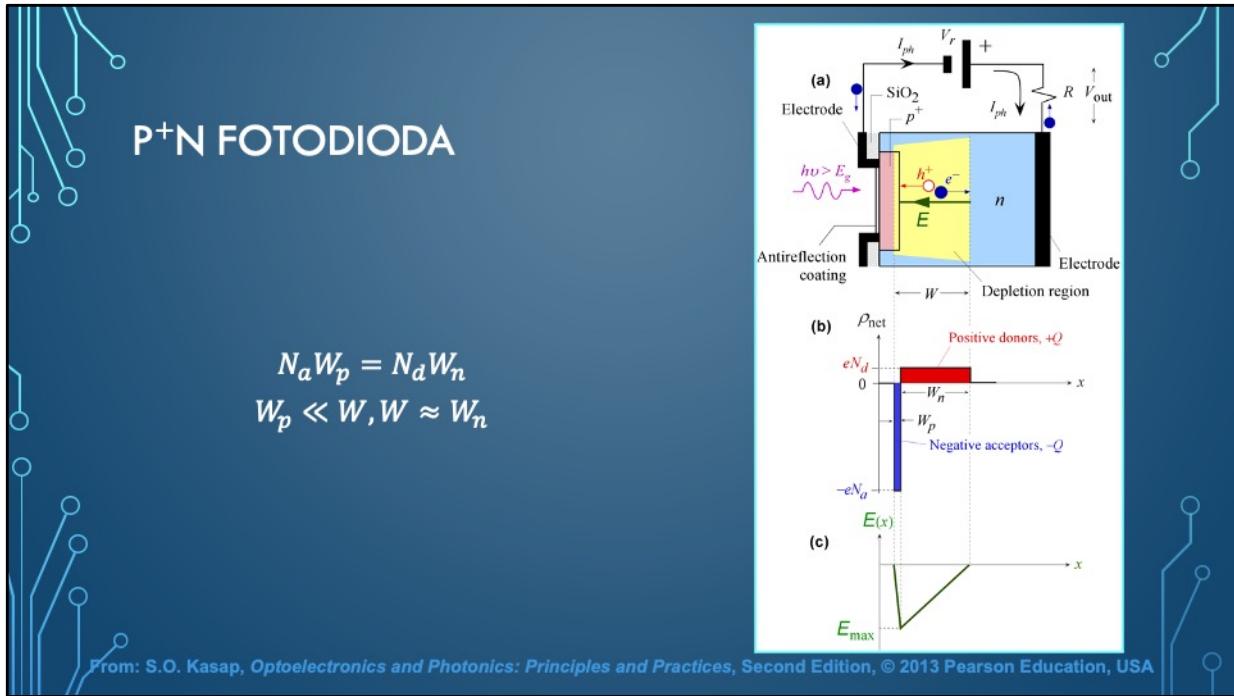




Fotodetektori konvertuju svjetlosni signal u električni signal kao što je struja ili napon. Kod mnogih fotodetektori kao što su fotokonduktori (fotootpornici) i fotodiode ova konverzija se tipično ostvaruje kreiranjem slobodnih parova elektron-šupljina (EHP) apsorpcijom fotona.



Osnovni predstavnik fotodetektora je fotodioda. Malih je dimenzija, visoke brzine i dobre osjetljivosti što je čini pogodnom za mnoge aplikacije u oblasti optoelektronike, prije svega u optičkim komunikacijama.

Na slici je prikazana pojednostavljena struktura tipične *pn* fotodiode, koja se bazira na *p⁺n* spoju, što znači da je koncentracija akceptorja N_a na *p*-strani mnogo veća od koncentracije donora N_d na *n*-strani. Strana koje se osvjetljava sadrži prozor definisan kružnom elektrodom, kako bi se omogućio prolazak fotona. Takođe postoji AR sloj (*antireflection coating*), tipično Si_3N_4 , čija funkcija je redukcija refleksije svjetlosti. *p⁺* sloj je veoma male debljine (manje od $1 \mu\text{m}$), i uglavnom je formiran planarnom difuzijom u epitaksijalni sloj *n*-tipa. Na slici (b) je prikazana prostorna distribucija nanelektrisanja po *p⁺n* presjeku. Ova nanelektrisanja se nalaze u osiromašenoj oblasti i predstavljaju negativno nanelektrisane akceptorske jone na *p⁺* strani, i pozitivno nanelektrisanje donorske jone na *n* strani. Osiromašena oblast se prostire, gotovo u potpunosti, slabo dopiranom *n* stranom, i njena širina je reda nekoliko mikrona.

Fotodioda se bazira na inverzno polarisanom *pn* spoju. Ukoliko je napon inverzne polarizacije V_r , ukupan napon širinom oblasti prostornog tovara iznosi $V_0 + V_r$, gdje je V_0 ugrađeni napon. Napon inverzne polarizacije V_r (reda nekoliko volti, pa i do 20 V) je

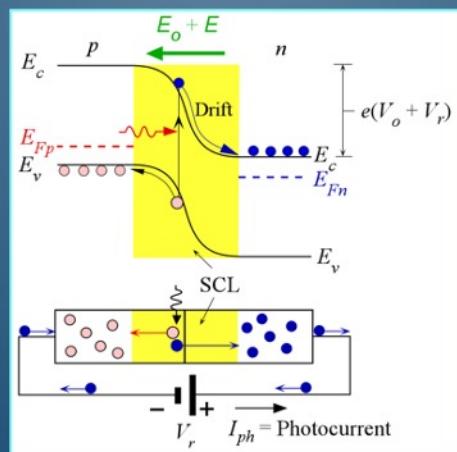
u principu značajno veći od napona V_0 (manje od jednog volta). Električno polje u oblasti prostornog tovara, pri inverznoj polarizaciji pn spoja prikazano je na slici (c). Maksimalnu vrijednost jačina polja dostiže na samom spoju i dominanto se prostire prema slabo dopiranoj n strani.

Kada se foton energije veće od *bandgap* energije E_g usmjeri ka fotodiodi, on biva apsorbovan i potencijalno vrši fotogeneraciju slobodnih parova elektron-šupljina, elektrona u provodnoj zoni i šupljina u valentnoj zoni. Obično je energija fotona tolika da se fotogeneracija dešava u oblasti prostornog tovara. Električno polje E dalje vrši razdvajanje elektrona i šupljina u suprotnim smjerovima dok ne stignu do neutralnih oblasti (van oblasti prostornog tovara). Usmjereno kretanje (*drift*) nosilaca nanelektrisanja predstavlja **fotostruju** I_{ph} . Fotostruja traje koliko je potrebno da nosioci nanelektrisanja pređu oblast prostornog tovara (širinu W), tj. dospiju u neutralna područja. Kako se elektron kreće prema neutralnoj n strani, jedan elektron napušta pn spoj i usmjerava se prema pozitivnom terminalu baterije (slika). Slično, kada se šupljina usmjeri prema neutralnoj p strani, jedan elektron od negativnog terminala baterije se usmjerava prema p strani. Kada šupljina stigne do neutralne p^+ oblasti, rekombinuje se sa elektronom koji je tu dospio iz spoljašnjeg kola. Slično, kada elektron pređe oblast prostornog tovara i dospije u neutralnu n oblast, "zauzima mjesto" elektrona koji je privučen pozitivnim terminalom baterije.

Fotostruja I_{ph} zavisi od broja fotogenerisanih parova elektron-šupljina i *drift* brzine nosilaca nanelektrisanja dok prelaze oblast prostornog tovara. Kako polje nije uniformno, a apsorpcija fotona se dešava na dubinama koje zavise od talasne dužine svjetlosti, vremenska zavisnost fotostruje nije jednostavna.

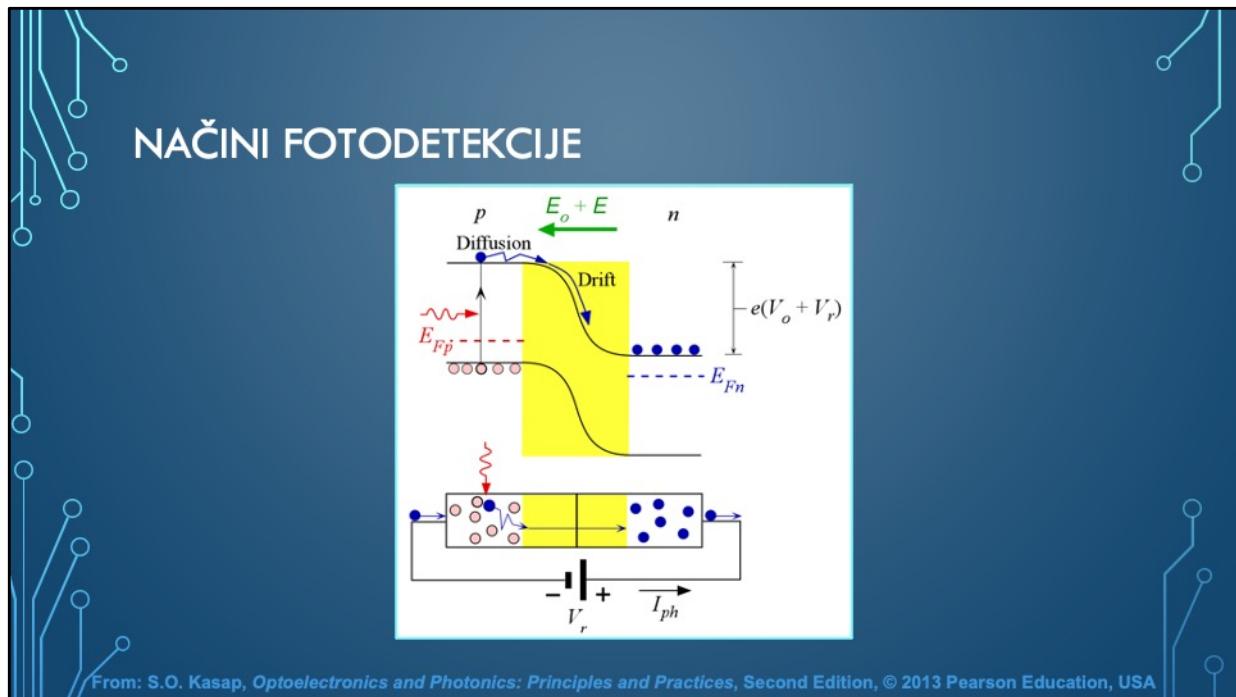
Kako je prikazano na slici (b), širina oblasti prostornog tovara W_p na p strani je veoma mala, dok je širina oblasti prostornog tovara W_n na n strani značajno veća, kako bi bio zadovoljen uslov $N_a W_p = N_d W_n$.

NAČINI FOTODETEKCIJE



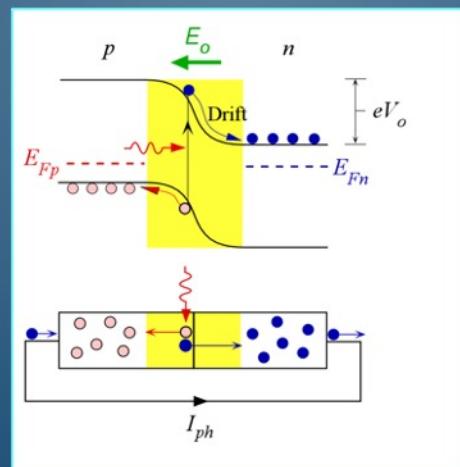
From: S.O. Kasap, *Optoelectronics and Photonics: Principles and Practices*, Second Edition, © 2013 Pearson Education, USA

Na slici je prikazan inverzno polarisan *pn* spoj. Napon inverzne polarizacije je V_r . Polje u okviru oblasti prostornog tovara takođe raste. Promjena energije E_c sa *n* strane prema *p* strani je veoma strma, kao posljedica jakog polja u oblasti prostornog tovara. Apsorpcijom fotona u oblasti prostornog tovara dolazi do kreiranja parova elektron-šupljina. Elektroni i šupljine se razdvajaju i usmjeravaju električnim poljem. To kretanje odgovara "spuštanju" elektrona niz energetski "spust" (duž E_c) prema *n* strani, odnosno "spuštanju" šupljina niz energetski "spust" (duž E_v) prema *p* strani. (Energija šupljina se povećava u smjeru prema dolje.)



Fotogeneracija na rastojanju u okviru difuzione dužine od oblasti prostornog tovara bi takođe dovela do generisanja fotostruje, slika. Par elektron-šupljina je kreiran na p strani u okviru difuzione dužine L_e elektrona na p strani. Elektron može stići do oblasti prostornog tovara jedino difuzijom. *Fotogenerisani* elektron difunduje do oblasti prostornog tovara, gdje biva ubrzan električnim poljem prema n strani. *Drift* kreira fotostruju. Kako se elektron usmjerava prema neutralnom n području, jedan elektron se kreće prema pozitivnom terminalu baterije. Fotogenerisana šupljina na p strani biva neutralizovana elektronom iz eksternog izvora. Fotostruja nastala kao posljedica fotogeneracije u neutralnim oblastima je slabija od fotostruje nastale fotogeneracijom u oblasti prostornog tovara. U drugom slučaju, polje trenutno razdvaja i usmjerava nosioce nanelektrisanja. Fotodetektori se baziraju na fotogeneraciji u oblasti prostornog tovara, pri čemu p^+ oblast ima što manju širinu.

