

# POLUPROVODNIČKI IZVORI I DETEKTORI SVETLOSTI

## 1. Uvod

U **poluprovodničke izvore** svetlosnog zračenja spadaju:

- 1) emitterske ili svetleće diode i
- 2) poluprovodnički laseri ,

U **poluprovodničke fotodetektore** spadaju

- 1) fotootpornici,
- 2) fotodiode , fototranzistori, solarne ćelije
- 3) CCD i CMOS senzori itd..

**Osnovni procesi** u materijalima u kojima dolazi do emisije ili apsorpcije svetlosti su :  
spontana emisija zračenja,  
apsorpcija zračenja i  
stimulisana emisija zračenja.

Prema **Borovom modelu** atoma:

-elektron može da se kreće oko jezgra samo po nekim tačno određenim putanjama (orbitama) različitih poluprečnika i na svakoj putanji ima određenu energiju i kretanje elektrona po putanji ne izaziva emitovanje zračenja.

-da bi došlo do emitovanja ili apsorpcije zračenja elektron moraju prelaziti sa jedne na drugu orbitu. Zračenje se emituje u obliku kvanta energije koji se zove foton i energija fotona je jednaka  $h\nu$  ili  $h\frac{c}{\lambda}$ , gde je h- Plankova konstanta , c brzina svetlosti ,  $\nu$  frekvencija emitovane svetlosti, i  $\lambda$  talasna dužina svetlosti.

### **Prilikom emisije svetlosti**

elektron **prelazi sa m-te orbite na kojoj ima enrgiju  $E_m$  na n-tu orbiti na kojoj ima energiju  $E_n$**  koja je manja od  $E_m$ . Energija emitovanog fotona je jednaka razlici ove dve energije

$$E_m - E_n = h\frac{c}{\lambda}, \quad (1)$$

talasna dužina emitovane svetlosti zavisi od razlike energetske nivoa

### **Kod apsorpcije svetlosti**

foton određene energije  $h\nu$  interaguje sa atomom i **elektron prelazi sa nivoa niže energije ,  $E_n$ , na nivo više energije  $E_m$ , ukoliko je  $h\nu \geq E_m - E_n$**  i atom apsorbuje energiju fotona, tj. materijal upija svetlost.

- Kada atom ima više elektrona , struktura dozvoljenih nivoa energija se usložnjava javljaju određeni opsezi dozvoljenih energija.

**-Svaki materijal prema tome ima određene opsege dozvoljenih energija. Najniži opseg dozvoljenih energija naziva se osnovni nivo, a ostali su pobudjeni nivoi.**

### a) Spontana emisija svetlosti

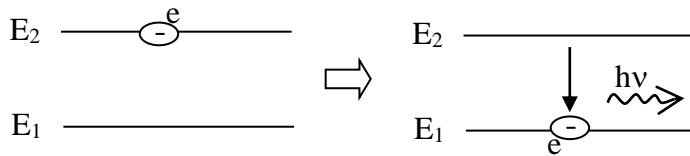
Neka je atom na neki način doveden u pobudjeno stanje i njegovi elektroni imaju energiju  $E_2$ . **Elektroni će posle nekog vremena spontano prelaziti** na neki niži energetske nivo energije  $E_1$ .

Pri svakom prelasku elektrona sa višeg na niži nivo će se emitovati foton energije

$$h\nu = E_2 - E_1 \quad (2)$$

Ovaj proces se naziva spontana emisija svetlosti ili spontana emisija zračenja i prikazan je na slici 1.

**Pri ovakvim spontanim prelazima dobija se nekoherentno zračenje.**



Slika 1 Spontana emisija

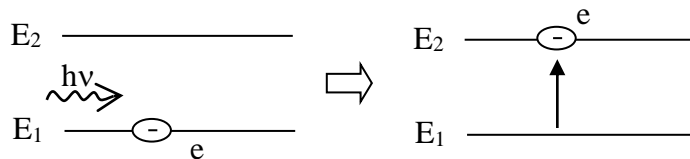
### b) apsorpcija zračenja

**Ako se elektron nalazi na nižem energetskom nivou  $E_1$  i interaguje sa upadnim fotonom energije  $h\nu$**  on prelazi na viši energetske nivo  $E_2$  ukoliko je

$$h\nu \geq E_2 - E_1$$

i na taj način apsorbuje energiju fotona

Ovaj proces je prikazan na slici 2.



Slika 2 Apsorpcija zračenja

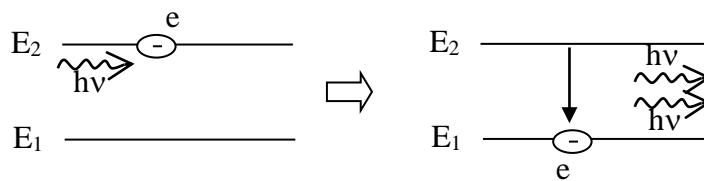
### c) stimulisana emisija

Ako se elektron u atomu nalazi u pobudjenom stanju  $E_2$  i upadni foton energije  $h\nu$  interaguje sa njim dolazi do vraćanja elektrona na niže energetske stanje, pri čemu se emituje dodatni foton koji je iste frekvencije i u fazi sa upadnim fotonom.

Od jednog upadnog dobijaju dva fotona na izlazu i oni su koherentni. Na ovaj način materijal pojačava upadnu svetlost.

Ovaj proces se naziva stimulisana emisija

Da bi se ostvarila stimulisana emisija u nekom materijalu potrebno je da je broj pobudjenih atoma veći od broja onih na osnovnom nivou, tj. **potrebno je ostvariti inverznu naseljenost.**



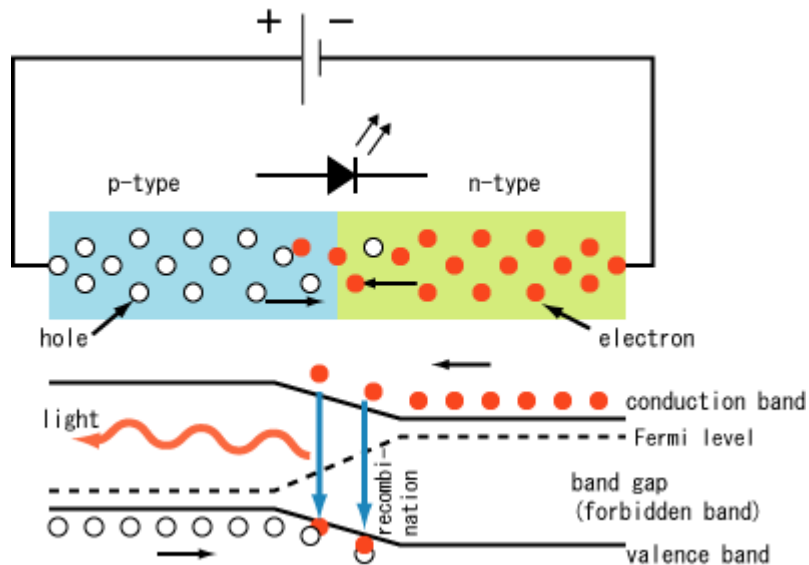
Slika 3 Stimulisana emisija

## 2. Poluprovodnički izvori svetlosti

**Emitorske ili svetleće diode** (light emitting diodes , **LED**) i **laserske diode** imaju istu osnovnu **strukturu poluprovodničke diode**.

-Kada je **dioda direktno polarisana**, elektroni prelaze u p- tip , a šupljine prelaze u n-tip poluprovodnika. **Susreću u zoni najveće gustine slobodnih nosilaca , na samom p-n spoju i tu dolazi do njihove rekombinacije**, tj. elektroni popunjavaju prazna mesta, tj. šupljine.

