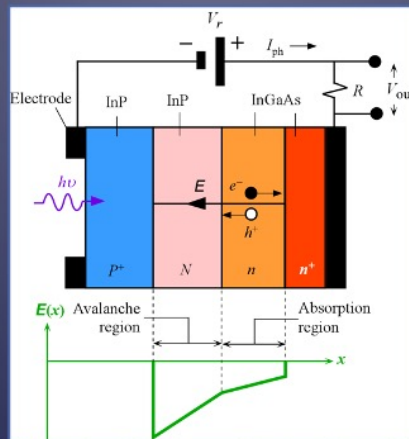




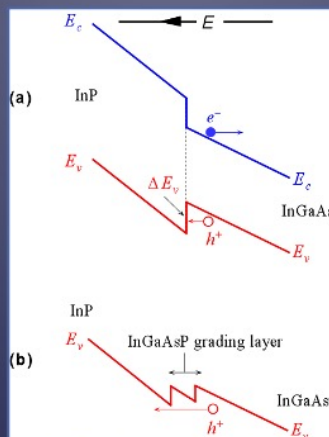
HETEROJUNCTION FOTODIODE



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

Brojne lavinske fotodiode na bazi jedinjenja elemenata iz III-V grupe su razvijene za talasne dužine koje se koriste u komunikacionim sistemima od $1.3 \mu\text{m}$ i $1.55 \mu\text{m}$. Kao i kod *reach-through* Si APD, regioni za apsorpciju i fotogeneraciju su razdvojeni od lavinskog ili multiplikacionog regiona. Na slici je predstavljena pojednostavljena struktura InGaAs-InP APD sa odvojenim regionima za apsorpciju i multiplikaciju (SAM – *Separate Absorption and Multiplication*). InP ima širi energetska procjep nego InGaAs (p i n slojevi su označeni velikim slovima P i N). Glavna osiromašena oblast se nalazi između P^+ InP i N InP slojeva i dominantno se prostire na stranu poluprovodnika N InP. Upravo ovdje polje ima najveću jačinu i tu se odvija proces multiplikacije. Ukoliko je dovoljan napon inverzne polarizacije, osiromašena oblast N InP se prostire do n InGaAs oblasti. Oblast prostornog tovara kod InGaAs se dominantno prostire širinom n oblasti. Polje u InGaAs oblasti prostornog tovara nije toliko jako kao kod InP. Grafički prikaz električnog polja po presjeku ove fotodiode je prikazan na slici, pretpostavljajući da je primijenjen dovoljan inverzni napon da dođe do “*reach-through*”. Iako fotoni dovoljno duge talasne dužine dolaze prema InP strani, nemaju dovoljnu energiju da budu apsorbovani u oblasti prostornog tovara InP. Fotoni prolaze kroz InP slojeve i bivaju apsorbovani u n InGaAs sloju. Polje u ovoj oblasti usmjerava šupljine prema InP oblasti gdje se *impact*-jonizacijom vrši multipliciranje nosilaca naelektrisanja.