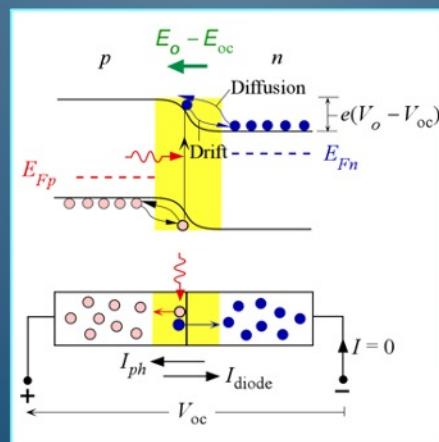
NAČINI FOTODETEKCIJE



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

Određene fotodiode rade u fotonaponskom režimu. Ne postoji eksterni izvor za napajanje. Fotogeneracijom će se formirati par elektron-šupljina koji će biti usmjereni ugrađenim električnim poljem E_o . Nagib energetskog "spusta" nije više strm kao u slučaju inverzno polarisanog pn spoja. Ipak, elektroni će biti usmjereni niz "spust" prema n strani. Slično, šupljine će biti usmjerene prema p strani. Kako se elektroni i šupljine usmjereno kreću, generiše se fotostruja u eksternom kolu. Situacija se razlikuje u odnosu na prvi slučaj u tome što nema inverzne polarizacije, već je dioda kratko spojena. Ukoliko se prema diodi usmjeri veoma kratak impuls svjetlosti, fotostruja će biti manja nego u prvom slučaju jer je polje slabije, pa se nosioci nanelektrisanja kreću sporije.

NAČINI FOTODETEKCIJE



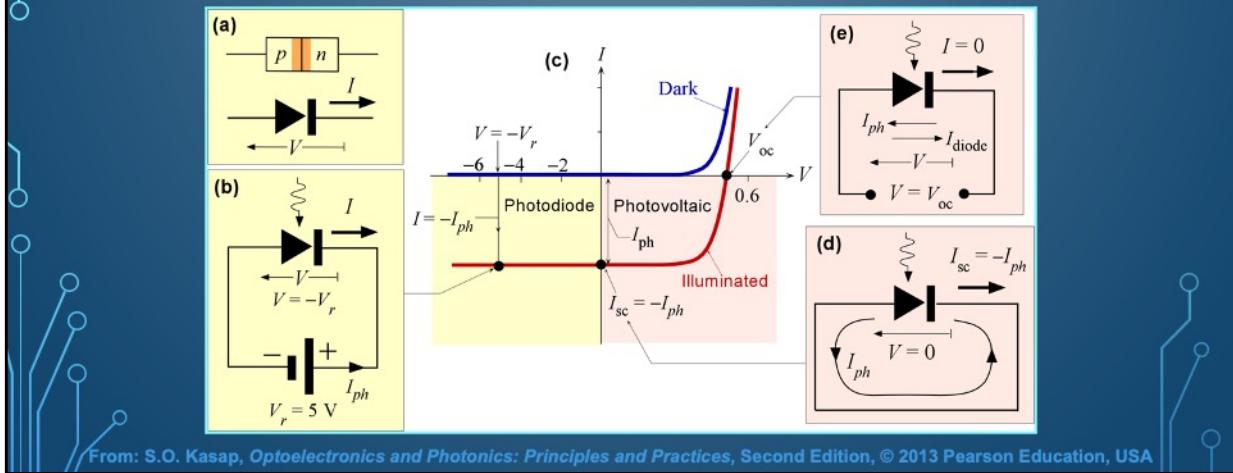
From: S.O. Kasap, *Optoelectronics and Photonics: Principles and Practices*, Second Edition, © 2013 Pearson Education, USA

Ukoliko dioda nije vezna u kolo, detektovao bi se napon na krajevima diode V_{oc} . Opet bi došlo da razdvajanja fotogenerisanih nosilaca nanelektrisanja i njihovog usmjereno kretanja. Na n-strani se formira višak elektrona, dok se na p-strani formira višak šupljina. Kako se fotogeneracija nastavlja, akumulirani elektroni na n-strani neutralizuju neke od pozitivnih jona u oblasti prostornog tovara. Slično, akumulirane šupljine na p-strani neutralizuju neke akceptorske jone u oblasti prostornog tovara blizu neutralne p-strane. Akumulacija elektrona na n-strani i šupljina na p-strani doprinosi povećanju napona V_{oc} na krajevima diode. Redukcija pozitivnih i negativnih donorskih i akceptorskih jona u oblasti prostornog tovara smanjuje intenzitet električnog polja duž oblasti prostornog tovara na $E_o - E_{oc}$, gdje je E_{oc} polje nastalo kao rezultat efekta fotogeneracije u pn spoju u otvorenom kolu. Ugrađeni napon takođe opada sa V_0 na $V_0 - V_{oc}$. Napon V_{oc} se može posmatrati kao direktna polarizacija pn spoja. Ta direktna polarizacija ubrizgava elektrone od n prema p strani, i šupljine od p prema n strani u normalnom radu diode, što bi rezultiralo strujom I_{diode} . Struja I_{diode} je suprotnog smjera od struje I_{ph} i istog su intenziteta. Dakle, rezultat je napon V_{oc} na krajevima diode.

Prilično je očigledno da fotonaponski princip prikazan prethodnim slikama predstavlja kratko spojeno, odnosno otvoreno kolo bez eksternog izvora napajanja i takođe

opisuje princip funkcionisanja solarnih čelija. Naravno, za krajeve solarne čelije (ili *pn* spoja) bi bilo vezano neko opterećenje.

STRUJNO-NAPONSKA KONVENCIJA ZA RAZLIČITE NAČINE FOTODETEKCIJE



Potrebno je uspostaviti odgovarajuću konvenciju oko znaka napona i struje kada je u pitanju fotodioda. Napon V duž pn spoja je usvojen kako je prikazano na slici (a).

Struja / ima smjer od anode prema katodi, slika (a). Ukoliko se primijeni inverzan napon od 5 V, prema usvojenoj konvenciji, zapisuje se kao $V=-V_r=-5$ V, slika (b).

Ukoliko se fotodioda osvijetli, generiraće se fotostruja I_{ph} , sa smjerom kako je prikazano na slici (b), pri čemu je struja I_{ph} sa ovim smjerom pozitivna. Dakle, $I = -I_{ph}$. Na slici (c) prikazana je I - V karakteristika idealnog pn spoja u mraku i kada se osvijetli. U mraku (*Dark*), I - V karakteristika ima standardnu eksponencijalnu formu. Kada je dioda u krakom spoju, struja je $I=I_{sc}=-I_{ph}$, slika (d). Dakle, I - V karakteristika osvijeljenog pn spoja se može dobiti transliranjem prema dolje I - V karakteristike pn spoja u mraku za iznos I_{sc} . Ova karakteristika siječe naponsku osu u tački V_{oc} koja predstavlja napon otvorenog kola koji bi se generisao kada se dioda osvijetli, slika (e), a kada nema struje. U toj situaciji, postoje zapravo dvije struje koje se međusobno poništavaju kako je prethodno objašnjeno.

Oblast I - V karakteristike koja odgovara pozitivnom naponu i negativnoj struji se odnosi na fotonaponski režim rada. Ne postoji polarizacija, svjetlost generiše fotostruju i napon duž uređaja. Oblast I - V karakteristike koja odgovara negativnom naponu i negativnoj struji odnosi se na režim rada pri inverznoj polarizaciji fotodiode. Ovo je najčešći način detekcije svjetlosti. Treba naglasiti da je inverzna struja (*Dark*)

zanemarena u odnosu na struju I_{ph} , što u uslovima slabog osvjetljenja nije opravdana pretpostavka.

KOEFICIJENT APSORPCIJE I MATERIJALI FOTODETEKTORA

$$E_g = \frac{hc}{\lambda_g} \text{ ili } \lambda_g (\mu m) = \frac{1.24}{E_g (eV)}$$

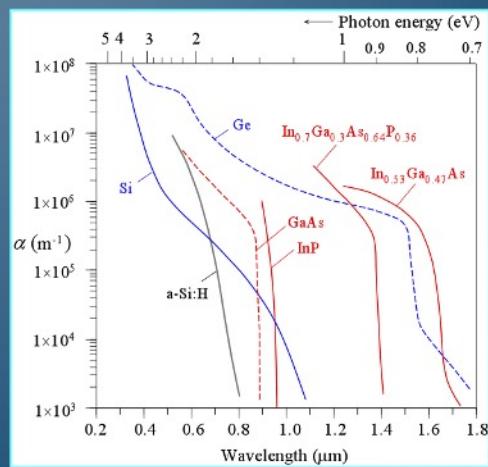
Primjer: Za silicijum energija procjepa iznosi $E_g=1.12 \text{ eV}$, slijedi da je granična talasna dužina $\lambda_g=1.11 \mu m$. Za germanijum energija procjepa iznosi $E_g=0.66 \text{ eV}$, slijedi da je granična talasna dužina $\lambda_g=1.87 \mu m$. Jasno je da se Si fotodioda ne može koristiti u optičkim komunikacijama na $1.3 \mu m$ i $1.55 \mu m$, dok su Ge fotodiode komercijalno dostupne za ove talasne dužine.

Proces apsorpcije fotona u cilju fotogeneracije, odnosno, kreiranja parova elektron šupljina, zahtijeva da energija fotona bude bar jednaka energiji energetskog procjepa (*bangap*) E_g poluprovodničkog materijala kako bi se elektron pobudio iz valentnog nivoa u provodni nivo. Gornja granična talasna dužina λ_g fotogenerativne apsorpcije je, dakle, određena energijom E_g poluprovodničkog materijala:

$$E_g = \frac{hc}{\lambda_g} \text{ ili } \lambda_g (\mu m) = \frac{1.24}{E_g (eV)}$$

KOEFICIJENT APSORPCIJE I MATERIJALI FOTODETEKTORA

$$I(x) = I_0 e^{-\alpha x}$$

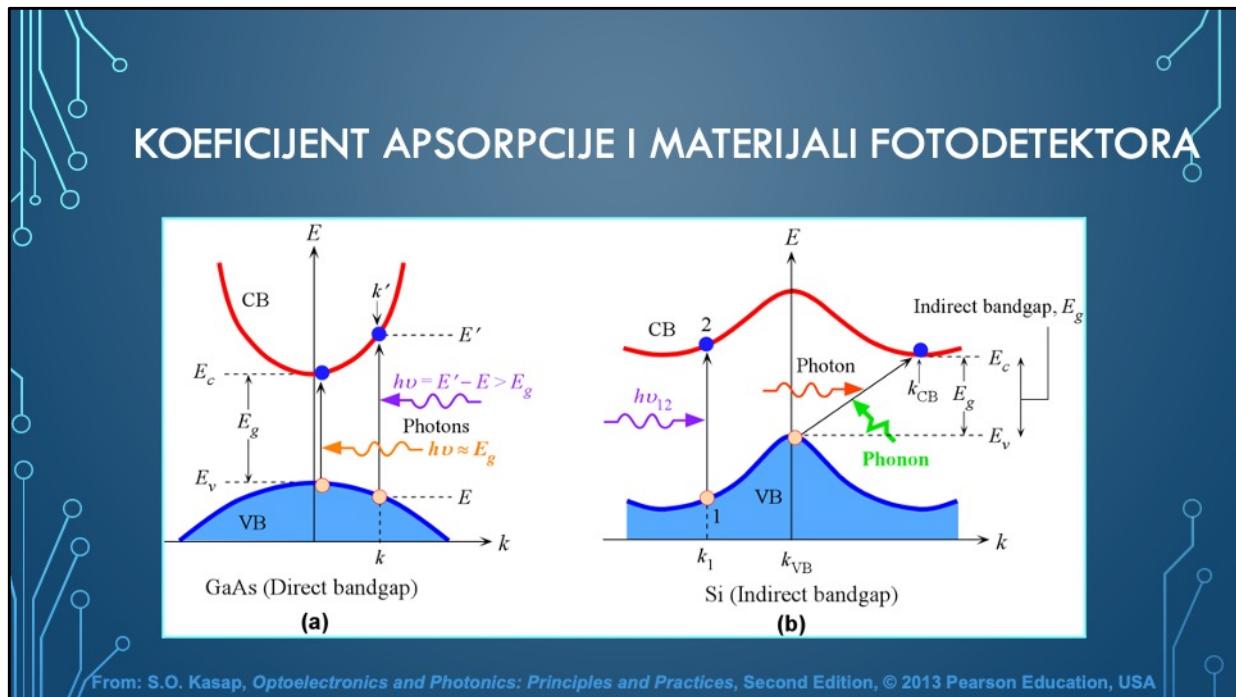


From: S.O. Kasap, *Optoelectronics and Photonics: Principles and Practices*, Second Edition, © 2013 Pearson Education, USA

Upadni fotoni talasne dužine manje od λ_g bivaju apsorbovani dok putuju kroz poluprovodnik, a intenzitet svjetlosti koji je proporcionalan broju fotona, eksponencijalno opada sa predenim rastojanjem. Intenzitet svjetlosti I na rastojanju x od površine poluprovodnika je dat izrazom:

$$I(x) = I_0 e^{-\alpha x}$$

gdje je I_0 intenzitet upadne svjetlosti, dok je α koeficijent apsorpcije koji zavisi od talasne dužine svjetlosti (energije fotona). Koeficijent apsorpcije je svojstvo materijala. Većina apsorpcije fotona (63 %) dešava se na rastojanju $1/\alpha$, i $1/\alpha$ se označava kao apsorpciona dubina (dubina penetracije) δ . Na slici je prikazana zavisnost α od talasne dužine za različite tipove poluprovodnika, gdje je jasno uočljiv uticaj vrste materijala na ovu zavisnost.



