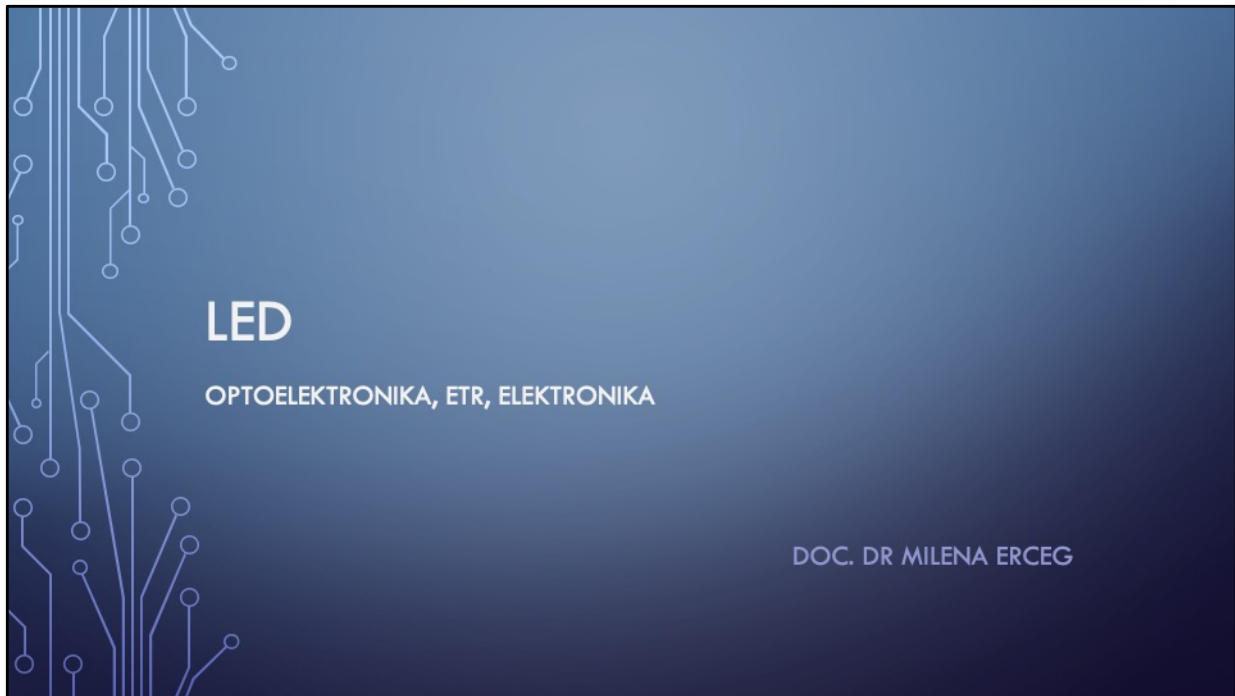


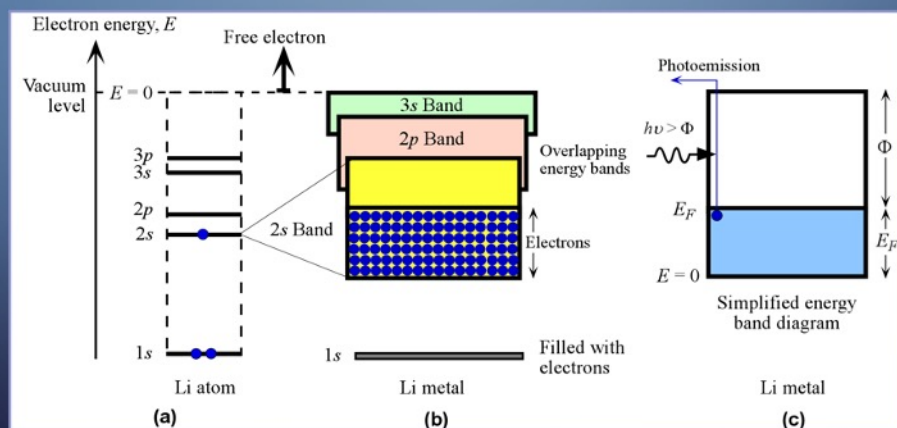


LED

OPTOELEKTRONIKA, ETR, ELEKTRONIKA

DOC. DR MILENA ERCEG

ENERGETSKE ZONE KOD METALA



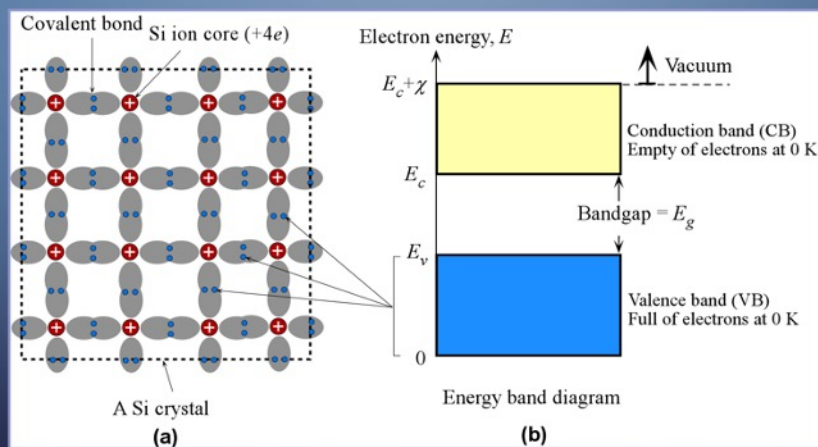
From: S.O. Kasap, *Optoelectronics and Photonics: Principles and Practices*, Second Edition, © 2013 Pearson Education, USA

Poznato je da energija elektrona u atomu može da ima samo određene diskretne vrijednosti, kako je ilustrovano slikom za Li atom. Izolovani Li atom ima dva elektrona u 1s ljusci i jedan elektron u 2s podljusci. Isti koncept se može primijeniti za energiju elektrona u sklopu molekula sa više atoma. I u ovom slučaju energija elektrona je kvantizovana. Međutim, kada se uzme u obzir veoma veliki broj atoma (npr. 10^{23} atoma litijuma) interakcije atoma dovode do formiranja energetske zone. 2s energetske zone se dijeli na oko 10^{23} veoma bliskih energetske zone koje zajedno formiraju 2s energetske zonu. Slično, i ostali viši energetske zone formiraju zone, kako je prikazano na slici. Ove energetske zone se međusobno preklapaju i čine jedinstvenu kontinualnu energetske zonu karakterističnu za metale. Kako je 2s energetske zone atoma litijuma "poluprazan" (u 2s podljusku može da se smjesti 2 elektrona, a postoji samo jedan), tako je i 2s energetske zone kristala popunjena do pola. Metali generalno imaju djelimično popunjene energetske zone. Dijagram energetske zone kod metala se sastoji od jedne zone energije kod koje su na temperaturi od 0 K svi energetske zone od 0 do određene vrijednosti energije popunjene, slika (c). Maksimalna vrijednost energije koju može imati elektron na temperaturi od 0 K označava se kao *Fermi*-jeva energija E_F . Energetske stanja iznad E_F su prazna do nivoa vakuuma. Energija koja je potrebna da se oslobodi elektron iz metala je upravo energija koja je potrebna da elektron "pređe" sa *Fermi*-jevog nivoa

do nivoa vakuuma i označava se kao *work* funkcija Φ metala. Foton energije veće od Φ usmjeren ka metalu može dovesti do oslobađanja elektrona (fotoemisije), što se označava kao fotoelektrični efekat. Efekat se intenzivno koristi u optoelektronici, pri čemu se fotoemitovani elektroni dalje ubrzavaju električnim poljem i u procesu multiplikacije oslobađaju druge elektrone. Jedan foton može osloboditi reda 10^6 elektrona.

Elektroni čija energija je bliska energiji E_F utiču na svojstva metala kao što su električna i termalna provodnost. Kada se primijeni električno polje E , elektron koji ima energiju blisku energiji E_F može dobiti dodatnu energiju usljed djelovanja eksterne sile eE i preći na veće energetske stanje (ta stanja su prazna i dostupna). Mnoga važna svojstva metala i poluprovodnika opisuju se na osnovu ponašanja elektrona u okviru energetskih zona. U slučaju metala, elektroni su slobodni i njihova potencijalna energija je konstantna.

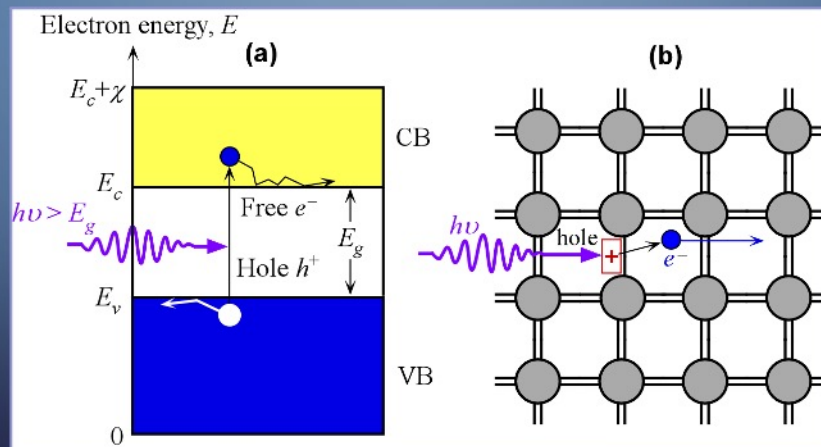
ENERGETSKE ZONE KOD POLUPROVODNIKA



From: S.O. Kasap, *Optoelectronics and Photonics: Principles and Practices*, Second Edition, © 2013 Pearson Education, USA

Energija elektrona u poluprovodničkom kristalu se značajno razlikuje u odnosu na metale. Na slici (a) je dat pojednostavljen prikaz kristala silicijuma. Sva četiri valentna elektrona atoma formiraju kovalentne veze sa susjednim atomima. Na slici (b) prikazan je dijagram energetske zone kod poluprovodnika. Razlikuju se dvije energetske zone - valentna VB i provodna CB koje su razdvojene energetske procjepom (*bandgap*) energije E_g . U okviru energetske procjepa ne postoje dozvoljena energetska stanja elektrona. Ova zona se stoga označava i kao zabranjena zona kristala. Valentna zona predstavlja energetska stanja elektrona u kristalu koja odgovaraju vezama između atoma. Elektroni koji zauzimaju ova energetska stanja se označavaju kao valentni elektroni. Kako su na apsolutnoj temperaturnoj nuli sve veze zauzete valentnim elektronima, svi energetske nivoi u valentnoj zoni su popunjeni elektronima. Provodna zona predstavlja energetska stanja elektrona u kristalu sa većom energijom u odnosu na valentnu zonu. Ova zona je na temperaturi od 0 K prazna. Gornja granica valentne zone označena je sa E_v , dok je donja granica provodne zone označena sa E_c . Slijedi da je „širina“ energetske procjepa $E_g = E_c - E_v$. Širina provodne zone označena je sa χ . Elektron u provodnoj zoni je slobodan da se kreće kao i da odgovori na električno polje prelaskom na veći energetske nivo (prihvatanjem energije električnog polja) jer su ta stanja u provodnoj zoni slobodna.

