

OPTIČKI PREDAJNICI I PRIJEMNICI

Andrija Kunarac, dipl.inž

1. UVOD

Svetlosni izvori su viđeni kao aktivne komponente u optičkim komunikacionim sistemima. Osnovna funkcija je konverzija električne energije u optičku energiju. Postoje tri tipa svetlosnih izvora:

- široko-pojasni izvori sa kontinualnim spektrom (lampe);
- monohromatske, nekoherentne svetlosne izvore – LED;
- monohromatske, koherentne izvore – lasere.

Ranije (1965-1970), glavni svetlosni izvor je bio He-Ne gasni laser sa visokom izlaznom snagom za kompenzaciju visokog slabljenja ranijih optičkih vlakana. Danas, sa velikim smanjenjem slabljenja, razvoj poluprovodničke tehnologije nas je doveo do drugih svetlosnih izvora (laser i LED).

Zahtevi za svetlosnim izvorima za optičke komunikacije u telekom i informatičkim mrežama su potpuno doveli do upotrebe LED i laser-a. Ovi zahtevi su:

- veličina i fizički dizajn bi trebali biti sposobni za prenos svetlosti kroz optičko vlakno;
- emitovana svetlost mora imati talasnu dužinu koja odgovara najnižem slabljenju i disperziji vlakna. Dalje, talasna dužina svetlosti mora odgovarati maksimalnoj osetljivosti detektora;
- dioda mora omogućiti modulaciju preko šireg opsega talasnih dužina, opsega od govornih frekvencija do desetina GHz;
- dioda moraju preneti glavni deo emitovane snage vlaknu tako da uprkos gubitcima u vlaknu, konektorima, splajsevima itd. dovoljna snaga dođe do detektora na drugom kraju sistema;
- dioda moraju imati vrlo uzanu spektralnu širinu zbog smanjenja disperzije u vlaknu;
- dioda moraju imati konstantnu optičku izlaznu snagu, nezavisnu od temperature ambijenta;
- dioda moraju biti relativno jeftine.

Prvi optički sistemi uključuju svetlosne izvore za talasne dužine oko 850nm, jer su kombinacije materijala u prvim laserskim diodama bile takve da su radile na ovoj talasnoj dužini. Vlakna su bila multimodna, tipa step indeksa prelamanja, a daljine prenosa su bile relativno kratke. U današnjim telekomunikacionim sistemima, laseri su talasne dužine 1300-1550nm i vlakna su monomodna takođe step indeksa prelamanja.

Svetlosni detektori predstavljaju elemente koji konvertuju svetlosne signale u električne, a u osnovi su takođe poluprovodnički elementi na bazi silicijuma.

Foto osetljivi silicijumski poluprovodnički element u obliku p-n spoja sa inverznom polarizacijom predstavlja fotodiodu. Kada se svetlost određene talasne dužine usmeri na p-n spoj poluprovodnika, formiraju se parovi elektrona i šupljina koji se kreću kroz spoj pod dejstvom polja koje se stvara preko ispražnjene zone. Kao rezultat javlja se strujni tok u spoljnjem kolu koji je srazmeran intenzitetu svetlosti usmerene na spoj. Dioda ima mali temperaturni koeficijent, a

vreme uspostavljanja je reda ispod mikro sekunde. Vreme uspostavljanja i brzina su zavisni od oblika i količine dopiranja spoja.

Svi silicijumski svetlosni detektori sastoje se od fotodiodnog spoja i pojačavača. Kod komercijalnih dioda struja je reda ispod mikro ampera pa do desetine mikro ampera, a sa dodatkom pojačavača na čipu postiže relativno nisku cenu.

Poluprovodnička tehnologija koristi samo nekoliko materijala za supstrate na kojima su aktivni uređaji napravljeni. To su Si, GaAs, Ge i InP. Drugi supstrati su takođe raspoloživi, ali ili su skupi (>100\$), ili imaju visoku koncentraciju defekata, ili ih ima u jako malim veličinama (nekoliko milimetara). Kao rezultat gore navedenog, izvor materijala za detektore je ograničen. Svaka posebna oblast primene ima svoju specifičnost u pogledu izbora materijala koji se koristi.

Nove oblasti se šire gotovo dnevno. Nije moguće opisati sve zone primene koje sadrže ili će uskoro sadržati neke oblike laserske diode. Telekomunikaciona industrija je bila i još je najmoćnija vodeća snaga iza istraživanja i razvoja. Za vreme 1980. godine, telekomunikacije su se naglo promenile zamenom bakarnih kablova i tradicionalne elektronike sa optičkim vlaknima i laserskim diodama. Optičko vlakno ima karakteristike koje su najbolje za prenos talasnih dužina oko 1310nm i 1550nm. Ovo vodi razvoju laserskih dioda i LED za ove talasne dužine. Nosilac sa ovom frekvencijom (oko 2×10^{14} Hz) daje enormne mogućnosti kapaciteta modulacije. Ako se koristi monomodno vlakno, današnji telekomunikacioni sistemi mogu preneti 2,4Gbit/s, a sistemi za 10Gbit/s su već počeli da se testiraju. 2,4Gbit/s su ekvivalentni sa skoro 32000 simultanih telefonskih razgovora po paru vlakana. Međutim, još uvek dominira prodaja lasera za kratke talasne dužine (650-850nm). Najviše se koriste u digitalnoj audio tehnologiji, bolje poznatoj kao CD. Ova tehnologija se takođe koristi za digitalne video signale. Za komunikacije na velikoj razdaljini se koriste fotoni sa talasnom dužinom od 1,55 μ m ili 1,3 μ m budući da su gubici usled transmisije u optičkom vlaknu vrlo mali na ovim talasnim dužinama. Prema tome potreban je detektor za reagovanje na ove energije. Čisti GaAs ne može da reaguje na ove energije fotona jer je njegova granica talasna dužina $\sim 0,8\mu$ m.

Među složenim poluprovodnicima, legure od InGaAs, InGaAsP, GaAsSb, HgCdTe mogu se podesiti da reaguju na ove energije. Energetski procep detektora mora biti niži od energije fotona tako da koeficijent apsorpcije bude značajan. Najčešći materijal koji se koristi za komunikacije na velikim razdaljinama je $In_{0,53}Ga_{0,47}As$. Takođe, u legurama složenih poluprovodnika koristi se kao primesa i Ge. Ovaj detektor se koristi kao avalanš fotodetektor za poboljšanje pojačanja uređaja.

U lokalnim mrežama (LANs) gde optički signal ima propagaciju oko kilometra emitori na bazi GaAs mogu biti korišćeni. Ovi uređaji emituju na $\sim 0,8\mu$ m i mnogo su jeftiniji od uređaja koji emituju na 1,55 μ m ili 1,3 μ m. Složeni poluprovodnički detektori koji se koriste za komunikacije na velikim razdaljinama mogu se takođe koristiti i za lokalne mreže, ali ovde je Si sasvim dobar materijal.