Kod ***direct bandgap*** poluprovodnika III-V grupa (GaAs, InAs, InP, GaP) i mnogih njihovih legura (InGaAs, GaAsSb) proces apsorpcije fotona je direktni proces gdje nije potrebno posredovanje vibracija kristalne rešetke. Nakon apsorpcije fotona, elektron je direktno pobuđen iz valentne u provodnu zonu ne mijenjajući svoj kristalni moment. Promjena momenta elektrona pri prelasku iz valentne u provodnu zonu je jednaka momentu fotona koji je značajno manji od momenta elektrona. Dakle, promjena momenta elektrona je zanemarivo mala.

Energija $E' - E_c$ je kinetička energija elektrona, dok je $E_v - E$ kinetička energija zaostale šupljine u valentnoj zoni. Koeficijent apsorpcije α je izведен na bazi vjerovatnoće kvantne mehaničke tranzicije od E do E' . Koeficijent apsorpcije α kod ***direct bandgap*** poluprovodnika izrazito raste sa opadanjem talasne dužine od granične vrijednosti λ_g .

Kod ***indirect bandgap*** poluprovodnika kao što su Si i Ge, momenti elektrona na dnu provodne zone i na vrhu valentne zone se značajno razlikuju. Apsorpcija fotona energije bliske E_g zahtijeva vibracije kristalne rešetke, odnosno apsorpciju i emisiju fonona, u toku procesa apsorpcije fotona. (Vibracije kristalne rešetke se kvantizuju fononima.) Kada je elektron u valentnoj zoni pobuđen prema provodnoj zoni, dolazi do promjene momenta kristala koji ne može biti kompenzovan momentom upadnog

fotona koji je veoma mali. Razlika momenata elektrona pri prelasku iz valentne u provodnu zonu jednaka je momentu fonona.

Proces apsorpcije je indirektni jer zavisi od vibracija kristalne rešetke koje su funkcija temperature. Kako interakcija fotona i valentnog elektrona zahtijeva posrednika, vibraciju kristalne rešetke, vjerovatnoća apsorpcije fotona nije tako visoka kao u slučaju direktnog prelaza. Koeficijent apsorpcije inicijalno sporo raste sa opadanjem talasne dužine od granične vrijednosti λ_g . U toku procesa apsorpcije fotona, fonon može biti apsorbovan ili emitovan. Slika (b) je primjer apsorpcije fonona u toku tranzicije elektrona sa energetskog nivoa E_v na energetski nivo E_c . Ukoliko je ϑ frekvencija vibracija kristalne rešetke, onda je energija fonona $\hbar\vartheta$. Energija fotona frekvencije v je hv . Prema zakonu o održanju energije važi:

$$hv = E_g \pm \hbar\vartheta$$

Dakle, početak apsorpcije se ne podudara sa E_g , ali je obično veoma blizu $\hbar\vartheta < 0.1 \text{ eV}$.

Pri dovoljno velikim energijama fotona, direktna tranzicija eventualno postaje moguća, kako je prikazano na slici (b), tranzicija 1 prema 2. Ukoliko je gradijent krive u valentnoj i provodnoj zoni isti, onda je vjerovatnoća prelaza visoka. Ukoliko se posmatra zavisnost koeficijenta apsorpcije α od talasne dužine za Si, povećanje nagiba u zoni ispod $0.5 \mu\text{m}$ je posljedica upravo ovih direktnih tranzicija.

Izbor materijala za fotodiode mora biti takav da je energija fotona veća od energije E_g . Za odgovarajuću talasnu dužinu svjetlosti, apsorpcija treba da se ostvari u oblasti prostornog tovara, tako da se generisani parovi elektron-šupljina mogu razdvojiti i usmjeriti električnim poljem i prikupiti na elektrodama. Ukoliko je koeficijent apsorpcije suviše veliki, onda će se apsorpcija desiti blizu površine p^+ sloja što je van oblasti prostornog tovara. Odsustvo polja znači da fotogenerisani elektron može dosjeti do oblasti prostornog tovara samo difuzijom. Osim toga, fotogeneracija u blizini površine dovodi do brze rekombinacije. Sa druge strane, ukoliko je koeficijent apsorpcije suviše mali, samo mali dio fotona će biti apsorbovan u oblasti prostornog tovara, pa će i broj generisanih parova elektron-šupljina biti ograničen.

KVANTNA EFIKASNOST I RESPONSIVITY

- Eksterna kvantna efikasnost (QE):

$$\eta_e = \frac{\text{broj elektrona prikupljenih na terminalima detektora u jedinici vremena}}{\text{broj upadnih fotona u jedincici vremena}}$$

$$\eta_e = \frac{I_{ph}/e}{P_0/h\nu}$$

- Interna kvantna efikasnost:

$$\eta_i = \frac{\text{broj fotogenerisanih slobodnih parova elektron/šupljina u jedinici vremena}}{\text{broj apsorbovanih fotona u jedincici vremena}}$$

- Responsivity:

$$R = \frac{\text{fotostruja}}{\text{optička snaga upadne svjetlosti}} = \eta_e \frac{e\lambda}{hc}$$

Neće svi fotoni usmjereni ka fotodioda biti apsorbovani u cilju kreiranja slobodnih parova elektron-šupljina koji će generisati fotostruju. Efikasnost procesa konverzije primljenih fotona u nosioce nanelektrisanja se ocjenjuje kao **eksterna kvantna efikasnost** detektora η_e (ili kvantna efikasnost uređaja).

Kako je fotostruja $I_{ph} = \frac{n_e e}{t}$, pri čemu je n_e broj elektrona prikupljenih na terminalima detektora, dok je optička snaga upadne svjetlosti $P_0 = \frac{n_p h\nu}{t}$, gdje je n_p broj upadnih fotona, slijedi da je:

$$\eta_e = \frac{I_{ph}/e}{P_0/h\nu}$$

Neće svi apsorbovani fotoni uspjeti da generišu slobodne parove elektron-šupljina. Neki od parova elektron-šupljina će nestati u procesu rekombinacije. Osim toga, ukoliko je dimenzija poluprovodnika uporediva sa apsorpcionom dubinom $1/\alpha$, jedan dio fotona neće biti uopšte apsorbovan. Takođe, dio fotona će se reflektovati od površine fotodetektora. Dakle, kvantna efikasnost fotodetektora je uvijek manja od jedinice. Ona zavisi od koeficijenta apsorpcije poluprovodnika za određenu talasnu dužinu i od strukture samog uređaja. Kvantna efikasnost se može povećati

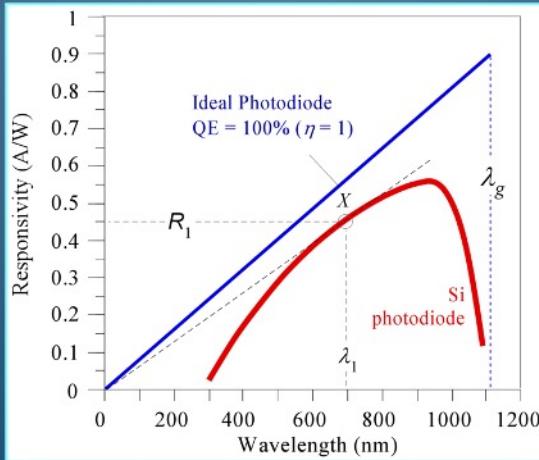
redukovanjem refleksije sa površine poluprovodnika, povećanjem apsorpcije u oblasti prostornog tovara i preveniranjem rekombinacije nosilaca nanelektrisanja.

Interna kvantna efikasnost je broj slobodnih parova elektron-šupljina po apsorbovanom fotonu i tipično ima visoku vrijednost.

Responsivity R fotodiode se odnosi na karakteristike fotodetektora u smislu odnosa fotostruje I_{ph} i optičke sange upadne svjetlosti P_0 za datu talasnu dužinu. Na osnovu izraza za eksternu kvantnu efikasnost dobija se:

$$R = \eta_e \frac{e}{h\nu} = \eta_e \frac{e\lambda}{hc}$$

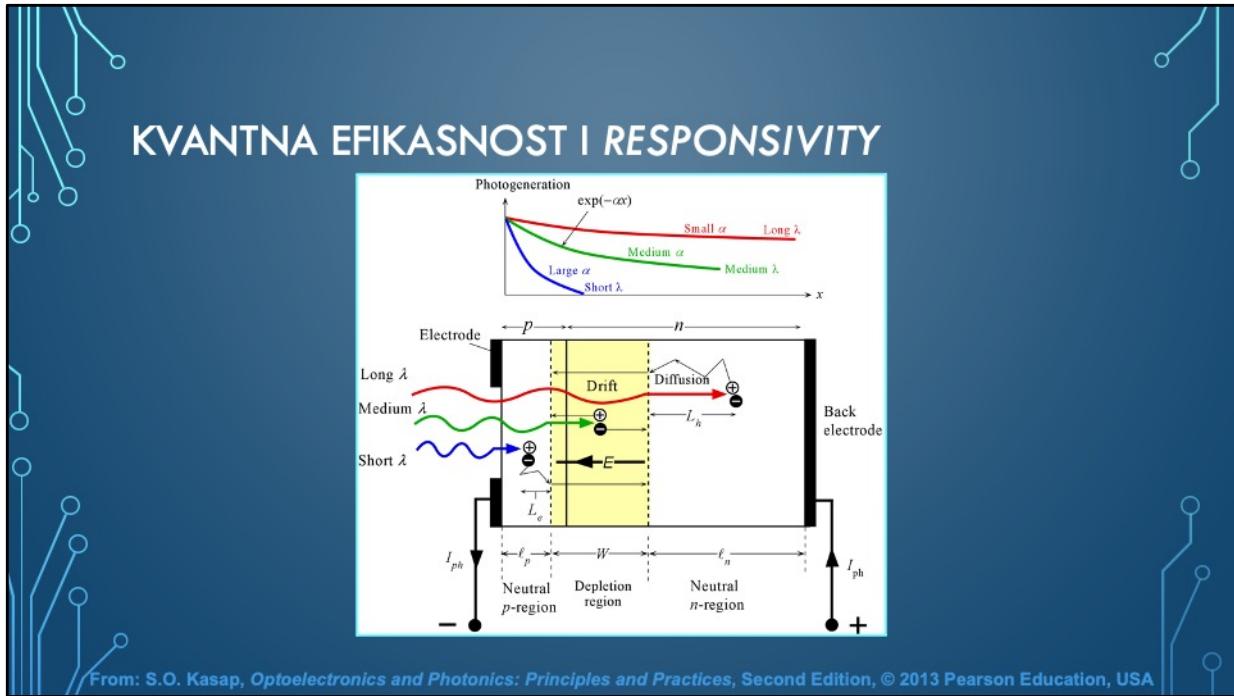
KVANTNA EFIKASNOST I RESPONSIVITY



$$R = \eta_e \frac{e\lambda}{hc}$$

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

Responsivity fotodetektora očigledno zavisi od talasne dužine svjetlosti. Responsivity se označava i kao *spectral responsivity* ili *radiant sensitivity*. Zavisnost ove karakteristike od talasne dužine predstavlja spektralni odziv fotodiode i uglavnom je data u specifikaciji proizvođača. Idealno, ukoliko je eksterna kvantna efikasnost jednaka jedinici, R bi trebalo da raste sa povećanjem talasne dužine do granične talasne dužine λ_g za poluprovodnik, kako je prikazano na slici. U praksi, QE ograničava R na prostor ispod idealne prave fotodiode, sa ograničenom donjom i gornjom talasnom dužinom, kako je prikazano na slici. QE dobro dizajniranih Si fotodioda za opseg talasnih dužina 700 nm - 900 nm može biti i do 90-95 %. Prepostavimo da označimo tangentu na krivu $R(\lambda)$ koja prolazi kroz koordinatni početak. Tačka dodira krive $R(\lambda)$ i tangente (označena sa X na slici) se odnosi na maksimalnu vrijednost QE. Za talasnu dužinu λ_1 eksterna kvantna efikasnost je maksimalna, dok *responsivity* iznosi R_1 , slika.



Oblik krive $R(\lambda)$ zavisi od brojnih faktora među kojima su najvažniji struktura uređaja, koeficijent apsorpcije poluprovodnika i eksterna kvantna efikasnost.

Na slici je prikazana p^+n fotodioda kod koje je p strana jako dopirana. Širine neutralnih p i n regiona su označene sa l_p i l_n , respektivno. Napon inverzne polarizacije generiše električno polje E . Oblast prostornog tovara ima širinu W , dominantno na n strani, dok je l_p značajno manje od W . U suštini postoje tri tipa procesa fotogeneracije koji mogu uticati na posmatranu fotostružu.

Razmotrimo "kratke" talasne dužine, za koje je apsorpciona dužina manja od l_p neutralnog p regiona. Ukoliko se fotogeneracija ostvari u okviru difuzione dužine manjinskih nosilaca nanelektrisanja L_e prema granici oblasti prostornog tovara, kako je prikazano na slici, onda elektron može difuzijom dospjeti do oblasti prostornog tovara, a potom biti ubrzan električnim poljem E prema neutralnoj n oblasti. Fotogenerisana šupljina na p strani je većinski nosilac nanelektrisanja i biće neutralisana elektronom koji nosi fotostružu od negativnog terminala.