Pri svakoj pojedinačnoj rekombinaciji **oslobadja se energija jednaka razlici energija** koje elektroni imaju **u provodnoj ( $E_p$ ) i valentnoj zoni ( $E_v$ )**, tj. **energija jednaka energetsom procepu  $E_g$** .



Slika 4. Generisanje svetlosnog zračenja pri rekombinaciji elektrona i šupljina u aktivnoj oblasti

**Uska oblast** u kojoj se odvija rekombinacija na granici p-n spoja naziva se **aktivna oblast**. Oslobodjena energija se emituje u vidu zračenja određenog opsega talasnih dužina i tada su prelazi elektrona iz provodne u valentnu zonu **radijativni**.

**Centralna talasna dužina** emitovane svetlosti  $\lambda_c$  se određuje na osnovu izraza

$$E_g = \frac{h \cdot c}{\lambda_c} \quad \text{tj.} \quad \lambda_c = \frac{h \cdot c}{E_g} \quad (3)$$

gde je  $h$ - Bolcmanova konstanta,  $c$ , brzina svetlosti u vakuumu, i  $\lambda$ - centralna talasna dužina emitovane svetlosti.

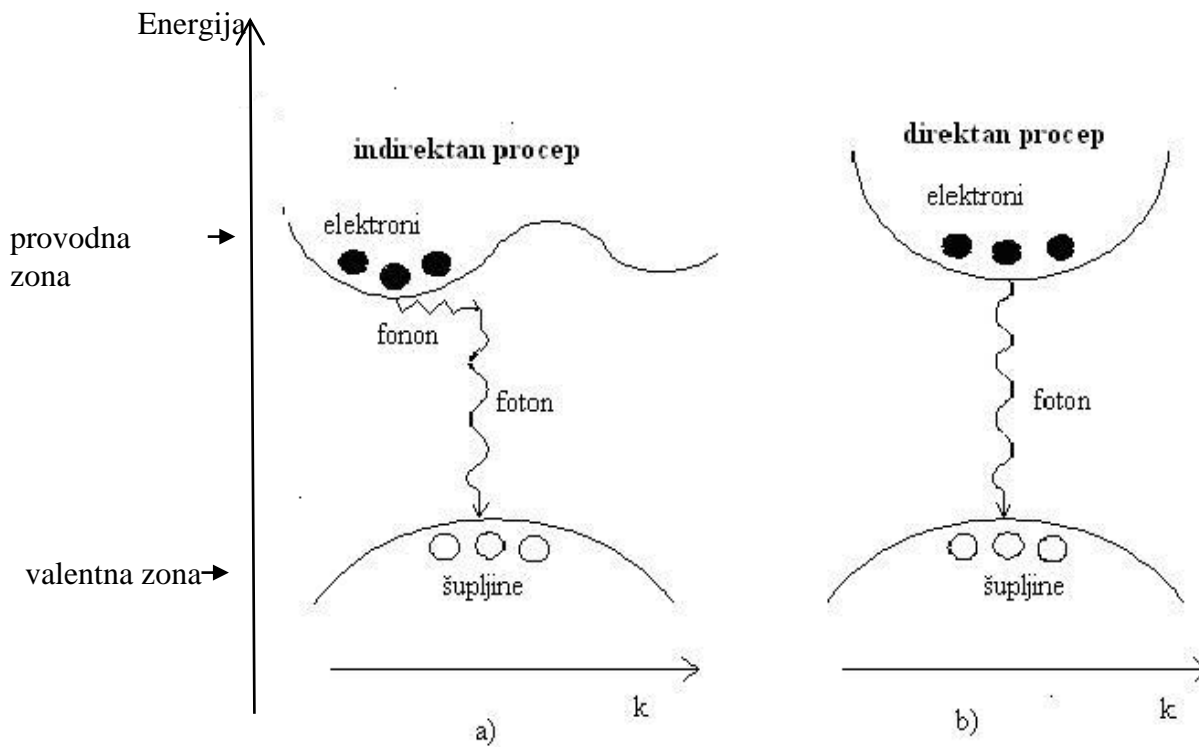
Potrebno izabrati materijal koji ima određenu vrednost energetskog procepa da bi dobili izvor svetlosti određene talasne dužine.

Oslobodjena energija ne mora da se isključivo emituje u vidu svetlosnog zračenja već i u obliku mehaničke energije vibracija ili toplotne energije u materijalu, pa takvi prelazi elektrona iz provodne u valentnu zonu **nisu radijativni**, i takvi materijali u kojima se ovo javlja nisu pogodni za svetlosne izvore.

Da bi prelazi bili radijativni potrebno je koristiti materijale sa takozvanim **direktnim procepom**

Neradijativni prelazi se javljaju kod poluprovodnika sa takozvanim **indirektnim procepom**.

Silicijum spada u materijale sa **indirektnim procepom** pa se ne koristi za izradu izvora svetlosti i zato silicijumske diode ne zrače svetlost nego se greju.



Slika4. Provodna i valentna zona :a) u materijalu sa indirektnim procepom, b) u materijalu sa direktnim procepom

**Za izradu poluprovodničkih svetlećih izvora koriste se legure III i V grupe elemenata jer takvi materijali imaju direktni energetska procep .**

To su materijali tipa:

$Ga_xIn_{1-x}As$ , , gde je x udeo pojedinog elementa ( u ovom slučaju Galijuma) i iznosi od 0 do 0,45 ili

$Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$  pri čemu su i x i y udeli pojedinih elemenata, i povezani su kao  $x=0,43y$

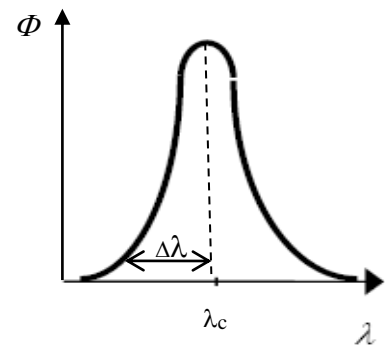
**U zavisnosti od udela pojedinih elemenata menja se energetska procep ovih poluprovodnika, pa na osnovu toga i talasna dužina svetlosti koju zrače diode..**

### 2.1. Svetleće ( emitorske diode, LED diode)

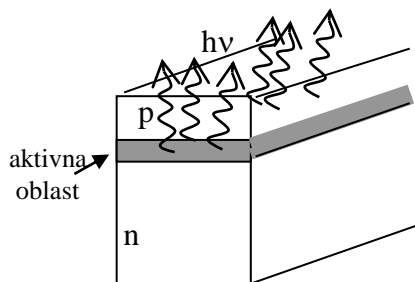
Svetleće diode su poluprovodničke diode kod kojih **pri direktnoj polarizaciji nastaje spontano zračenje svetlosti**, pa su one izvori nekoherentne svetlosti.

Spektar zračenja svetleće diode nalazi se u opsegu  $\lambda_c \pm \Delta\lambda$ , gde je  $\Delta\lambda$ , reda nekoliko desetina nanometara.

