijeva općenito se koristi u audiofrekvencijskim pojačalima i kao pretpojačala s visokim vrijednostima ulaznih impedancija i u raznim predstupnjevima pojačanja. Kao karakteristika pojačanja u izlaznom krugu izlazni signal kasni za 180° za ulaznim, odnosno „protufazan” je ulaznom signalu (vidi sliku 62).



Slika 62. Predložba FET-a u spoju zajedničkog slijeva

6.3.2. Spoj sa zajedničkim gatom

U spoju sa zajedničkim gatom ili upravljačkim vratima (slično kao spoj sa zajedničkom bazom kod BJT) ulaz se spaja na slijev, a izlaz se uzima s dotoka s gatom izravno spojenim s masom (uzemljenjem 0V), kao što je predloženo na slici 63. Velika ulazna impedancija ne postoji u ovom spoju s obzirom na to da zajednički gat ima malu ulaznu impedanciju, ali i visoku izlaznu impedanciju.

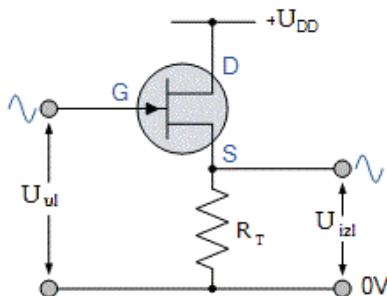


Slika 63. Predložba FET-a u spoju zajedničkog gata

Ova vrsta FET spoja može se koristiti u visokofrekvencijskim krugovima ili u prilagodnim impedancijskim krugovima gdje su potrebite niske ulazne impedancije koje treba upariti na visoku izlaznu impedanciju. Izlaz je „u-fazi” s ulazom (vidi sliku 63).

6.3.3. Spoj sa zajedničkim dotokom

U spoju sa zajedničkim dotokom (slično kao spoj sa zajedničkim kolektorom kod BJT), ulaz se spaja na gat, a izlaz je spojen na slijev. Zajednički dotok ili „slijedilo slijeva” ima visoku ulaznu impedanciju i nisku izlaznu impedanciju i približno nultu naponsko pojačanje, pa se stoga koristi u *buffer*skim pojačalima. Naponsko pojačanje spoja „slijevnog slijedila” je manje od jedinice, a izlazni signal je „u-fazi” s ulaznim signalom.

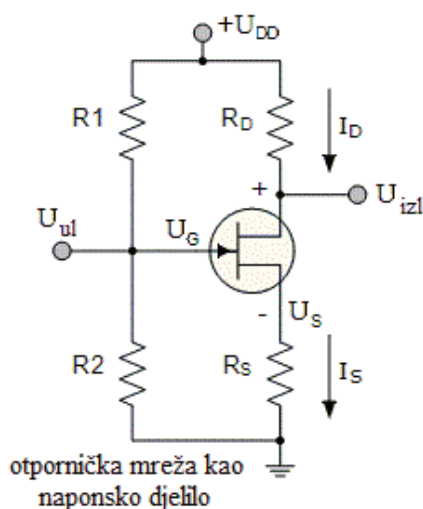


Slika 64. Predložba FET-a u spoju zajedničkog dotoka

Ova vrsta konfiguracije naziva se „zajednički dotok” jer nema signala na priključcima dotoka, a postojeći napon $+U_{DD}$ samo daje radni prednapon. Izlaz je u fazi s ulazom kao što predložava slika 64 iznad.

6.4. Pojačala s JFET tranzistorom

Baš kao u slučaju uporabe bipolarnih tranzistora BJT tipa i JFET-ovi se mogu koristiti za izradu pojačala s jednim stupnjem u A klasi, s JFET-om u spoju zajedničkog slijeva, a karakteristike su vrlo slične spoju zajedničkog emitera kao u slučaju kod BJT rođaka. Glavna prednost JFET pojačala u odnosu na BJT pojačala je njihova velika ulazna impedancija -gatom upravljana otpornička mreža koja se sastoji od otpora R_1 i R_2 kao što je predloženo na slici 65.



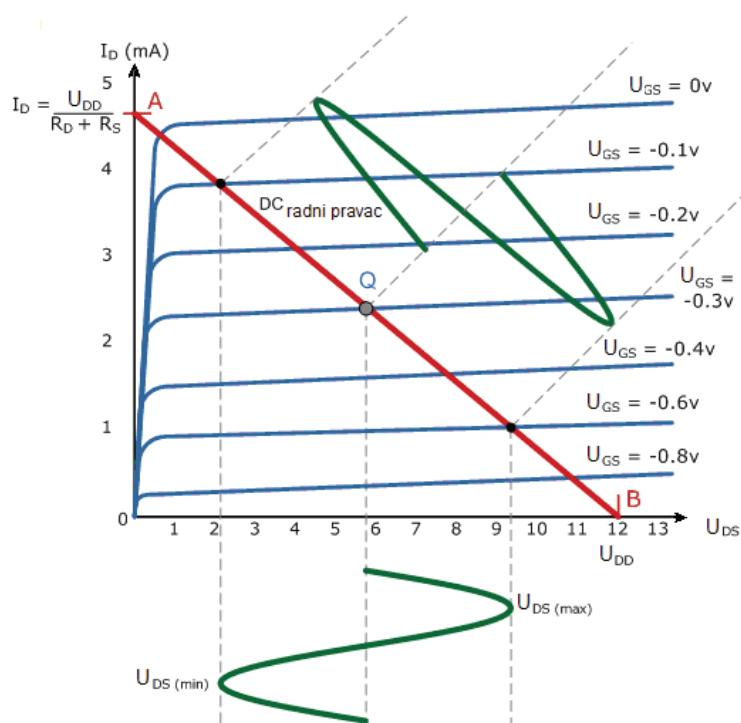
Slika 65. Predložba prednapona pojačala s n-kanalnim JFET-om