Sljedeće su "srednje" talasne dužine, odnosno, apsorpciona dužina je uporediva sa $l_p + W$. Značajan dio fotogeneracije se odvija upravo u oblasti prostornog tovara,

naročito zbog činjenice da je I_p značajno manje od W . Električno polje E u oblasti prostornog tovara razdvaja parove elektron/šupljina i usmjerava ih u suprotnim smjerovima, što doprinosi fotostruji.

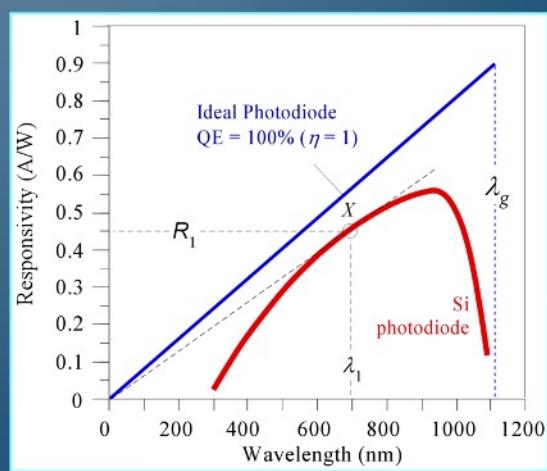
Za "duge" talasne dužine, za koje je apsorpciona dužina veća od I_p+W , samo one šupljine koje su generisane u okviru difuzione dužine manjinskih nosilaca naelektrisanja L_h prema granici prostornog tovara, kako je prikazano na slici, mogu doprinijeti fotostruji.

Dakle, oblast u okviru koje ostvarena fotogeneracija doprinosi fotostruji je L_e+W+L_h .

Iako je u ovoj pojednostavljenoj analizi razmatrana samo apsorpciona dužina (koja zavisi od talasne dužine) i struktura uređaja, kao i interna kvantna efikasnost su takođe veoma značajni faktori. Eksterna kvantna efikasnost ne mora da bude uniformna po čitavom presjeku pn spoja. Za veoma male talasne dužine, apsorpciona dužina je toliko mala da se fotogeneracija ostvaruje veoma blizu površine uređaja, van oblasti L_e+W+L_h . Na slici bi to bila I_p-L_e oblast koja se ponaša kao "mrtva zona" jer slobodni nosioci naelektrisanja nestaju rekombinacijom. Neosjetljivost pojedinih fotodioda na svjetlost male talasne dužine je često posljedica upravo ove "mrtve zone". Ukoliko bi I_p bilo kraće od L_e , neki od slobodnih nosilaca naelektrisanja bi difuzijom dospjeli na površinu fotodiode i tu se rekombinovali.

KVANTNA EFIKASNOST I RESPONSIVITY

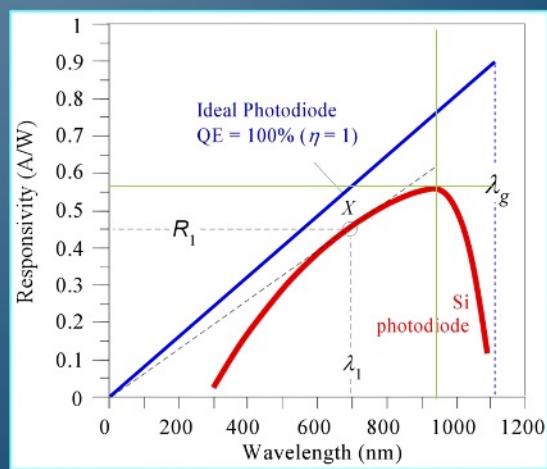
Primjer: Posmatra se fotodioda čija $R(\lambda)$ kriva je data na slici. Koliko iznosi eksterna kvantna efikasnost za maksimalnu vrijednosti responsivity-a?



KVANTNA EFIKASNOST I RESPONSIVITY

Primjer: Posmatra se fotodioda čija $R(\lambda)$ kriva je data na slici. Koliko iznosi eksterna kvantna efikasnost za maksimalnu vrijednost responsivity-a?

Rješenje: Sa slike, $\lambda \approx 940 \text{ nm}$ i $R \approx 0.56 \frac{\text{A}}{\text{W}}$



KVANTNA EFIKASNOST I RESPONSIVITY

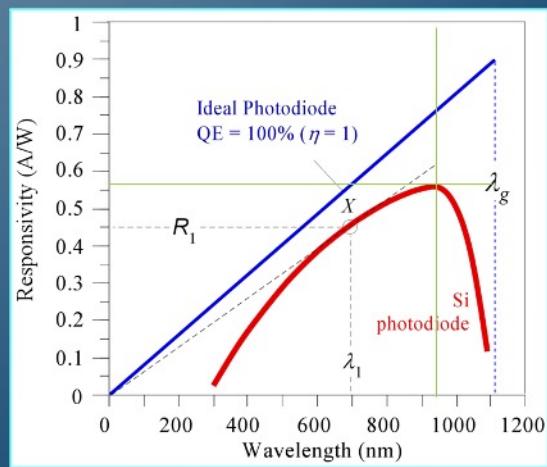
Primjer: Posmatra se fotodioda čija $R(\lambda)$ kriva je data na slici. Koliko iznosi eksterna kvantna efikasnost za maksimalnu vrijednosti responsivity-a?

Rješenje: Sa slike, $\lambda \approx 940 \text{ nm}$ i $R \approx 0.56 \frac{\text{A}}{\text{W}}$

$$R = \eta_e \frac{e\lambda}{hc} \Rightarrow \eta_e = \frac{hc}{e\lambda} R$$

$$\eta_e = \frac{hc}{e\lambda} R$$

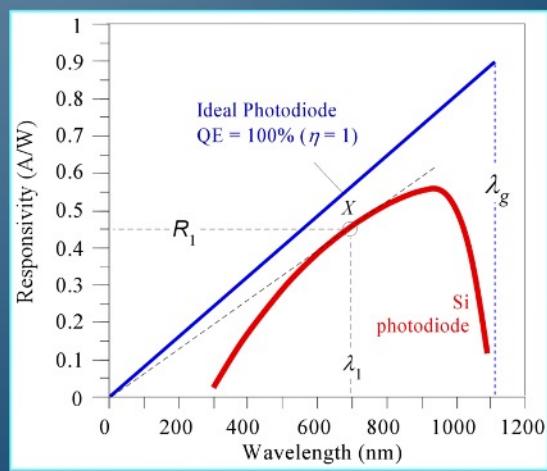
$$= \frac{6.63 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 940 \cdot 10^{-9} \text{ m}} \cdot 0.56 = 0.74$$



KVANTNA EFIKASNOST I RESPONSIVITY

Primjer: Koliko iznosi QE za talasnu dužinu

450 nm?

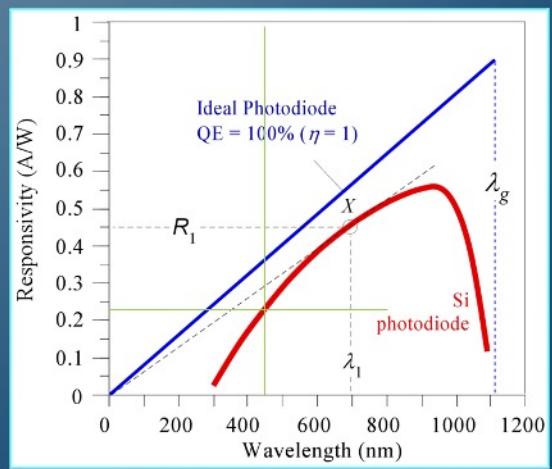


KVANTNA EFIKASNOST I RESPONSIVITY

Primjer: Koliko iznosi QE za talasnu dužinu

450 nm?

Rješenje: Sa slike, $R \approx 0.24 \text{ A/W}$.



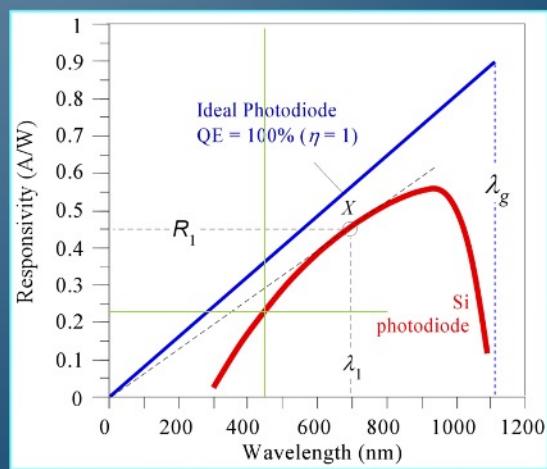
KVANTNA EFIKASNOST I RESPONSIVITY

Primjer: Koliko iznosi QE za talasnu dužinu

450 nm?

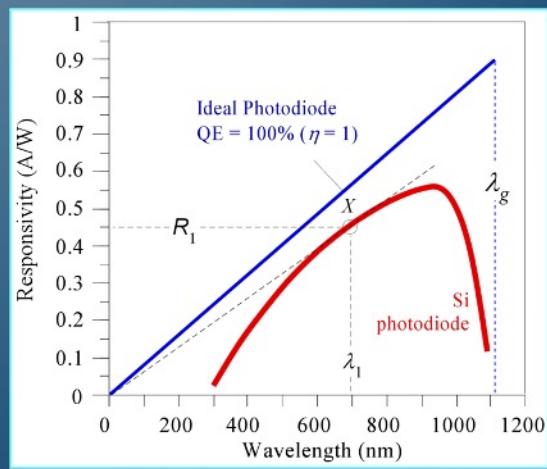
Rješenje: Sa slike, $R \approx 0.24 \text{ A/W}$.

$$\begin{aligned}\eta_e &= \frac{hc}{e\lambda} R \\ &= \frac{6.63 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 450 \cdot 10^{-9} \text{ m}} \cdot 0.24 \\ &= 0.66\end{aligned}$$



KVANTNA EFIKASNOST I RESPONSIVITY

Primjer: Ukoliko je površina fotoosjetljivog uređaja 1 mm^2 , koji intenzitet svjetlosti bi odgovarao struji od 10 nA pri maksimalnoj vrijednosti responsivity-a?



KVANTNA EFIKASNOST I RESPONSIVITY

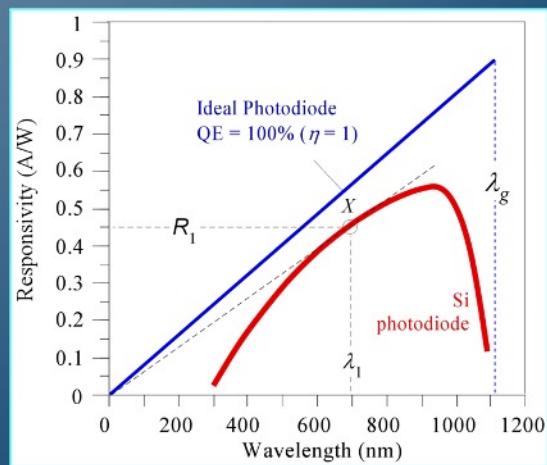
Primjer: Ukoliko je površina fotoosjetljivog uređaja 1 mm^2 , koji intenzitet svjetlosti bi odgovarao struji od 10 nA pri maksimalnoj vrijednosti responsivity-a?

Rješenje:

$$R = 0.56 \frac{A}{W}$$

$$P_o = \frac{I_{ph}}{R} = 18 \text{ nW}$$

Dakle, intenzitet svjetlosti je $18 \frac{\text{nW}}{\text{mm}^2}$.

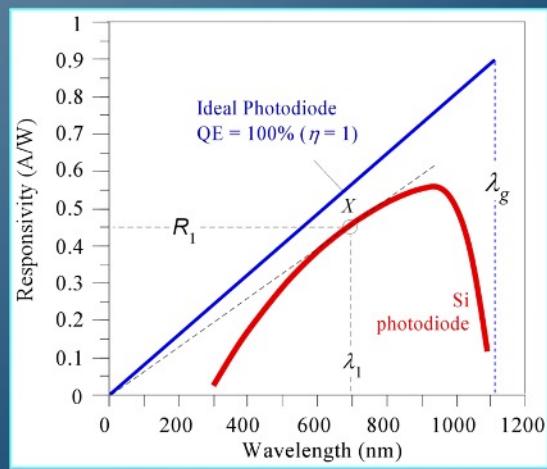


MAKSIMALNA EKSTERNA KVANTNA EFIKASNOST

Primjer: Pokazati da fotodioda ima maksimum eksterne kvantne efikasnosti za

$$\frac{dR}{d\lambda} = \frac{R}{\lambda}$$

odnosno, kada tangenta u tački X za talasnu dužinu λ_1 prolazi kroz koordinatni početak.



MAKSIMALNA EKSTERNA KVANTNA EFIKASNOST

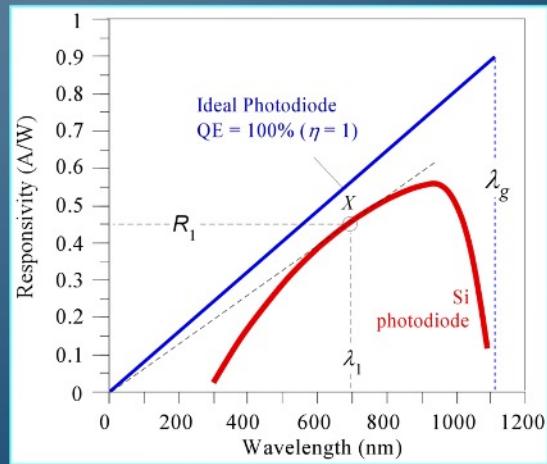
Primjer: Pokazati da fotodioda ima maksimum eksterne kvantne efikasnosti za

$$\frac{dR}{d\lambda} = \frac{R}{\lambda}$$

odnosno, kada tangenta u tački X za talasnu dužinu λ_1 prolazi kroz koordinatni početak.