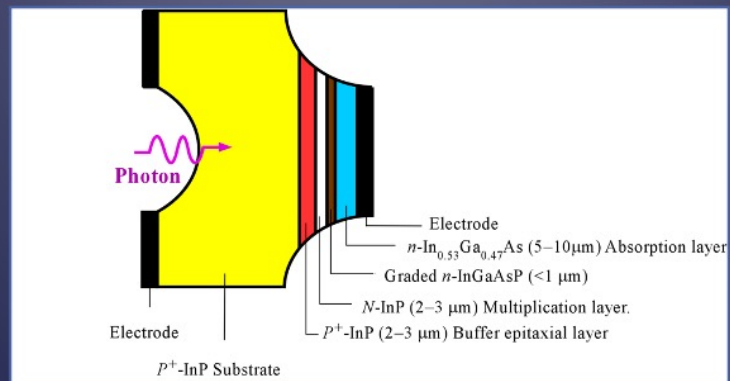
HETEROJUNCTION FOTODIODE



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

Prethodni, veoma pojednostavljen prikaz, ne sadrži veliki broj praktičnih detalja. Fotogenerisane šupljine koje su usmjerene poljem od n InGaAs prema N InP postaju zarobljene pri prelazu između poluprovodnika jer postoji nagli porast energetskeg procjepa, i nagla promjena energije valentne zone za ΔE_v između dva materijala, pa šupljine ne mogu jednostavno prevazići energetske barijeru ΔE_v kako je prikazano na slici (a). Ovaj problem se prevazilazi upotrebom tankih slojeva poluprovodnika n tipa InGaAsP čiji se energetske procjepi manje razlikuju, kako bi se omogućio postepen prelaz od InGaAs prema InP, kako je prikazano na slici (b). Energetska barijera ΔE_v je "razbijena" na nekoliko nivoa. Šupljine imaju dovoljno energije da prevaziđu prvi korak i dospiju u InGaAsP oblast. Dobijaju dalje ubrzanje da preskoče u sljedeći nivo, itd. Ovakvi uređaji se označavaju kao SAGM (*Separate Absorption, Grading and Multiplication*) APD.

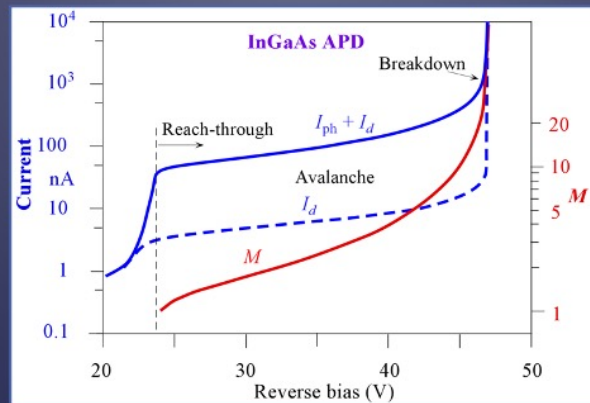
HETEROJUNCTION FOTODIODE



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

Precizniji šematski prikaz SAGM APD je ilustrovan na slici.