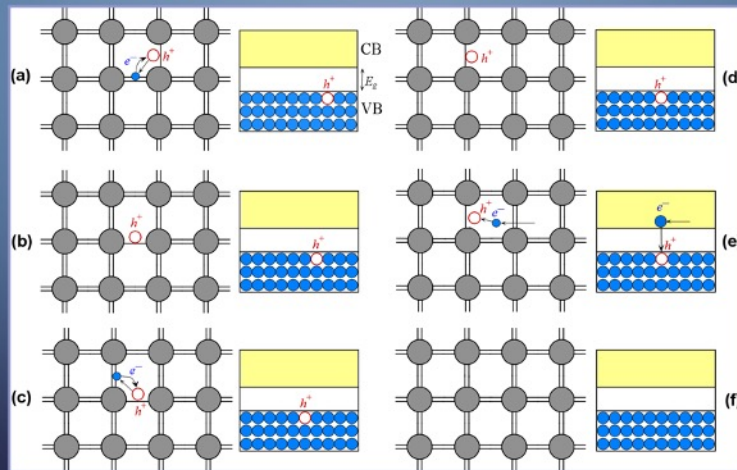
ENERGETSKE ZONE KOD POLUPROVODNIKA



From: S.O. Kasap, *Optoelectronics and Photonics: Principles and Practices*, Second Edition, © 2013 Pearson Education, USA

Kako su jedina slobodna stanja u provodnoj zoni, pobuđivanje elektrona iz valentne zone zahtijeva energiju čija je minimalna vrijednost jednaka E_g . Na slici je prikazana situacija kada foton energije veće od E_g vrši interakciju sa elektronom u valentnoj zoni. Elektron apsorbira upadni foton i dobija dovoljno energije da „preskoči“ zabranjenu zonu i dostigne provodnu zonu. Kao posljedica, formiran je par elektron-šupljina (elektron u provodnoj zoni i šupljina u valentnoj zoni usljed „odlaska“ elektrona). „Oblast oko šupljine“ u valentnoj zoni je pozitivno naelektrisana zbog oslobađanja elektrona.

KRETANJE ŠUPLJINA KOD POLUPROVODNIKA



From: S.O. Kasap, *Optoelectronics and Photonics: Principles and Practices*, Second Edition, © 2013 Pearson Education, USA

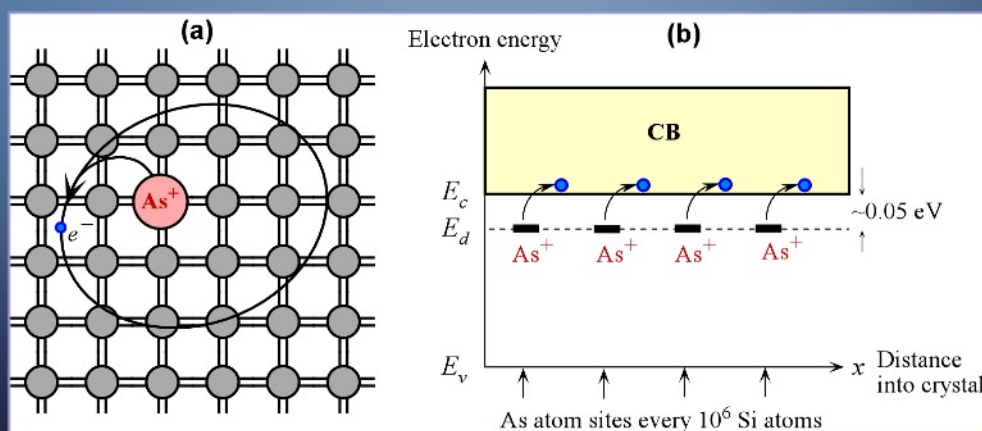
Nastala šupljina, kao i elektron u provodnoj zoni, može da “luta” kristalom kao da je slobodna. Naime, elektron iz susjedne veze može da „preskoči”, popuni prazno elektronsko stanje i istovremeno kreira novu „pomjerenu” šupljinu. Zapravo, kao da dolazi do pomjeranja šupljine u suprotnom smjeru. Proces je ilustrovan slikom.

Kada slobodni elektron iz provodne zone naiđe na šupljinu u valentnoj zoni, pronalazi prazno energetsko stanje niže energije i popunjava ga. Proces se označava kao **rekombinacija**, slika (e) i (f). Višak energije elektrona koji prelazi iz provodne u valentnu zonu kod određenih poluprovodnika (GaAs i InP) se emituje kao foton. Kod silicijuma i germanijuma ovaj višak energije se oslobađa kroz vibracije kristalne rešetke (fononi) što dovodi do zagrijavanja. U ravnotežnom stanju, stepen termalne generacije se balansira stepenom rekombinacije tako da koncentracija elektrona n u provodnoj zoni i koncentracija šupljina p u valentnoj zoni ostaje konstantna.

Osim svjetlosti, i drugi izvori energije mogu dovesti do kreiranja parova elektron-šupljina. U odsustvu radijacije, proces generacije parova elektron-šupljina se odvija kao rezultat termalne generacije. Pod uticajem termalne energije, atomi u kristalu konstantno vibriraju, što odgovara periodičnoj deformaciji veza između atoma silicijuma sa odgovarajućom distribucijom energija. Energetske vibracije mogu

narušiti veze i dovesti do kreiranja parova elektron-šupljina što odgovara pobuđivanju elektrona iz valentne u provodnu zonu.

POLUPROVODNICI N-TIPA



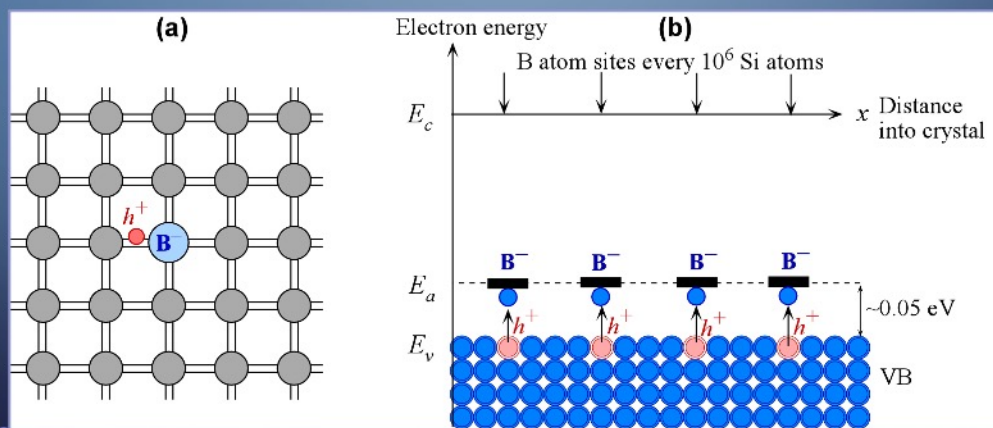
From: S.O. Kasap, *Optoelectronics and Photonics: Principles and Practices*, Second Edition, © 2013 Pearson Education, USA

Uvođenjem male količine nečistoća u čisti kristal, moguće je dobiti poluprovodnik u kome koncentracija nosilaca naelektrisanja jednog polariteta značajno dominira. Na primjer, dodavanjem petovalentnih nečistoća, kao što je arsen, dobija se poluprovodnik kod koga je koncentracija elektrona značajno veća od koncentracije šupljina. U ovom slučaju riječ je o poluprovodniku *n*-tipa. Dodavanjem trovalentnih nečistoća, kao što je bor, ostvaruje se značajno veći broj šupljina u odnosu na broj elektrona i u pitanju je poluprovodnik *p*-tipa.

Atom arsena ima pet valentnih elektrona, dok atom silicijuma ima četiri. Kada je kristal silicijuma dopiran malim količinama arsena, svaki od atoma arsena je „okružen“ sa četiri atoma silicijuma. Dolazi do formiranja četiri kovalentne veze, atom arsena se ponaša kao pozitivan jon, dok jedan (peti) elektron kruži oko njega, slika (a). Energija koja je potrebna da oslobodi ovaj elektron je mala, reda 0.05 eV, što znači da se on može osloboditi usljed termalnih vibracija kristalne rešetke na sobnoj temperaturi. Oslobođanje elektrona znači njegov prelazak u provodnu energetska zonu. Dodavanjem atoma arsena uvode se lokalna elektronska stanja na mjestu umetnutog atoma arsena, jer peti elektron ima lokalizovanu talasnu funkciju (elektronsko stanje). Energija tih stanja E_d je oko 0.05 eV ispod provodne zone, kako je označeno na slici (b). Dakle, energija od oko 0.05 eV je dovoljna za pobuđivanje elektrona sa E_d do provodne zone. Ovu energiju mogu obezbijediti vibracije kristalne

rešetke na sobnoj temperaturi. U opisanom procesu se formiraju slobodni elektroni.
 As^+ jon ostaje nepokretan.
Kako atom arsena donira elektron provodnoj zoni, označava se kao donor.

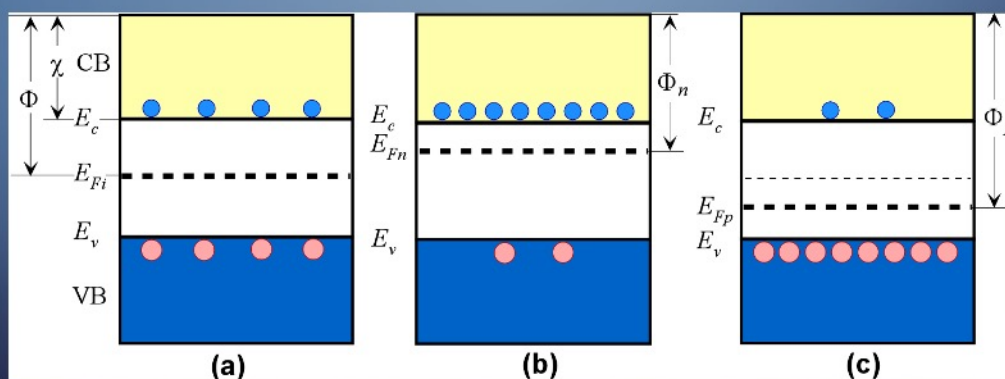
POLUPROVODNICI P-TIPA



From: S.O. Kasap, *Optoelectronics and Photonics: Principles and Practices*, Second Edition, © 2013 Pearson Education, USA

Dopiranjem kristala silicijuma trovalentnim atomima kao što je bor dobija se poluprovodnik *p*-tipa koji ima višak šupljina u kristalu. Prilikom umetanja atoma bora u kristalnu strukturu silicijuma, formiraju se tri kovalentne veze, dok jednoj vezi nedostaje elektron. Na taj način nastaje šupljina, slika (a). Susjedni elektron može popuniti ovu šupljinu i na taj način je udaljiti od atoma bora. Kako se šupljina udaljava, privlači je negativno naelektrisanje B⁻ jona (atom bora je prihvatio elektron). Energija opisane veze šupljine i B⁻ jona se pokazuje da je veoma mala, reda 0.05 eV. Dakle, i u ovom slučaju termalne vibracije kristalne rešetke mogu osloboditi šupljinu. Slobodna šupljina postoji u valentnoj energetskoj zoni. Oslobađanje šupljine od B⁻ jona podrazumijeva prihvatanje elektrona iz susjedne Si-Si veze (valentna zona). Dolazi do efektivnog pomjeranja šupljine i konačnog oslobađanja šupljine dostizanjem valentne zone. Atom bora se, dakle, ponaša kao akceptor. Elektron koga je prihvatio atom bora dolazi iz susjedne veze. Prema dijagramu energetskih zona, slika (b), elektron napušta valentnu zonu i prihvata ga atom bora koji postaje negativno naelektrisan. U ovom procesu ostaje šupljina u valentnoj zoni koja je slobodna da „luta“ kako je prikazano na slici (b). Očigledno je da se dopiranjem kristala silicijuma trovalentnim nečistoćama dobija poluprovodnik *p*-tipa. Kako su negativni joni bora nepokretni, električna provodnost se oslanja na šupljine koje u poluprovodniku *p*-tipa dominiraju.