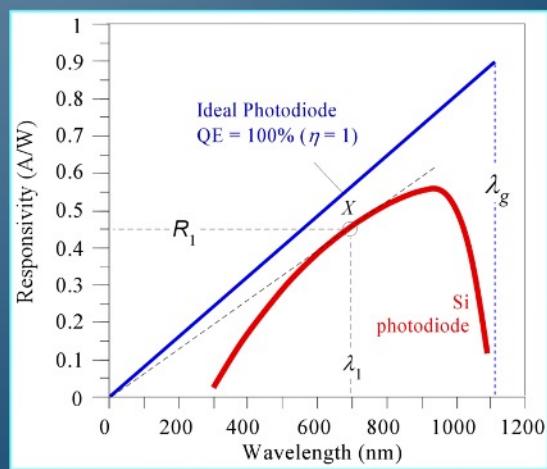
Rješenje: $\eta_e = \frac{hc}{e\lambda} R$

$$\frac{d\eta_e}{d\lambda} = \frac{hc}{e\lambda^2} dR + \frac{hcR}{e} \left(-\frac{1}{\lambda^2} \right) = 0 \Rightarrow \frac{dR}{d\lambda} = \frac{R}{\lambda}$$



MAKSIMALNA EKSTerna KVANTNA EFIKASNOST

Primjer: Odrediti talasnu dužinu za koju QE ima najveću vrijednost za Si fotodiodu kao i vrijednost maksimalne kvantne efikasnosti.

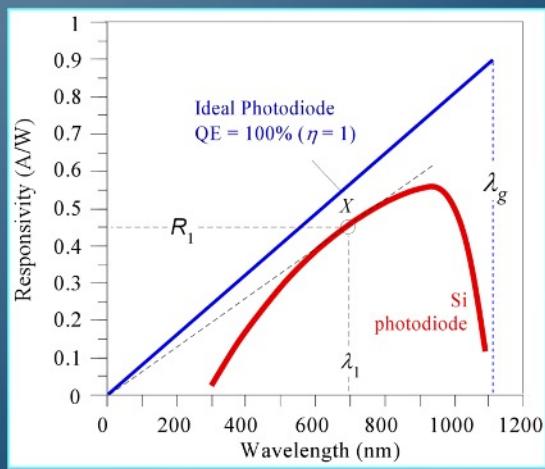


MAKSIMALNA EKSTerna KVANTNA EFKASNOST

Primjer: Odrediti talasnu dužinu za koju QE ima najveću vrijednost za Si fotodiodu kao i vrijednost maksimalne kvantne efikasnosti.

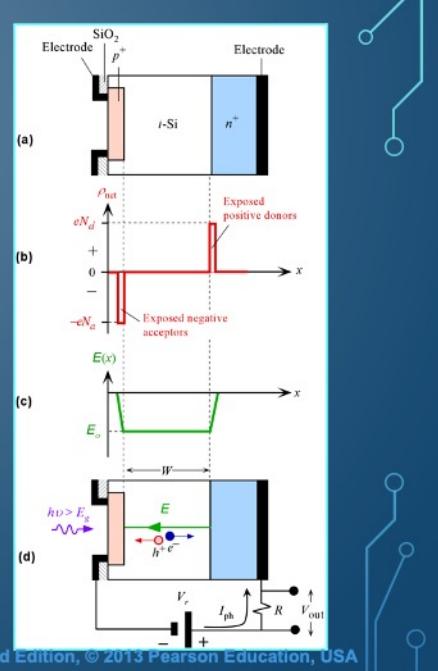
Rješenje: Sa slike: $\lambda_1 = 700 \text{ nm}$, $R = 0.45 \frac{\text{A}}{\text{W}}$

$$\eta_e = \frac{hc}{e\lambda} R = 0.8$$



PIN FOTODIODA

- Nedostaci p^+n fotodiode:
 - Mala širina oblasti prostornog tovara
 - ⇒ Velika kapacitivnost oblasti prostornog tovara
 - ⇒ Mala eksterna kvantna efikasnost za velike talasne dužine



Jednostavna pn fotodioda ima da osnovna nedostatka. Kapacitivnost oblasti prostornog tovara nije dovoljno mala da omogući fotodetekciju na visokim modulacionim učestanostima. U pitanju je ograničenje RC vremenskom konstantom. Drugi nedostatak je taj što je širina oblasti prostornog tovara veoma mala reda nekoliko mikrona. To znači da za velike talasne dužine gdje je apsorpciona dužina veća od širine oblasti prostornog tovara, većina fotona su apsorbovani van oblasti prostornog tovara gdje nema električnog polja da razdvoji i usmjeri nosioce nanelektrisanja. Eksterna efikasnost je samim tim veoma niska za velike talasne dužine. Ovi problem su značajno ublaženi kod **pin** (*p-intrinsic-n*) fotodioda.

Pin se odnosi na poluprovodničke uređaje koji se baziraju na strukturi $p^+-intrinsic-n^+$ kako je prikazano na slici. Unutrašnji (*intrinsic*) sloj je značajno manje dopiran u odnosu na p^+ i n^+ regije i mnogo je širi u odnosu na ove regije, tipično 5-50 μm . Kod idealizovane *pin* fotodiode, može se smatrati da je i-Si region nedopiran. Kada se formira ova struktura, šupljine difunduju sa p^+ strane, dok elektroni difunduju sa n^+ strane prema i-Si sloju gdje se rekombinuju i nestaju. Ovaj proces za sobom ostavlja tanak sloj negativnih akceptorskih jona na p^+ strani i tanak sloj pozitivnih donorskih jona na n^+ strani, kako je prikazano na slici.

Dva nanelektrisanja su razdvojena i-Si slojem širine W . Postoji uniformno ugrađeno električno polje E_0 u i-Si sloju koje potiče od pozitivnih jona prema negativnim jonoma

kako je prikazano na slici (c). U slučaju oblasti prostornog tovara, ugrađeno električno polje nije uniformno. Bez primjene eksterne polarizacije, ravnoteža je ostvarena ugrađenim poljem E_0 koje onemogućava dalju difuziju većinskih nosilaca nanelektrisanja u i-Si sloj. Razdvajanje dva veoma tanka sloja negativnog i pozitivnog nanelektrisanja na fiksnom rastojanju, širine W , odgovara pločastom kondenzatoru. Kapacitivnost spoja ili osiromašenog sloja C_{dep} pin fotodiode je data kao:

$$C_{dep} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{W}$$

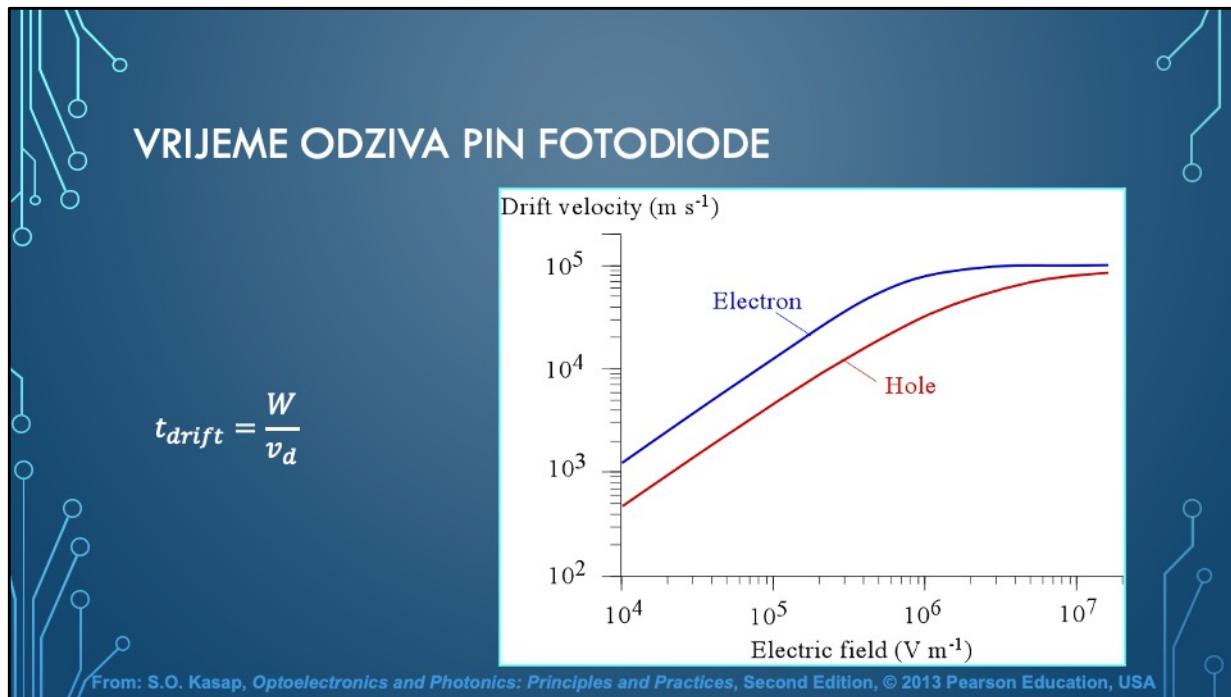
gdje je A površina poprečnog presjeka, dok je ϵ_r relativna permitivnost poluprovodnika Si. Kako je širina W konstantna, kapacitivnost spoja C_{dep} ne zavisi od primjenjenog napona kao što je to bilo u slučaju pn fotodioda. C_{dep} je tipično reda pikofarada kod brzih pin fotodioda tako da sa $50\text{-}\Omega$ otpornošću, vremenska konstanta RC_{dep} iznosi oko 50 ps.

Kada se primjeni napon inverzne polarizacije V_r na pin fotodiodu, kako je prikazano na slici (d), dolazi do povećanja ugrađenog napona na $V_0 + V_r$. Električno polje E je i dalje uniformno i iznosi:

$$E = E_0 + \frac{V_r}{W} \approx \frac{V_r}{W}, V_r \gg V_0$$

pin struktura je dizajnirana tako da se apsorpcija fotona ostvaruje u *i*-Si sloju. Fotogenerisani parovi elektron-šupljina u *i*-Si sloju se razdvajaju pod uticajem električnog polja E i usmjeravaju se ka n^+ i p^+ strani, slika (d). Dok fotogenerisani nosioci nanelektrisanja *drift*-uju kroz *i*-Si sloj, povećava se fotostruja, što se detektuje kao pad napona na otporniku R na slici.

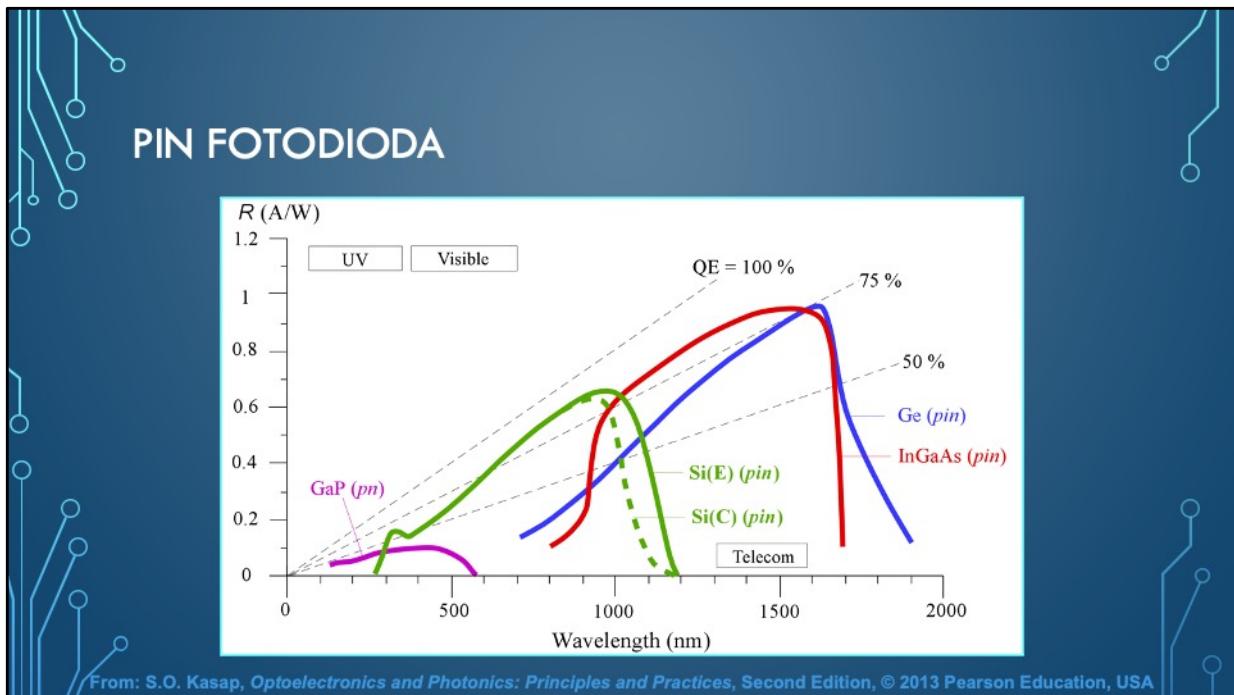
Prikazana struktura *pin* fotodiode je naravno idealizovana. U stvarnosti, *i*-Si sloj će biti malo dopiran. Na primjer, ukoliko je središnji sloj slabo dopiran poluprovodnik *n* tipa, označava se kao *v*-sloj dok je struktura p^+vn^+ . Središnji *v*-sloj postaje osiromašeni sloj sa malom koncentracijom pozitivnih donorskih jona. Polje tada nije u potpunosti uniformno. Maksimum polja je na spoju p^+v a potom lagano opada prema n^+ strani.