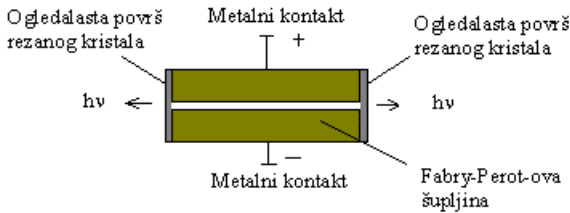
2. LASERSKE DIODE

Prva laserska dioda bazirana na poluprovodničkoj tehnologiji je prikazana 1962. godine. Najveći razvoji u laserskoj tehnologiji su primarno zavisili od dva faktora: sposobnost novih tehnologija da proizvedu bolje, manje i jeftinije poluprovodničke lasere i broj oblasti primene.

Razvoj u poluprovodničkoj tehnologiji nije bio ništa manje dramatičan i rezultovao je manjim, ali kompleksnijim komponentama. Bilo je moguće razviti laserske diode za duže i kraće talasne dužine, veće izlazne snage, bolje kontrolisanu optičku radijaciju i duže vreme života. U skladu sa ovim razvojem širio se i broj primena. Laserske diode su vrlo kompaktne, visoko efikasne za masovnu proizvodnju.

2.1. Laserska struktura prostog lasera

Za optimizaciju performansi laserske diode za što je moguće šire primene, različite strukture su bile razvijane. Najprostija laserska dioda je nazvana Fabry-Perot-ov laser. Fabry-Perot je ime optičke šupljine tj. uređenje ogledala koje daje povratnu spregu u laserskom oscilatoru. Ogledala su dobijena rezanjem kristalnih površina oba kraja. Razlika u indeksu prelamanja između vazduha i poluprovodnika izaziva delimičnu refleksiju koja omogućava nekom delu radijacije da izađe napolje iz lasera, a nekom delu da bude reflektovan. Ovi prosti laseri često daju nelinearnu izlaznu snagu.



Slika 1 Prostiji laserski dizajn. Ovaj tip lasera poznat kao Fabry-Perot-ov laser ima samo p-n spoj. Iz ovog razloga je nazvan homospojni laser.

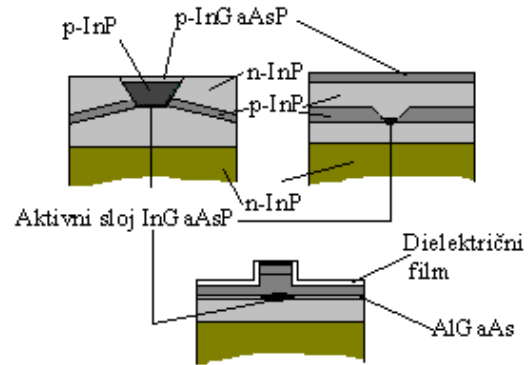
2.2. Laser sa heterostrukturou

Heterostruktura znači da je p-n spoj napravljen od nekoliko slojeva sa različitim energetskim procepima. Promena u energetskim procepima utiče na indeks prelamanja i kretanje nosilaca. Dizajniranjem p-n spoja tako da sadrži tanke (<0,5µm) slojeve sa niskim energetskim procepom okružene sa slojevima sa višim energetskim procepom, nosioci i optička radijacija su bolje ograničeni u transverzalnom pravcu. Ovo daje nižu struju praga i bolju stabilnost moda.

Za dobijanje istih prednosti takođe u lateralnom pravcu moramo širiti laserski materijal u nekoliko koraka sa uzorkovanjem i nagrizanjem između. Zajednički metod je prvo rast heterostrukture. Tada posle jednog nagrizanja dalje sav materijal osim oštre ivice će postati laserska šupljina. Posle toga novi materijal sa različitim sastavom ponovo raste na strani ivica. Ovaj materijal je izabran da ima širi energetski procep od aktivnog sloja u p-n spoju. Sada imamo laser sa aktivnim slojem okruženim materijalom sa većim

procepom u oba pravca. Ovo daje dobru kontrolu preko nosilaca i generisane optičke radijacije.

Slika 2 pokazuje profile tri tipa modernih laserskih struktura. Prva (gore levo) je obična B-H struktura opisana iznad. Gore desno je "v-brazda" laser. Treći laser je "ivični laser". Svi gornji laseri mogu se koristiti sa prostom Fabry-Perot-ovom šupljinom koja daje multimodno ponašanje spektra tj. laserske oscilacije mnogih frekvencija u isto vreme. Ako želimo monomodni spektar, koji je potreban za najveći broj primena, moramo napraviti optičku šupljinu kao mrežu i to su tzv. "laseri sa raspodeljenom povratnom spregom" (DBF laser).



Slika 2 Heterospojne laserske diode. Gore levo i desno: dva različita tipa BH laserske diode-jedna planarna i druga ne planarna. Dole: ivična laserska dioda.

3. LED

Druga važna komponenta za fiber optičke komunikacije je LED. LED se razlikuje od laserske diode to što LED nije stimulirana emisija. LED ima nekoliko nedostataka u poređenju sa laserskom diodom:

- niža snaga koja ulazi u vlakno;
- relativno mala sposobnost modulacije;
- širi optički spektar.

Ovi nedostaci utiču da je LED mnogo manje atraktivna od laserske diode. Međutim, LED ima mnogo prednosti u odnosu na lasersku diodu i u mnogim situacijama može doprineti izboru LED u odnosu na lasersku diodu:

- prostija izrada;
- jeftinija;
- niža osetljivost na temperaturu.

Ove prednosti i nedostaci znače da se laserska dioda uglavnom koristi za komunikacije na velikim udaljenostima, dok se LED primarno koristi u LAN i TV monitoring sistemima. Jednostavnost LED čini je vrlo atraktivnim uređajem za displej i primene u komunikaciji. Laserska dioda se koristi tamo gde je potrebna vrlo velika brzina modulacije ~5GHz ili gde je potreban čist optički spektralni izlaz. Spektralna širina optičkog izlaza LED je reda $k_B T$ tj. pretvoreno u talasne dužine od 300-400Å na sobnoj temperaturi. Iako je ovo velika vrednost, LED proizvodi jednu boju za ljudsko oko. Prema tome LED može biti korišćena vrlo efikasno u kolor displejima. Važna skorašnja