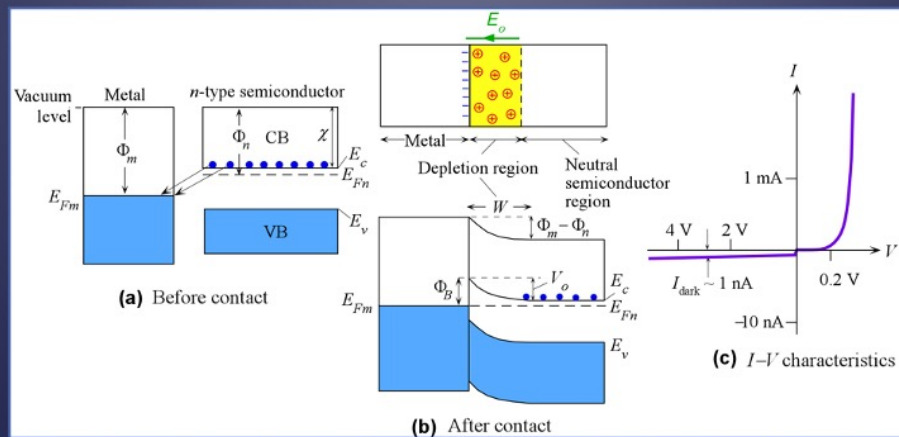
HETEROJUNCTION FOTODIODE



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

Zavisnost struje od napona inverzne polarizacije za InGaAs *reach-through* APD je data na slici. Optička snaga upadne svjetlosti iznosi 100 nW. Struja fotodiode sadrži *dark* struju I_d i fotostruju I_{ph} . *Dark* struja je označena sa I_d . Ova struja, kao i fotostruja, se pojačava. Inicijalno, osiromašena oblast u N InP sloju ne pokriva čitav region. Fotogenerisane šupljine u n InGaAs sloju moraju difuzijom preći do oblasti prostornog tovara kako bi stigle do polja koje će ih ubrzati. Dakle, kako se napon inverzne polarizacije povećava, fotostruja I_{ph} i *dark* struja I_d se povećavaju jer se oblast prostornog tovara širi. Šupljine treba da pređu sve manje i manje rastojanje difuzijom sa povećanjem napona inverzne polarizacije. Struja raste sve dok čitava N InP oblast ne postane osiromašena. Od tog trenutka, postoji polje u čitavoj N InP oblasti i fotogenerisane šupljine se usmjeravaju prema p^+ InP regionu. Počinje *impact*-jonizacija i pojačanje M se povećava sa povećanjem napona inverzne polarizacije, kako je prikazano na slici. Tipično pojačanje M komercijalnih InGaAs APD iznosi 10-20. Pri dovoljno velikim naponima inverzne polarizacije, može doći do oštećenja uređaja sa naglim porastom struje. Kritični napon se označava kao probojni *breakdown* napon.

SCHOTTKY JUNCTION FOTODETEKTOR



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

Posmatra se slučaj kada je formiran spoj od metala i poluprovodnika n tipa (n -SC n -type Semiconductor). Ovaj spoj se najčešće ostvaruje evaporacijom metala na površinu kristalnog poluprovodnika u vakuumu. Odgovarajući energetske dijagrami su prikazani na slici (a). *Work* funkcija, označena sa Φ , je razlika energija između vakuum nivoa i *Fermi* nivoa. Vakuum nivo označava energiju gdje su elektroni slobodni i imaju nultu kinetičku energiju.

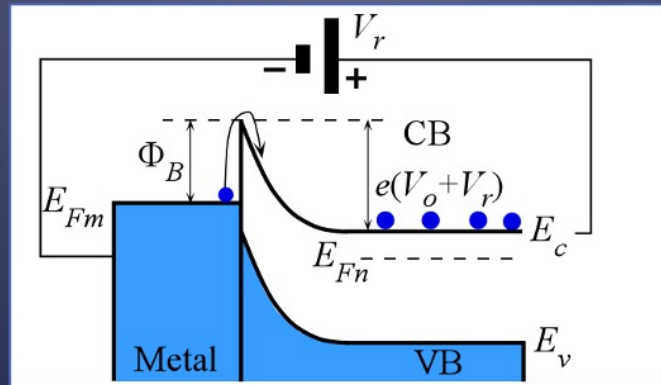
Pretpostavka je da je *work* funkcija metala veća nego u slučaju poluprovodnika, $\Phi_m > \Phi_n$. Kada dođe do kontakta dva materijala, energičniji elektroni iz provodne zone n -SC mogu izvršiti "tunelovanje" u metal u potrazi za nižim energetske nivoima (neposredno iznad E_{Fm}) i akumulirati se pri površini metala, kako je prikazano na slici (a). Elektroni koji su tunelovanjem napustili n -SC ostavljaju za sobom osiromašenu oblast širine W u kojoj sada postoje pozitivni donorski joni, odnosno pozitivni prostorni tovar. Ugrađeni potencijal V_0 se razvija između metala i n -SC. Očigledno je da sada postoji i ugrađeno električno polje E_0 od pozitivnog prostornog tovara prema elektronima na površini metala, kako je prikazano na slici (b). Ravnoteža je postignuta kada polje dostigne vrijednost koja ne dozvoljava dalju akumulaciju elektrona na površini metala. Situacija je donekle slična pn spoju. Maksimalna vrijednost električnog polja E_0 je na samom spoju metal - n -SC.

Kada se ostvari kontakt, *Fermi* nivo kroz čitavu strukturu mora biti uniforman i

uravnotežen. Dakle, E_{Fm} i E_{Fn} moraju biti "poravnati", kako je prikazano na slici (b). Oblast prostornog tovara je bez slobodnih elektrona, pa u ovoj oblasti razlika $E_c - E_{Fn}$ mora da se povećava prema spoju, kako koncentracija elektrona opada. Mora doći do "savijanja" zona, kako je prikazano na slici (b). "Savijanje" je toliko da vakuum nivo bude kontinualan i promijeni se za $\Phi_m - \Phi_n$ od poluprovodnika prema metalu jer je toliko energije potrebno da se elektron prenese od poluprovodnika do metala. Ugrađena energetska barijera eV_0 je jednaka $\Phi_m - \Phi_n$. Upravo ova energija odgovara "savijanju" zona, odnosno, promjeni E_{Fn} kako bi se poravnao sa E_{Fm} . Energetska barijera za elektrone koji se kreću od metala prema poluprovodniku označava se kao *Schottky barrier height*, Φ_B , i veća je od eV_0 .