Vrijeme odziva (*response time*) pin fotodiode je određeno tranzitnim vremenom fotogenerisanih nosilaca nanelektrisanja širinom i -Si sloja. Povećanjem širine W omogućava se apsorpcija većeg broja fotona, što povećava QE ali usporava brzinu odziva jer tranzitno vrijeme postaje duže. Za nosioca nanelektrisanja koji je fotogenerisani na ivici i -Si sloja, tranzitno vrijeme ili vrijeme *drift-a* t_{drift} iznosi:

$$t_{drift} = \frac{W}{v_d}$$

gdje je v_d brzina *drift-a*. Kako bi se redukovalo vrijeme *drift-a*, odnosno kako bi se povećala brzina odziva, potrebno je povećati v_d , tj. pojačati polje E . Pri velikim vrijednostima polja, brzina *drift-a* ne prati očekivani trend $\mu_d E$, gdje je μ_d *drift* pokretljivost nosilaca nanelektrisanja, već ima težnju saturacije na vrijednost v_{sat} koja je reda 10^5 m/s za polja iznad 10^6 V/m u slučaju silicijuma. Na slici je prikazana zavisnost *drift* brzine nosilaca nanelektrisanja (elektrona i šupljina) od primjenjenog električnog polja. Za i -Si sloj širine 10 um, sa nosiocima nanelektrisanja čija brzina je u zasićenju, vrijeme *drift-a* je oko 0.1 ns što je duže nego tipična RC_{dep} vremenska konstanta. Brzina pin fotodiode je ograničena vremenom tranzita fotogenerisanih nosilaca nanelektrisanja duž i -Si sloja.



Kao što je već pomenuto, izrazita prednost *pin* fotodiode je ta što omogućava apsorpciju šireg spektralnog opsega u oblasti prostornog tovara gdje se odvija fotogeneracija. Posljedično, *responsivity* R *pin* fotodiode generalno ima veću vrijednost nego kod jednostavnih *pn* fotodioda i može se kontrolisati širinom *i* sloja. Si i InGaAs *pin* fotodiode su široko dostupne na tržištu, pokrivajući opseg talasnih dužina od oko 800 nm do 1700 nm. Ge *pin* fotodiode su takođe dostupne ali im je veća *dark* struja. Na slici je prikazana zavisnost $R(\lambda)$ za Ge, Si i InGaAs *pin*, kao i GaP *pn* fotodetektore od UV (150 nm) zračenja do talasnih dužina koje odgovaraju optičkim komunikacionim kanalima. Isprekidana linija označava *responsivity* koja odgovara određenim eksternim kvantnim efikasnostima, QE = 50 %, 75 %, 100 %. Može se primijetiti da Si i InGaAs *pin* fotodiode imaju QE iznad 75 % i samim tim se koriste za veliki broj različitih aplikacija. GaP *pn* fotodiode se koriste za detekciju UV zračenja, a postoje i Si *pn* fotodiode koje takođe mogu detektovati UV zračenje. Takođe se može uočiti da se InGaAs fotodiode mogu koristiti i za 1550 nm i za 1310 nm optičke sisteme.

PIN FOTODIODA

Primjer: Si pin fotodioda ima i-Si sloj širine $20 \mu\text{m}$. p+ sloj na strani koja se osvjetljava ima širinu $0.1 \mu\text{m}$. Fotodioda je inverzno polarisana naponom od 100 V i osvjetljena veoma kratkim svjetlosnim impulsom talasne dužine 900 nm . Koliko iznosi vrijeme odziva fotodiode? Koeficijent apsorpcije za talasnu dužinu 900 nm iznosi $3 \times 10^4 \text{ m}^{-1}$.

PIN FOTODIODA

Primjer: Si pin fotodioda ima i-Si sloj širine $20 \mu\text{m}$. p+ sloj na strani koja se osvjetljava ima širinu $0.1 \mu\text{m}$. Fotodioda je inverzno polarisana naponom od 100 V i osvjetljena veoma kratkim svjetlosnim impulsom talasne dužine 900 nm . Koliko iznosi vrijeme odziva fotodiode? Koeficijent apsorpcije za talasnu dužinu 900 nm iznosi oko $3 \times 10^4 \text{ m}^{-1}$.

Rješenje:

Kako je koeficijent apsorpcije $3 \times 10^4 \text{ m}^{-1}$, apsorpciona dužina iznosi oko $33 \mu\text{m}$. To znači da se može pretpostaviti da se apsorpcija, a s tim i fotogeneracija odigrava u okviru i-Si sloja.

Polje u i-Si sloju je:

$$E \approx V_r/W = 5 \times 10^6 \text{ V/m}$$

PIN FOTODIODA

Rješenje:

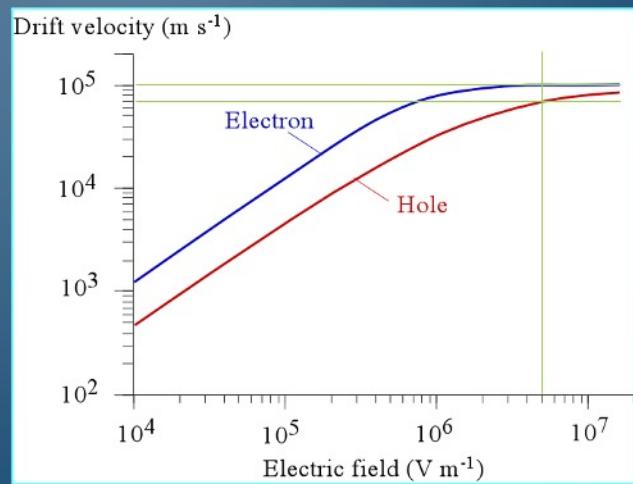
$$E \approx V_r/W = 5 \times 10^6 \text{ V/m}$$

Pri ovom polju, brzina drift-a elektrona je veoma blizu zasićenja na oko 10^5 m/s . Brzina drift-a šupljina iznosi:

$$v_h \approx 7 \cdot 10^4 \text{ m/s}$$

Tranzitno vrijeme šupljina iznosi:

$$t_h = W/v_h \approx 0.29 \text{ ns}$$



PIN FOTODIODA

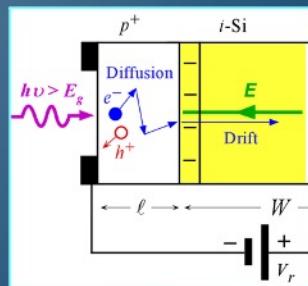
Rješenje:

Tranzitno vrijeme šupljina predstavlja vrijeme odziva fotodiode, jer su šupljine sporije od elektrona.

Kako bi se smanjilo vrijeme odziva, bilo bi potrebno smanjiti širinu i-Si sloja. Međutim, na taj način bi se ugrozio responsivity.

PIN FOTODIODA

Primjer: Inverzno polarisana fotodioda je osvjetljena svjetlosnim impulsom male talasne dužine koji je apsorbovan u blizini površine, slika. Fotogenerisani elektron treba da izvrši difuziju prema osiromašenoj oblasti. Koja je brzina odziva ove fotodiode ukoliko je i-Si sloj širok $20 \mu\text{m}$ dok je p^+ sloj širok $1 \mu\text{m}$. Primjenjeni inverzni napon iznosi 60 V . Difuzioni koeficijent D_e elektrona u jako dopiranom p^+ regionu je oko $3 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$.



PIN FOTODIODA

Rješenje:

Na p^+ strani, elektron se kreće difuziono. Za vrijeme t , elektron, prosječno, pređe rastojanje l prema relaciji:

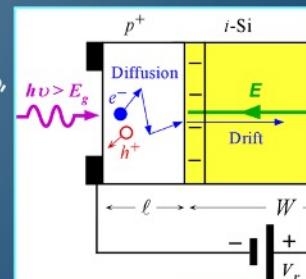
$$l = \sqrt{2D_e t}$$

Difuziono vrijeme t_{diff} je vrijeme za koje elektron difuzijom pređe rastojanje l :

$$t_{diff} = l^2 / 2D_e = 1.67 \text{ ns.}$$

Sa druge strane, kada elektron dođe do osiromašene oblasti, polje će ga usmjeriti jačinom:

$$E = \frac{V_r}{W} = 3 \text{ MV/m}$$



PIN FOTODIODA

Rješenje:

Pri ovom polju, drift brzina elektrona je u zasićenju na oko 10^5 m/s.

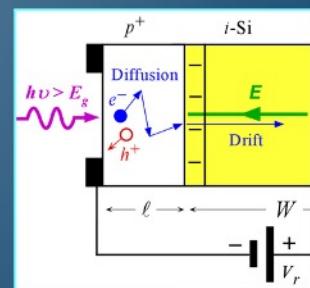
Vrijeme drifta iznosi:

$$t_{drift} = \frac{W}{v_e} = 0.2 \text{ ns}$$

Slijedi da je vrijeme odziva pin fotodiode na svjetlosni impuls veoma male talasne dužine koji je apsorbovan u blizini površine približno:

$$t_{diff} + t_{drift} = 1.87 \text{ ns.}$$

Naravno, odgovarajuća analiza bi podrazumijevala razmatranje difuzije i drift-a mnogih nosilaca nanelektrisanja i pronađenje bar neke srednje vrijednosti.



PIN FOTODIODA

Primjer: Si pin fotodioda ima kružnu aktivnu površinu prečnika 0.4 mm . Kada se prema njoj usmjeri crvena svjetlost talasne dužine 700 nm i intenziteta 0.1 mW/cm^2 , ona generiše fotostruju od 56.6 nA . Koliko iznosi responsivity i eksterna kvantna efikasnost fotodiode na 700 nm ?

PIN FOTODIODA

Primjer: Si pin fotodioda ima kružnu aktivnu površinu prečnika 0.4 mm. Kada se prema njoj usmjeri crvena svjetlost talasne dužine 700 nm i intenziteta 0.1 mW/cm², ona generiše fotostruju od 56.6 nA. Koliko iznosi responsivity i eksterna kvantna efikasnost fotodiode na 700 nm?

Rješenje: Optička snaga upadne svjetlosti je:

$$P_0 = r^2 \pi I = 0.126 \mu\text{W}$$

PIN FOTODIODA

Primjer: Si pin fotodioda ima kružnu aktivnu površinu prečnika 0.4 mm. Kada se prema njoj usmjeri crvena svjetlost talasne dužine 700 nm i intenziteta 0.1 mW/cm², ona generiše fotostruju od 56.6 nA. Koliko iznosi responsivity i eksterna kvantna efikasnost fotodiode na 700 nm?

Rješenje: Optička snaga upadne svjetlosti je:

$$P_0 = r^2 \pi I = 0.126 \mu\text{W}$$

Responsivity je:

$$R = I_{ph}/P_0 = 0.45 \text{ A/W},$$

PIN FOTODIODA

Primjer: Si pin fotodioda ima kružnu aktivnu površinu prečnika 0.4 mm. Kada se prema njoj usmjeri crvena svjetlost talasne dužine 700 nm i intenziteta 0.1 mW/cm², ona generiše fotostruju od 56.6 nA. Koliko iznosi responsivity i eksterna kvantna efikasnost fotodiode na 700 nm?

Rješenje: Optička snaga upadne svjetlosti je:

$$P_0 = r^2 \pi I = 0.126 \mu\text{W}$$

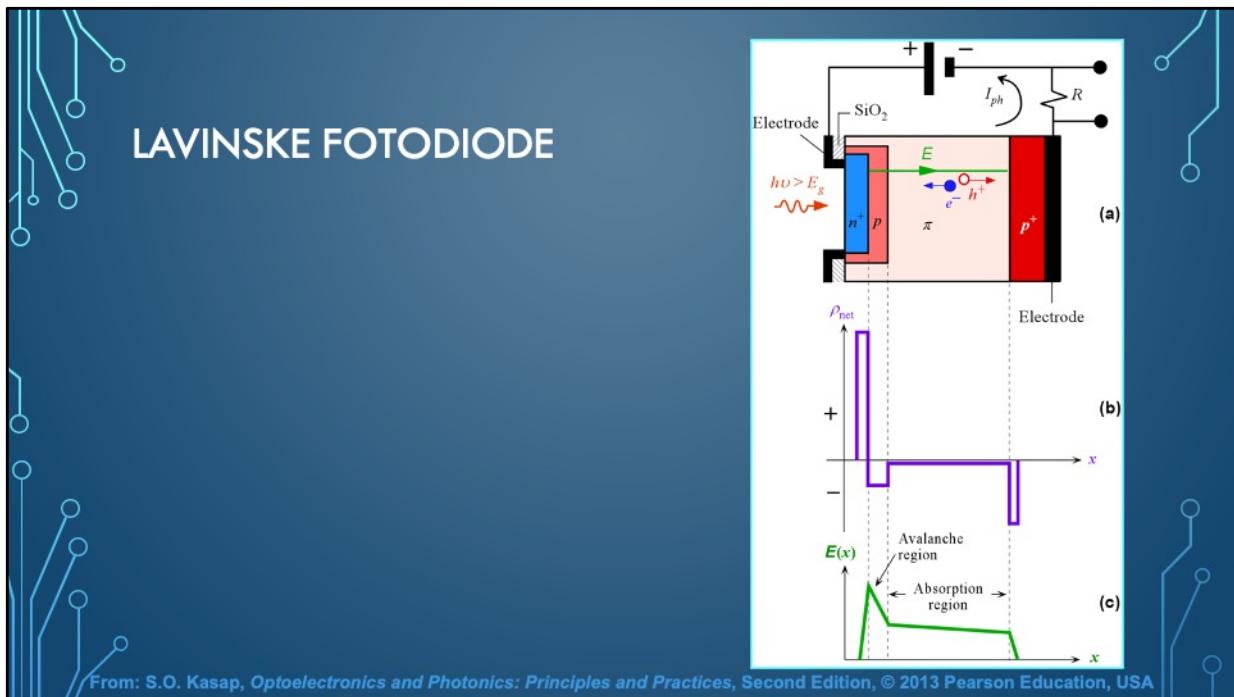
Responsivity je:

$$R = I_{ph}/P_0 = 0.45 \text{ A/W},$$

dok je eksterna kvantna efikasnost:

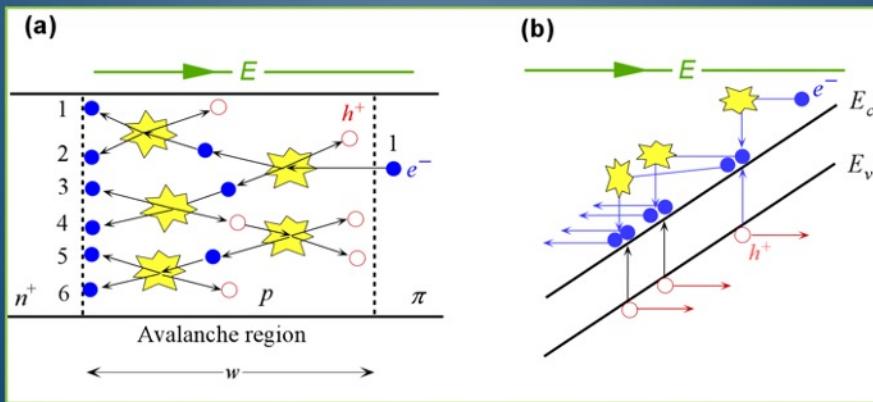
$$\eta_e = R \frac{hc}{e\lambda} = 0.8$$

LAVINSKE FOTODIODE



Lavinske fotodiode (APD Avalanche Photodiode) se široko koriste u optičkim komunikacijama zbog svoje visoke brzine i internog pojačanja. Takođe se koriste u aplikacijama gdje je osjetljivost značajna. Pojednostavljen šematski dijagram Si *reach-through* APD je prikazan na slici. n^+ sloj je veoma tanak i upravo sa te strane se vrši osvjetljavanje fotodiode. Osim n^+ sloja, postoje još tri p sloja različitog stepena dopiranosti kako bi se dobila odgovarajuća raspodjela polja. Susjedni n^+ sloju je veoma tanak p sloj, slijedi deblji slabo dopiran p sloj, koji se označava kao π -sloj, i na kraju visoko dopiran p^+ sloj. Dioda se inverzno polariše kako bi se povećalo polje u osiromašenoj oblasti. Na slici (b) je prikazana raspodjela nosilaca nanelektrisanja po poprečnom presjeku lavinske fotodiode. Bez spoljašnje polarizacije, osiromašeni sloj u p oblasti (između n^+ i p) se ne prostire svom širinom ovog sloja. Kada se izvrši dovoljna inverzna polarizacija fotodiode, osiromašena oblast se širi da dosegne (*reach-through*) do π -sloja. Polje je usmjereni od pozitivnih donorskih jona u uskoj osiromašenoj oblasti n^+ sloja, pa sve do negativnih akceptorskih jona u uskoj osiromašenoj oblasti p^+ sloja. Promjene polja po poprečnom presjeku fotodiode su prikazane na slici (c). Polje dostiže maksimum na n^+p spoju, zatim slabo opada kroz p sloj, dok je širinom π -sloja nagib još manji kao posljedica malog stepena dopiranosti. Polje dostiže nultu vrijednost na kraju oblasti prostornog tovara u p^+ sloju.

LAVINSKE FOTODIODE

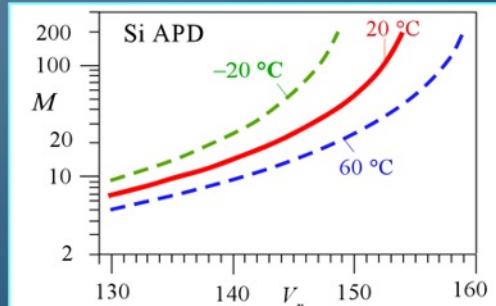


Apsorpcija fotona, pa samim tim i fotogeneracija, se odigrava u π -sloju. Gotovo uniformno polje u ovoj oblasti razdvaja i usmjerava generisane parove elektron-šupljina brzinama koje su blizu zasićenja prema n^+ i p^+ strani, respektivno. Kada usmjereni elektron stigne do p sloja, nađe se pod uticajem još jačeg polja, dobije dovoljnu kinetičku energiju (veću od E_g) da izvrši *impact*-jonizaciju silicijuma pri čemu se oslobađa par elektron-šupljina, slika (a). Prilikom "udara" energičnog elektrona koji je u provodnoj zoni vibracijama kristalne rešetke se prenosi kinetička energija valentnom elektronu kako bi se pobudio i prešao u provodnu zonu, slika (b). Nosioci naelektrisanja generisani *impact*-jonizacijom se označavaju kao sekundarni nosioci naelektrisanja. Sekundarni nosioci naelektrisanja i sami mogu biti dovoljno ubrzani pod uticajem polja do sticanja kritične kinetičke energije na osnovu koje mogu izazvati dalju *impact*-jonizaciju i osloboditi dodatne parove elektron-šupljina, što dalje vodi do lavinskog procesa *impact*-jonizacije. Dakle, pomoću jednog elektrona koji je dospio do p oblasti može se generisati veliki broj parova elektron-šupljina, koji doprinose fotostruji. Fotodioda posjeduje interni pojačavački mehanizam koji omogućava da se pomoću jednog apsorbovanog fotona generiše veliki broj parova elektron-šupljina. Fotostruja kod APD u prisustvu lavinske multiplikacije, dakle, odgovara kvantnoj efikasnosti preko jedinične vrijednosti.

LAVINSKE FOTODIODE

$$M = \frac{\text{multiplicirana fotostruja}}{\text{primarna nemultiplicirana fotostruja}} = \frac{I_{ph}}{I_{ph0}}$$

$$M = \frac{1}{1 - \left(\frac{V_r}{V_{br}}\right)^m}$$



Multiplikacija nosilaca nanelektrisanja u lavinskoj oblasti zavisi od vjerovatnoće *impact-ionizacije*, koja jako zavisi od intenziteta polja u ovoj oblasti, pa samim tim i od napona inverzne polarizacije V_r . Ukupni, ili efektivni faktor multiplikacije M , ili pojačanje, se definiše kao:

$$M = \frac{\text{multiplicirana fotostruja}}{\text{primarna nemultiplicirana fotostruja}} = \frac{I_{ph}}{I_{ph0}}$$

gdje je I_{ph} APD fotostruja, dok je I_{ph0} primarna fotostruja. I_{ph0} je struja u odsustvu efekta multiplikacije, na primjer, pri veoma malim naponima inverzne polarizacije V_r . Faktor multiplikacije M je funkcija inverznog napona V_r i temperature, slika, i može se aproksimativno opisati empirijski dobijenom relacijom:

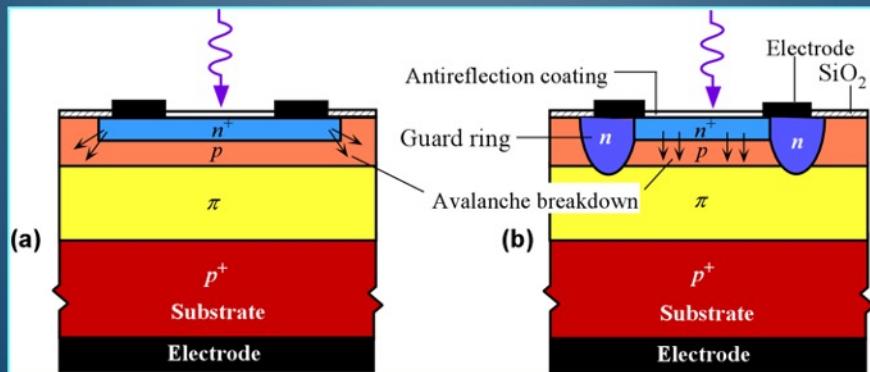
$$M = \frac{1}{1 - \left(\frac{V_r}{V_{br}}\right)^m}$$

gdje je V_{br} lavinski probajni napon, dok je m karakteristični indeks eksperimentalno dobijen. I probajni napon V_{br} i indeks m su temperaturno zavisni. Sa Si APD, faktor multiplikacije M iznosi i do 1000 i više, dok za mnoge komercijalne Ge i InGaAs APD ovaj faktor iznosi oko 10 - 20.

Brzina *reach-through* APD zavisi od tri faktora. Prvi je vrijeme koje je potrebno da fotogenerisani elektron pređe π -sloj do multiplikacionog p -sloja. Drugi je vrijeme koje je potrebno da se ostvari lavinski proces u p -oblasti i generišu se parovi elektron-šupljine. Treći je vrijeme koje je potrebno posljednjoj šupljini oslobođenoj u lavinskom procesu da pređe π -sloj.

Vrijeme odziva lavinske fotodiode je uglavnom duže nego kod *pin* fotodiode, što znači manju brzinu. Međutim, frekventni opseg optičkog prijemnika prije svega određuje frekventni opseg ostale elektronike odnosno transimpedansnog pojačavača. Kako je struja lavinske fotodiode značajno veća nego *pin* fotodiode, transimpedansni pojačavač ne mora imati veliku vrijednost transimpedanse, što znači veći brzinu. Slijedi da se sa APD mogu ostvariti visoke brzine rada.

LAVINSKE FOTODIODE



Jedan od nedostataka jednostavne *reach-through* ADP strukture je u tome što polje na n^+p spoju na ivicama, slika (a) dovodi do lavinskog probroja brže nego direktno ispod osvijetljenog dijela. Idealno bi bilo da se lavinska multiplikacija dešava uniformno u osvijetljenoj oblasti kako bi se podstakla multiplikacija primarne fotostruje, a ne *dark* struje (termalno generisanih parova elektron-šupljina). Iz navedenih razloga, uvodi se zaštitni n prsten oko centralnog n^+ regiona kako je prikazano na slici (b). Probojni napon na periferiji je sada veći i lavinski proces se ograničava na region koji je direktno ispod otvora za svjetlost. Slojevi n^+ i p su veoma tanki (ispod $2 \mu m$) kako bi se redukovala apsorpcija fotona u ovom regionu i najveći dio apsorpcije obavio u π -sloju.

PREGLED KARAKTERISTIKA TIPIČNIH FOTODIODA

Photodiode	$\lambda_{\text{range}} (\text{nm})$	$\lambda_{\text{peak}} (\text{nm})$	$R \text{ at } \lambda_{\text{peak}} (\text{A W}^{-1})$	Gain	$I_d \text{ for } 1 \text{ mm}^2$	Features
GaP <i>pin</i>	150–550	450	0.1	<1	1 nm	UV detection ^a
GaAsP <i>pn</i>	150–750	500–720	0.2–0.4	<1	0.005–0.1 nA	UV to visible, covering the human eye, low I_d
GaAs <i>pin</i>	570–870	850	0.4–0.5	<1	0.1–1 nA	High speed, low I_d
Si <i>pn</i>	200–1100	600–900	0.5–0.6	<1	0.005–0.1 nA	Inexpensive, general purpose, low I_d
Si <i>pin</i>	300–1100	800–1000	0.5–0.6	<1	0.1–1 nA	Faster than <i>pn</i>
Si APD	400–1100	800–900	0.4–0.6 ^b	$10\text{--}10^3$	1–10 nA ^c	High gains, fast
Ge <i>pin</i>	700–1800	1500–1580	0.4–0.7	<1	0.1–1 μA	IR detection, fast
Ge APD	700–1700	1500–1580	0.4–0.8 ^b	10–20	1–10 μA^c	IR detection, fast
InGaAs <i>pin</i>	800–1700	1500–1600	0.7–1	<1	1–50 nA	Telecom, high speed, low I_d
InGaAs APD	800–1700	1500–1600	0.7–0.95 ^b	10–20	0.05–10 μA^c	Telecom, high speed, and gain
InAs <i>pn</i>	2–3.6 μm	3.0–3.5 μm	1–1.5	<1	>100 μA	Photovoltaic mode; normally cooled
InSb <i>pn</i>	4–5.5 μm	5 μm	3	<1	Large	Photovoltaic mode; normally cooled

LAVINSKE FOTODIODE. PRIMJER

Primjer: InGaAs lavinska fotodioda ima eksternu kvantnu efikasnost 60% za talasnu dužinu $1.55 \mu m$ u odsustvu multiplikacije ($M=1$). APD je polarisana tako da se postigne faktor multiplikacije $M=12$. Izračunati fotostruju ukoliko je optička snaga upadne svjetlosti 20 nW . Koliko iznosi responsivity R' kada je $M=12$?