Ovakav krug pojačala u spoju sa zajedničkim slijevom ima prednapon pojačala A klase načinjen od dijelila napona koje tvore otpornici R_1 i R_2 . Napon otpornika slijeva R_S općenito je postavljen tako da čini oko četvrtinu napona U_{DD} , ($U_{DD}/4$), ali može biti i bilo koja druga prihvatljiva vrijednost.

Potrebni napon gata može se izračunati iz R_S vrijednosti. Budući da je vrijednost struje gata nula, ($I_G = 0$) možemo podesiti potrebnu naponsku DC radnu točku pomoću pravilnog odabira otpornika R_1 i R_2 . Odnosi veličina struja i napona ispisani su u grupi jednadžbi (32).

$$\begin{aligned}
 U_S &= I_D \cdot R_S = \frac{U_{DD}}{4} \\
 U_S &= U_G - U_{GS} \\
 U_G &= \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) U_{DD} \\
 I_D &= \frac{U_S}{R_S} = \frac{U_G - U_{GS}}{R_S}
 \end{aligned} \tag{32}$$

Upravljanje strujom dotoka s negativnim potencijalom gata čini tranzistor s efektom polja korisnim prekidačkim sklopom i nužno je omogućiti da napon gata nikad ne postane pozitivan što uzrokuje oštećenje JFET-a. Princip rada u slučaju p -kanalnog JFET-a je isti kao i kod n -kanalnog JFET-a, s tom razlikom što polaritet napona treba biti suprotan.



Slika 66. Predodžba DC radnog pravca i položaja radne točke Q audiopojачala s n -kanalnim JFET-om

Na slici 66 predočen je DC radni pravac omeđen rubnim radnim točkama A i B. Radna točka A predstavlja vrijednost maksimalne struje JFET-a I_D ($I_D = U_{DD} / (R_D + R_S)$) pri vrijednosti napona JFET-a $U_{DS} = 0$ V, dok točka B predstavlja vrijednost napona $U_{DS} = U_{DD}$ pri vrijednosti struje I_D JFET-a $I_D = 0$ A. Sve točke između rubnih točaka A i B su potencijalne radne točke pojačala. Radna točka približno na sredini radnog (aktivnog) područja ima oznaku Q. Grafička predodžba (krivulje zelene boje) iskazuje korelaciju dvaju napona JFET-a: upravljačkog U_{GS} i izlaznog U_{DS} .

6.5. MOSFET tranzistori

Kao kod JFET tranzistora postoji još jedna vrsta tranzistora s efektom polja čija je upravljačka elektroda ili ulaz električki izoliran od glavnog poluvodičkog kanala za vođenje struje i stoga se zove tranzistor s efektom polja s izoliranim vratima - IGFET (engl. *Insulated Gate Field Effect Transistor*).

Najčešći FET s izoliranim vratima koji se koristi u mnogim vrstama elektroničkih sklopova naziva se „metalom oksidirani” poluvodički tranzistor s efektom polja (engl. *Metal Oxide Semiconductor*) ili kraće MOSFET.

IGFET ili MOSFET tranzistori su naponski upravljani s efektom polja koji se razlikuju od JFET-ova po tome što imaju „metaloksid” elektrodu koja je električki izolirana iz glavnog poluvodičkog n -kanala ili p -kanala vrlo tankim slojem izolacijskog materijala, obično pomoću tankog sloja silicijevog dioksida ili materijala poznatijeg kao staklo.

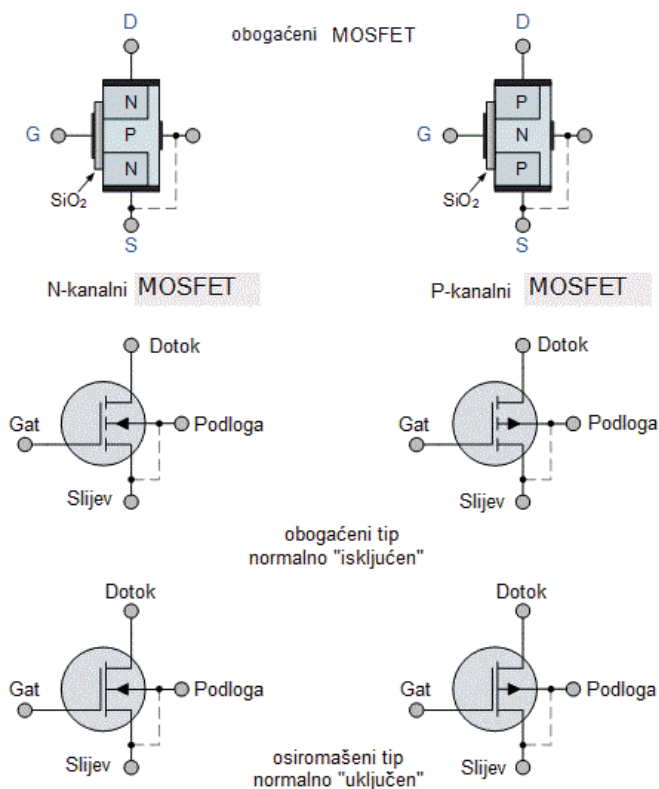
Metalna elektroda ili metalna vrata s vrlo tankim slojem izolacijskog stakla može se smatrati jednom pločom kondenzatora. Izolirana upravljačka vrata imaju vrlo velik ulazni otpor MOSFET-a iskazanim u megaomima ($M\Omega$) što je čini gotovo beskonačna vrijednost otpora.