DIJAGRAM ENERGETSKIH ZONA KOD POLUPROVODNIKA

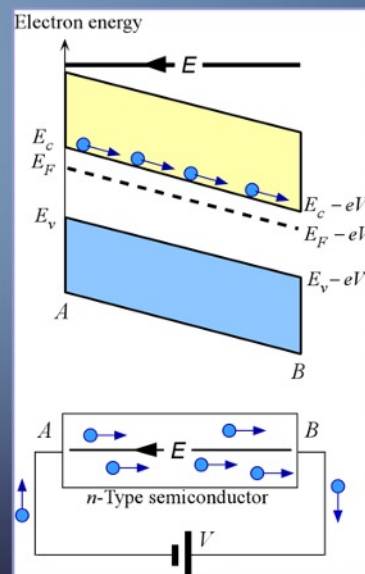


From: S.O. Kasap, *Optoelectronics and Photonics: Principles and Practices*, Second Edition, © 2013 Pearson Education, USA

Na slici je prikazan dijagram energetske zone za čisti poluprovodnik (a), poluprovodnik n -tipa (b) i poluprovodnik p -tipa (c). Energetsko rastojanje između E_F i E_c , odnosno, E_v određuje koncentraciju elektrona, odnosno, šupljina u poluprovodniku. Tako je kod čistog poluprovodnika, rastojanje od E_F do E_c , i od E_F do E_v približno jednako. Kod poluprovodnika n tipa, rastojanje E_F do E_c je značajno manje nego rastojanje od E_F do E_v dok je kod poluprovodnika p -tipa rastojanje E_F do E_c je značajno veće nego rastojanje od E_F do E_v .

Pozicija *Fermi*-jevog nivoa na dijagramu energetske zone ima veoma značajnu ulogu u određivanju koncentracije slobodnih elektrona u provodnoj zoni i šupljina u valentnoj zoni, kao je ilustrovano slikom. *Work* funkcija Φ poluprovodnika se definiše kao energetsko rastojanje od *Fermi*-jevog nivoa do vakuuma, kako je prikazano na slici. Kako ne postoje energetska stanja na nivou E_F , *work* funkcija predstavlja srednju potrebnu energiju za oslobađanje elektrona iz poluprovodnika.

DIJAGRAM ENERGETSKIH ZONA PRI SPOLJAŠNJOJ POLARIZACIJI

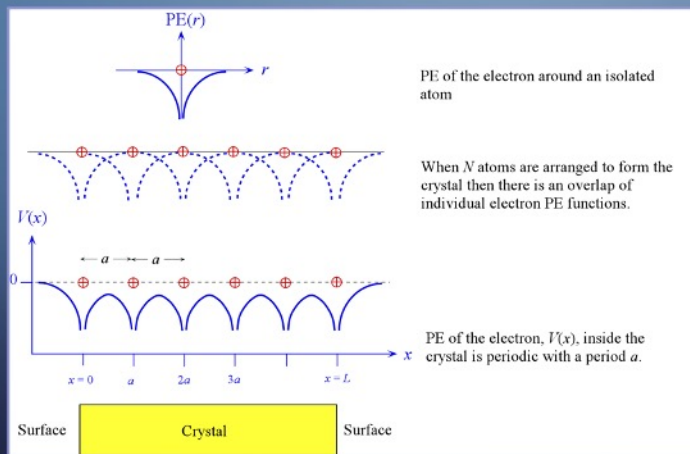


From: S.O. Kasap, *Optoelectronics and Photonics: Principles and Practices*, Second Edition, © 2013 Pearson Education, USA

Prilikom povezivanja poluprovodnika *n*-tipa na eksterni jednosmjerni naponski izvor V , dolazi do usmjerenog kretanja elektrona, kako je prikazano na slici. *Fermi*-jev nivo E_F je iznad *Fermi*-jevog nivoa za čisti poluprovodnik, bliže E_c . Potencijalna energija elektrona koji se kreće od kraja A poluprovodnika prema kraju B poluprovodnika, opada jer se on bliži pozitivnom terminalu baterije. Cjelokupna struktura energetske zone je iz tog razloga na slici nagnuta prema dolje.

Za poluprovodnik u mraku, bez spoljašnje polarizacije, E_F mora biti uniformno jer je $\Delta E_F = eV = 0$. Međutim, kada postoji električni rad, npr. kada se priključi baterija, E_F nije uniformno. Promjena energije *Fermi*-jevog nivoa ΔE_F je ekvivalentna električnom radu po elektronu eV . Slijedi da *Fermi*-jev nivo prati trend promjene potencijalne energije. Dakle, promjena *Fermi*-jevog nivoa od jednog do drugog kraja poluprovodnika $E_F(A) - E_F(B)$ je prosto jednaka energiji eV koja je potrebna za prenos elektrona duž poluprovodnika (od A do B). Koncentracija elektrona u poluprovodniku je uniformna, pa je $E_c - E_F$ konstantno od jednog kraja poluprovodnika prema drugom. Dijagram provodne zone, valentne zone i *Fermi*-jev nivo se „deformišu“ za isti iznos.

ELEKTRONI U POLUPROVODNIČKIM KRISTALIMA



$$\Psi_k(x) = U_k(x) \exp(jkx)$$

From: S.O. Kasap, *Optoelectronics and Photonics: Principles and Practices*, Second Edition, © 2013 Pearson Education, USA

Potencijalna energija elektrona u metalima je približno jednaka nuli. To znači da će elektron ostati u metalu, jer je potencijalna energija spoljašnje sredine veća. Model približno slobodnog elektrona kojim se opisuju mnoga svojstva metala ipak je približan i ne može se primijeniti na kristale jer ne uzima u obzir stvarne varijacije potencijalne energije elektrona u kristalu.

Potencijalna energija elektrona zavisi od njegove lokacije unutar kristala i periodična je u skladu sa pravilnim rasporedom atoma unutar kristala. Određivanje energije elektrona u kristalu podrazumijeva rješavanje *Schrodinger*-ove jednačine za periodičnu funkciju potencijalne energije u tri dimenzije. Na slici je prikazana hipotetička predstava jedno-dimenzionog kristala. Funkcija potencijalne energije $V(x)$ elektrona je periodična sa periodom a , koja odgovara periodi kristala.

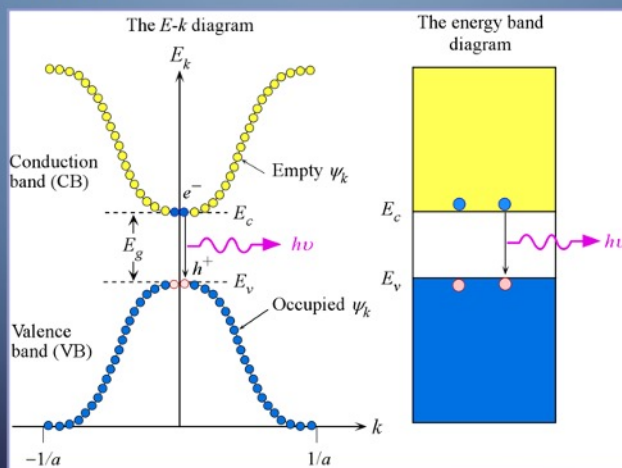
Pokazuje se da je talasna funkcija elektrona data relacijom:

$$\Psi_k(x) = U_k(x) \exp(jkx)$$

gdje je $U_k(x)$ periodična funkcija koja zavisi od $V(x)$ i ima istu periodu a kao i $V(x)$. Član $\exp(jkx)$ se odnosi na putujući talas čiji talasni vektor je $k=2\pi/\lambda$. Svaka talasna funkcija $\Psi_k(x)$ odgovara određenom talasnom vektoru elektrona k i predstavlja stanje sa energijom E_k . Zavisnost energije E_k od vektora k se ilustruje tzv. $E-k$

dijagramom.

E-K DIJAGRAM



From: S.O. Kasap, *Optoelectronics and Photonics: Principles and Practices*, Second Edition, © 2013 Pearson Education, USA

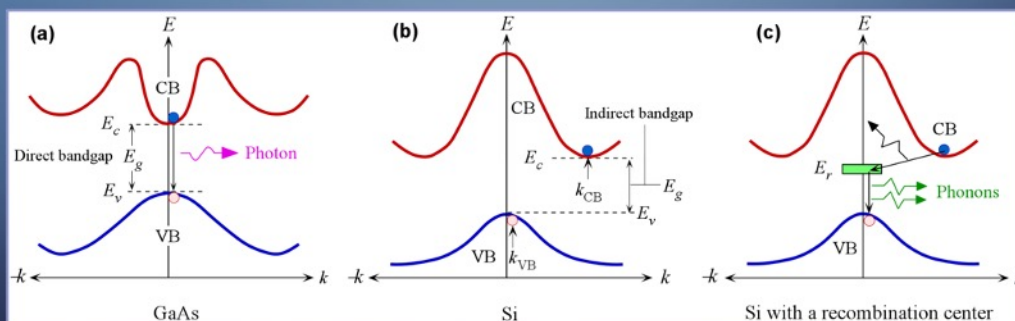
Na slici je prikazan tipičan primjer E - k dijagrama za *direct-bandgap* poluprovodnike za slučaj hipotetičkog jedno-dimenzionog kristala. E - k dijagram se sastoji od mnogo diskretnih tačaka od kojih svaka odgovara mogućem stanju, talasnoj funkciji $\Psi_k(x)$, koja može da postoji u kristalu. Tačke su toliko blizu da se E - k dijagram može aproksimirati kontinualnom krivom. U opsegu energija od E_v do E_c nema tačaka, nema rješenja *Schrodinger*-ove jednačine i odgovarajućih stanja $\Psi_k(x)$.

Stanja u donjem dijelu dijagrama se odnose na valentnu zonu jer odgovaraju talasnim funkcijama valentnih elektrona. Gornji dio dijagrama odgovara većim energijama i odnosi se na provodnu zonu. Na temperaturi od 0 K svi valentni elektroni popunjavaju stanja u donjem dijelu dijagrama.

Iznad apsolutne temperaturne nule, usljed termalne pobude, neki elektroni pri vrhu valentne zone mogu biti pobuđeni i preći na dno provodne zone. Prema E - k dijagramu, prikazanom na slici, kada dođe do rekombinacije elektrona i šupljine, elektron jednostavno pređe sa dna provodne zone na vrh valentne zone bez promjene svoje k vrijednosti. E - k dijagram prikazan na slici se odnosi na *direct-bandgap* poluprovodnike. Minimum provodne zone je iznad maksimuma valentne zone, pa može doći do direktne rekombinacije elektrona i šupljine. Kako je prikazano na slici, prilikom tranzicije elektrona sa dna provodne zone na vrh valentne zone, dolazi do emisije fotona.

Pojednostavljeni $E-k$ dijagram prikazan na slici odnosi se na na hipotetički jedno-dimenzioni kristal. Kod realnih kristala, atomi su raspoređeni u tri dimenzije sa odgovarajućom periodičnošću u pojedinim pravcima.

E-K DIJAGRAM ZA DIRECT-BANDGAP I INDIRECT-BANDGAP POLUPROVODNIKE



From: S.O. Kasap, *Optoelectronics and Photonics: Principles and Practices*, Second Edition, © 2013 Pearson Education, USA

E-k dijagram prikazan na prethodnom slajdu veoma podsjeća na E-k dijagram za GaAs prikazan na slici (a). Minimum provodne zone je iznad maksimuma valentne zone za istu k vrijednost. GaAs je dakle *direct-bandgap* poluprovodnik kod koga se parovi elektron-šupljina mogu direktno rekombinovati pri čemu se emituje foton. Većina uređaja koji emituju svjetlost se baziraju na *direct-bandgap* poluprovodnicima kako bi se iskoristila mogućnost direktne rekombinacije.