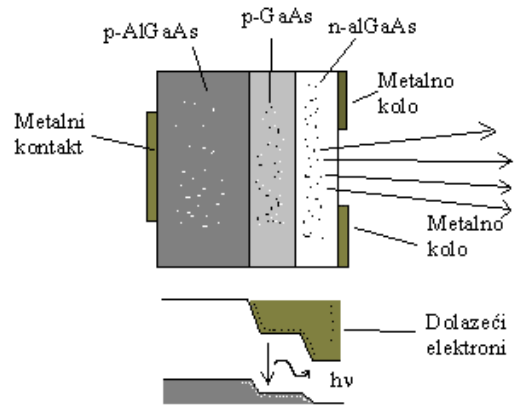
primena LED je u izvodima svetala u automobilima, primena koja bi trebalo da LED načini vrlo važnim komercijalnim uređajem. Osnova LED je p-n spoj koji je direktno polarisan da ubacuje elektrone i šupljine na p i n stranu respektivno. Injektovano manjinsko naelektrisanje rekombinuje se sa većinskim naelektrisanjem u osiromašenoj ili neutralnoj oblasti. U poluprovodnicima sa direktnim procepom, ova rekombinacija dovodi do emisije svetlosti pošto radijativna rekombinacija dominira u visoko kvalitetnim materijalima. U materijalima sa indirektnim procepom, sposobnost emisije svetlosti je sasvim mala i češća rekombinacija je ne-radijativna tj. generiše toplotu pre nego svetlost. Uređaji koji emituju svetlost su jedna klasa uređaja koja je dala pokretačku snagu za kompoznu poluprovodničku industriju. Pošto je Si materijal sa indirektnim procepom, radijativna rekombinacija je vrlo slaba, ovaj materijal, koji dominira svim drugim oblastima elektronike ima mnogo nedostataka kad dolazi do emisije svetlosti. Skoro svi optoelektronski svetlosni izvori zavise od epitaksijalnog kristalnog rasta gde tanki aktivni sloj (nekoliko mikrona) raste na supstratu (koji je ~200µm). Dostupnost visoko kvalitetnih supstrata je ekstremno važna u epitaksijalnoj tehnologiji. Ako rešetka supstrata nije usaglašena sa aktivnim slojem uređaja, aktivni sloj može imati dislokacije u druge defekte. Ovo može ozbiljno pokvariti performanse uređaja. Važni supstrati koji su raspoloživi za tehnologiju emisije svetlosti su GaAs i InP. Nekoliko poluprovodnika i njihovih legura mogu se usaglasiti sa ovim supstratima. Konstanta rešetke legure je opterećena obično konstantama rešetke posebnih komponenti tj. konstanta rešetke legure je:

$$a_{all} = xa_A + (1 - x)a_B$$

gde je a_A i a_B konstante rešetke A i B. Važni poluprovodnički materijali korišćeni u optoelektronici su legure Ga_xAl_{1-x} čija je rešetka usaglašena vrlo dobro sa GaAs supstratom; $In_{0,53}Ga_{0,47}As$ i $In_{0,52}Al_{0,48}As$ čije su rešetke usaglašene sa InP; InGaAsP koji je četvorni materijal čiji sastav se može podesiti da se usaglasiti sa InP i može emitovati na 1,55µm; GaAsP koji ima dostupan širok opseg energetskog procepa. Pouzdan SiC LED se nalazi u slobodnoj prodaji iako samo nekoliko snabdevača se može susresti sa tehnološkim izazovom. Važno je imati na umu da neke legure kao GaAlAs i GaAsP postaju materijali sa indirektnim procepom u izvesnim sastavima. Za efikasnu emisiju svetlosti, moramo raditi u oblasti direktnog procepa. Međutim, sa izvesnim nečistoćama možemo dobiti svetlosnu emisiju i u materijalu sa indirektnim procepom. Neki materijali sa indirektnim procepom mogu, međutim, imati podnošljiv radijativni koeficijent korisnog dejstva ako se dopiraju sa izvesnim nečistoćama. Nečistoće kreiraju nivoe u energetskom procepu i apsorpcija fotona je dozvoljena kretanjem elektrona preko ovih nivoe. Apsorpciona i emisiona brzina su manje od onih sa direktnim procepom. GaAsP legura je jedan poluprovodnik u kojem su nivoe nečistoća široko korišćeni za proizvodnju LED. Međutim, pošto je efikasnost svetlosne emisije siromašna, nije bilo moguće koristiti ove nivoe nečistoća za proizvodnju laserske diode.

3.1. LED sa dvostrukom heterostrukturom

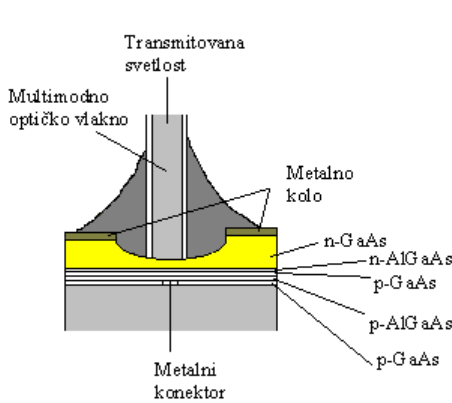
Struktura LED je prikazana na slici 3. LED se sastoji od p-sloja GaAs između p-sloja AlGaAs i n-sloja AlGaAs. Kad se primeni napon, elektroni se kreću od n-sloja u p-sloj GaAs gde oni postaju manjinski nosioci. Ovi manjinski nosioci difunduju od granične površine i rekombinuju se sa šupljinama. Za vreme rekombinacije, energija u formi fotona se emituje. Energija (frekvencija) ovih fotona odgovara energiji energetskog procepa GaAs p-sloja. Elektroni su sprečeni da difunduju u AlGaAs p-sloj potencijalnom barijerom između dva p-sloja. Pošto se elektroluminescencija samo dešava u tankim GaAs slojevima, dobra interna kvantna efikasnost i visoka gustina snopa su dobijeni. Svetlost je emitovana bez početka reapsorpcije u AlGaAs sloju, jer je energetski procep u ovom sloju mnogo veći od energije emitovane svetlosti i energetskog procepa GaAs. LED sa DH strukturom su uobičajene kad se ne zahteva koherentna svetlost, ali visoka efikasnost da. Nedostatak je da je deo svetlosti koji ulazi u vlakno relativno mali.



Slika 3 Dvostruki heterospoj (DH) LED. Gornja ilustracija pokazuje različite slojeve. Donja pokazuje energetski dijagram LED.

3.2. Burrus LED sa emitujućom ivicom

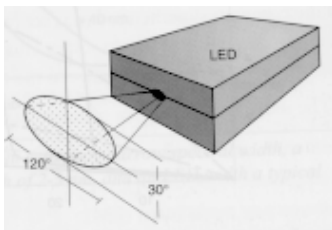
Slika 4 pokazuje Burrus LED sa konektovanim vlaknom. Nagriženi kanal u n-sloju GaAs može se potpuno videti. Dalje nagrižanje skoro ulazi u n-sloj preko male površine (kanal), apsorpcija svetlosti je smanjena u ovom sloju, dok ostatak n-sloja omogućava relativno jaku struju kroz diodu. LED na slici ispod je bila napravljena za talasne dužine opsega 800-900nm. Interna apsorpcija je minimizirana zahvaljujući velikom energetskom procepu u slojevima susednim aktivnoj zoni. Zadnji reflektujućii sloj SiO₂ daje jako veliku direktnu radijaciju. Širina kanala odgovara prečniku vlakna za dobijanje najboljih mogućih sprega svetlosti u vlakno. Optimalno sprezanje je dobijeno kad radijativna površina odgovara površini svetlovoda vlakna.