I - V karakteristika *Schottky* spoja je data na slici (c), i veoma je slična karakteristici *pn* spoja. Kako je očigledno sa slike (b), barijera koja se suprotstavlja ubrizgavanju elektrona od *n*-SC prema metalu iznosi eV_0 . Barijera koja se suprotstavlja ubrizgavanju elektrona od metala prema *n*-SC iznosi Φ_B . U ravnoteži, brzine ubrizgavanja elektrona u suprotnim smjerovima (koje po eksponencijalnom zakonu zavise od energetske barijere) su male i balansiraju se. Pri direktnoj polarizaciji naponom V , sa pozitivnim terminalom vezanim za metal i negativnim za *n*-SC, dolazi do redukcije napona na $V_0 - V$. Kako je brzina ubrizgavanja elektrona proporcionalna $\exp[-e(V_0 - V)/k_B T]$, dolazi do povećanja ove brzine $\exp[eV/k_B T]$ puta, što zapravo znači veoma veliku brzinu ubrizgavanja elektrona sa *n*-SC strane prema metalu. Direktna struja je dakle veoma velika i zavisi eksponencijalno od napona direktne polarizacije V .

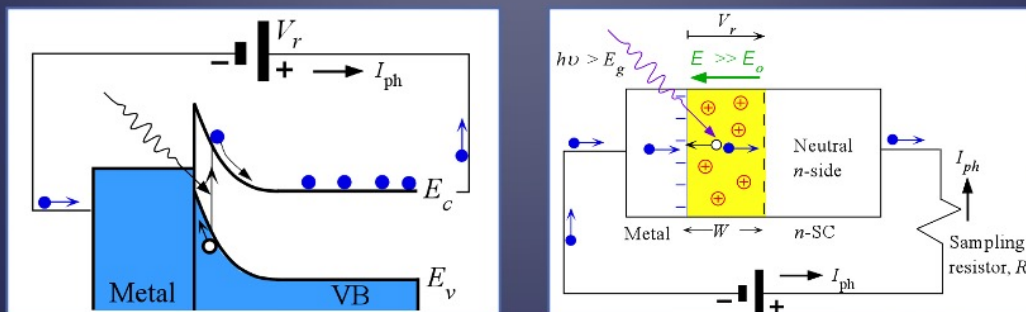
SCHOTTKY JUNCTION FOTODETEKTOR



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

Ukoliko se primijeni inverzna polarizacija naponom V_r , napon V_0 raste na $V_0 + V_r$. Brzina ubrizgavanja elektrona sa n -SC strane prema metalu postaje veoma mala, i prevazilazi je mala brzina ubrizgavanja elektrona od metala prema n -SC "preko Φ_B " koja je proporcionalna $\exp(-\Phi_B/k_B T)$.