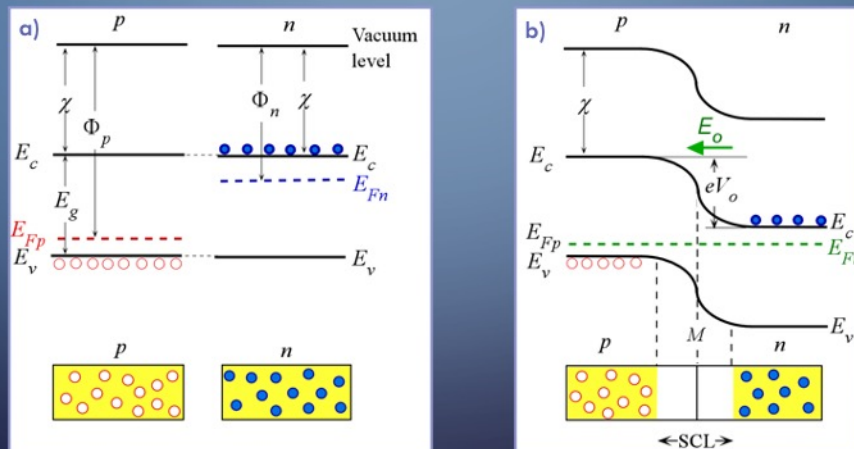
E-k dijagram za kristal silicijuma je ilustrovan slikom (b). Može se uočiti da minimum provodne zone nije iznad maksimuma valentne zone, već je pomjeren po k osi. Ovakvi kristali se označavaju kao *indirect-bandgap* poluprovodnici. Elektron sa dna provodne zone se ne može direktno rekombinovati sa šupljinom na vrhu valentne zone jer bi se njegov moment ($p = \hbar k$) morao promijeniti od vrijednosti koja odgovara k_{CB} na vrijednost koja odgovara k_{VB} , što prema zakonu o održanju momenta nije moguće. Rekombinacije se u ovom slučaju obavlja posredno, preko centra za rekombinaciju koji se nalazi na energetske nivou E_r , u energetske procjepu, slika (c). Centri za rekombinaciju mogu biti defekti kristala ili nečistoće. Elektron je najprije „uhvaćen“ od strane defekta kristalne rešetke ili nečistoće na energetske nivou E_r . Promjena energije i momenta elektrona u ovom procesu dovodi do vibracija kristalne rešetke. Kao što je svjetlost kvantizovana fotonima, vibracije kristalne rešetke se kvantizuju fononima. „Uhvaćeni“ elektron na energetske nivou E_r sada može da se

rekombinuje sa šupljinom na vrhu valentne zone. Tipično, tranzicija elektrona sa E_r do E_v podrazumijeva dalje vibracije kristalne rešetke.

Kod nekih *indirect-bandgap* poluprovodnika kao što je GaP, rekombinacija elektrona i šupljine u određenim rekombinacionim centrima rezultuje emisijom fotona.

Rekombinacioni centar E_r se u ovom slučaju realizuje dodavanjem nečistoća azota, GaP:N.

DIJAGRAM ENERGETSKIH ZONA ZA PN SPOJ



From: S.O. Kasap, *Optoelectronics and Photonics: Principles and Practices*, Second Edition, © 2013 Pearson Education, USA

Na slici (a) prikazani su poluprovodnici *p*-tipa i *n*-tipa od istog materijala (npr. Si) koji su međusobno izolovani. Nivo vakuuma, gdje je elektron slobodan i ima nultu potencijalnu energiju, je takođe prikazan i zajednički je za oba poluprovodnika. E_g i χ su svojstvo materijala i jednaki su za oba slučaja. *Fermi*-jev nivo E_{Fp} kod poluprovodnika *p*-tipa je blizak nivou E_v , dok je *Fermi*-jev nivo E_{Fn} kod poluprovodnika *n*-tipa blizak E_c . *Fermi*-jev nivo nije kontinualan jer su poluprovodnici međusobno izolovani.

Kada dođe do povezivanja ova dva poluprovodnika, odnosno, do formiranja *pn* spoja, *Fermi*-jev nivo mora biti jedinstven jer je u pitanju jedan materijal, slika (b). Bilo kakva promjena *Fermi*-jevog nivoa odgovara električnom radu koji je za slučaj otvorenog kola jednak nuli. Razmotrimo šta se dešava prilikom formiranja *pn* spoja. Daleko od samog spoja M, na *n*-strani razlika $E_c - E_{Fn}$ je ista kao i u slučaju izolovanog poluprovodnika *n*-tipa. Slično, razlika $E_{Fp} - E_v$ daleko od spoja M na *p*-strani je ista kao i u slučaju izolovanog poluprovodnika *p*-tipa. Širina energetske procjepa E_g mora biti konstantna. Kako bi se ispunili prethodno opisani zahtjevi, dijagram energetske zone se mora „saviti“ u blizini spoja M, slika (b).

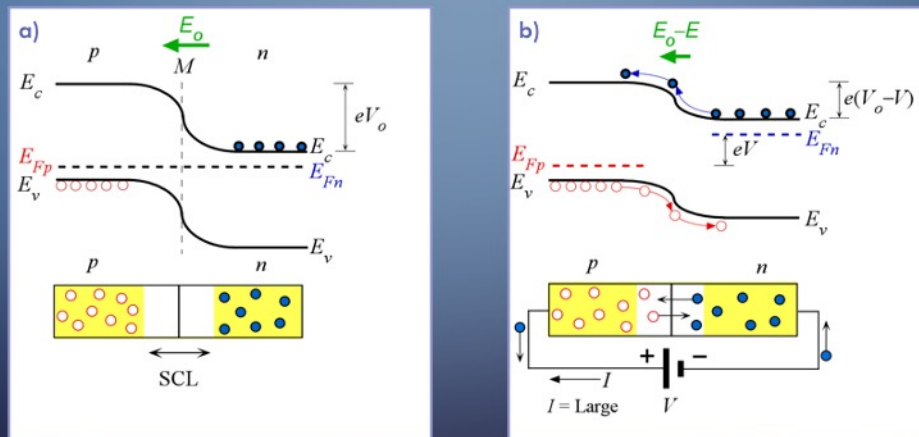
Po formiranju spoja, elektroni vrše difuziju sa *n*-strane na *p*-stranu i na taj način oblast u blizini spoja sa *n*-strane je „osiromašena“ elektronima. To znači da se E_c udaljava od E_{Fn} prema spoju M, slika (b). Šupljine vrše difuziju sa *p*-strane prema *n*-strani i na taj

način oblast u blizini spoja postaje „osiromašena“ šupljinama. To znači da se razlika $E_{Fp}-E_v$ prema spoju M povećava. Većina elektrona i šupljina se u blizini samog spoja rekombinuje što dovodi do formiranja SCL-a (*Space Charge Layer*). Ova oblast je „osiromašena“ nosiocima naelektrisanja i upravo savijanje zona E_c i E_v u okolini spoja M prikazuje ovo osiromašenje.

Elektron sa n -strane na nivou E_c mora da prevaziđe potencijalnu barijeru eV_0 kako bi prešao na nivo E_c na p -strani. Dakle, savijanje dijagrama energetskih zona u okolini samog spoja M oslikava postojanje ugrađenog električnog polja a samim tim i potencijalne barijere. Dalja difuzija elektrona iz provodne zone sa n -strane prema p -strani je spriječena potencijalnom barijerom, kao i difuzija šupljina sa p -strane prema n -strani. U SCL oblasti *Fermi*-jev nivo nije blizu ni E_c , ni E_v , u poređenju sa neutralnim dijelom poluprovodnika, što je posljedica manje koncentracije slobodnih nosilaca naelektrisanja u ovoj oblasti.

Stepen savijanja energetskih zona zavisi od razlike *work* funkcija $\Phi_p - \Phi_n$. Ova razlika odgovara potencijalnoj barijeri. Takođe se može uočiti da nivo vakuuma nije više uniforman.

DIJAGRAM ENERGETSKIH ZONA ZA PN SPOJ

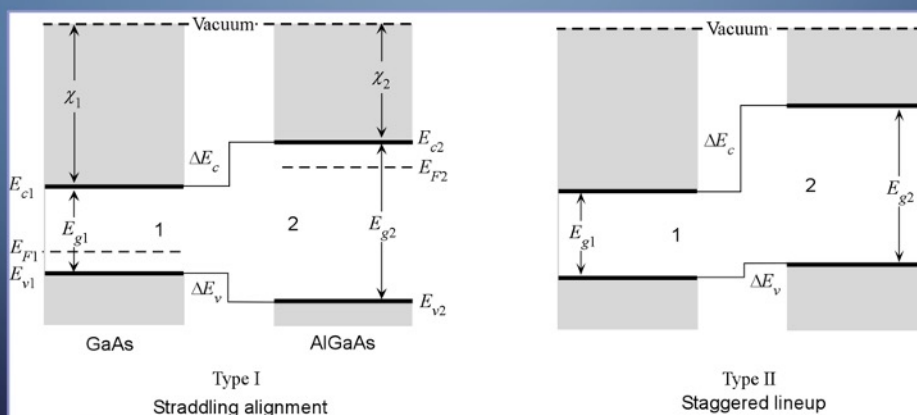


From: S.O. Kasap, *Optoelectronics and Photonics: Principles and Practices*, Second Edition, © 2013 Pearson Education, USA

Na slici (a) je prikazan dijagram energetske zone pn spoja u otvorenom kolu na bazi prethodne analize. Vakuum nivo je izostavljen jer nije od značaja za narednu analizu. Kada je pn spoj direktno polarisan, primijenjeni napon je u opoziciji sa ugrađenim potencijalom V_0 . Na slici (b) je prikazan efekat direktne polarizacije koji se odnosi na redukovanje potencijalne barijere sa vrijednosti eV_0 na vrijednost $e(V_0 - V)$. Elektroni sa n -strane na nivou E_c sada mogu prevazići potencijalnu barijeru i preći na p -stranu, prema pozitivnom terminalu baterije. Slično, šupljine sada mogu preći sa p -strane na n -stranu i dalje prema negativnom terminalu baterije. Dakle, uspostavlja se strujni tok u kolu.

Kako je zavisnost struje od napona eksponencijalna, malim promjenama napona direktne polarizacije V , odgovara značajna promjena struje I .

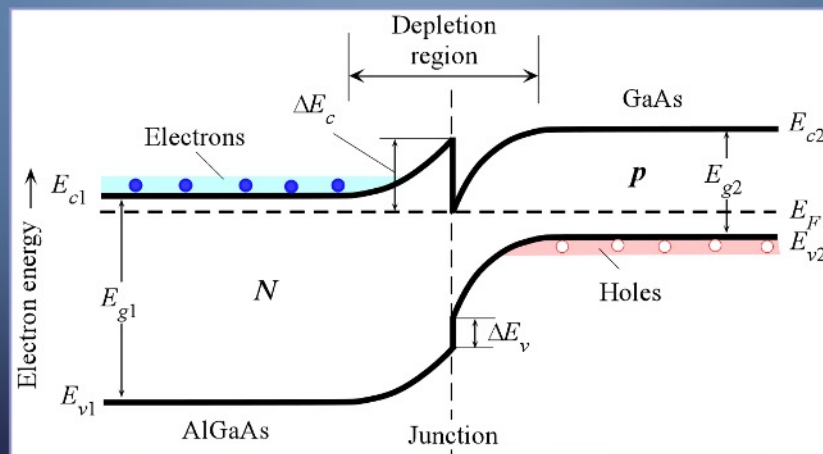
HETEROSPOJEVI



From: S.O. Kasap, *Optoelectronics and Photonics: Principles and Practices*, Second Edition, © 2013 Pearson Education, USA

pn -spoj čiji dijagram je prikazan na slajdu 13 je spoj istih kristala (Si) što znači da E_g ima konstantnu vrijednost. Ovakvi spojevi se označavaju kao homospojevi. Heterospoj je spoj dva različita poluprovodnika sa različitim energetske procjepima E_{g1} i E_{g2} . Iako se ove energije razlikuju, njihovo „poravnavanje“ je veoma važno. Ukoliko je razlika $\Delta E_g = E_{g2} - E_{g1}$, onda ovu razliku zauzima razlika $\Delta E_c = E_{c2} - E_{c1}$ provodnih zona i razlika $\Delta E_v = E_{v1} - E_{v2}$ valentnih zona. Energetski diskontinuiteti ΔE_c i ΔE_v se označavaju kao *band offset* i imaju značajnu ulogu u heterospojevima. Termini heterospoj i heterostruktura se često koriste ravnopravno, međutim heterostruktura se obično sastoji od više heterospojeva. Postoje dva osnovna tipa heterospojeva koji se označavaju kao Tip I i Tip II heterospojevi. Kod heterospojeva Tipa I, slika lijevo, materijal sa manjim energetske procjepom (GaAs) obezbjeđuje nižu energiju i za elektrone i za šupljine u heterospoju, u odnosu na AlGaAs. Heterospojevi Tipa I se najčešće i koriste u optoelektronici. Kod heterospoja Tipa II, slika desno, minimalne energije za elektrone i šupljine pripadaju različitim materijalima.