LAVINSKE FOTODIODE. PRIMJER

Primjer: InGaAs lavinska fotodioda ima eksternu kvantnu efikasnost 60 % za talasnu dužinu $1.55 \mu m$ u odsustvu multiplikacije ($M=1$). APD je polarisana tako da se postigne faktor multiplikacije $M=12$. Izračunati fotostruju ukoliko je optička snaga upadne svjetlosti $20 nW$. Koliko iznosi responsivity R' kada je $M=12$?

Rješenje: Responsivity R u funkciji eksterne kvantne efikasnosti je

$$R = \eta_e \frac{e\lambda}{hc} = 0.75 \frac{A}{W}$$

Ukoliko je I_{ph0} primarna fotostruja i P_0 optička snaga upadne svjetlosti, tada je:
 $I_{ph0} = RP_0 = 15 nA$

LAVINSKE FOTODIODE. PRIMJER

Rješenje: Responsivity R u funkciji eksterne kvantne efikasnosti je

$$R = \eta_e \frac{e\lambda}{hc} = 0.75 \frac{\text{A}}{\text{W}}$$

Ukoliko je I_{ph0} primarna fotostruja i P_0 optička snaga upadne svjetlosti, tada je:

$$I_{ph0} = RP_0 = 15 \text{ nA}$$

Fotostruja I_{ph} lavinske fotodiode je:

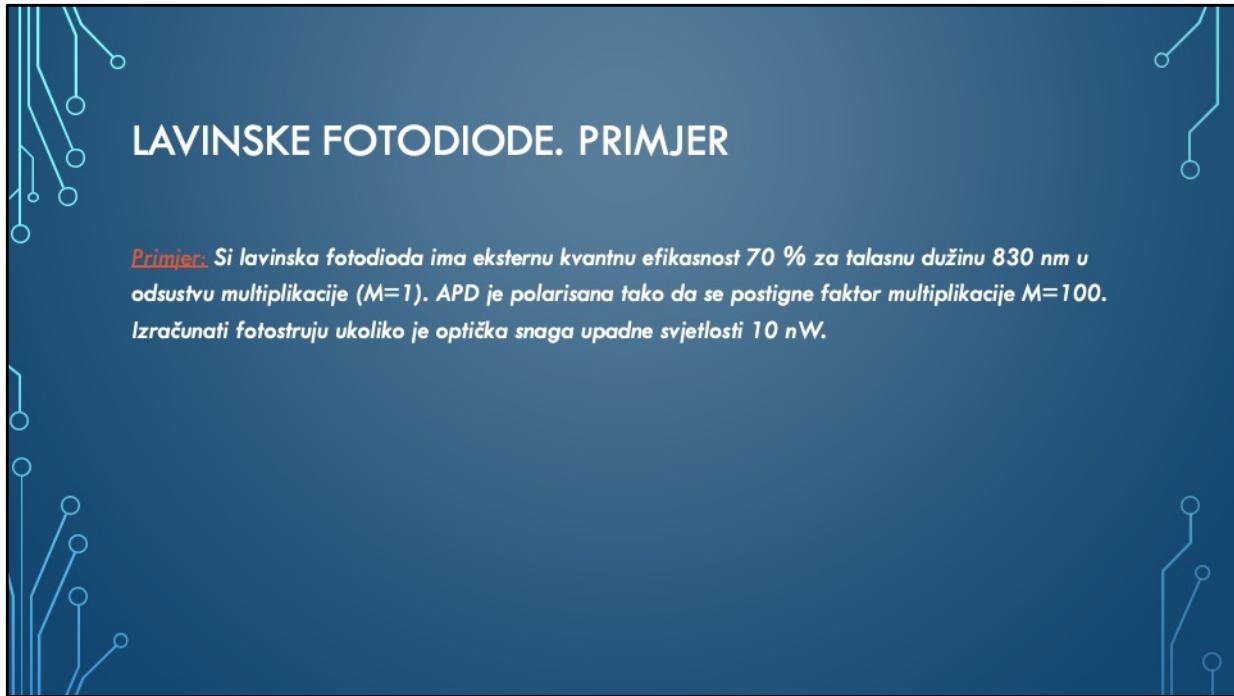
$$I_{ph} = MI_{ph0} = 180 \text{ nA}$$

Responsivity R' za $M=12$:

$$R' = \frac{I_{ph}}{P_0} = MR = 9 \text{ A/W}$$

LAVINSKE FOTODIODE. PRIMJER

Primjer: Si lavinska fotodioda ima eksternu kvantnu efikasnost 70 % za talasnu dužinu 830 nm u odsustvu multiplikacije ($M=1$). APD je polarisana tako da se postigne faktor multiplikacije $M=100$. Izračunati fotostruju ukoliko je optička snaga upadne svjetlosti 10 nW .



LAVINSKE FOTODIODE. PRIMJER

Primjer: Si lavinska fotodioda ima eksternu kvantnu efikasnost 70 % za talasnu dužinu 830 nm u odsustvu multiplikacije ($M=1$). APD je polarisana tako da se postigne faktor multiplikacije $M=100$. Izračunati fotostruju ukoliko je optička snaga upadne svjetlosti 10 nW .

Rješenje: Responsivity R u funkciji eksterne kvantne efikasnosti je

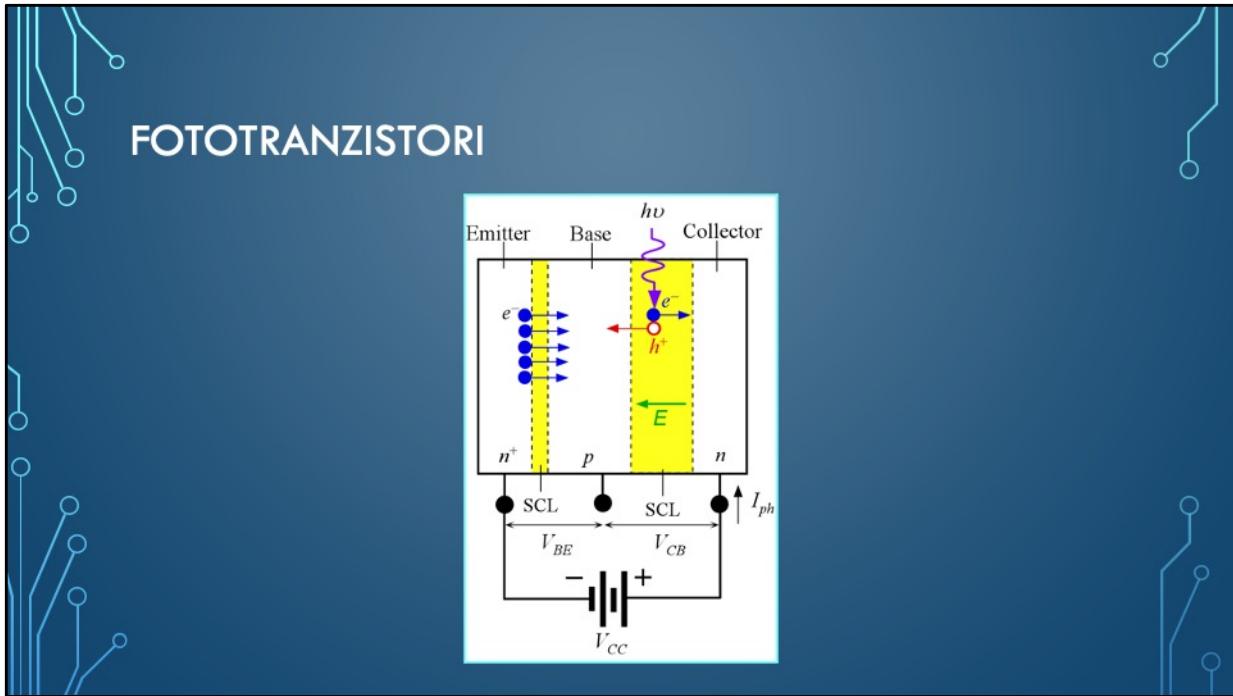
$$R = \eta_e \frac{e\lambda}{hc} = 0.47 \frac{\text{A}}{\text{W}}$$

Ukoliko je I_{ph0} primarna fotostruja i P_0 optička snaga upadne svjetlosti, tada je:

$$I_{ph0} = RP_0 = 4.7 \text{ nA}$$

Fotostruja I_{ph} lavinske fotodiode je:

$$I_{ph} = MI_{ph0} = 470 \text{ nA}$$



Fototranzistor je BJT koji radi kao fotodetektor sa pojačanjem fotostruje. Osnovni princip je ilustrovan na slici. U idealnom slučaju, polje postoji samo u oblasti prostornog tovara. Terminal baze je otvoren. Upadni foton se apsorbuje u oblasti prostornog tovara između baze i kolektora kako bi se formirao par elektron-šupljina. Polje E usmjerava nosioce nanelektrisanja u suprotnim smjerovima. Generisana struja se označava kao primarna fotostruja i to je zapravo bazna struja iako je bazni terminal otvoren (struja teče od kolektora prema bazi, a ne kroz terminal baze). Kada elektron usmjeren poljem stigne do kolektora, privlači ga pozitivni terminal baterije. Sa druge strane, kada šupljina stigne do neutralnog regiona baze, ona se može neutralizovati samo ubrizgavanjem velikog broja elektrona u bazu, kako je dalje objašnjeno, što uslovljava ubrizgavanje velikog broja elektrona od emitora. Tipično vrijeme rekombinacije elektrona u bazi je mnogo veće od vremena koje je potrebno da elektron difunduje kroz bazu. To znači da se samo mali dio elektrona koji su ubrizgani od emitora mogu rekombinovati sa fotogenerisanim šupljinama koje su ušle u bazu. Dakle, emitor će morati da ubrizga veliki broj elektrona kako bi se neutralisala jedna šupljina u bazi. Ovi elektroni (osim jednog koji se rekombinovao) se difuzijom kreću preko baze prema kolektoru i formiraju fotostruju.

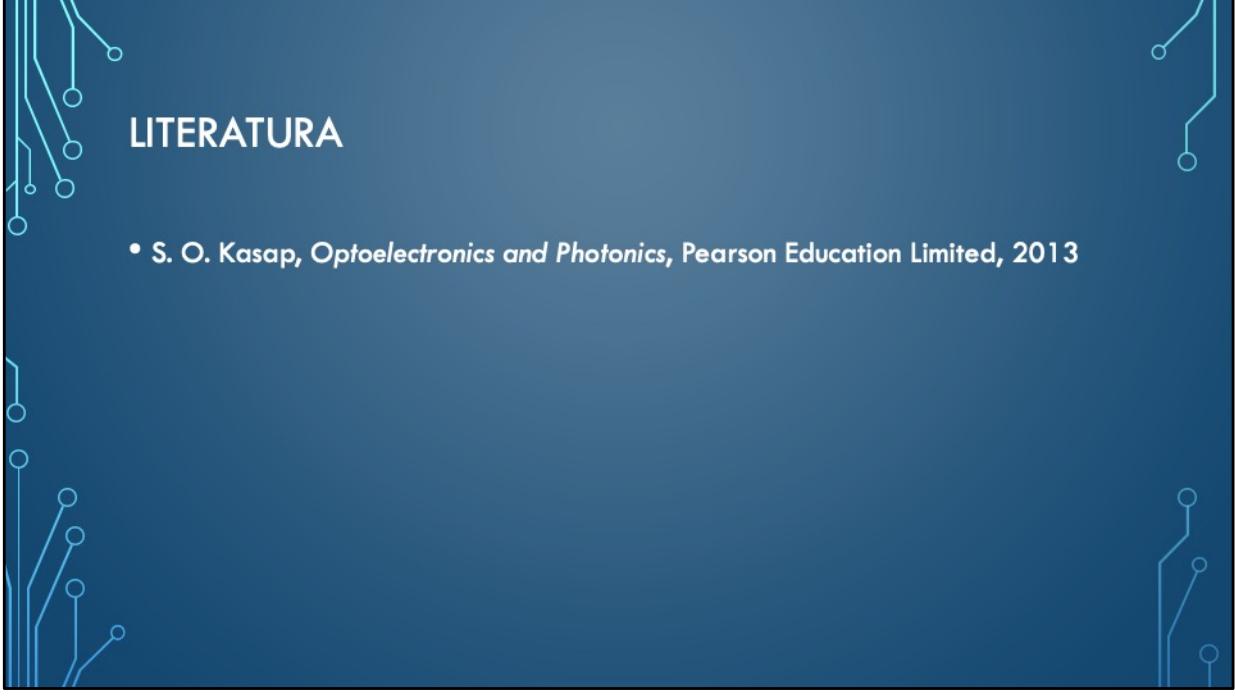
Alternativno, fotogeneracija parova elektron-šupljina u kolektorskoj oblasti postornog

tovara smanjuje otpornost ovog regiona, što dovodi do smanjenja napona V_{CB} . Kao posljedica, napon V_{BE} se mora povećati kako bi $V_{BE}+V_{CB}=V_{CC}$, slika. Ovo povećanje napona baza-emitor djeluje kao da postoji dodatna direktna polarizacija spoja što dovodi do ubrizgavanja elektrona u bazu, $I_E \propto \exp\left(\frac{eV_{BE}}{k_b T}\right)$.

Kako je fotogenerisana primarna fotostruja I_{ph0} pojačana kao da je u pitanju bazna struja, fotostruja koja teče kroz eksterno kolo će biti:

$$I_{ph} \approx \beta I_{ph0}$$

Konstrukcija fototranzistora naravno omogućava apsorpciju svjetlosti u oblasti prostornog tovara na spoju baza kolektor. Većina komercijalnih fototranzistora nemaju eksterni priključak za bazu.



LITERATURA

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