SCHOTTKY JUNCTION FOTODETEKTOR



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

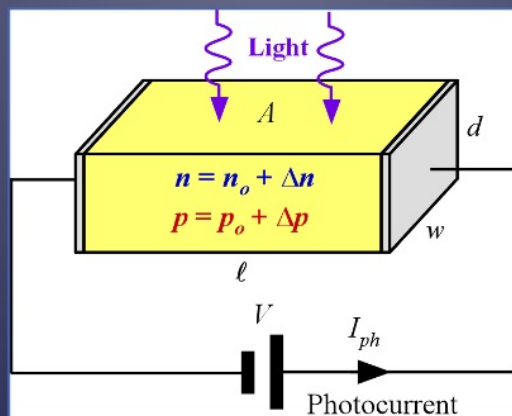
Kao fotodioda, *Schottky* spoj (SJ) je inverzno polarisan kako bi se ostvarilo jako polje u oblasti prostornog tovara. Ukoliko se osiromašena oblast SJ-a osvijetli fotonima energije veće od E_g , ostvariće se fotogeneracija u oblasti prostornog tovara. Elektroni i šupljine će se “spustiti” niz odgovarajući energetska spust, kako je prikazano na slici lijevo. Oni vrše *drift* u odgovarajućem smjeru, kako je prikazano na slici desno. Za foton čija energija je manja od E_g , uređaj će ipak odgovoriti, ukoliko energija fotona može pobuditi elektron iz E_{Fm} metala “preko Φ_B ” do provodne zone, odakle će se elektron “spustiti” prema neutralnom n regionu. U ovom slučaju energija fotona $h\nu > \Phi_B$. SJ fotodioda može raditi u fotonaponskom modu, bez primjene polarizacije, jer ugrađeno polje E_0 može razdvojiti i usmjeriti fotogenerisane nosioce naelektrisanja u oblasti prostornog tovara.

Značajna prednost SJ fotodioda je ta što je oblast prostornog tovara odmah pored metalnog kontakta. Svjetlost male talasne dužine bi bila apsorbirana u neutralnoj oblasti u blizini elektrode kod *pn* ili *pin* fotodioda, dok je kod SJ fotodiode apsorbirana u oblasti prostornog tovara. Generisani parovi elektron-šupljine se mogu trenutno razdvojiti, usmjeriti i prikupiti, dok manjinski nosioci naelektrisanja moraju difuzijom stići do oblasti prostornog tovara kod *pn* ili *pin* fotodioda. Osim toga, kod *pn* i *pin* fotodioda, mnogi fotogenerisani nosioci naelektrisanja difuzijom dopiru do površine gdje se rekombinuju.

Očigledno je da su SJ fotodiode pogodne za detektovanje svjetlosti male talasne dužine, pa se koriste često kao UV detektori. SJ diode imaju široku spektralnu osjetljivost, od UV do crvene svjetlosti.

Još jedna prednost SJ fotodetektora je ta što mogu biti značajno brži od *pn* ili *pin* fotodioda. Ubrizgani nosioci naelektrisanja su elektroni koji su većinski nosioci naelektrisanja, pa ih ne usporava rekombinaciono vrijeme karakteristično za manjinske nosioce naelektrisanja.

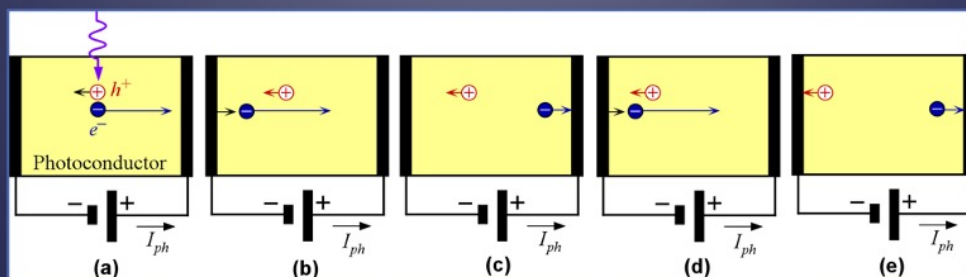
FOTOKONDUKTIVNI DETEKTORI I FOTOKONDUKTIVNO POJAČANJE



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

Fotokonduktivni detektori imaju jednostavnu strukturu kako je prikazano na slici. Poluprovodnik odgovarajuće kvantne efikasnosti i koeficijenta apsorpcije za odgovarajući opseg talasnih dužina je između dvije elektrode. Na elektrode se dovodi polarizacioni napon. Po apsorpciji upadnih fotona dolazi do fotogeneracije parova elektron-šupljina. Rezultat je povećana provodnost poluprovodnika, a samim tim i porast eksterne struje koja čini fotosruju I_{ph} , kako je prikazano na slici.