HETEROSPOJEVI

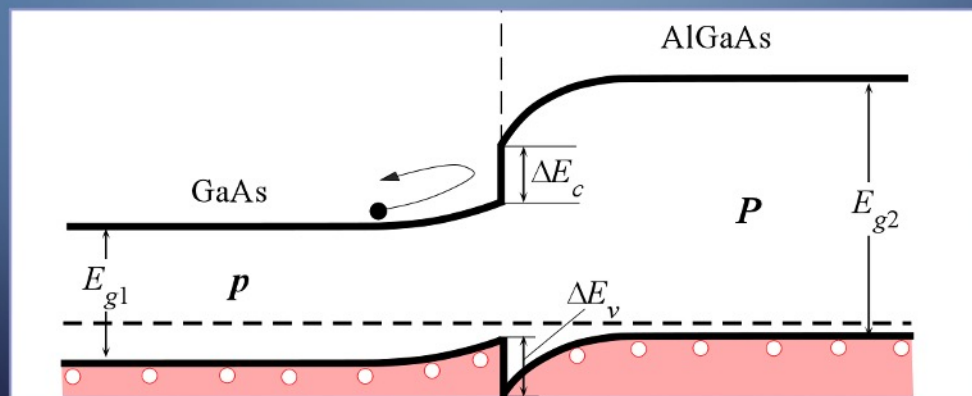


From: S.O. Kasap, *Optoelectronics and Photonics: Principles and Practices*, Second Edition, © 2013 Pearson Education, USA

Koncentracija primjesa u heterospoju se obično označava velikim slovima N i P ukoliko je u pitanju materijal sa širim energetske procjepom, dok se se kod materijala sa užim energetske procjepom označava malim slovima n i p . Ivični profil energetske zona za datu heterostrukturu je određen nivoom dopiranja, transportom nosilaca naelektrisanja i rekombinacijama u blizini spoja, kao i u slučaju jednostavnog pn -homospoja. Dijagram energetske zona heterospoja bez spoljašnje polarizacije podrazumijeva da *Fermi* nivo mora biti uniforman kao i da se razlika energija zabranjenih zona ΔE_g dijeli na energije ΔE_c i ΔE_v . Na slici je prikazan dijagram energetske zona Np heterospoja između AlGaAs poluprovodnika n -tipa i GaAs poluprovodnika p -tipa. Može se uočiti da je E_F uniformno. Na N -strani, daleko od samog spoja, je poluprovodnik n -tipa sa širokim energetske procjepom kod koga je E_F blizu E_c . Na p -strani, daleko od samog spoja, je poluprovodnik p -tipa sa užom zabranjenom zonom kod koga je E_F blizu E_v . U osiromašenoj oblasti, oko samog spoja, E_c i E_v se moraju saviti jer postoji interno električno polje. E_{c1} i E_{v1} se savijaju prema gore, dok se E_{c2} i E_{v2} savijaju prema dolje. Potrebno je povezati E_{v1} i E_{v2} uzimajući u obzir ΔE_v , slika. Slično, potrebno je povezati E_{c1} i E_{c2} vodeći računa i o ΔE_c . U ovom slučaju, vezu je moguće uspostaviti jedino na način prikazan na slici. Očigledno je da je potencijalna barijera za ubrizgavanje šupljina ($E_{v2}-E_{v1}$), od p prema N strani, veća nego potencijalna barijera $E_{c2}-E_{c1}$ za ubrizgavanje elektrona od N prema

p strani. Dakle, pri direktnoj polarizaciji struja dominantno potiče od ubrizgavanja elektrona od N prema p strani. ΔE_v povećava potencijalnu barijeru za šupljine, dok ΔE_c smanjuje potencijalnu barijeru za elektrone.

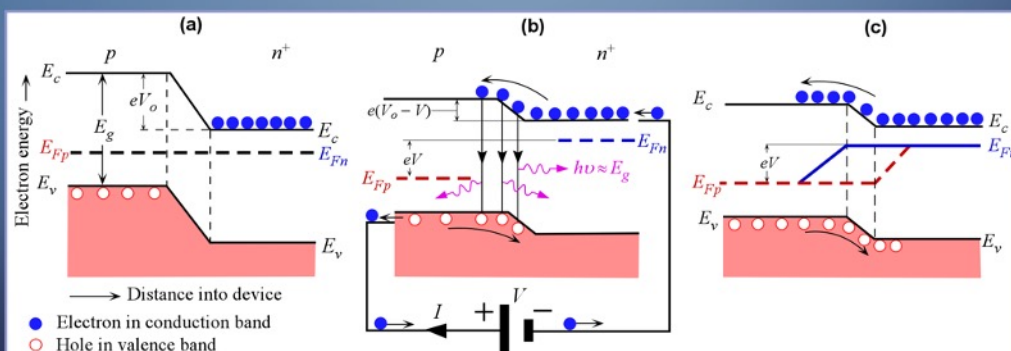
HETEROSPOJEVI



From: S.O. Kasap, *Optoelectronics and Photonics: Principles and Practices*, Second Edition, © 2013 Pearson Education, USA

Dijagram energetske zone za heterospoj pp -tipa prikazan je na slici. Princip skiciranja dijagrama je isti kao i u prethodnom slučaju. Potencijalna barijera za elektrone je uvećana za ΔE_c , dok šupljine mogu prelaziti (tunelovanjem) sa jedne na drugu stranu. Obje heterostrukture, i Np i pP , se intenzivno koriste za proizvodnju LED i poluprovodničkih laserskih dioda.

LED: OSNOVNI PRINCIPI



From: S.O. Kasap, *Optoelectronics and Photonics: Principles and Practices*, Second Edition, © 2013 Pearson Education, USA

LED (*Light-Emitting Diode*) je u osnovi *pn* dioda tipično napravljena od *direct-bandgap* poluprovodnika, npr. GaAs, kod koga rekombinacija elektrona i šupljine rezultuje emisijom fotona. Energija emitovanog fotona je približno jednaka energiji procjepa $h\nu \approx E_g$. Na slici (a) je prikazan dijagram energetske zone nepolarisanog pn^+ spoja, gdje je n -strana značajno više dopirana od p -strane. Može se uočiti da je *Fermi*-jev nivo uniforman. Osiromašena oblast pn^+ spoja se dominantno prostire prema p -strani. Postoji potencijalna barijera eV_0 od nivoa E_c na strani poluprovodnika n -tipa do E_c nivoa na strani poluprovodnika p -tipa, što znači da je $\Delta E_c = eV_0$, pri čemu je V_0 ugrađeni napon. Difuziju elektrona sa n -strane prema p -strani onemogućava potencijalna barijera.

Kada se dovede napon direktne polarizacije V , osiromašena oblast preuzima gotovo u potpunosti ovaj napon. Dolazi do redukovanja ugrađenog napona sa V_0 na $V_0 - V$, što omogućava elektronima da prelaze sa n -strane prema p -strani, kako je prikazano na slici (b). Prelazak šupljina sa p -strane prema n -strani je značajno manje izražen.

Rekombinacija elektrona sa šupljinama u osiromašenoj oblasti ili na p -strani rezultira spontanom emisijom fotona. Rekombinacija se primarno odigrava u oblasti prostornog tovara i na p -strani do rastojanja koje odgovara difuzionoj dužini L_e elektrona. Zona rekombinacije se često označava kao aktivna zona. Fenomen emisije svjetlosti prilikom EHP rekombinacije kao rezultat ubrizgavanja manjinskih nosilaca

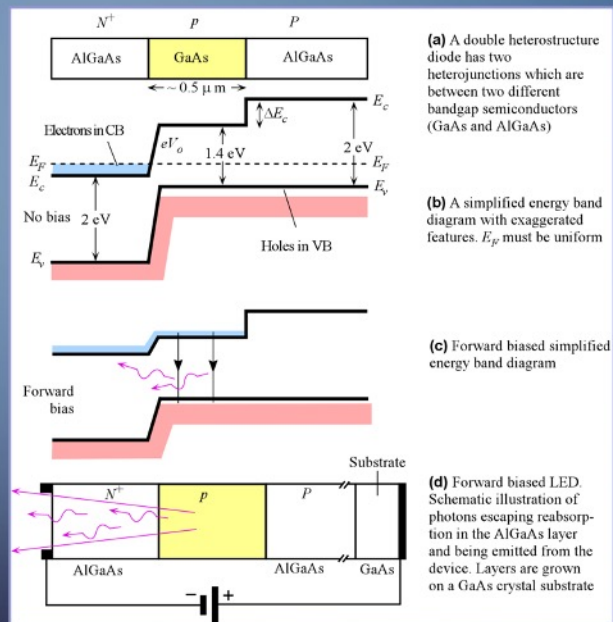
naelektrisanja, kao što je ovdje slučaj, označava se kao ***injection elektroluminescencija***.

Kako je proces rekombinacije elektrona i šupljina statističke prirode, pravac emitovanih fotona je u potpunosti nasumičan. Ovako slučajno emitovano zračenje se označava kao spontana emisija. Struktura LED-a treba da bude takva da emitovani fotoni ne budu reapsorbovani, već da mogu napustiti materijal. To bi značilo da *p*-strana treba da bude dovoljno uska ili da se koriste heterospojevi. Brzina rekombinacije zavisi od koncentracije nosilaca naelektrisanja, što znači da koncentracija treba da bude što veća u cilju postizanja većeg emitovanog svjetlosnog fluksa.

Može se uočiti, slika (b), da su nivoi E_{Fp} i E_{Fn} , pri naponu direktne polarizacije V , razdvojeni energijom eV . Razlika ova dva nivoa ΔE_F jednaka je električnom radu po elektronu eV . Takođe se može primijetiti da se ovi *Fermi*-jevi nivoi prostiru ka osiromašenoj oblasti, gdje sada postoje dva *Fermi* nivoa, slika (c). U pitanju su tzv. kvazi-*Fermi* nivoi. Pomoću kvazi-*Fermi* nivoa se može zaključiti o koncentraciji elektrona i šupljina u osiromašenoj oblasti i van nje. E_{Fn} se na *p*-strani udaljava od E_c što označava opadanje koncentracije slobodnih elektrona na *p*-strani, jer dolazi do njihove rekombinacije sa većinskim šupljinama. E_{Fn} dostiže E_{Fp} na rastojanju koje je približno jednako difuzionoj dužini ubrizganih elektrona. Oblast gdje su E_{Fn} i E_{Fp} poravnati predstavlja neutralnu *p-oblast*. Slično važi i za nivo E_{Fp} .