Slika 4 Burrus-ov tip diode sa nagriženim kanalom za minimizaciju apsorpcije u n-sloju GaAs.

3.3. LED sa emitujućom ivicom

U ovoj LED, korišćena tehnika transparentnije slojeva je kombinovana sa vrlo tankim aktivnim slojem (50-100µm). Svetlost generisana u ovom drugom po redu sloju je razasuta direktno u transparentni sloj, smanjujući samoapsorpciju. Transparentni sloj funkcioniše kao talasovod, pa je svetlosni konus sa uglom 30° u odnosu na vertikalnu površ i oko 120° u odnosu na horizontalnu ravan (slika 5). Jedan kraj površine je pokriven reflektujućim slojem, što znači da je skoro sva radijacija usmerena u jednom pravcu. Korišćenjem transparentnih talasovoda, 4-7 puta više svetlosti može biti ubačeno u optičko vlakno sa malom numeričkom aperturom (NA).



Slika 5 LED sa emitujućom ivicom.

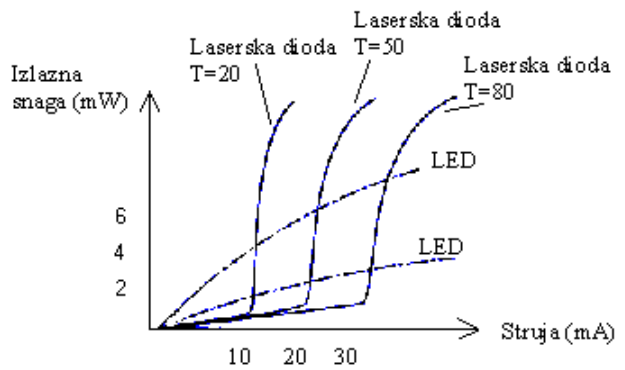
4. KARAKTERISTIKE LED I LASERSKE DIODE

4.1. Koeficijent iskorišćenja LED

Nedostatak optičkog pojačanja kroz stimulisanu emisiju znači da koeficijent iskorišćenja LED je potpuno zavisian od koliko mnogo elektrona su generisani pobuđeni fotoni. Kvantna efikasnost od oko 50% može se dobiti za homospojni LED. Ako se koristi heterospojna LED, koeficijent iskorišćenja je 60-80%.

4.2. Izlazna snaga

Najveću razliku između laserske diode i LED (slika 6) možemo uočiti posmatranjem I-P dijagrama za obe komponente. Laserska dioda ima isti tip krive kao LED do tačke (napona praga) kada struja izazove lasersku diodu da emituje. Posle ove tačke (stimulisana emisija), izlazna snaga laserske diode raste oštrije i više linearno. LED, koja je bazirana na spontanoj emisiji, nema tačku napona praga.



Slika 6 Dijagram iznad pokazuje relaciju između struje i izlazne snage. Laserska dioda funkcioniše kao odgovarajući LED do tačke napona praga.

4.3. Radijaciona lepeza

Radijacione lepeze za lasersku diodu i LED (slika 7) su dosta različite. Radijacija lasera ima više direktnu lepezu, dok radijacija LED ima skoro kružnu.



Slika 7 Različiti radijacioni uglovi između LED i laserske diode.

4.3. Spektralna širina laserske diode i LED

Spektralna širina lasera i LED je širina optičkog spektra. Optički spektar sastoji se od nosioca koji u ovom slučaju ima frekvenciju oko 10¹⁴Hz. Drugo, ako su LED i laserska dioda modulirane, bočni opsezi će se pojaviti na obe strane nosioca samo za neke predajnike. Frekvencijska čistoća signala laserske diode je bolja nego LED.

Uzimajući relaciju između frekvencije i talasne dužine $f=c/\lambda$, dobijamo relaciju:

$$\Delta f=(c/\lambda^2)\Delta\lambda$$

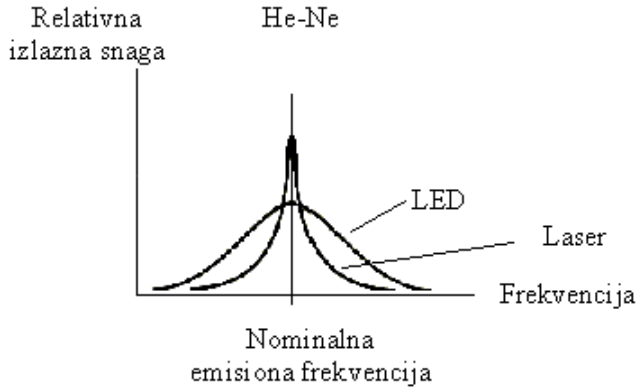
Vidimo da je širina laserskog spektra mnogo šira od električno-modulirane širine opsega od nekoliko GHz. Ovo objašnjava da bočni opsezi nisu direktno uticajni na optički spektar.

Spektralna čistoća ili širina linije emitovane radijacije je važna karakteristika optičkih uređaja. Važnost spektralne čistoće emitovane svetlosti zavisi od primene. Ako se LED koristi u displejnim uređajima, spektralna čistoća nije bitna. Međutim, u primenama za optičke komunikacije spektralna čistoća je vrlo važna. Svetlosni impulsi različitih talasnih dužina putuju kroz optičko vlakno različitim brzinom. Prema tome signal dobija distorziju ako optički snop ima veće širenje talasne dužine. Emisioni spektar je bitno određen

proizvodom $(\hbar\omega - E_g)^{\frac{1}{2}} f^e(E^e) f^h(E^h)$. Ovo je konvolucioni proizvod verovatnoća zauzetosti elektrona i šupljina. Pri niskoj injekciji, ova širina je reda $k_B T$. Pri visokoj injekciji ova širina je:

$$\Delta E \sim \frac{n}{N_c} k_B T$$

gde je N_c efektivna gustina stanja. Za komunikaciju na velikim daljinama, izlaz LED nije adekvatan pa se laserska dioda mora koristiti.



Slika 8 Optički spektar gasnog lasera sa ekstremno uskom spektralnom širinom, multimodna laserska dioda sa spektralnom širinom 2-5nm i LED sa tipičnom spektralnom širinom više od 40nm.

5. MODULACIJA

Najprostija, i danas najviše zastupljena, modulacija je samo prekidanje svetlosti u zavisnosti od jedinice ili nule. Ova modulacija je nazvana impulsna kodna modulacija tj. IKM. Druge vrste modulacije su: amplitudna, frekvencijska i fazna modulacija (slika 9)



Slika 9 Različiti tipovi modulacije korišćeni u prenosu informacija.