FOTOKONDUKTIVNI DETEKTORI I FOTOKONDUKTIVNO POJAČANJE

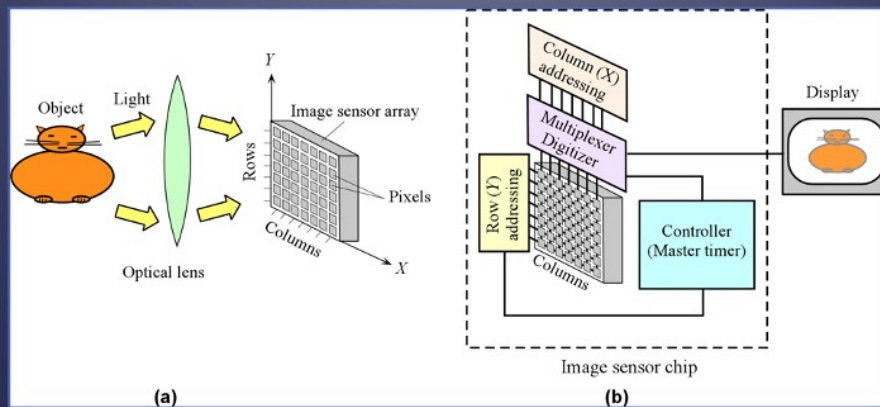


From: S.O. Kasap, *Optoelectronics and Photonics: Principles and Practices*, Second Edition, © 2013 Pearson Education, USA

Sa omskim kontaktima, fotoprovodnik ostvaruje fotokonduktivno pojačanje, odnosno, eksterna struja je rezultat generisanja više od jednog elektrona po apsorbovanom fotonu, kako je prikazano na slici.

Apsorbovani foton fotogeneriše par elektron-šupljina, koji *drift*-uju u suprotnim smjerovima kako je prikazano na slici (a). Elektron se kreće mnogo brže od šupljine i veoma brzo napušta uzorak. Uzorak, međutim, mora biti električno neutralan, što znači da drugi elektron mora ući u uzorak sa negativne elektrode, slika (b). Novi elektron veoma brzo napušta uzorak, dok se šupljina još uvijek polako kreće prema negativnoj elektrodi, slike (b) i (c). Sada još jedan elektron mora ući u uzorak kako bi se održala neutralnost, slike (d) i (e), itd. sve dok šupljina ne stigne do negativne elektrode ili se rekombinuje sa jednim od elektrona u uzorku. Eksterna fotostruja, dakle, odgovara toku mnogih elektrona po apsorbovanom fotonu što predstavlja pojačanje koje se označava kao fotokonduktivno pojačanje. Pojačanje zavisi od vremena *drift*-a nosilaca naelektrisanja i njihove "dužine života" (do rekombinacije).

SENZORI SLIKE



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

Senzor slike, kako je prikazano na slici (a), je integrisano kolo koje se sastoji od niza fotoosjetljivih elemenata, koje je u stanju da snimi sliku i da obezbijedi izlaz u formi električnog signala kao što je napon, struja ili naelektrisanje. Izlaz se obično preko multipleksera prosljeđuje AD konvertoru kako bi se dobio digitalni format slike kako je prikazano na slici (b). Senzor se obično sastoji od matrice elemenata slike – piksela (*picture element*). Svaki piksel posjeduje detektor i u stanju je da obezbijedi električni signal koji je proporcionalan intenzitetu svjetlosti detektovanom na tom mjestu. Sočivo formira sliku objekta na senzoru slike, i svjetlost intenziteta $I(X,Y)$ za svaku tačku slike (na samom senzoru) pobuđuje odgovarajući piksel na X,Y lokaciji. Tačka slike X,Y pobuđuje piksel(i,j) i piksel na poziciji (i,j) daje električni signal proporcionalan intenzitetu svjetlosti $I(X,Y)$. Dakle, svaki piksel (i,j) nosi dio informacije slike.