Jasno je da emisija fotona kod LED-a podrazumijeva direktnu rekombinaciju elektrona i šupljina. Elektron vrši tranziciju sa dna provodne zone na vrh valentne zone gdje postoji „prazno stanje“ - šupljina, prilikom čega se emituje foton. Iz opisanog razloga za proizvodnju LED-a se najčešće koriste *direct-bandgap* poluprovodnici. Međutim, postoje LED koje se baziraju na *indirect-bandgap* poluprovodnicima sa dodatkom odgovarajućih nečistoća. Primjer bi bila GaP:N dioda, gdje je nečistoća azot, koja je zapravo jeftina zelena LED koja se često koristi kao indikatorska lampica ili u sklopu displeja. Dodavanjem azota u GaP se formira tzv. rekombinacioni centar. Energija zračenja je u ovom slučaju manja od energije E_g što znači manju mogućnost reapsorpcije fotona u GaP podlozi, pogotovo ako su atomi azota ugrađeni samo u okviru rekombinacione oblasti, u blizini spoja.

LED BAZIRANE NA HETEROSPOJEVIMA



From: S.O. Kasap, *Optoelectronics and Photonics: Principles and Practices*, Second Edition, © 2013 Pearson Education, USA

LED bazirana na jednostavnom pn spoju ima mnoge nedostatke i nisku efikasnost. p -region treba da bude dovoljno uzak kako bi fotoni napustili poluprovodnik, a da prethodno ne dođe do njihove reapsorpcije.

Sa druge strane, LED bazirane na heterospojevima mogu imati izuzetno visoku efikasnost uz niz drugih prednosti. Većina savremenih LED su bazirane na heterospojevima (HD - *Heterostructure Device*).

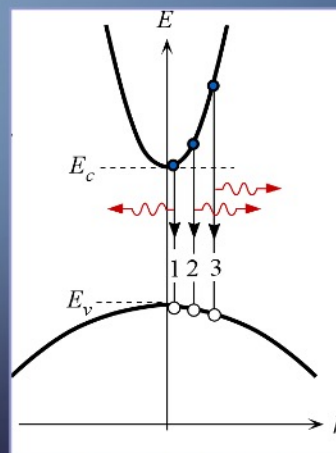
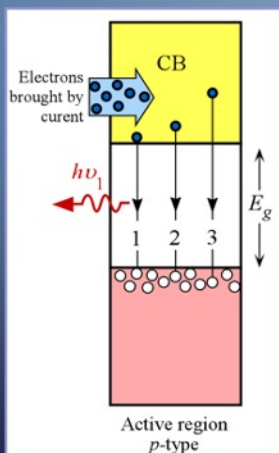
Na slici (a) je prikazan DH (*double-heterojunction*) uređaj baziran na dva heterospoja gdje odgovarajući materijali imaju različitu širinu energetskeg procjeka. U konkretnom primjeru, poluprovodnik AlGaAs karakteriše $E_g \approx 2$ eV, dok GaAs karakteriše $E_g \approx 1.4$ eV. Ova struktura sadrži N^+p spoj i pP spoj. p -oblast (GaAs) je veoma uska i slabo dopirana. Prikazani primjer sadrži strukture prikazane u poglavlju o heterospojevima (slajd 16 i 17).

Pojednostavljeni dijagram energetskeg zona bez spoljašnje polarizacije je prikazan na slici (b). *Fermi*-jev nivo je uniforman kroz čitavu strukturu. Postoji potencijalna energetska barijera eV_0 za elektrone iz N^+ -oblasti. Kako postoji razlika u širini energetskeg procjeka između p i P oblasti, postoji i razlika između nivoa provodnih zona ΔE_c . Ova barijera onemogućava prelaz elektrona iz p -oblasti u P -oblast.

Kada se primijeni direktna polarizacija, dolazi do redukovanja potencijalne barijere, kao i u slučaju jednostavnog pn homospoja. Na ovaj način, elektroni iz provodne zone

N^+ poluprovodnika mogu biti ubrizgani u p -oblast, slika (c). Ovi elektroni, međutim, ne mogu dalje prema P -oblasti jer im to onemogućava potencijalna barijera. Oni su, dakle, ograničeni na provodnu zonu p -GaAs-a. P -AlGaAs sloj se ponaša kao ograničavajući sloj jer onemogućava dalji prelazak elektrona iz p -GaAs sloja. Rekombinacija ubrizganih elektrona sa šupljinama u p -GaAs oblasti rezultira spontanom emisijom fotona. Kako je širina zabranjene zone kod AlGaAs veća nego kod GaAs, emitovani fotoni se neće reapsorbovati kada napuštaju aktivni region, slika (d). Kako fotoni neće biti reapsorbovani ni u P -AlGaAs sloju, može doći do njihove refleksije ukoliko se npr. postavi ogledalo na kraju ovog sloja. Na taj način bi se povećala ukupna efikasnost uređaja. Na osnovu prethodnog, može se zaključiti da je DH LED značajno efikasnija od LED bazirane na homospoju.

EMISIONI SPEKTAR



From: S.O. Kasap, *Optoelectronics and Photonics: Principles and Practices*, Second Edition, © 2013 Pearson Education, USA

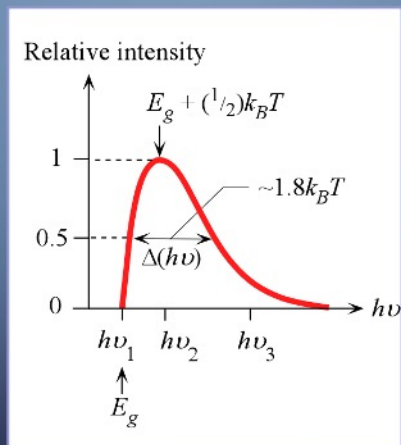
Energija emitovanog fotona nije prosto jednaka energiji energetskeg procjepa E_g jer je energija pojedinih elektrona u provodnoj zoni različita kao i energija šupljina u valentnoj zoni. E - k dijagram za tipični *direct-bandgap* poluprovodnik kao što je GaAs je prikazan na slici desno. Kako je koncentracija šupljina visoka (slika lijevo), može se smatrati da stopa rekombinacije primarno zavisi od koncentracije ubrizganih elektrona. Kada se elektron sa energetskeg nivoa E_c rekombinuje sa šupljinom na energetskeg nivou E_v (tranzicija 1 na slici), emituje se foton energije:

$$h\nu_1 = E_c - E_v = E_g$$

Kako nema mnogo elektrona i šupljina na samim ivicama provodne i valentne zone, ovakav tip rekombinacije se ne dešava često, pa je intenzitet svjetlosti koja odgovara tranziciji tipa 1 mali.

Prilikom tranzicije tipa 2, slika, emituje se foton veće energije $h\nu_2 > h\nu_1$. Tranzicije ovog tipa su češće u odnosu na tranzicije tipa 1. Slično, tranziciji tipa 3 odgovara emisija fotona još veće energije $h\nu_3 > h\nu_2$. U ovom slučaju elektron je prilično „visoko“ u provodnoj zoni. Kako je koncentracija elektrona ovdje manja, i tranzicije tipa 3 nisu česte kao tranzicije tipa 2. Kako je koncentracija elektrona koji imaju energiju koja je dovoljno blizu ivici provodne zone, ali ne na samoj ivici, najveća, najveći broj tranzicija će odgovarati tipu 2.

EMISIONI SPEKTAR

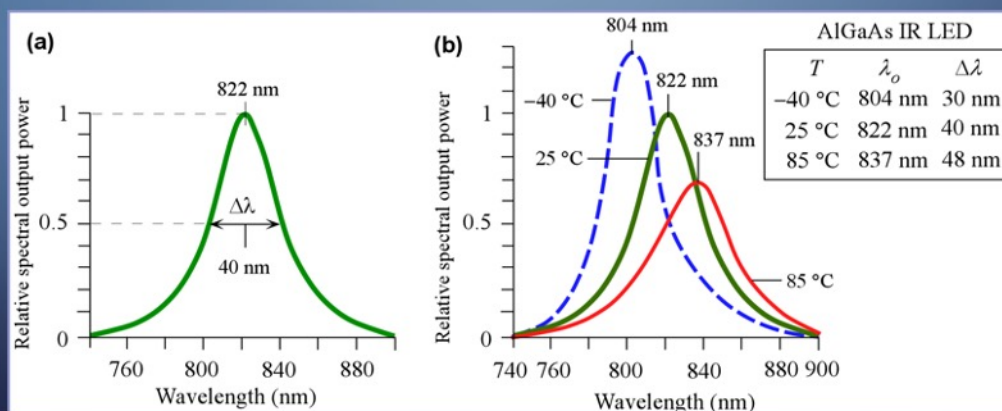


From: S.O. Kasap, *Optoelectronics and Photonics: Principles and Practices*, Second Edition, © 2013 Pearson Education, USA

Karakteristika relativnog intenziteta svjetlosti (u odnosu na maksimalnu vrijednost) u funkciji energije fotona je prikazana na slici i predstavlja veoma važnu karakteristiku LED-a. Na osnovu ove karakteristike može se doći i do karakteristike relativnog intenziteta svjetlosti u funkciji talasne dužine (ili frekvencije) svjetlosti. *Linewidth* $\Delta\lambda$ ($\Delta\nu$) izlaznog spektra se definiše kao opseg talasnih dužina (frekvencija) svjetlosti za koje relativni intenzitet svjetlosti iznosi preko 0.5, slika.

Eksperimentalno dobijeni izlazni spektar, odnosno, relativni intenzitet svjetlosti u funkciji talasne dužine LED-a ne zavisi samo od vrste poluprovodničkog materijala, koncentracije primjesa, već i od same strukture *pn*-spoja. Spektar prikazan na slici je idealizovan slučaj.

EMISIONI SPEKTAR



From: S.O. Kasap, *Optoelectronics and Photonics: Principles and Practices*, Second Edition, © 2013 Pearson Education, USA

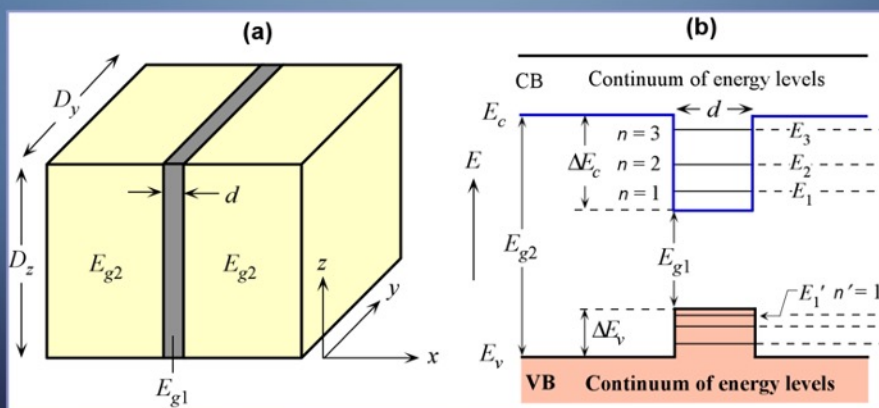
Na slici je prikazan tipični izlazni spektar za AlGaAs IR LED. Prikazani spektar ima značajno veći stepen simetrije nego prethodno prikazani idealizovan slučaj. Širina spektra je oko 40 nm. Sa promjenom temperature dolazi do promjene širine energetskeg procjepa E_g , prema relaciji:

$$E_g = E_{g0} - \frac{AT^2}{B + T}$$

gdje je E_{g0} širina energetskeg procjepa na temperaturi od 0 K, dok su A i B konstante specifične za određeni materijal.

Dakle, sa povećanjem temperature dolazi do opadanja E_g , odnosno do pomjeranja spektra u desnu stranu. *Linewidth* $\Delta\lambda$ se povećava sa povećanjem temperature jer su pri većim temperaturama elektroni šire distribuirani u provodnoj zoni.