5.1. Spoljašnji efekti modulacije

Za modulaciju lasera na velikim brzinama, laser mora biti polarisan za što je moguće veći izlaz fotona. Ovo zahteva vrlo veliku struju u direktno polarisanoj diodi. Ako laser počne da se greje, skoro sve performanse se degradiraju. Prema tome, regulisanje grejanja lasera je kritična tehnološka komponenta svakog visoko brzog predajnika. Međutim, postoji granica koliko mnogo toplote se može odvesti sa lasera. Granice struje na kojim laser može biti polarisan mogu ograničavati visoko brzi odziv lasera.

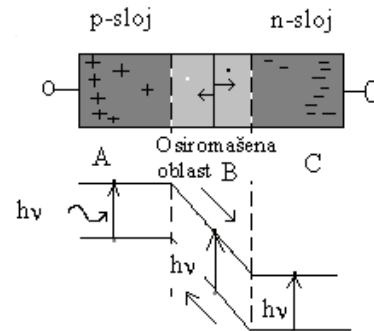
Važno ograničenje polarizacije lasera pri velikim strujama zavisi od katastrofičnog otkaza laserske strukture. Ovo je važno za vreme života i pouzdanost lasera. Pri visokoj struji, oštećenje se može desiti u laserskoj površini koja može smanjiti reflektivnost R pa gubitak šupljine raste. Ovo menja struju napona praga i smanjuje izlaz fotona. Eventualno se može desiti i otkaz. Prema tome, potreba za visokim performansama lasera je u suprotnosti sa vremenom života lasera.

6. OPTIČKI DETEKTORI

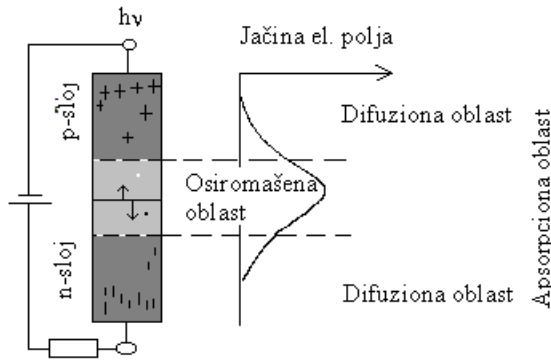
6.1. Fotodioda p-n tipa

Fotodioda koja sadrži samo p-n spoj predstavlja najprostiji tip fotodiode i kao takav se najmanje koristi. Slika 10 pokazuje p-n fotodiodu. Kao što možemo videti na ilustraciji, fotodioda ima samo p-n spoj. Kad se dioda priključi na negativan napon, električno polje pravi osiromašenu oblast u oblasti spoja. Nosioci naelektrisanja će prema tome napustiti oblast spoja i napraviti vrlo veliku otpornost.

Upadni fotoni sa energijom većom od energije energetskog procepa će kreirati parove elektron-šupljina. Parovi mogu biti formirani u tri različite oblasti p-n diode. Na slici 10, ove tri oblasti su označene sa A, B i C. U oblasti A, upadni fotoni kreiraju slobodne elektrone i šupljine. Pošto je električno polje napravljeno inverznim naponom, elektroni će sporije driftovati prema osiromašenoj oblasti i preko nje, kreirajući tok naelektrisanja. Elektroni će preći osiromašenu oblast ako je polje manje od difuzione dužine osiromašene oblasti. Difuziona dužina je definisana kao razdaljina koju pređu manjinski nosioci pre nego što se rekombinuju. Drift preko A i C oblasti je spor pa proizvođači fotodiode teže za konstrukcijom sa minimalnom detekcijom u ovim oblastima. Ako, međutim, fotoni kreiraju parove elektron-šupljina u osiromašenoj oblasti B, kreirani elektroni će driftovati brže prema n-oblasti, a šupljine prema p-oblasti. Ova brzina kretanja zavisi od veličine električnog polja u ovoj oblasti. Tok nosioca naelektrisanja kreira električnu struju. Difuzioni procesi u oblastima A i C su relativno spori. Primenjujući vrlo lako dopiranu oblast između p i n oblasti nazvanu sopstvena oblast i pravljenjem p-sloja tankog i virtuelno transparentnog, proizvodnja parova elektron-šupljina može biti ograničena skoro isključivo na osiromašenu oblast B. Rezultujuća konstrukcija nazvana PIN dioda je sa mnogo većim koeficijentom iskorišćenja od proste p-n diode.



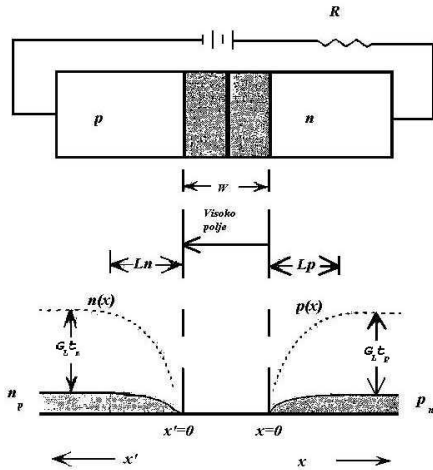
Slika 10 Upadni foton može izazvati produkciju parova elektron-šupljina u tri različite oblasti u p-n diodi. Međutim, brza detekcija se dešava samo u B tj. osiromašenoj oblasti.



Slika 11 Šema koja opisuje jačinu polja u p-n diodi.

Slika 12 prikazuje p-n diodu sa osiromašenom oblasti širine W . Fotostruja koja proističe iz apsorbovanih fotona u osiromašenoj oblasti je prema tome:

$$\frac{1}{\tau_n} = \frac{1}{\tau_r} + \frac{1}{\tau_{nr}}$$



Slika 12 Šema p-n diode i koncentracije manjinskih nosilaca u odsustvu i prisustvu svetlosti.

gde je A površina poprečnog preseka diode. Usled elektrona i šupljina koje deluju u I_{L1} i kreću se pod dejstvom velikog električnog polja odziv je vrlo brz i ova komponenta struje je nazvana brza fotostruja. Na fizičkoj podlozi možemo očekivati da šupljine generisane unutar dužine L_p (difuziona dužina) od osiromašene oblasti će biti sposobne da uđu u osiromašenu oblast gde će ih električno polje prebaciti na p-stranu. Slično, elektroni generisani unutar dužine L_n od $x'=0$ osiromašene oblasti će takođe sačinjavati ovu struju. Prema tome fotostruja bi trebala biti sačinjena od svih nosilaca u oblasti $(W+L_n+L_p)$. Koristićemo diodnu teoriju i aproksimacije da dobijemo fotostruju. Poći ćemo od jednačine kontinuiteta i pretpostavke da su parovi elektron-šupljina generisani uniformno u G_L . Jednačina kontinuiteta za šupljine u n-oblasti je:

$$D_p \frac{\partial^2 \delta p_n}{\partial x^2} - \frac{\delta p_n}{\tau_p} + G_L = 0$$

$$\delta p_n = p(x) - p_n$$

gde su D_p -difuzioni koeficijent šupljina a τ_p -vreme rekombinacije šupljina. Granični uslovi su:

$$\delta p(x \rightarrow 0) = G_L \tau_p$$

$$\delta p(x = 0) = p_n \left[\exp \frac{eV}{k_B T} - 1 \right]$$

Rešenje jednačine kontinuiteta je dato kao zbir rešenja homogene i partikularne jednačine. Homogena jednačina za $G_L=0$ ima oblik

$$\frac{d^2 \delta p_n'}{dx^2} - \frac{\delta p_n'}{L_p^2} = 0$$

sa rešenjem za dugačku diodu:

$$\delta p_n' = A \exp \left(- \frac{x}{L_p} \right)$$

Partikularna jednačina ima oblik:

$$\frac{\delta p_n''}{L_n^2} = \frac{G_L}{D_p} \text{ ili } \delta p_n'' = G_L \tau_p$$