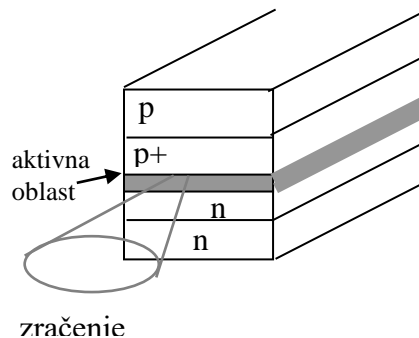
**Po konstrukciji emitorske diode ili zrače sa površine ili bočno.**



Slika 6. Spektar zračenja LED diode



Slika 7 Struktura LED  
a) koja emituje sa površine



, b) koja emituje

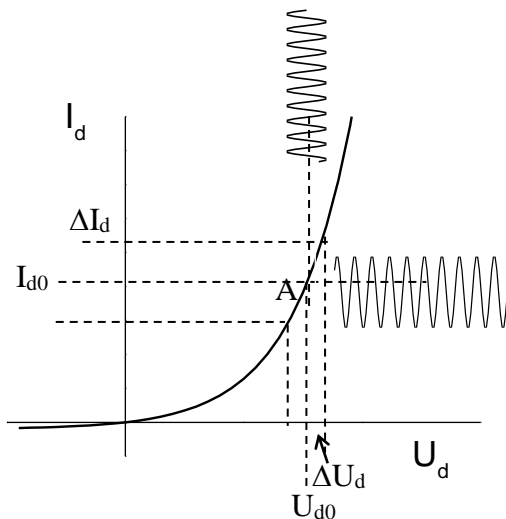
### 2.1.1. Optičke i električne karakteristike LED dioda

Kao i za svaku poluprovodničku diodu **strujno- naponska karakteristika LED** je data izrazom

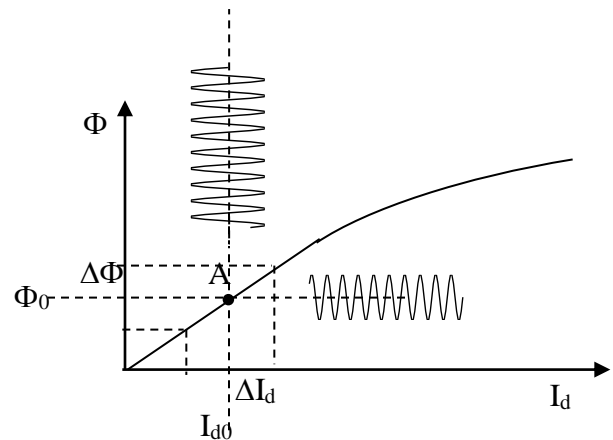
$$i = i_0 \left( e^{\frac{qU}{\beta k T}} - 1 \right), \quad (4)$$

gde je  $i_0$  inverzna struja zasićenja diode, a  $U$  napon na diodi ..  
i predstajena je grafikom na slici 8..

**Optičko –strujna karakteristika** koja predstavlja zavisnost emitovane snage optičkog zračenja (fluksa zračenja) od jačine struje kroz diodu predstavljena je na slici 9. Na njoj se uočava linearni deo , i deo kada kriva ulazi u zasićenje. **Linearni deo karakteristike omogućava menjanje optičke snage srazmerno promeni struje kroz diodu , tj. analognu modulaciju intenziteta zračenja periodično promenljivom strujom.**



Slika 8. I-U karakteristika svetleće diode

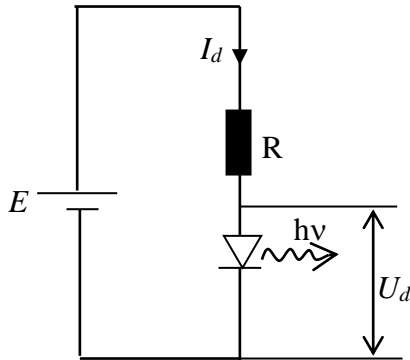


Slika 9. Optičko-strujna karakteristika svetleće diode

**Optička snaga je takodje i funkcija frekvencije pobudne struje, i opada na većim frekvencijama, pa se emitterske diode mogu koristiti za frekvencije pobudne struje manje od 200 MHz.**

Tačka A se nalazi na sredini linearnog dela optičko- strujne karakteristike i odgovara vrednost pobudne struje  $I_{d0}$  i odgovarajućeg fluksa zračenja  $\Phi_0$ .

### Šema osnovnog električnog kola za pobudjivanje svetleće diode



Slika 10 Kolo za napajanje emitorske diode

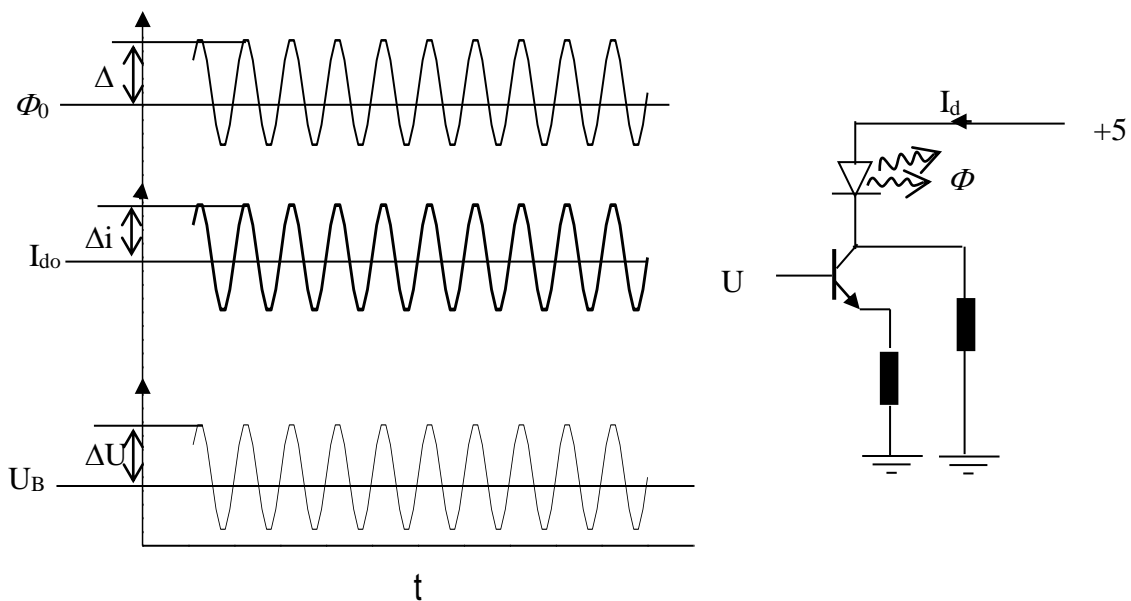
- Na osnovu optičko - strujne karakteristike se odredi kolika je struja potrebna da se dobije željena optička snaga, i neka je to struja diode  $I_d$ . Na osnovu I-U karakteristike se odredi koliki je napon  $U_d$  koji treba da se da se dovede na emitorsku da se dobije ta struja. Na osnovu poznatih elektromotorne sile izvora  $E$ ,  $U_d$  i  $I_d$  se određuje vrednost otpornika  $R$  koji treba izabrati da se dobije željena struja .

$$E = U_d + R \cdot I_d \quad (5)$$

dobija se

$$R = \frac{E - U_d}{I_d} \quad (6)$$

**Kada se želi promenljiva optička snaga** najčešće se za pobudnu struju emitorske diode koristi kolektorska struja tranzistora koja se menja promenom napona na bazi tranzistora



Slika 11. Kolo za napajanje emitorske diode prostoperiodičnom

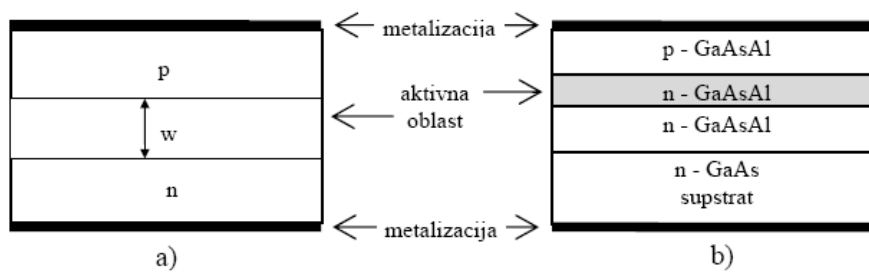
## 2.2 Poluprovodnička laserska dioda

**LASER** je skraćenica od **Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation**, u prevodu , **pojačanje svetlosti stimulisanom emisijom zračenja**.