S obzirom na to da su upravljačka vrata, tj. da je metalni gat električki izoliran od glavnog kanala za vođenje struje između dovoda i slijeva, „struja ne teče kroz gat” i, baš kao i JFET, MOSFET također funkcionira kao naponski upravljan otpor, a struja teče kroz glavni kanal između dovoda i slijeva te je proporcionalna ulaznom naponu. Isto tako kao i JFET, vrlo visoka ulazna otpornost MOSFET-a može lako akumulirati velike količine statičkog naboja što dovodi do činjenice da se MOSFET lako može oštetiti, osim ako se pažljivo ne rukuje s njim.

Kao i prethodni rođaci JFET-ovi i MOSFET-ovi su tronožni uređaji s gatom, dovodom i slijevom, a dostupni su i *p*-kanalni (PMOS) i *n*-kanalni (NMOS) MOSFET-ovi. Ovoga puta je glavna razlika što su MOSFET-ovi dostupni u dva osnovna oblika, tzv. :

- Osiromašeni tip - tranzistor treba vrijednost ulaznog napona (U_{GS}) za isključenje rada „OFF”. Osiromašeni tip MOSFET odgovara stanju sklopke „Normalno isključena”.
- Obogaćeni tip - tranzistor treba vrijednost ulaznog napona (U_{GS}) za uključivanje uređaja „ON”. Obogaćeni tip MOSFET odgovara stanju sklopke „Normalno uključena”.

Niže su prikazani simboli i osnovna konstrukcija za obje izvedbe MOSFET-ova.

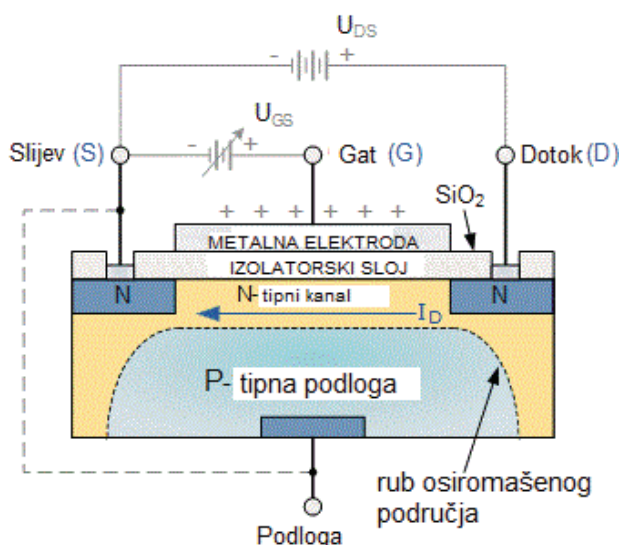


Slika 66. Struktura i simboli MOSFET tranzistora za obje izvedbe

6.5.1. Osnovna građa MOSFET-a

Građa metaloksidnog poluvodičkog FET-a vrlo je različita od spojnog JFET-a. Oba tipa MOSFET-a, osiromašeni i obogaćeni, pomoću električnog polja formiranog od priključenog napona na gatu, upravljaju protokom slobodnih nosilaca naboja, elektrona u n -kanalnom ili šupljina u p -kanalnom poluvodičkom kanalu koji se nalazi između spoja dotok-slijev. Nožica na gatu pričvršćena je na vrlo tanki izolacijski sloj te postoji i par malih područja dopiranih s n -tipom kristala ispod nožice dotoka i ispod nožice slijeva.

S obzirom na to da smo spoznali raniji način rada JFET-a i značaj nepropusne polarizacije p - n spoja te formiranje osiromašenog područja u takvom tranzistoru, i ovdje se načelno radi o istom principu rada, ali s jednom bitnom razlikom. Na MOSFET tranzistoru s izoliranim vratima ne primjenjuju se takva ograničenja napona pa je moguća polarizacija vrata MOSFET-a i s pozitivnim i s negativnim polaritetom (slika 67).



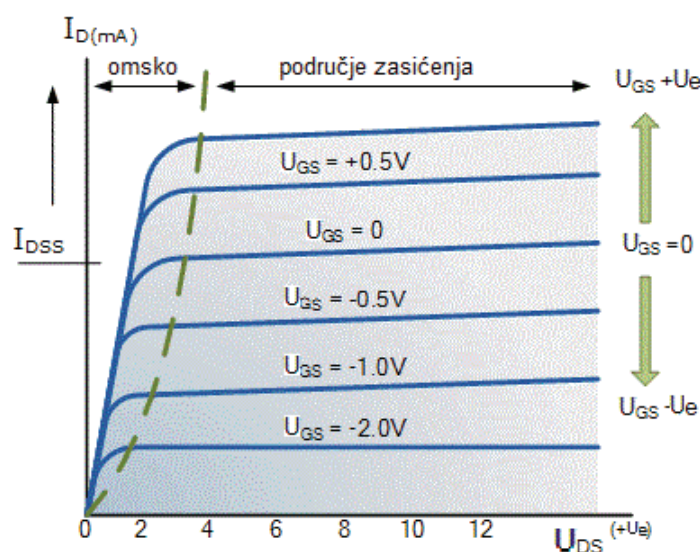
Slika 67. Struktura MOSFET tranzistora s n -kanalom. Priključeni su naponi napajanja.