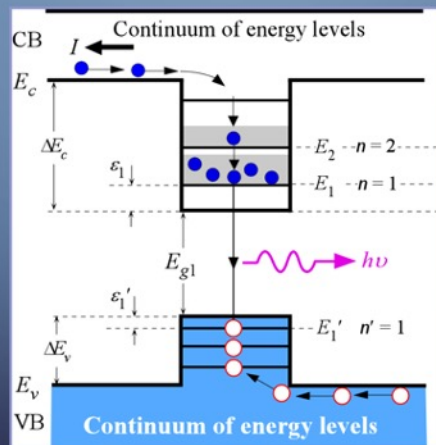
KVANTNI WELL-OVI



From: S.O. Kasap, *Optoelectronics and Photonics: Principles and Practices*, Second Edition, © 2013 Pearson Education, USA

Tipični *quantum well* (QW) uređaji sadrže jedan ultra-tanki poluprovodnik sa uskim energetske procjepom E_{g1} , između dva ograničavajuća (*confining*) poluprovodnika sa širim energetske procjepom E_{g2} , slika. Kako se razlikuju širine zabranjene zone, postojaće diskontinuitet u E_c i E_v nivoima, slika (b). Kako postoji potencijalna barijera ΔE_c , kretanje elektrona u pravcu x -ose je ograničeno. Širina prostora na koji je elektron ograničen (koja je jednaka debljini srednjeg sloja) je toliko mala da se može smatrati da je u ostala dva pravca elektron slobodan. Energija elektrona unutar kvantnog *well*-a je kvantizovana, kao i energija šupljina, slika.

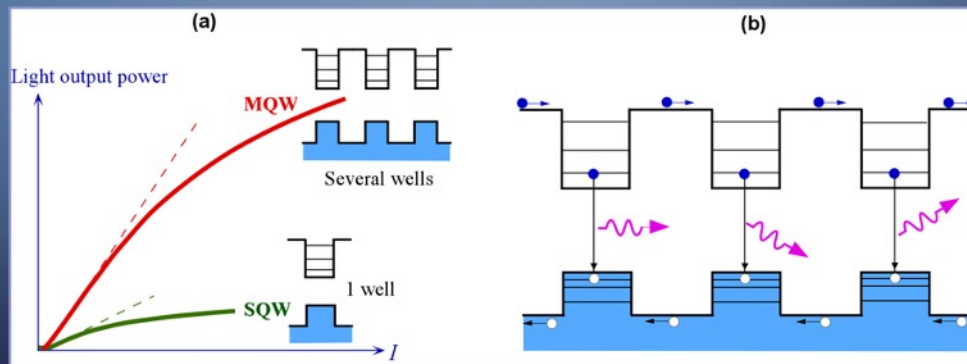
KVANTNI WELL-OVI



From: S.O. Kasap, *Optoelectronics and Photonics: Principles and Practices*, Second Edition, © 2013 Pearson Education, USA

Kako na nivou E_1 ima konačan broj energetske stanja, elektroni u provodnoj zoni neće imati široku distribuciju kao u slučaju klasičnih poluprovodničkih struktura. Elektron u kvantnom *well*-u značajno brže pronalazi stanje. Na taj način, veoma brzo se može postići značajna koncentracija elektrona u blizini E_1 . Slično se dešava sa šupljinama u blizini E'_1 u valentnoj zoni. Pri direktnoj polarizaciji, elektroni se ubrizgavaju u provodnu zonu E_{g1} -sloja, koji služi kao aktivni sloj. Elektroni veoma brzo popunjavaju veliki broj stanja u blizini E_1 , što znači da koncentracija elektrona u blizini E_1 naglo raste sa strujom. Slijedi da će se i radijacione tranzicije dešavati značajno češće za istu vrijednost struje u odnosu na tzv. *bulk* poluprovodnike. Kako je većina elektrona u blizini E_1 i većina šupljina u blizini E'_1 , opseg energija emitovanih fotona je uži nego u slučaju *bulk* uređaja. Gubitak energije dok elektron prelazi sa viših na niža stanja u okviru *well*-a je izražen kroz vibracije kristalne rešetke (emisiju fonona) i veoma je brz. Radijaciona tranzicija u QW-u mora ispuniti selekciono pravilo što znači da inicijalni i konačni kvantni broj n i n' moraju biti isti. Prilikom tranzicije iz stanja 1 u 1' ili iz 2 u 2' će se emitovati foton.

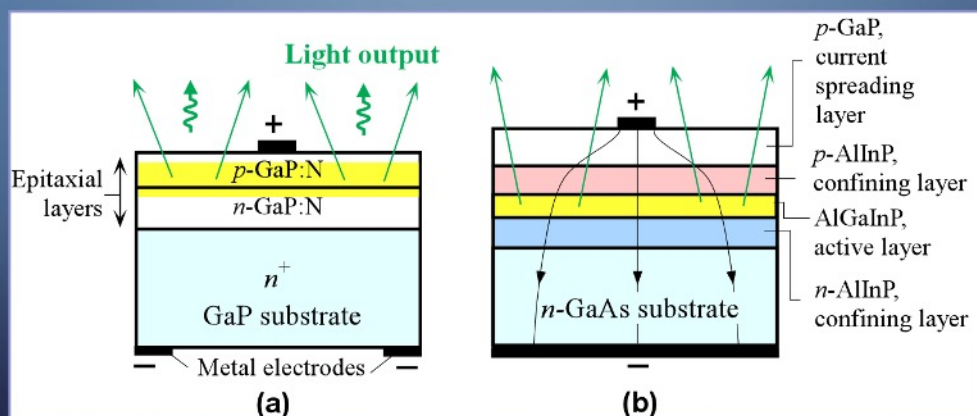
VIŠESTRUKI KVANTNI WELL-OVI



From: S.O. Kasap, *Optoelectronics and Photonics: Principles and Practices*, Second Edition, © 2013 Pearson Education, USA

Osnovni problem kod SQW (*single quantum well*) LED je taj što pri previše velikoj vrijednosti struje, može doći do „prelivanja“ well-a. Na ovaj način bi se prednosti koje ima ova struktura poništile. Emitovana svjetlost ne bi više bila proporcionalna ulaznoj struji, kako je prikazano na slici (a). Ovaj problem se rješava upotrebom MQW (*multiple quantum well*) gdje se elektroni raspoređuju u više kvantnih well-ova. Na ovaj način se postiže i veća efikasnost izvora svjetlosti. Savremene UV, ljubičaste i plave LED visokog intenziteta zračenja su često bazirane na MQW-u.

STRUKTURA LED-A

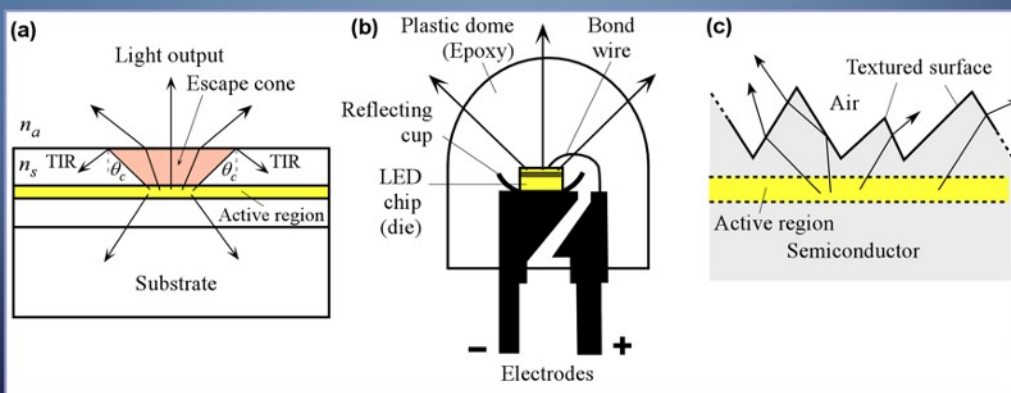


From: S.O. Kasap, *Optoelectronics and Photonics: Principles and Practices*, Second Edition, © 2013 Pearson Education, USA

Najjednostavnija struktura LED-a prikazana je na slici (a). Sastoji se od podloge n^+ tipa i dva epitaksijalna sloja n -tipa i p -tipa. Podloga je neka vrsta mehaničke potpore za pn spoj. p -sloj zapravo predstavlja površinu LED-a odakle se emituje svjetlost. Ovaj sloj je veoma tanak (reda nekoliko mikrona) kako bi fotoni napustili diodu, a da se prethodno ne reapsorbiraju. Kako bi se rekombinacija dominantno obavljala u p -sloju, n -sloj je jače dopiran. Fotoni koji se emituju prema n -strani budu reapsorbovani ili reflektovani od ivice podloge u zavisnosti od konkretne realizacije (debljine podloge i strukture).

Na slici (b) je prikazana struktura LED bazirane na heterospoju visokog intenziteta emitovane svjetlosti. Na podlozi n -tipa su najmanje četiri epitaksijalna sloja. Aktivni sloj je tanki AlGaInP koji je slabo dopiran. On se nalazi između ograničavajućih slojeva p -tipa i n -tipa AlInP prema pozitivnom i negativnom terminalu, respektivno. AlInP ima širu zabranjenu zonu u odnosu na AlGaInP pa ograničava nosioce naleketrisanja na aktivni sloj. Pri direktnoj polarizaciji p -AlInP ubrizgava šupljine, dok n -AlInP ubrizgava elektrone u aktivni sloj. Na vrhu je p -GaP sloj čija uloga je da onemogući radijacione rekombinacije ispod samog gornjeg kontakta odakle se fotoni ne mogu „izvući“.

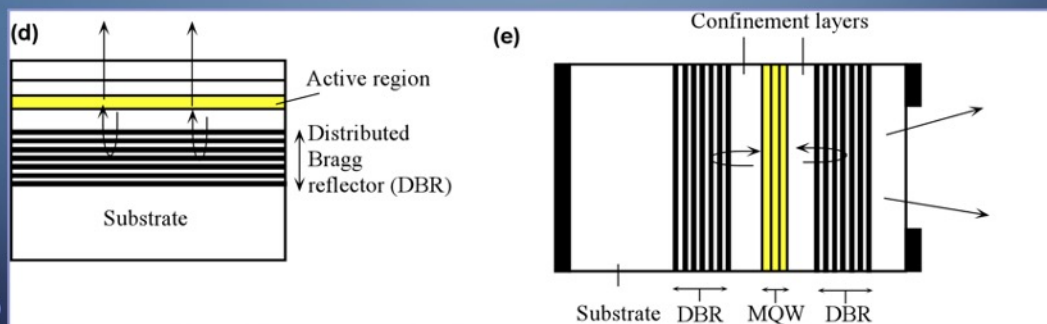
EKSTRAKCIJA SVJETLOSTI



From: S.O. Kasap, *Optoelectronics and Photonics: Principles and Practices*, Second Edition, © 2013 Pearson Education, USA

Svi fotoni koji dopiju do interfejsa pluprovodnik-vazduh neće biti u mogućnosti da napuste poluprovodnik zbog efekta totalne interne refleksije (TIR). Zraci čiji upadni ugao je iznad granične vrijednosti će se reflektovati nazad u poluprovodnik, slika (a). Za GaAs taj ugao je svega 17 stepeni. Moguće je oblikovati površinu diode (kao kupolu) na način da svjetlosni zraci udaraju u površinu pod uglom koji je manji od granične vrijednosti za totalnu refleksiju, što naravno povećava cijenu proizvodnje. Značajno praktičniji i jednostavniji način je upotreba providnog plastičnog medijuma (*epoxy*) koji ima veći indeks prelamanja od vazduha a oblikuje se kao kupola na samoj površini diode (gdje se emituje svjetlost), slika (b). Na slici (c) je prikazan još jedna pristup povećanju efikasnosti LED-a. Sama površina diode je takva da omogućava emitovanje svjetlosti nakon nekoliko refleksija.