Osobine laserske svetlosti su da je monohromatska, linearno polarizovana, koherentna, visoko usnopljena, velike jačine.

Poluprovodnički laseri ili laserske diode imaju strukturu poluprovodničke diode. Kod nje se mora postići da je aktivna oblast što uža i da je svetlost koja se vodi kroz diodu usmerena i koncentrisana na usku aktivnu oblast i po pravcu normalna na nju.

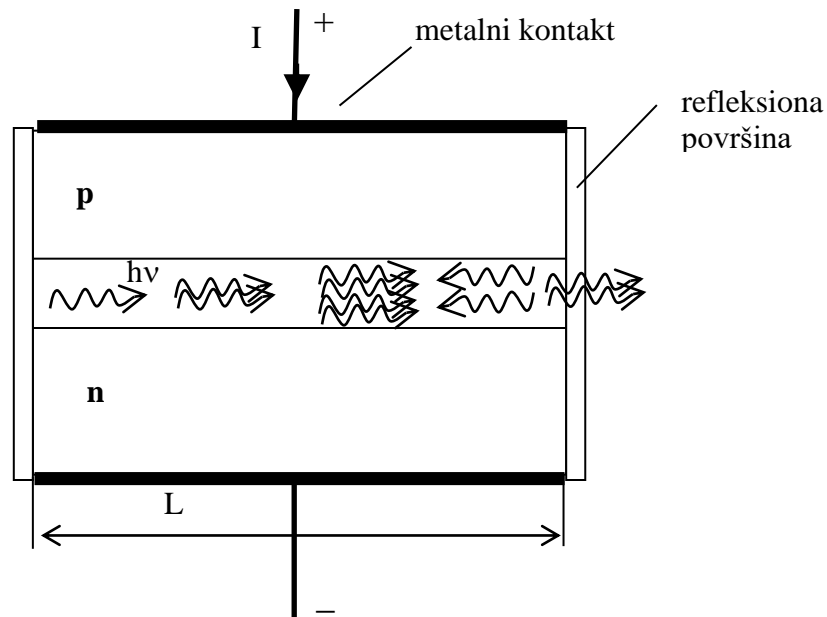
Najjednostavniji su u **obliku sendvič strukture**, ali češće su to **višeslojne strukture (heterostrukture)** sa različito dopiranim p i n slojevima kako bi se aktivna oblast tj. oblast u kojoj se vrše prelazi elektrona iz provodne u valentnu zonu (tj. do rekombinacije) bila što uža , Takođe, radi usmeravanja svetlosti i sprečilo zračenje sa strane slojevi i ivične ravni imaju uloge reflektora.



Slika 12 Strukturni prikazi laserske diode a) kao običnog pn spoja i b) kao heterostrukture.

Kao i kod ostalih vrsta lasera i **rad laserskih dioda se zasniva na stimulisanjoj emisiji zračenja**. Radijativni prelazi) se ostvaruju između elektronskih stanja provodne i valentne zone. Prvo je potrebno ostvariti inverznu naseljenost tj. postići da više elektrona ima u dnu provodne nego na vrhu valentne zone. To se ostvaruje prolaskom jake struje kroz direktno polarisan p-n spoj.

**Aktivna oblast mora biti smeštena u rezonator u okolini p-n spoja tj. izmedju dve paralelne refleksione površine** kako je prikazano na slici 13. Na taj način se obezbedjuje višestruki prolazak svetlosti kroz aktivnu oblast i ta se svetlost pri svakom prolasku pojačava.. Ove refleksione površine se dobijaju ili poliranjem stranica diode tako da se na površinama dioda- vazduh ostvaruje delimična refleksija svetlosti ili se dioda smešta izmedju dva ogledala od kojih je jedno polutransparentno pa se jedan deo zračenja propušta, a jedan deo reflektuje kako je prikazano na slici 13.



Slika 13. Laserska dioda kao rezonator u kome je omogućen višestruki prolaz fotona kroz aktivnu oblast

**Unutar rezonatora se ostvaruje stojeći talas**, i na taj način su talasi koherentni i postoje samo talasne dužine koje zadovoljavaju izraz

$$L = m \cdot \frac{\lambda}{2} = m \cdot \frac{\lambda_0}{n} \cdot \frac{1}{2}, \quad \text{gde je } L - \text{ dužina rezonatora, } n - \text{ indeks prelamanja aktivne}$$

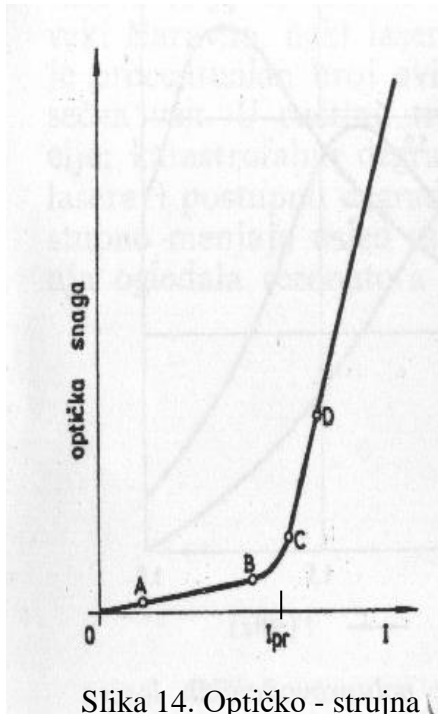
sredine,  $\lambda$  - talasna dužina svetlosti unutar lasera,  $\lambda_0$  - talasna dužina emitovane svetlosti u vakuumu.

Da bi došlo do stimulisanog zračenja potrebno je da pobudna struja bude veća od struje praga  $I_{pr}$ . Na slici 14 je predstavljena optičko- strujna karakteristika laserske diode koja predstavlja zavisnost snage zračenja od pobudne struje laserske diode.

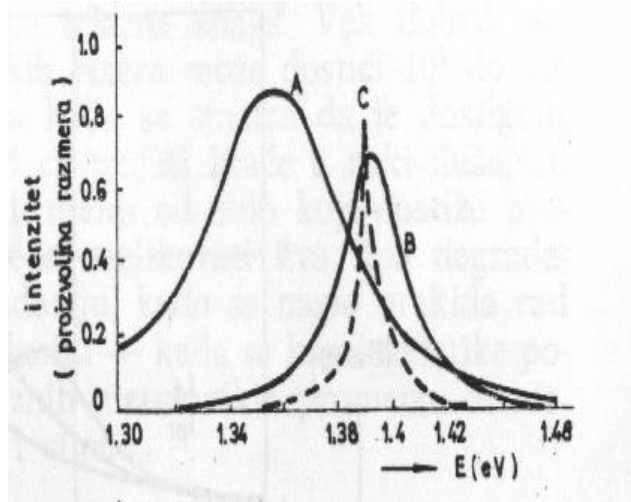
U tačkama A i B na ovoj karakteristici pobudna struja je manja od struje praga, pa se tada ostvaruje spontana emisija i laserska dioda radi kao svetleća dioda. Njeno zračenje je nekoherentno i širi je spektar zračenja. Spektar zračenja za pojedine pobudne struje je prikazan na slici 15 i uočava se da pri porastu struje od vrednosti u A ka vrednosti u B spektar zračenja sužava ali je i dalje slično zračenju emitterske diode.