To čini MOSFET uređaj posebno vrijednim ako ga se koristi kao elektronička sklopka ili kao logička vrata jer bez napona oni obično nisu vodljivi, a visoki ulazni otpor tranzistora znači da je potrebna vrlo mala ili nikakva struja s obzirom na to da su MOSFET-ovi naponski upravljani uređaji. I p -kanalni i n -kanalni MOSFET dostupni su u dva osnovna oblika, osiromašeni i obogaćeni.

Osiromašeni tip MOSFET-a

Osiromašeni tip MOSFET-a je manje uobičajen od obogaćenog tipa, normalno je „uključen” („ON”) i vodi struju kroz kanal bez priključenog napona na gatu. Tada je riječ o kanalu koji vodi kada je $U_{GS}=0V$ što ga čini „normalno zatvorenim” uređajem. Simbol tranzistora koji je prikazan na slici 66 za osiromašeni tip MOS tranzistora predložen je s čvrstom linijom kanala za označavanje stanja normalno zatvorenog vodljivog kanala.

Za osiromašeni tip MOSFET-a, negativni ulazni napon, $-U_{GS}$ će osiromašiti (otuda ime) vodljivi n -kanal od slobodnih elektrona prebacujući tranzistor u „OFF” način rada. Istovremeno, za obogaćeni tip MOSFET-a pozitivni ulazni napon U_{GS} će osiromašiti vodljivi p -kanal slobodnih šupljina i prebaciti ga u „OFF” način rada. Drugim riječima, za n -kanalni osiromašeni tip MOSFET-a: $+U_{GS}$ znači više elektrona i više struje. Dok $-U_{GS}$ znači manje elektrona i manje struje. Suprotno je za tip p -kanalom. Tada je osiromašeni tip MOSFET-a ekvivalentan „normalno zatvorenoj” sklopki. Na slici 68 predložena je I-U karakteristika osiromašenog tipa MOSFET-a.



Slika 68. Predložba I-U karakteristike osiromašenog tipa MOSFET-a

Osiromašeni tip MOSFET-a s n - kanalom

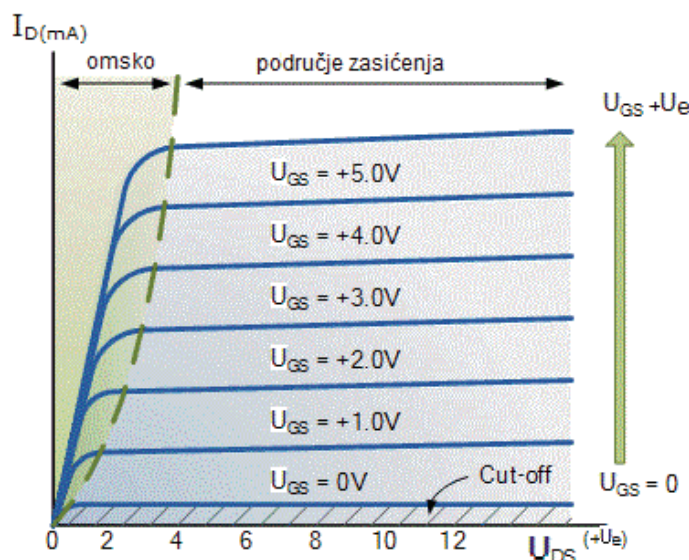
Osiromašeni tip MOSFET-a konstruiran je na sličan način kao i JFET tranzistorski rođak tako da je vodljivi kanal inherentno vodljiv zbog primjesa (elektrona i šupljina) prisutnima u poluvodičkom kristalu. Koncentracija primjesa u kanalu stvara vodljivi put malog otpora između dotoka i slijeva bez napona na upravljačkim vratima.

Obogaćeni tip eMOSFET

Uobičajeni MOSFET tranzistor obogaćenog tipa ili eMOSFET, radi suprotno od osiromašenog tipa. U ovom slučaju vodljivi kanal je lagano dopiran ili je čak bezprimjesan što ga čini nevodljivim. To rezultira stanjem da je uređaj normalno „ISKLUČEN” (ne vodi struju) kada je napon upravljačkih vrata $U_{GS}=0V$. Za simbol tranzistora s obogaćenim tipom eMOSFET-a (predočen na slici 69) koristi se isprekidana linija vodljivog kanala kako bi se naznačilo da je nevodljivi kanal normalno otvoren.

Za n -kanalni eMOSFET obogaćenog tipa struja dotoka će teći jedino u slučaju kada je napon (U_{GS}) priključen na gat veći od razine napona vođenja (U_{tr}) na kojem kanal počinje voditi struju, što ga čini transvodljivim uređajem.

Priključenje pozitivnog napona gata na n -tipni eMOSFET privlači više elektrona prema sloju oksida oko gata, čime se povećava ili pojačava (otuda njegovo ime) debljina kanala dozvoljavajući protok veće struje. To je i razlog zbog čega se ova vrsta tranzistora naziva uređaj za obogaćivanje načina rada jer priključenje napona gata povećava širinu vodljivog kanala.