Rešenje je prema tome zbir rešenja homogene i partikularne jednačine.

$$\delta p_n = A \exp \left(- \frac{x}{L_p} \right) + G_L \tau_p$$

Koristeći granične uslove dobijamo vrednost za konstantu A . Ovo daje na kraju konačno rešenje za viših šupljina u neutralnoj n oblasti:

$$\delta p(x) = \left[p_n \left(\exp \left(\frac{eV}{k_B T} - 1 \right) \right) - G_L \tau_p \right] \exp \left(- \frac{x}{L_p} \right) + G_L \tau_p$$

Ako je dioda postavljena u kolo tako da je napon na njenim krajevima 0 tada je

$$\delta p(x) = G_L \tau_p \left[1 - \exp \left(- \frac{x}{L_p} \right) \right]$$

tako da je struja šupljina, određena nosiocima apsorbovanim u neutralnoj n-oblasti:

$$I_{pL} = AeD_p \frac{d\delta p}{dx} \Big|_{x=0} = eG_L L_p A$$

Struja elektrona može biti izračunata na sličan način tako da je ukupna struja određena nosiocima u neutralnoj oblasti i osiromašenoj oblasti:

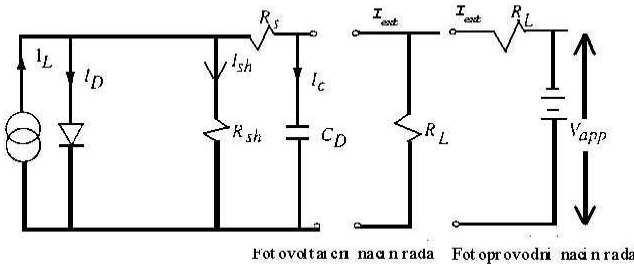
$$I_L = I_{nL} + I_{pL} + I_{L1} = eG_L (L_p + L_n + W) A$$

Optički predajnici i prijemnici

Ukupna struja u diodi uključenoj u kolo je zbir struje u odsustvu svetlosti i struje generisane pod uticajem svetlosti. Uopšte, ako je napon na diodi V struja je:

$$I = I_L + I_0 \left[1 - \exp\left(\frac{e(V + R_S I)}{mk_B T}\right) \right]$$

Gde je R_S diodna seriska otpornost, m faktor idealnosti a V napon na diodi.



Slika 13 Ekvivalentno kolo fotodiode. Unutrašnje karakteristike uređaja su predstavljene šant otpornikom R_{sh} i kapacitivnošću C_D . R je serijska otpornost diode.

6.1.1. Primena u solarnim ćelijama

Važna primena p-n diode je konverzija optičke energije u električnu energiju kao u solarnoj ćeliji. Solarna ćelija radi bez spoljašnjeg dovoda i sama koristi optičku energiju za generisanje napona i struje. Za izračunavanje važnih parametara solarne ćelije razmatramo slučaj diode u otvorenom kolu tako da je struja I jednaka nuli. Ovo daje

$$I = 0 = I_L - I_0 \left[\exp\left(\frac{eV_{oc}}{mk_B T}\right) - 1 \right]$$

gde je V_{oc} napon na diodi i poznat kao napon otvorenog kola. Za ovaj napon dobijamo

$$V_{oc} = \frac{mk_B T}{e} \ln\left(1 + \frac{I_L}{I_0}\right)$$

Za visoke optičke intenzitete napon otvorenog kola može da se približi energetskom procepu poluprovodnika. U slučaju Si solarnih ćelija vrednost V_{oc} je oko 0,7eV. Drugi ograničavajući faktor u solarnoj ćeliji je kada je izlaz kratko spojen, tj. $R=0$ i $V=0$. Struja kratkog spoja je tada:

$$I = I_{sc} = I_L$$

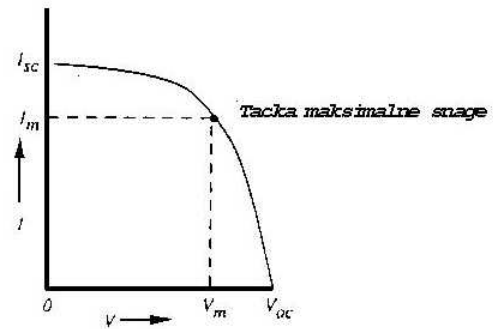
Grafik struje diode u solarnoj ćeliji u funkciji napona diode je kriva prikazana na slici 14. U opšte, električna snaga je data:

$$P = IV = I_L V - I_0 \left(\exp\left(\frac{eV}{k_B T}\right) - 1 \right) V$$

Maksimalnu snagu dobijamo za vrednost napona V_m i struje I_m kao na slici 14. Koeficijent konverzije solarne ćelije je definisan kao količnik izlazne električne snage i ulazne optičke snage. Kada solarna ćelija radi u uslovima maksimalne snage, koeficijent konverzije je:

$$\eta_{conv} = \frac{P_m}{P_{in}} \times 100 = \frac{I_m V_m}{P_{in}} \times 100 (\text{percent})$$

U koeficijentu konverzije solarne ćelije, važno je napomenuti da fotoni koji imaju energiju $\hbar\omega$ manju od energetskog procepa neće proizvesti parove elektron-šupljina. GaAs solarne ćelije su bolje podešene za solarni spektar i obezbeđuju veće koeficijente, međutim, tehnologija je mnogo skuplja kad je uporedimo sa Si tehnologijom. GaAs solarne ćelije se koriste samo za posebne primene dok Si solarne ćelije se koriste za primene gde cena igra ključnu ulogu.

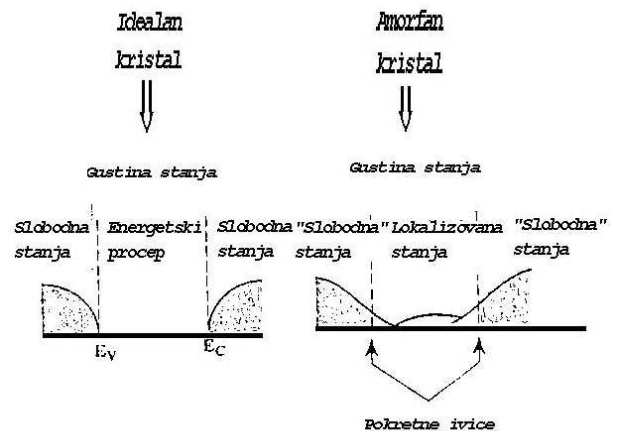


Slika 14 Relacija između struje i napona koje daje solarna ćelija. Napon otvorenog kola je V_{oc} a struja kratkog spoja I_{sc} .