**Kada je pobudna struja veća od struje praga ( tačka C) ostvaruje se stimulisana emisija , sužava se spektar zračenja (slika 15) , svetlost postaje koherentna .**

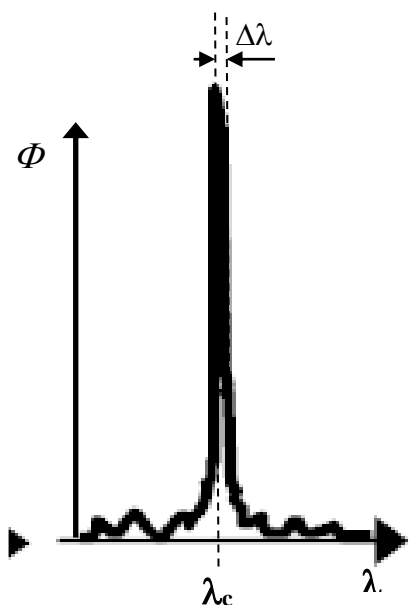
Na optičko - strujnoj karakteristici, tačka D se nalazi na linearnom delu krive i odgovara struji kojom treba da se pobudjuje dioda kada želimo periodično pojačanje i slabljenje intenziteta svetlosti srazmerno pobudnoj struji. Frekvencije ove prostoperiodične struje, a samim tim i promene intenziteta zračenja mogu da budu do 1 GHz.



Slika 14. Optičko - strujna karakteristika laserske diode



Slika 15. Spektar zračenja za različite pobudne struje laserske diode (A i B - pobudne struje manje od struje praga, C - pobudna struja veća od struje praga)



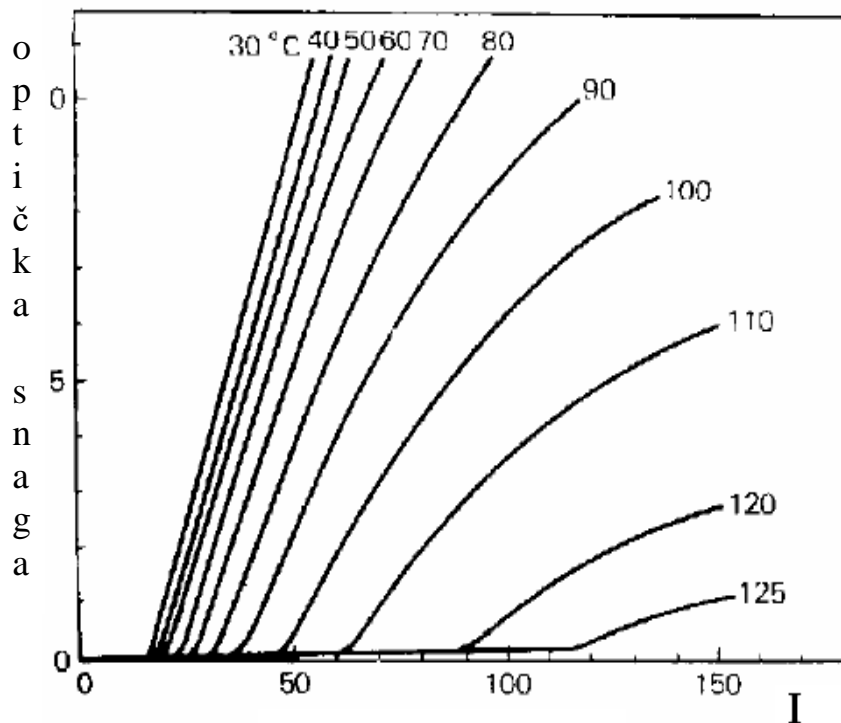
Grafik predstavlja zavisnost optičke snage laserske diode od talasne dužine kada je pobudna struja veća od struje praga. Uočava se da je spektar zračenja diode vrlo uzak oko centralne talasne dužine  $\lambda_c$  i njegova širina  $2 \cdot \Delta\lambda$  je reda nm.

Slika 16. Spektar zračenja laserske diode

### Struja praga zavisi od temperature i veća je za veće temperature.

Uočava se da na istoj pobudnoj struji intenzitet optičkog signala kao i to da li će biti koherentno ili nekoherentno zračenje zavisi od temperature. **Zbog ovoga je veoma bitna stabilizacija temperature pri radu laserske diode i stalna kontrola intenziteta optičkog signala**, pa se laserska dioda najčešće ne proizvodi kao samostalna komponenta već u modulima koji sadrže više komponenti pomoću kojih se ostvaruju kontrola rada diode.

Pri istoj pobudnoj struji laserskim diodama posle određenog vremenskog perioda korišćenja počinje da opada emitovana optička snaga pri istoj pobudnoj struji, tj. dolazi do starenja. To se dešava najčešće posle  $10^5$  do  $10^6$  časova rada.



Slika 17 Optičko-strujne karakteristike laserske diode na različitim temperaturama.

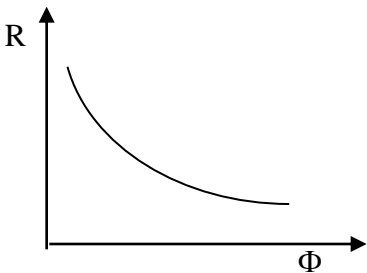
### 3. Poluprovodnički fotodetektor

**Poluprovodnički detektori služe za pretvaranje svetlosne u električnu energiju i za merenje intenziteta optičkog signala.** Svetlosno zračenje koje pada na fotodetektor se pretvara u odgovarajući napon ili struju na izlazu sa fotodetektora u zavisnosti od njegovih karakteristika i konfiguracije električnog kola u koje su uključeni.

#### 3.1 Fotokonduktivni fotodetektor

Fotokonduktivni detektori ili fotootpornici su **otpornici od poluprovodničkog materijala čija otpornost opada kada su izloženi svetlosnom fluksu.** Grafik zavisnosti otpornosti od ptikog fluksa kome je izložena prikazana je na slici 18.

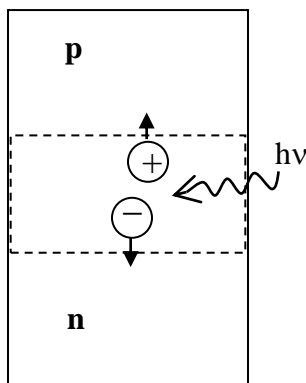
Ovi detektori se uglavnom koriste za detekciju prisustva i odsustva svetlosnog signala, a manje za preciznomerenje intenziteta. Oni se kao otpornici koriste u okviru naponskih razdelnika i na taj način se dobija napon srazmeran intenzitetu svetlosti, ili kao delo kola tranzistorskog prekidača i na taj nači se vrši uključivanje i isključivanje prekidača pomoću svetlosnog signala.