Slika 69. Predodžba I-U karakteristike obogaćenog tipa eMOSFET-a

Nadalje, povećanje pozitivnog napona gata dovest će do smanjenja otpora kanala uzrokujući povećanje struje dotoka I_D kroz kanal. Drugim riječima, za n -kanalni obogaćeni tip eMOSFET napon $+U_{GS}$ postavlja tranzistor u stanje „uključen”, dok vrijednost napona od 0 V ili $-U_{GS}$ postavlja tranzistor u stanje „isključen”. Tako da je obogaćeni tip eMOSFET jednak „normalno otvorenoj” sklopki.

Suprotno je za slučaj obogaćenog tipa eMOSFET-a s p -kanalom. Kada je $U_{GS}=0V$, uređaj je „isključen” i kanal je otvoren. Priključenje negativnog napona gata na p -tipni eMOSFET povećava se vodljivost kanala i postavlja ga u stanje „uključen”. Zatim za obogaćeni tip eMOSFET s p -kanalom $+U_{GS}$ napon postavlja tranzistor u stanje „isključen”, dok ga $-U_{GS}$ napon postavlja u stanje „uključen”.

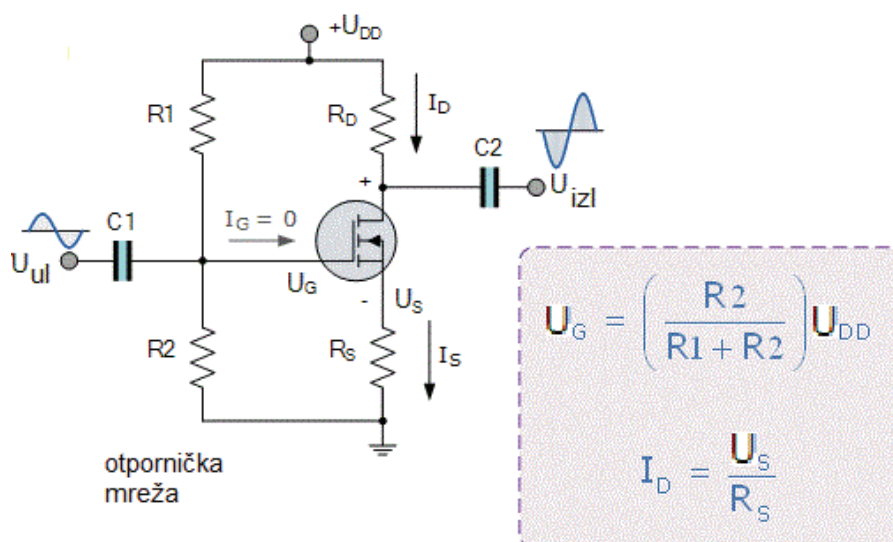
6.6. Pojačalo s MOSFET tranzistorom

Baš kao i prethodni JFET tranzistori, MOSFET-ovi se mogu koristiti za izradu jednostupanjskih audiopojačala A klase (s obogaćenim tipom i n -kanalnim MOSFET-om) u spoju zajedničkog slijeva, i to su najpopularniji sklopovi (predočeno na slici 70). MOSFET-ovi s osiromašenim područjem su vrlo slični JFET pojačalima, osim što MOSFET ima puno veću ulaznu impedanciju.

Ova velika ulazna impedancija upravljana naponom gata i otporničkom mrežom koju tvore otpori $R1$ i $R2$. Također, izlazni signal pojačala s MOSFET-om u spoju zajedničkog slijeva je protufazan, jer kada je U_G nizak, tranzistor se prebacuje na stanje „isključen” i U_D (U_{izl}) je veliki. Kada je pak U_G veliki, tranzistor se prebacuje na „uključen” i U_D (U_{izl}) je mali.

6.7. Pojačalo s n -kanalnim obogaćenim tipom MOSFET-a

DC prednaponi sklopa pojačala s MOSFET-om u spoju zajedničkog slijeva praktički su identični JFET pojačalu. MOSFET krug ima prednapon za rad u A klasi od otporničke mreže naponskog dijelila kojeg tvore otpornici R_1 i R_2 . Vrijednost AC impedancije na ulazu je $R_{ul}=R_G=1\text{M}\Omega$.



Slika 70. Predodžba audiopojačala A klase s obogaćenim tipom eMOSFET

Metaloksidni poluvodički tranzistor s efektom polja kao tronožni uređaj izrađen od različitih poluvodičkih materijala može se ponašati kao izolator ili vodič primjenom malog signalnog napona.

Mogućnost MOSFET-a da mijenja ta dva stanja omogućuje mu dvije osnovne funkcije: „prebacivanje stanja” (digitalna elektronika) ili „pojačanje signala” (analogna elektronika). Nadalje, MOSFET-ovi imaju sposobnost rada u tri različita područja:

1. Odsječeno ili zaporno područje - s naponom $U_{GS} < U_{tr}$, tj. napon gat-slijev je znatno niži od napona vođenja tranzistora, tako da je MOSFET tranzistor prebačen u stanje „potpuno isključen”, pri čemu je struja $I_D=0\text{A}$, a tranzistor se ponaša kao otvorena sklopka bez obzira na vrijednosti U_{DS} .
2. Linearno (omsko) područje - s naponima $U_{GS} > U_{tr}$ i $U_{DS} < U_{GS}$ tranzistor je u području stalnog (konstantnog) otpora koji se ponaša kao naponski upravljani otpor čija je vrijednost otpora određena naponom gata i vrijednosti U_{GS} .
3. Područje zasićenja - s naponima $U_{GS} > U_{tr}$ i $U_{DS} > U_{GS}$ tranzistor je u području stabilne (konstantne) struje i stoga je „potpuno uključen”. Struja dotoka I_D je maksimalna tako da tranzistor djeluje kao zatvorena sklopka.