6.1.2. Amorfne Si solarne ćelije

Amorfni Si filmovi se deponuju parnom hemijskom metodom na prilično niskim temperaturama ($\sim 600^\circ\text{C}$). U procesu depozicije dobar deo hidrogena se ugradi u film i pomaže boljem kvalitetu filma. Amorfni Si filmovi se mogu deponovati na skoro sve supstrate koji ih čine vrlo jeftinim i univerzalnim.

Elektronske karakteristike amornog Si nisu tako loše kao što je prirodno očekivati. Gustina stanja tipičnog a-Si filma je prikazana na slici 15. Ovi filmovi imaju visoku gustinu dozvoljenih stanja u domenu energetskog procepa. Međutim, ova stanja su strašno "lokalizovana". Njihov opseg u prostoru je sasvim mali.



Slika 15 Šema efekta nereda u amornom materijalu na gustinu stanja. Prikazano je poređenje amornog i idealnog kristala. Pokretne ivice predstavljaju efektivni energetski procep u amornom materijalu.

Kada se priroda elektronskih stanja promeni od lokalizovanih do spoljašnjih u skladu sa tim se pokretljivost menja od vrlo niske ($\leq 1\text{cm}^2/\text{Vs}$) do relativno visoke ($\sim 10\text{cm}^2/\text{Vs}$). Energetsko mesto gde se ovaj prelazak dešava se zove ivica pokretljivosti. Ivica pokretljivosti definiše efektivni energetski procep za a-Si film i u velikom broju filmova efektivni procep je $\sim 1,6\text{eV}$.

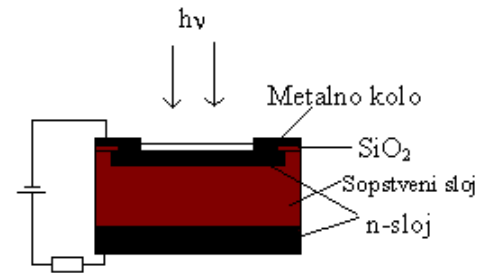
Važan pozitivan aspekt a-Si je da vertikalno k pravilo odabiranja koje daje nisku optičku apsorpciju u kristalnom Si ne primenjujemo. Ovo je zbog toga jer je k pravilo odabiranja primenljivo striktno u savršanim kristalima gde elektronska stanja imaju formu ravanskog talasa.

Kao rezultat a-Si može imati visok koeficijent apsorpcije i jedan tanki film je potreban za apsorpciju solarne ćelije. Laka izrada a-Si filmova čini ih vrlo atraktivnim za alternativne izvore energije. Pre završetka priče o solarnim ćelijama važno je napomenuti da heterospojevi mogu takođe biti korišćeni za solarne ćelije. Korišćenje više od jednog energetskog procepa može poboljšati koeficijent konverzije, ali je tehnologija naravno skupa i koristi se samo u posebnim slučajevima.

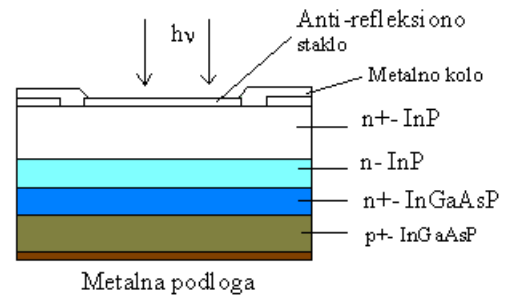
6.2. PIN dioda

p-n dioda je potpuno dovoljna za detekciju vidljive svetlosti, ali za detekciju infracrvene svetlosti (duže talasne dužine) moraju se razviti drugi tipovi fotodiode. Svetlost sa dužim talasnim dužinama prodire dublje u p-sloj nego kraće talasne dužine. Jedno rešenje se može napraviti tako da je p materijal tanji, ali u tom slučaju će se mnogi parovi elektron-šupljina rekombinovati u p oblasti bez kreiranja toka naelektrisanja. Umesto toga, relativno tanak sloj lako dopiranog p poluprovodnika je ubačen između p i n sloja (slika 16). PIN dioda je vrlo sposobna za detekciju svetlosti sa dužim talasnim dužinama od vidljive svetlosti.

Sopstveni sloj, ili i-sloj, skoro da nema slobodnih nosilaca naelektrisanja što znači da je otpornost visoka i da je električno polje u i-oblasti strašno veliko. Karakteristike i-sloja omogućuju osiromašenoj oblasti da zauzme relativno veliki deo fotodiode. Slika 16 pokazuje silikonsku PIN diodu. Ovaj tip fotodiode je korišćen primarno za talasne dužine opsega $0,8\text{-}0,9\mu\text{m}$. Metalno kolo radi kao negativan pol. i-sloj je napravljen što je moguće tanje za postizanje visoke kvantne efikasnosti. Međutim, postoji granica do koliko se sme ići pre nego što vreme odziva počne da raste. Sa debljinom datom ovde, vreme odziva je oko 1ns i struja mraka je manja od 1nA . Za duže talasne dužine $1,3\text{-}1,55\mu\text{m}$ proizvođači koriste kombinacije InGaAsP na podlozi InP ili GaAlAsSb na podlozi GaSb. Slika 17 pokazuje kako je fotodiode napravljena prema prvo-pomenutoj kombinaciji. Dioda je dizajnirana da ima struju mraka manju od $0,2\text{nA}$; kvantna efikasnost je bolja od 60% i vreme odziva kraće od 100ps.



Slika 16 Tri sloja PIN diode.



Slika 17 PIN dioda za duže talasne dužine. Poluprovodnički materijali: InP i InGaAsP.

6.3. Avalanš fotodiode

U idealnoj PIN diodi, svaki upadni foton bi trebalo da kreira par elektron-šupljina, što znači da bi elektron trebao da se kreće od pozitivnog do negativnog pola. Trebalo bi da PIN diodu nazovemo invertovana LED. Ekvivalent laserskoj diodi bi trebalo da bude avalanš fotodiode (APD), u kojoj svaki upadni foton rezultuje u većem broju nosilaca naelektrisanja. Značajnim povećanjem inverznog napona na p-n spoju, jačina polja može postati tako velika da ubrzanje nosilaca naelektrisanja u polju pojača dovoljno da imaju kinetičku energiju koja je sposobna da dovede do pomeranja drugih elektrona iz valentne i još prođe kroz osiromašenu oblast. Prema tome, proizvedeni parovi elektron-šupljina prouzrokuju nove parove. U ovom slučaju, originalni nosilac naelektrisanja se multiplicira.