Slika 18. Zavisnost otpornosti fotootpornika od svetlosnog fluksa

#### 3.2 Fotodiode i PIN diode

**Najjednostavnija fotodiode je u obliku običnog p-n spoja,** tj. poluprovodničke diode.



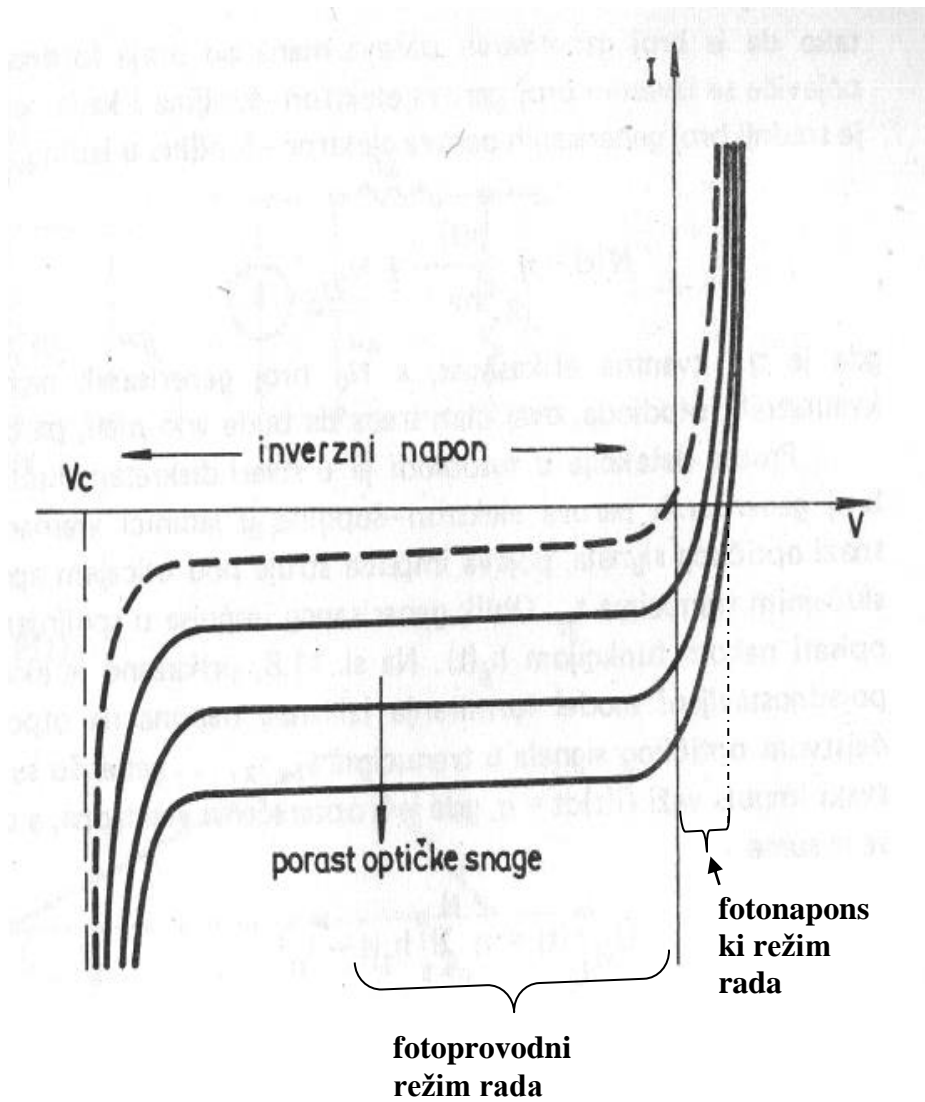
Slika 19. Princip rada fotodiode

**Kada foton dođe u zaprečni sloj i preda elektronu iz atoma dovoljnu energiju da pređe u provodnu zonu stvara se par elektron – šupljina.**

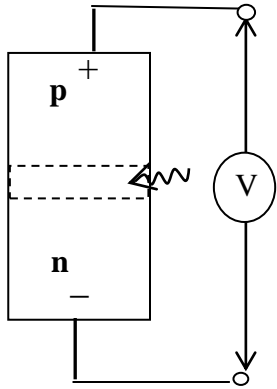
Elektron se zbog pozitivno naelektrisanih donora kreće ka n-strani diode, a šupljina zbog negativno naelektrisanih akceptora kreće ka p-strani diode i tako se **pod dejstvom svetlosti na p strani stvara višak šupljina, tj. višak pozitivnog naelektrisanja, a na n- strani višak elektrona, tj. višak negativnog naelektrisanja.** Na taj način se **javlja razlika potencijala između p i n kraja diode.**

Kretanje pozitivnog i negativnog naelektrisanja je u smeru kretanja kao kod inverzne struje na diodi.

Na slici je I-U karakteristika fotodiode kada je ona neosvetljena (isprekidana linija) i kada je osvetljena svetlošću različitog intenziteta. Uočava se da **jačina inverzne struje raste sa jačinom svetlosnog fluksa**.



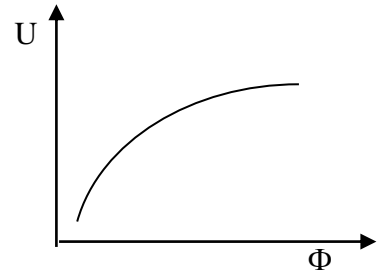
Slika 20 . Strujno -naponska karakteristika fotodiode



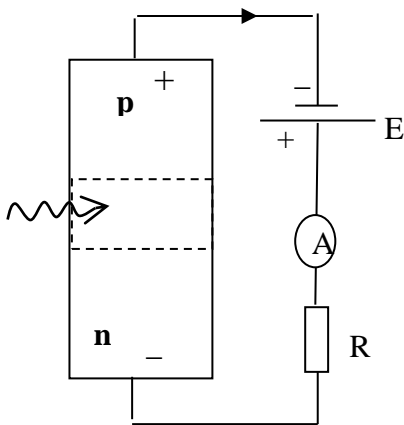
**Razdvajanje elektrona i šupljina**, tj. nagomilavanje pozitivnog i negativnog naelektrisanja na krajevima fotodiode **može se detektovati na dva načina:**

1) kao napon između p i n kraja fotodiode koji može da se meri voltmetrom, pri čemu je kolo otvoreno, tj. ovi krajevi nisu povezani otpornikom. Ovaj način rada se naziva **fotonaponski**. Na I-U karakteristici fotodiode ovo odgovara oblasti karakteristike pozitivnog napona i struje manje od

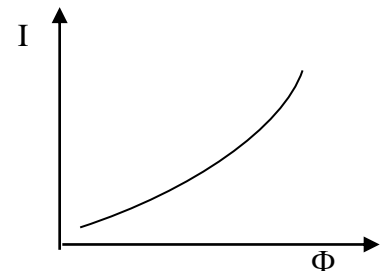
struje praga kako je prikazano na grafiku na slici 20. Ako se nacrtava zavisnost izlaznog napona od upadnog svetlosnog fluksa dobja se grafik kao na slici 21.



Slika 21. Zavisnost napona na krajevima fotodiode od svetlosnog fluksa u fotonaponskom načinu rada



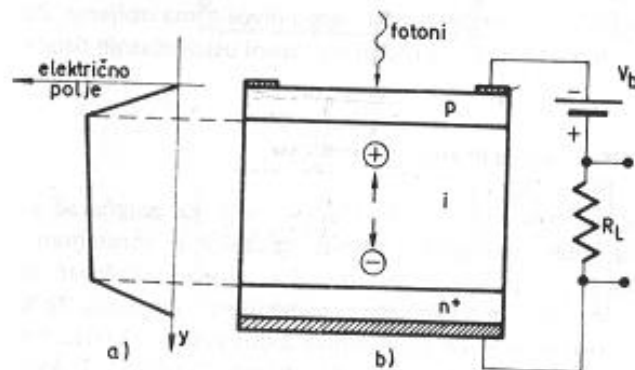
2) merenjem struje u zatvorenom kolu. Kada se dioda inverzno polarise i p i n krajevi diode se povežu preko otpornika R stvara se inverzna struja u kolu koja se meri, a čiji intenzitet je srazmeran jačini svetlosnog signala. Ova struja može da se meri i posredno kao napon na poznatom otporniku R. Ovaj način rada se naziva **fotoprovodni** i na I-U karakteristici odgovara oblasti inverzno polarisane diode (slika 20)



Slika 22. Zavisnost struje fotodiode od svetlosnog fluksa pri fotoprovodnom načinu rada

### a) PIN fotodioda

Da bi se generisalo što više parova elektron šupljina potrebno je da je zaprečna oblast bude što šira. Zbog toga se između sloja p i n poluprovodnika ubacuje čist poluprovodnik i na taj način se stvara takozvana PIN fotodioda, gde slovo I označava postojanje ispražnjene oblasti između p i n sloja fotodiode. Na taj način se znatno proširuje zaprečni sloj pa samim tim i oblast između donora i akceptora u kojoj vlada električno polje (slika 23) koje usmerava šupljine ka p, a elektrone ka n-kraju. PIN dioda se povezuje u kolo tako da radi u fotoprovodnom režimu, tj. inverzno se polarise i povezuje u kolo sa otpornikom  $R_L$  kao na slici 23. Generisana inverzna struja  $I_{c0}$  koja raste sa porastom



Slika 23. Struktura PIN fotodiode i kolo u koje se povezuje

svetlosnog fluksa stvara na otporniku napon  $U_L = R_L \cdot I_{c0}$ , koji se meri i na osnovu njega se određuje jačina optičkog signala. Ovaj tip fotodiode se najčešće koristi kod merenja.