Zaključak

MOSFET, ukratko rečeno, ima izuzetno visok ulazni otpor, dok strujom koja teče kroz kanal između slijeva i dotoka upravlja napon gata. Zbog ovakve velike ulazne impedancije i pojačanja, MOSFET-ovi se mogu lako oštetiti statičkim elektricitetom ako se pažljivo ne zašтите ili rukuje s njima.

MOSFET-ovi su idealni za korištenje kao elektroničke sklopke ili kao pojačala zajedničkog slijeva jer je njihova potrošnja energije vrlo mala. Tipične primjene MOSFET-ova su u mikroprocesorima, memorijama, kalkulatorima i logičkim CMOS vratima itd. [5, 6].

Također, potrebno je uočiti da crtkana ili isprekidana crta unutar simbola FET-a označava uobičajeno vrstu „isključen-OFF”, što pokazuje da struja „NE” može teći kroz kanal kad se priključi U_{GS} napon.

Kontinuirana neprekinuta linija unutar simbola ukazuje na uobičajeno osiromašeni tip „uključen-ON” koji pokazuje da struja „DA” teče kroz kanal s naponom na gatu od 0 volti. Kod p -kanalnih tipova simboli su potpuno isti za obje vrste, osim što strelica pokazuje prema van. To se može sažeti u sljedećoj tablici za vrijednosti uključivanja - ON i isključivanja - OFF.

TIP eMOSFET	$U_{GS}=+\text{napon}$	$U_{GS}=0V$	$U_{GS}=-\text{napon}$
n-kanalni osiromašeni	ON	ON	OFF
n-kanalni obogaćeni	ON	OFF	OFF
p-kanalni osiromašeni	OFF	ON	ON
p-kanalni obogaćeni	OFF	OFF	ON

Dakle, za n -kanalne obogaćene eMOSFET-ove, pozitivni napon gata uključuje „ON-uključen” tranzistor, a s naponom 0V, tranzistor će biti „OFF-isključen”. Kod p -kanalnog obogaćenog eMOSFET-a, negativni napon na gatu će uključiti tranzistor „ON”, a s naponom 0V tranzistor će biti „OFF”. Naponski prag pri kojem eMOSFET počinje voditi struju kroz kanal određen je i označen vrijednošću napona praga U_{TH} (engl. *threshold*).

6.8. MOSFET kao sklopka

Rad obogaćenog eMOSFET-a najbolje se može opisati sagledavanjem njegovih karakterističnih U-I krivulja predloženih na slici 69. Kada je ulazni napon (U_{ul}) na ulazu tranzistora (gat) 0 V, eMOSFET ne vodi gotovo nikakvu struju, a izlazni napon (U_{izl}) jednak je naponu napajanja U_{DD} . Dakle, eMOSFET je „ISKLUČEN”, a djeluje unutar svog zapornog („*cut-off*”) područja.

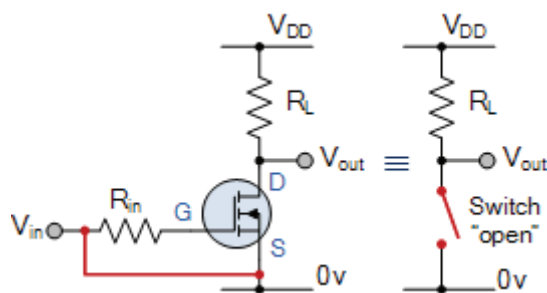
Kako naznačuje slika 69, minimalna vrijednost napona na gatu potrebnog da bi se osiguralo da eMOSFET ostane „UKLJUČEN” pri propuštanju struje može se odrediti iz U-I krivulje. Kad je U_{ul}

velik ili jednak U_{DD} , radna Q-točka eMOSFET-a pomiče se prema većim strujama I_D sve do granice radnog područja, tj. do točke A na radnom pravcu. I_D struja povećava se na maksimalnu vrijednost zbog smanjenja otpora u kanalu. I_D postaje konstantna vrijednost neovisna o naponu U_{DD} i ovisi samo o naponu U_{GS} . Dakle, tranzistor se ponaša poput zatvorene sklopke, ali otpor kanala koji vodi (ON) ne smanjuje se potpuno na nulu zbog svoje R_{DS} (dinamičke) vrijednosti, ali postaje vrlo mali.

Isto tako, kada je U_{ul} mali ili smanjen na nulu, Q-točka eMOSFET-a kreće se od točke A do točke B na radnom pravcu. Otpor kanala je vrlo visok, tako da tranzistor djeluje poput otvorenog kruga i struja ne teče kroz kanal. Dakle, ako se napon na eMOSFET-u prebacuje između te dvije vrijednosti, VISOKO i NISKO, eMOSFET će se ponašati kao jednapolni prekidač i ta je akcija definirana kao:

1. Zaporno područje

U ovom području uvjeti rada tranzistora su: bez ulaznog napona ($U_{ul} = 0$ V), bez protoka struje ($I_D = 0$ A), ali uz prisutnost maksimalnog izlaznog napona ($U_{DS} = U_{DD}$). Zbog toga je za obogaćeni tip, tj. za eMOSFET vodljivi kanal zatvoren, a uređaj kao sklopka prebačen u isključeno stanje „OFF”.