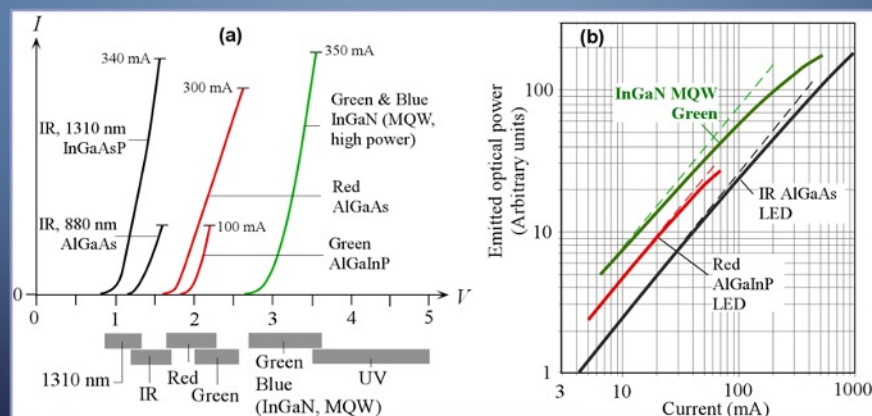
EKSTRAKCIJA SVJETLOSTI



From: S.O. Kasap, *Optoelectronics and Photonics: Principles and Practices*, Second Edition, © 2013 Pearson Education, USA

Stepen ekstrakcije fotona se može povećati i ukoliko se omogući refleksija zraka koji su usmjereni ka podlozi. Kod nekih dioda koje emituju svjetlost, kao što su DBR (*Distributed Bragg Reflector*) koriste se dielektrična ogledala ispod ograničavajućeg sloja (ispod aktivnog regiona) koja se ponašaju kao ogledala za svjetlost određene talasne dužine (koja odgovara talasnoj dužini svjetlosti koju emituje LED), slika (d). Dizajn baziran na rezonantnoj šupljini (*resonant cavity*) je prikazan na slici (e). Optičku rezonantnu šupljinu formiraju dva DBR-a. Ova šupljina je selektivno propustljiva za određene talasne dužine svjetlosti. Širina emitovanog spektra se na ovaj način sužava.

OSNOVNE KARAKTERISTIKE LED-A



From: S.O. Kasap, *Optoelectronics and Photonics: Principles and Practices*, Second Edition, © 2013 Pearson Education, USA

I - V karakteristike LED-a zavise od strukture samog uređaja i poluprovodničkog materijala. Zavisnost DC struje od napona je prikazana na slici (a). I - V karakteristika ne prati uvijek u potpunosti eksponencijalni model jednostavnog direktno polarisanog pn spoja. Većina savremenih LED su bazirane na heterospojevima. Struja naglo raste za uzak opseg napona, slika (a). Očigledno je da postoji određena vrijednost napona od koga struja naglo raste. Mnogi proizvođači navode *forward* napon V_F kome odgovara određena (značajna) vrijednost struje, a ne navode napon "praga". Na primjer, za AlGaInP LED $V_F=2.0$ V i $I=20$ mA, na 40 % maksimalne struje. V_F zavisi od materijala i strukture diode koja emituje svjetlost. Sa smanjenjem talasne dužine svjetlosti (povećanjem energije emitovanog fotona koja je blizu energije E_g aktivnog sloja), po pravilu se povećava napon V_F . Međutim, sama struktura LED-a ima značajan uticaj. MQW InGaN LED ima veću vrijednost napona V_F nego odgovarajuća AlGaInP LED bazirana na heterospoju (odgovarajući grafik je crvene boje). Na slici (b) prikazana je zavisnost izlazne optičke snage (P_O) u funkciji struje. Važi približno linearna zavisnost. Većim vrijednostima emitovane optičke snage dolazi do deformisanja karakteristike. U slučaju MQW zelene LED ovo odstupanje je najviše izraženo. Nelinearnost P_O - I karakteristike može dovesti do značajnih izobličenja kada je u pitanju analogna modulacija signala.

Primjer: Posmatra se LED sa naponom praga $V_{th} = E_g/e = 2 \text{ V}$ i otpornošću $R_s = 20 \text{ } \Omega$, tako da je strujno-naponska karakteristika linearna i data izrazom $V = V_{th} + IR_s$. Ukoliko kroz diodu protiče struja od 20 mA , ona emituje svjetlost optičke snage 4 mW , energije $h\nu = E_g$. Odrediti internu kvantnu efikasnost, eksternu kvantnu efikasnost, i efikasnost snage, pretpostavljajući da je efikasnost ekstrakcije $50 \text{ } \%$.

Interna kvantna efikasnost se definiše kao:

$$\eta_{int} = \frac{\text{broj fotona emitovan sa aktivnog regiona po sekundi}}{\text{broj elektrona ubrizganih u LED po sekundi}} = \frac{P_{int}/(h\nu)}{I/e}$$

gdje je P_{int} optička snaga svjetlosti emitovane sa aktivnog regiona LED-a.

Aktivni region idealne LED emituje jedan foton za svaki „ubrizgani“ elektron. Svaka naelektrisna kvantna čestica (elektron) produkuje jednu kvantnu česticu (foton). Dakle, idealna LED ima kvantnu efikasnost jednaku jedinici.

Efikasnost ekstrakcije svjetlosti se definiše kao

$$\eta_{\text{extraction}} = \frac{\text{broj fotona emitovan u slobodan prostor po sekundi}}{\text{broj fotona emitovan sa aktivnog regiona po sekundi}} \\ = \frac{P/(h\nu)}{P_{\text{int}}/(h\nu)}$$

gdje je P optička snaga svjetlosti emitovane u slobodni prostor.

Kod idealne LED, svi generisani fotoni se oslobađaju u slobodni prostor. Takva LED ima jediničnu efikasnost ekstrakcije. Međutim, kod realne LED, to nije slučaj. Neki fotoni će ostati „zarobljeni“ u poluprovodniku. Postoji nekoliko uzroka ove pojave. Na primjer, svjetlost emitovana sa aktivnog regiona može biti reapsorbovana u podlogu LED-a, ukoliko podloga apsorbuje svjetlost iste talasne dužine. Metalni kontakti takođe mogu apsorbovati svjetlost. Osim toga, može doći i do totalne refleksije unutar poluprovodnika.

Eksterna kvantna efikasnost se definiše kao:

$$\eta_{ext} = \frac{\text{broj fotona emitovan u slobodan prostor po sekundi}}{\text{broj elektrona ubrizganih u LED po sekundi}} = \frac{\frac{P}{(h\nu)}}{\frac{I}{e}}$$
$$= \frac{P_{int}/(h\nu)}{I/e} \frac{P/(h\nu)}{P_{int}/(h\nu)} = \eta_{int} \eta_{extraction}$$

Efikasnost ekstrakcije može da bude značajno ograničenje performansi LED-a.

Efikasnost snage se definiše kao:

$$\eta_{power} = \frac{P}{IV}$$

Primjer: Posmatra se LED sa naponom praga $V_{th} = E_g/e = 2 \text{ V}$ i otpornošću $R_s = 20 \text{ } \Omega$, tako da je strujno-naponska karakteristika linearna i data izrazom $V = V_{th} + IR_s$. Ukoliko kroz diodu protiče struja od 20 mA , ona emituje svjetlost optičke snage 4 mW , energije $h\nu = E_g$. Odrediti internu kvantnu efikasnost, eksternu kvantnu efikasnost, i efikasnost snage, pretpostavljajući da je efikasnost ekstrakcije $50 \text{ } \%$.

Primjer: Posmatra se LED sa naponom praga $V_{th} = E_g/e = 2 \text{ V}$ i otpornošću $R_s = 20 \text{ } \Omega$, tako da je strujno-naponska karakteristika linearna i data izrazom $V = V_{th} + IR_s$. Ukoliko kroz diodu protiče struja od 20 mA, ona emituje svjetlost optičke snage 4 mW, energije $h\nu = E_g$. Odrediti internu kvantnu efikasnost, eksternu kvantnu efikasnost, i efikasnost snage, pretpostavljajući da je efikasnost ekstrakcije 50 %.

$$\eta_{extraction} = \frac{P/(h\nu)}{P_{int}/(h\nu)} = 0.5 \Rightarrow P_{int} = 2P = 8 \text{ mW}$$

Primjer: Posmatra se LED sa naponom praga $V_{th} = E_g/e = 2 \text{ V}$ i otpornošću $R_s = 20 \text{ } \Omega$, tako da je strujno-naponska karakteristika linearna i data izrazom $V = V_{th} + IR_s$. Ukoliko kroz diodu protiče struja od 20 mA, ona emituje svjetlost optičke snage 4 mW, energije $h\nu = E_g$. Odrediti internu kvantnu efikasnost, eksternu kvantnu efikasnost, i efikasnost snage, pretpostavljajući da je efikasnost ekstrakcije 50 %.

$$\eta_{\text{extraction}} = \frac{P/(h\nu)}{P_{\text{int}}/(h\nu)} = 0.5 \Rightarrow P_{\text{int}} = 2P = 8 \text{ mW}$$

$$\eta_{\text{int}} = \frac{P_{\text{int}}/(h\nu)}{I/e} = \frac{P_{\text{int}}}{IV_{th}} = 0.2$$

Primjer: Posmatra se LED sa naponom praga $V_{th} = E_g/e = 2 \text{ V}$ i otpornošću $R_s = 20 \text{ } \Omega$, tako da je strujno-naponska karakteristika linearna i data izrazom $V = V_{th} + IR_s$. Ukoliko kroz diodu protiče struja od 20 mA, ona emituje svjetlost optičke snage 4 mW, energije $h\nu = E_g$. Odrediti internu kvantnu efikasnost, eksternu kvantnu efikasnost, i efikasnost snage, pretpostavljajući da je efikasnost ekstrakcije 50 %.

$$\eta_{\text{extraction}} = \frac{P/(h\nu)}{P_{\text{int}}/(h\nu)} = 0.5 \Rightarrow P_{\text{int}} = 2P = 8 \text{ mW}$$

$$\eta_{\text{int}} = \frac{P_{\text{int}}/(h\nu)}{I/e} = \frac{P_{\text{int}}}{IV_{th}} = 0.2$$

$$\eta_{\text{ext}} = \frac{\frac{P}{(h\nu)}}{\frac{I}{e}} = \frac{P}{IV_{th}} = 0.1$$

Primjer: Posmatra se LED sa naponom praga $V_{th} = E_g/e = 2 \text{ V}$ i otpornošću $R_s = 20 \text{ } \Omega$, tako da je strujno-naponska karakteristika linearna i data izrazom $V = V_{th} + IR_s$. Ukoliko kroz diodu protiče struja od 20 mA, ona emituje svjetlost optičke snage 4 mW, energije $h\nu = E_g$. Odrediti internu kvantnu efikasnost, eksternu kvantnu efikasnost, i efikasnost snage, pretpostavljajući da je efikasnost ekstrakcije 50 %.

$$\eta_{extraction} = \frac{P/(h\nu)}{P_{int}/(h\nu)} = 0.5 \Rightarrow P_{int} = 2P = 8 \text{ mW}$$

$$\eta_{int} = \frac{P_{int}/(h\nu)}{I/e} = \frac{P_{int}}{IV_{th}} = 0.2$$

$$\eta_{ext} = \frac{\frac{P}{(h\nu)}}{\frac{I}{e}} = \frac{P}{IV_{th}} = 0.1$$

$$\eta_{power} = \frac{P}{IV} = \frac{P}{I(IR_s + V_{th})} = 0.0833$$

LITERATURA

- S. O. Kasap, *Optoelectronics and Photonics*, Pearson Education Limited, 2013