### 3.2.1. Karakteristike fotodiode

**Fotodiode imaju električne i optičke karakteristike.**

Najvažnije karakteristike su:

kvantna efikasnost, osetljivost, spektralna karakteristika, brzina rada i struja mraka.

#### a) Kvantna efikasnost

**Kvantna efikasnost predstavlja odnos broja elektrona koji se generišu pod dejstvom upadnih fotona i broja upadnih fotona.** Može se predstaviti izrazom

$$\text{kao } \eta = \frac{\text{broj generisani h elektrona}}{\text{broj upadnih fotona}} = \frac{\frac{I_p}{q}}{\frac{P_0}{h\nu}} \quad (7)$$

gde je  $I_p$ - generisana struja na diodi (foto struja),  $q$ - naelektrisanje elektrona,  $P_0$ . optička snaga upadne svetlosti,  $h\nu$ - energija jednog fotona a  $q$  naelektrisanje elektrona.

Kod PIN dioda kvantna efikasnost je reda 60%., a u principu može biti od 30-95 % u zavisnosti od vrste fotodiode.

#### b) Koeficijent konverzije $R_k$ , ili osetljivost fotodiode

**Osetljivost fotodiode ili koeficijent konverzije predstavlja odnos generisane struje na diodi i optičke snage upadne svetlosti.** tj.

$$R_k = \frac{I_p}{P_0} = \eta \cdot \frac{q}{h\nu} \quad (8)$$

#### c) Struja neosvetljene fotodiode /struja mraka

Kao i kod ostalih električnih fotodetektora i **na fotodiodi se javlja mala inverzna struja i kada je dioda inverzno polarisana i neosvetljena.**

#### 4. )Brzina rada fotodiode

**Inverzno polarisana dioda se ponaša kao pločasti kondenzator jer ima dva kraja pozitivno i negativno naelektrisan, a između se nalazi isparžnjena oblast bez slobodnih naelektrisanja (/kao izolator).** Zbog toga se može odrediti **kapacitivnost inverzno polarisane diode** kao

$$C_{pn} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{d}, \quad (9)$$

gde je  $\epsilon_r$  relativna dielektrična konstanta materijala diode, površina diode, a  $d$  širina zaprečnog (ispražnjenog sloja).

Što je širina ispražnjene zone veća, kapacitivnost diode je manja, pa PIN fotodiode ima manju kapacitivnost od obične. U zavisnosti od materijala fotodiode i veličine inverznog napona ova kapacitivnost iznosi od 3-2500pF.

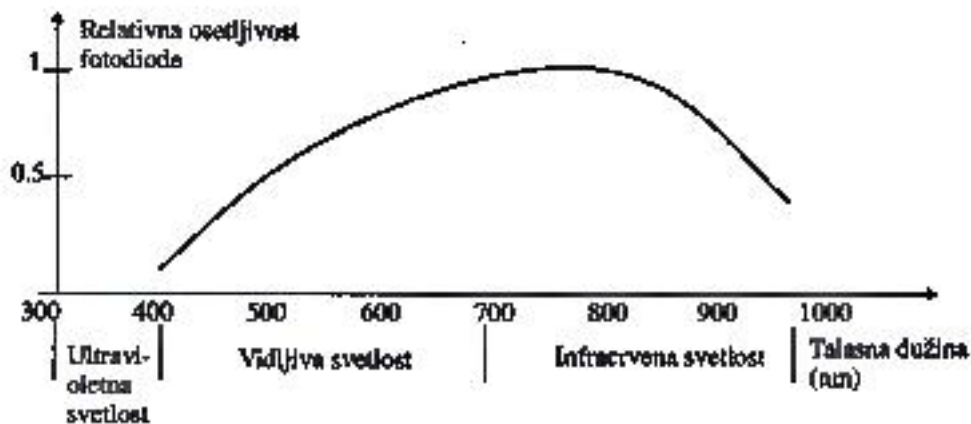
Otpornik  $R_L$  (Slika 23) i inverzno polarisana dioda na taj način čine CR kolo, i struja punjenja i pražnjenja kondenzatora (što ovde predstavlja struju kroz diodu) zavisi od proizvoda  $C_{pn} \cdot R_L$ , tj. od vremenske konstante inverzno polarizovane diode. Ova vremenska konstanta određuje na taj način brzinu rada fotodiode, pa se foto dioda koristi za detektovanje brzo promenljivih svetlosnih signala frekvencije reda 200 MHz. Ako se osvetli kratkotrajnim svetlosnim impulsom vreme uspona i pada su reda 100 ps.

5) Spektralna osetljivost fotodiode predstavlja zavisnost osetljivosti diode od talasne dužine. Pošto je kvantna efikasnost fotodiode funkcija talasne dužine svetlosti, a zavisi i od vrste materijala od koga je izradjena fotodiode, svaka fotodiode je osetljiva u nekom opsegu talasnih dužina. Gornja granična talasna dužina je određena energetskim procepom materijala od koga je izradjena fotodiode i jednaka je

$$\lambda_c = \frac{h \cdot c}{E_g} \quad (10)$$

Za silicijumske diode ona iznosi  $1,06\mu\text{m}$ , a germanijumske  $1,6\mu\text{m}$

Donja granična talasna dužina potiče od fotona velike energije koji generišu par elektron šupljina na površini fotodiode i oni se veoma brzo ponovo rekombinuju pre prolaska kroz detektorsko kolo, pa se fotoni ne detektuju. Na slici 24 je prikazana spektralna karakteristika silicijumske fotodiode-

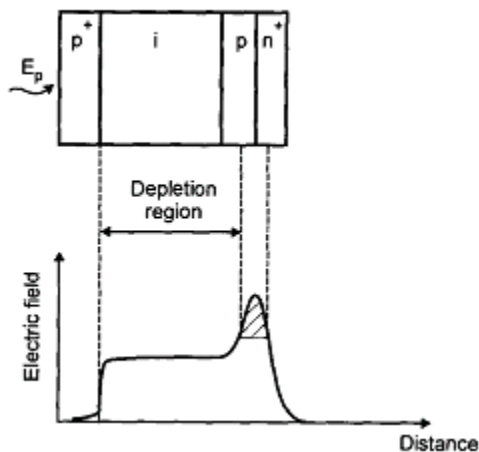


Slika 24. Spektralna osetljivost Si- fotodiode

### 3.4 Lavinske (avalans) fotodiode

**Kada inverzni napon fotodiode predje neku kritičnu vrednost elektroni i šupljine koje su generisali fotoni dostižu u ispražnjennoj zoni energije koje su dovoljne za udarnu jonizaciju i formiranje novih parova elektron šupljina.**

Na karakteristici fotodiode na slici 20 **kritičan napon je je u okolini probojnog napona  $V_c$** . Ispod ovog napona primarni parovi elektron šupljina generišu konačan broj sekundarnih parova., a kada je napon iznad probojnog napona broj generisanih parova se značajno povećava teorijski može biti beskonačan.