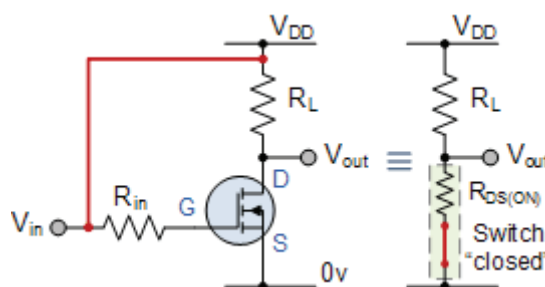
Slika 71. Predodžba rada eMOSFET-a u zapornom području

Stoga možemo definirati granično područje rada ili „OFF” način rada, kada se koristi eMOSFET kao sklopka, s obzirom na to da je napon gata $U_{GS} < U_{TH}$, a posljedično dakle $I_D = 0$ A. Izlazni napon je: $U_{IZL} = U_{DS} = U_{DD}$. Dakle, napon na izlazu je maksimalan što znači da uređaj djeluje kao otvorena sklopka ili kao da ima stanje „1”.

Za p -kanalni eMOSFET potencijal gata mora biti „pozitivniji” odnosno veći u odnosu na slijev.

2. Područje zasićenja

U području zasićenja (engl. *saturation region*) ili linearnom području tranzistor će biti u prednaponu tako da se na gat spoji maksimalni napon (napon napajanja U_{DD}) koji rezultira vrlo malim dinamičkim otporom kanala ($R_{DS} < 0,1\Omega$) i maksimalnom strujom I_D kroz eMOSFET prekidač. U tom slučaju za eMOSFET vodljivi kanal je otvoren i uređaj je uključen „ON”. Izlazni napon $U_{IZL} = U_{DS} \approx 0,2$ V. Dakle, napona na izlazu nema ili je jako mali što znači da je zanemariv ili jednak „0” i uređaj djeluje kao zatvorena sklopka.



Slika 72. Predodžba rada eMOSFET-a u području zasićenja

Stoga možemo definirati područje zasićenja ili „ON” način rada kada koristimo eMOSFET kao sklopku, dok je napon na gat $U_{GS} > U_{TH}$ i struja I_D maksimalna.

Za p -kanalni eMOSFET potencijal gata mora biti „negativniji” odnosno manji u odnosu na slijev.

Primjenjujući odgovarajući radni napon na gat FET-a, otpor vodljivog kanala, $R_{DS(ON)}$ može se mijenjati od „OFF” stanja (od nekoliko stotina $k\Omega$) što je otvoreni strujni krug, do „ON” stanja (otpor je manji od 1Ω) koji učinkovito djeluje kao kratki spoj.

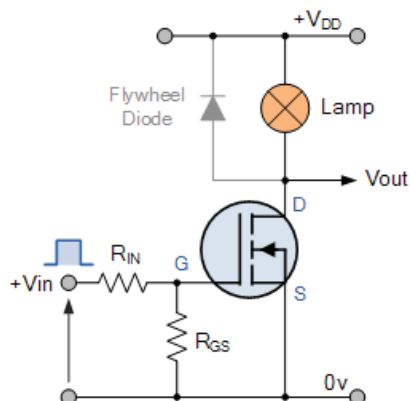
Kada koristimo eMOSFET kao sklopku, možemo upravljati eMOSFET-om da brže ili sporije uključuje stanje „ON” dozvoljavajući protok velikih ili malih struja. Ova mogućnost uključivanja i isključivanja eMOSFET-a omogućuje da se uređaj koristi kao vrlo učinkoviti prekidač s brzinama prebacivanja mnogo većim od standardnih bipolarnih tranzistora.

Primjer korištenja eMOSFET-a kao sklopke

U ovom primjeru spojen je n -kanalni eMOSFET za uključivanje (prebacivanje stanja) obične svjetiljke u stanje „ON” i „OFF”. Teret može biti i LED lampica odnosno dioda.

Ulazni napon U_{GS} uzima se kao pozitivan za uključenje tereta, pa se lampica opterećuje i dolazi u stanje „ON”, ($U_{GS} > 0\text{ V}$), ili se dovodi napon koji isključuje eMOSFET, a time i teret „OFF”, ($U_{GS} = 0\text{ V}$).

Ako bi se otporničko opterećenje svjetiljke trebalo zamijeniti induktivnim opterećenjem, poput zavojnice, magnetnog tipa ili releja, potrebno je paralelno spojiti s opterećenjem „zaštitnu diodu” kako bi se eMOSFET zaštitio od bilo kojeg samoinduciranog povratnog napona (elektromagnetska indukcija svitka zavojnice).



Slika 73. Predodžba spoja eMOSFET-a u radu kao sklopka

Predložen je vrlo jednostavan krug za prebacivanje otporničkog opterećenja poput svjetiljke ili LED diode. Ali, kada se koriste eMOSFET-ovi za napajanje i za prebacivanje bilo induktivnih ili kapacitivnih opterećenja, potreban je neki oblik zaštite da se spriječi oštećenje eMOSFET tranzistora. Treba se prisjetiti kako upravljanje induktivnim teretom ima suprotan učinak od upravljanja kapacitivnim teretom.