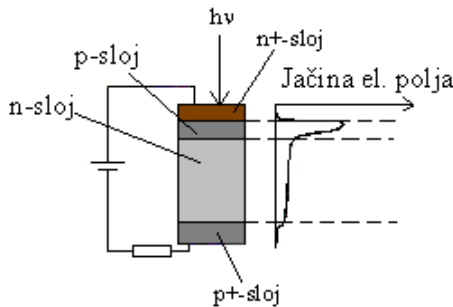
Po ovom avalanš efektu je i dioda dobila ime avalanš fotodiode. Multiplikacioni faktor je strašno zavisen od inverznog napona. Prosečan multiplikacioni faktor 70-100 znači da jedan foton rezultuje u proseku 70-100 elektrona. Odnos signal/šum je značajno poboljšan kroz fotomultiplikaciju.

Inverzni napon određuje multiplikacioni faktor, jer dovoljno veliko polje mora postojati za kreiranje avalanš efekta. U efikasnom funkcionisanju kola sa APD, inverzni napon će ležati ispod ove vrednosti napona praga, tako da se čak i slaba optička radijacija može detektovati. Nedostatak APD u poređenju sa PIN diodom je potreba za visokim inverznim naponom preko 100V. Tipična vrednost za silikon APD je 200V, ali za InGaAsP APD napon praga je 10-50V. Ključ atraktivnosti APD je veliko pojačanje koje može biti dobijeno u uređaju. Prema tome, uređaj je sposoban za detekciju vrlo niskih intenziteta svetlosti. Međutim, cena je morala biti plaćena na drugoj strani tj. u širini opsega i šumu. Vreme odziva uređaja je ograničeno sa tri važna faktora:

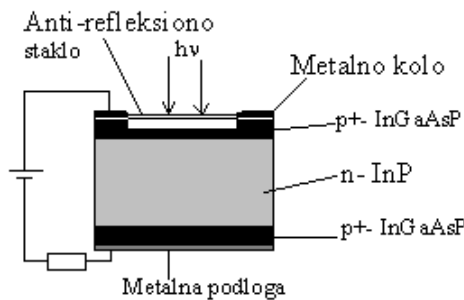
Optički predajnici i prijemnici

- vreme prolaska kroz apsorpcionu oblast;
- vreme potrebno da se avalanš proces razvije;
- vreme prolaska za generisanje šupljine za vreme avalanš procesa kroz apsorpcionu oblast i nazad do p-oblasti.

Primitili smo da u APD multiplikacioni proces povećava šum. Međutim, signal se takođe multiplicira pa je optimalna tačka korišćenja ona gde osetljivost prijemnika ima maksimum. Faktor sa kojim se šum povećava je nazvan faktor šuma.



Slika 18 Primer raspodele jačine polja u APD duž različitih slojeva.



Slika 19 Konstrukcija RAPD.

6.4. Fototranzistor

Fototranzistor, ime za bipolarni uređaj korišćen za optičku apsorpciju, obezbeđuje veliko pojačanje u zavisnosti od rada tranzistora. Uređaj je nisko šumni u poređenju sa APD.

Normalno, u bipolarnom tranzistoru, unošenje male bazne struje prouzrokuje malu promenu u direktnoj polarizaciji na spoju emitor-baza. Ako je bazna širina mala i baza visokog kvaliteta, svi elementi ove struje se kolektuju na kolektoru. Strujno pojačanje, definisano kao odnos kolektorske i bazne struje, može biti sasvim veliko. U slučaju fototranzistora, bazna struja nije obezbeđena spoljašnjim naponom (često nema bazni kontakt na fototranzistoru), nego optičkim signalom. Svetlost koja obasjava uređaj kreira parove elektron-šupljina. Ovi parovi su generisani svuda u uređaju, premda u HBT, emitor može biti napravljen od materijala slojevitog energetskog procepa i prema tome, napravljen da bude transparentan. U fototranzistoru, dopirani nivoi su napravljeni tako da širina osiromašene oblasti na spoju emitor-baza bude sasvim mala, dok je širina osiromašenog sloja na spoju baza-kolektor velika, tako da je optički signal primarno apsorbovan u osiromašenoj oblasti na spoju baza-kolektor. Ovo takođe zahteva malu širinu za bazu. Deo fotonske struje apsorbovan u BCJ osiromašenoj oblasti je

$$\frac{I_{ph}(BCJ)}{I_{ph}(0)} = \eta \exp(-\alpha W_{bn}) [1 - \exp(-\alpha W_{BCJ})]$$

gde je η je veličina efikasnosti materijala ($\eta \sim I$ za visoko kvalitetan materijal); drugi član je gubitak usled apsorpcije u neutralnoj bazi, a treći član je apsorpcija u osiromašenoj oblasti širine W_{BCJ} . Ako je fototranzistor napravljen tako da je $\exp(-\alpha W_{bn}) \sim I$ i vrednost W_{BCJ} široka tad je

$$I_{ph}(BCJ) \approx \eta I_{ph}(0)$$

Optičko pojačanje uređaja je tada

$$\Gamma_G = \frac{I_e}{e I_{ph}(0)} = \frac{\eta I_c}{I_B} = \eta \beta$$

gde je β strujno pojačanje uređaja.

Fototranzistor nema vrlo dobar frekventni odziv usled vrlo velike kapacitance vezane za spoj baza-kolektor. Fototranzistor može biti napravljen korišćenjem heterospojeva bipolarnih tranzistora.

7. ŠUM

7.1. Odnos signal/šum na prijemnom kraju

Odnos signal/šum na izlazu iz optoelektronskog predajnog sistema određen je nivoom signala prijema, preko izraza:

$$i_2 = p \eta e / h \nu$$

gde je i_2 struja na izlazu iz fotoprijemnika.

7.2. Termički šum optičkog prijemnika

Glavni izvor termičkog šuma kod optičkog prijemnika predstavlja šum otpornosti na otporu opterećenja R:

$$i_p^2 = (4kT/R)B$$

gde je B širina opsega šuma prijemnika.

7.3. Kvantni šum

Posle konverzije u struju i primljeni signal je izložen uticaju kvantnog šuma. Kvadrat efektivne vrednosti struje šuma je:

$$i_Q^2 = 2e i_2 B$$

Snaga šuma je srazmerna primljenoj optičkoj snazi. Odnos snaga signala prema snazi kvantnog šuma je:

$$S_2 / N_Q = i_2^2 / i_Q^2 = i_2^2 / 2e i_2 B$$

Ovaj odnos određuje fizički moguću osetljivost idealnog optoelektronskog prijemnika. Kod električnih sistema kvantni šum je zanemarljiv u poređenju sa izvorima termičkih šumova.

7.4. Šum struje mraka

Kod poluprovodničkih fotodioda inverzna struja teče i kada dioda nije pod uticajem svetlosti. Ta struja mraka i stvara snagu šuma srezmernu izrazu:

$$i_D^2 = 2e I_D B$$