Slika 25.

**Struktura lavinske diode je prikazana na slici i ona ima dodatnu p oblast. Velika jačina polja potrebna za udarnu jonizaciju ostvaruje se izmedju p i n<sup>+</sup> sloja i ova oblast se naziva oblast lavinskog proboja. Oblast izmedju p<sup>+</sup> i p naziva se  $\pi$  oblast. Optički signal prolazi kroz p<sup>+</sup> oblast i u  $\pi$  oblasti se apsorbuje pri čemu se generiše primarni par elektron-šupljina. Pod uticajem električnog polja u ispražnjennoj  $\pi$  oblasti elektron i šupljina se razdvajaju i usmereno kreću, šupljina ka p<sup>+</sup>, a elektron ka pn<sup>+</sup> oblasti. Pod dejstvom jakog polja u pn<sup>+</sup> oblasti elektron naglo povećava energiju i u procesu udarne jonizacije generiše se mnoštvo parova elektron- šupljina.**

**Srednji broj parova koji stvara jedan primarni nosilac na jediničnoj dužini naziva se podužni koeficijent jonizacije ili nekad skraćeno koeficijent jonizacije** i kod većine materijala on je različit za elektrone i šupljine, a za određivanje performansi fotodetektora koristi se faktor k koji predstavlja odnos ovih koeficijenata jonizacije za šupljine i elektrone.

**Materijali kod kojih je koeficijent jonizacije znatno veći za elektrone od onog za šupljine imaju manji šum usled stohastičnosti lavinskog umnožavanja i veći proizvod pojačanje puta propusni opseg. Silicijum spada u takve materijale.**

Usled udarne jonizacije u oblasti lavinskog pojačanja , odnos ukupne struje kroz lavinsku fotodiodu prema primarnoj fotostruji tj. strujno pojačanje  $M$  je broj veći od jedinice.

Idealno svaki elektron u  $pn^+$  oblasti bi trebao da proizvede isti broj sekundarnih parova elektron- šupljina , ali to u praksi nije slučaj pa ukupna struja lavinske fotodiode varira zbog ove stohastičke prirode lavinskog umnožavanja. Zbog ovoga se osetljivost lavinske diode ne povećava za iznos lavinskog pojačanja, već manje usled generisanja dodatnog šuma na prethodno opisan način..

**Strujno pojačanje lavinske fotodiode na bazi silicijuma zavisi od talasne dužine optičkog signala , a najviše je za talasne dužine u okolini  $1\mu\text{m}$ .**

Na slici 26 je prikazano strujno pojačanje lavinske fotodiode u funkciji inverznog napona , a za različite temperature fotodiode. **Temperaturna zavisnost strujnog pojačanja lavinske fotodiode je njena mana** jer izvor njenog napajanja mora da ima regulatorske karakteristike.

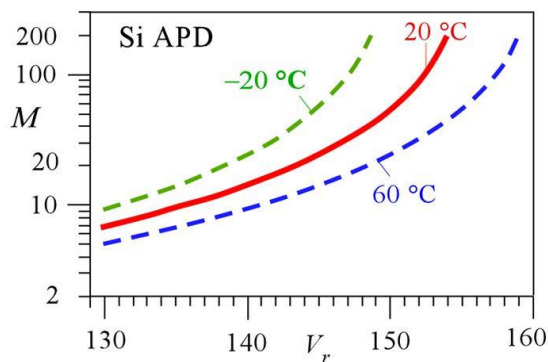
Koeficijent konverzije se definiše i kod lavinske fotodiode i on je dat izrazom

$$R_{km} = \frac{\eta q}{h\nu} \cdot M = R_k \cdot M$$

gde je  $M$  strujno pojačanje (odnos ukupne i primarne struje) lavinske fotodiode, a  $R_k$  je jedinični koeficijent konverzije po obliku jednak onom od PIN fotodiode.

Ovaj tip dioda se izrađuje od silicijuma i InGaAs, i silicijum se koristi u opsegu talasnih dužina 300-1000nm, a InGaAs od 0,9-2,6 $\mu\text{m}$ .

**Avalanche Photodiode**



Typical multiplication (gain)  $M$  vs. reverse bias characteristics for a typical commercial Si APD, and the effect of temperature. ( $M$  measured for a photocurrent generated at 650 nm of illumination)

Sl.26 Zavisnost strujnog pojačanja lavinske fotodiode od inverznog napona  $V_r$  , a za različite temperature

**Izbor između PIN čiji signal mora da se pojača i lavinske fotodiode za konkretnu primenu zavisi više činilaca među kojima je i nivo šuma.** Generalno lavinska fotodiode ima veći šum i bolju osetljivost. Pošto se u realnim kolima vrši pojačavanje signala sa PIN fotodiode, ako je šum samog pojačavača mali onda PIN fotodiode ima niži prag detekcije upadnog optičkog signala, tj. može da detektuje slabije optičke signale i onda se ona i bira za primenu.. Ali ako sam pojačavač za PIN fotodiode stvara jači šum od lavinske fotodiode onda je bolje nju koristiti zbog njenog boljeg pojačanja i većeg dobijenog signala za istu snagu optičkog signala.

### **Šum u električnim i optoelektričnim kolima.**

**Pod šumom se podrazumeva svaka smetnja koja se superponira na koristan signal.**

U elektronici se obično **pod šumom (engleski noise)** podrazumeva onaj koji se generiše usled procesa koji se odvijaju u elektronskim komponentama (unutrašnji šum).

Za razliku od ovog **spoljašnji šum (engleski disturbance)** je smetnja koja dolazi iz okoline i oni se odstranjuju filtriranjem, oklopljavanjem uredjaja i sl.

Najčešće razlikujemo **tri tipa unutrašnjih šumova** i to su

termički,  
kvantni ili sačma šum i  
fliker ili 1/f šum.

**Termički šum** nastaje zbog flutuacije broja elektrona koji čine struju zbog njihovog termalnog kretanja. Ovaj šum se **javlja na otpornicima** i srazmeran je temperaturi  $T$  otpornika, njegovoj otpornosti  $R$  i propusnom opsegu signala.

**Kvantni ili sačma šum se javlja u komponentama koje sadrže p-n spojeve.** Kada se nosioci naelektrisanja kreću kroz p-n spoj njihovo kretanje nije ravnomerno i kontinualno već više impulsno pa dolazi do impulsnih flutuacija struje kroz pn spoj. **I ovaj šum je veći što je struja koja teče kroz direktno polarizovan spoj veća.**

**Fliker šum koji ima 1/f zavisnost javlja se zbog nesvršenosti spojeva raznih materijala u komponentama i na kontaktima.** On se javlja kada kroz komponente teče jednosmerna struja.

Pored ovih kod fotodetektora postoji rekombinacijski šum zbog flutuacija broja elektrona i šupljina pri rekombinacijama, kao i **lavinski šum kod inverzno polarisanih dioda**, zener dioda i lavinskih fotodiode zbog flukuacija u broju stvorenih sekundarnih parova elektron šupljina.

**Kod fotodiode su dominantni kvantni i termički šum.**

**Mera kvaliteta elektronskih komponenata i kola se se meri i preko odnosa signal-šum (SNR- signal to noise ratio) tj odnosa snage dobijenog signala na komponenti i snage šuma koji se generiše.**