Na primjer, kondenzator bez električnog naboja je kratki spoj, što rezultira velikim „naletom” struje i kada uklonimo napon od induktivnog opterećenja imamo veliki povratni napon kako se magnetsko polje urušava, što rezultira induciranim naponom u namotajima svitka.

U sljedećoj tablici predložene su radne karakteristike *n*-kanalnog i *p*-kanalnog tipa eMOSFET kada se koriste kao sklopke.

TIP eMOSFET-a	$U_{GS}=+$ napon	$U_{GS}=0V$	$U_{GS}=-$ napon
<i>n</i> -kanalni osiromašeni	OFF	OFF	ON
<i>n</i> -kanalni obogaćeni	OFF	ON	ON
<i>p</i> -kanalni osiromašeni	ON	OFF	OFF
<i>p</i> -kanalni obogaćeni	ON	ON	OFF

Treba imati na umu da za razliku od *n*-kanalnog eMOSFET-a čiji gat priključak mora biti pozitivniji (privlačiti elektrone) od slijeva da bi struja mogla teći kroz kanal, vodljivost kroz *p*-kanalni eMOSFET nastaje zbog protoka šupljina. Prema tome, gat priključak *p*-kanalnog eMOSFET-a mora biti negativniji od slijeva da prestane voditi (isključenje) sve dok gat ne postane pozitivniji od slijeva.

Da bi eMOSFET mogao raditi kao analogni uređaj za prebacivanje, treba ga prebaciti između zapornog područja gdje je $U_{GS} = 0 V$ (ili $U_{GS} < 0 V$) i područja zasićenja gdje je $U_{GS(ON)} > 0 V$. Snaga raspršena i potrošena (disipirana P_{DIS}) u eMOSFET ovisi o struji I_D koja teče kroz kanal, kao i o vrijednosti dinamičkog otpora kanala naznačenom kao $R_{DS(ON)}$.

U nastavku teksta naznačen je primjer.

Primjer:

Pretpostavimo da je žarulja sa slike 73 nazivnog napona 6 V i snage 24 W i u stanju uključenja „ON”, a standardni eMOSFET ima vrijednost otpora kanala ($R_{DS(ON)}$) od 0,1 Ω . Izračunajte potrošnju snage sklopnog uređaja s eMOSFET-om.

Izračun

Struja koja teče kroz svjetiljku izračunava se kao:

$$I_D = \frac{P}{U} = \frac{24W}{6V} = 4A, \quad (8.1)$$

što znači da će potrošnja snage biti:

$$P = I^2 \cdot R = 1,6W. \quad (8.2)$$

Komentar

Možda to i nije velika potrošnja, ali kada se eMOSFET-ovi koriste kao prekidači za upravljanje istosmjernim motorima ili električnim teretima s velikim strujama, vrijednost otpora kanala ($R_{DS(ON)}$) je jako važna. Na primjer, eMOSFET-ovi koji upravljaju istosmjernim motorima podvrgavaju se velikoj naionalnoj struji u početku rotacije, jer je pokretačka struja motora određena vrlo niskom vrijednošću otpora namotaja motora.

Kako je osnovni odnos snage $P=I^2 \cdot R$, velika vrijednost otpora kanala ($R_{DS(ON)}$) jednostavno će rezultirati rasipanjem velike količine energije i gubitkom unutar samog eMOSFET-a što rezultira prevelikim porastom temperature ako se procesom ne upravlja te može rezultirati velikim zagrijavanjem eMOSFET-a i oštećenjem zbog toplinskog preopterećenja.

Niža vrijednost otpora kanala ($R_{DS(ON)}$) je također poželjan parametar jer pomaže u smanjenju efektivnog napona zasićenja ($U_{DS(zas)} = I_D R_{DS(ON)}$) kroz eMOSFET i stoga će tranzistor raditi na nižoj temperaturi. eMOSFET-ovi velike snage obično imaju vrijednost $R_{DS(ON)}$ manju od 0,01 Ω što im omogućuje pokretanje tereta produžujući njihov radni vijek.

LITERATURA:

- [1] P. Biljanović, *Poluvodički elektronički elementi*, Školska knjiga, Zagreb 1996.
- [2] D. L. Eggleston, *Basic electronics for scientists and engineers*, Cambridge University Press, 2011.
- [3] J. Grilec, D. Zorc: *Osnove elektronike*, Školska knjiga, Zagreb 2013.
- [4] Ž. Butković, J. Divković-Pukšec, A. Barić, *Elektronika 1, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb - interna skripta*, Fakultet elektrotehnike i računarstva Sveučilišta u Zagrebu 2018.
- [5] P. Biljanović *Mikroelektronika (Integrirani elektronički sklopovi)*, Školska knjiga, Zagreb 2001.
- [6] A.S. Sedra, K.C. Smith, *Microelectronic Circuits, 6th ed.*, Oxford University Press 2011.
- [7] B. Van Zeghbroeck, 2011, <https://ecee.colorado.edu/~bart/book/book/toc2.htm>
- [8] https://www.pmf.unizg.hr/_download/repository/materijali__poluvodici.pdf

PREPORUKA

Referentni edukacijski materijali i animacije:

<https://www.youtube.com/watch?v=JBtEckh3L9Q>

<https://www.youtube.com/watch?v=W6QUEq0nUH8>

<https://www.youtube.com/watch?v=7ukDKVHnac4>