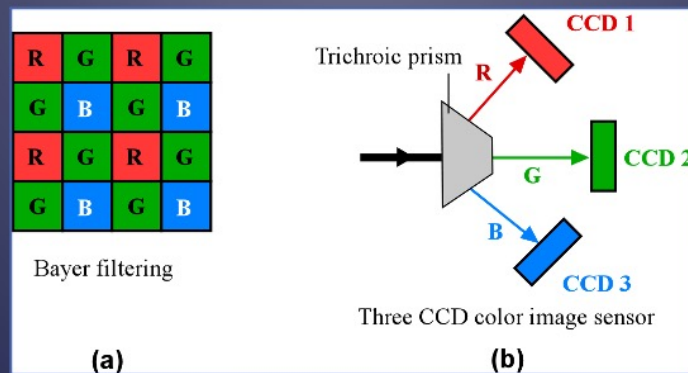
Senzorski niz prikazan na slici (b) se adresira od strane kontrolera (*Master timer*) kako bi se pročitali signali (naelektrisanje) piksela i dobila elektronski snimljena slika. Postoje dvije osnovne *solid-state* tehnologije koje se odnose na senzore slike, a to su:

CCD (*Charge-Coupled Device*) senzori

CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*) senzori

CMOS ukazuje na tehnologiju koja se koristi za proizvodnju senzora. Kod CCD tehnologije, upadna svjetlost (za odgovarajući piksel) generiše naelektrisanje koje je smješteno u CCD pikselu (koji se označava kao *well*). Ovo naelektrisanje (električni signal) se iščitava sekvencijalnim taktnim mehanizmom, koji se svodi na šiftovanje naelektrisanja prema registru za konačno iščitavanje. CMOS senzor je više senzor slike kakav je prikazan na slici (b). Svaki piksel sadrži MOSFET i fotodiodu. Električni signali se iščitavaju red po red. Red i se adresira od strane kontrolera, i svi pikseli u ovom redu obezbjeđuju odgovarajući signal. Paralelni podaci se multipleksiraju i digitalizuju kako bi se dobila digitalna slika. Senzor slike kvantizuje sliku u $M \times N$ piksela, što predstavlja njenu rezoluciju.

SENZORI SLIKE

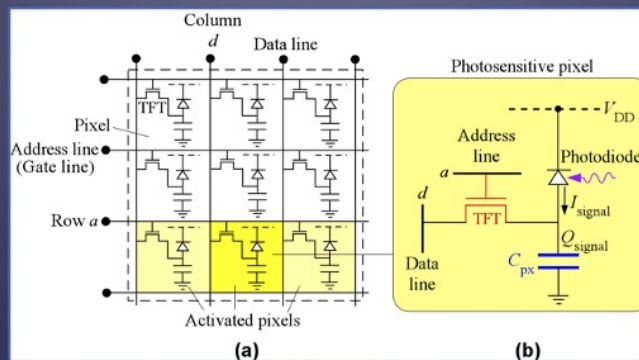


From: S.O. Kasap, *Optoelectronics and Photonics: Principles and Practices*, Second Edition, © 2013 Pearson Education, USA

Color rendering uz pomoć senzora slike se može izvršiti na tri načina. Najčešći pristup je upotreba crvenog, zelenog i plavog filtera za razdvajanje boja u tački na tri različita susjedna piksela, kao u slučaju *Bayer color* senzora slike, slika (a). Svaki fotodetektor prikuplja informaciju o jednoj boji, a ostale boje se izračunavaju na osnovu vrijednosti susjednih piksela. Na ovaj način se gubi na oštadini slike. Kod *Three CCD* senzora slike, slika (b), trihroična prizma se koristi za razdvajanje svjetlosti od objekta na crvenu, zelenu i plavu i tri različita CCD-a se koriste da detektuju svaku od komponenti. Treća tehnika koristi različite apsorpcione dubine silicijuma za crvenu, zelenu i plavu svjetlost. Crvena, zelena i plava svjetlost imaju različite dubine penetracije, tako da se mogu koristiti odgovarajuće fotodiode kako bi se razdvojile tri osnovne boje. *Bayer* filtriranje je tehnika koja se najčešće koristi kod *color* senozra slike.

Pored boja, za vjernu reprodukciju slike su potrebne i informacije o količini svjetlosti. Za svaku od tri boje, intenzitet svjetlosti se dijeli na 256 nivoa. Ova kombinacija od $256 \times 256 \times 256$ daje 16.7 miliona mogućih nijansi.

AMA I CMOS SENZORI SLIKE

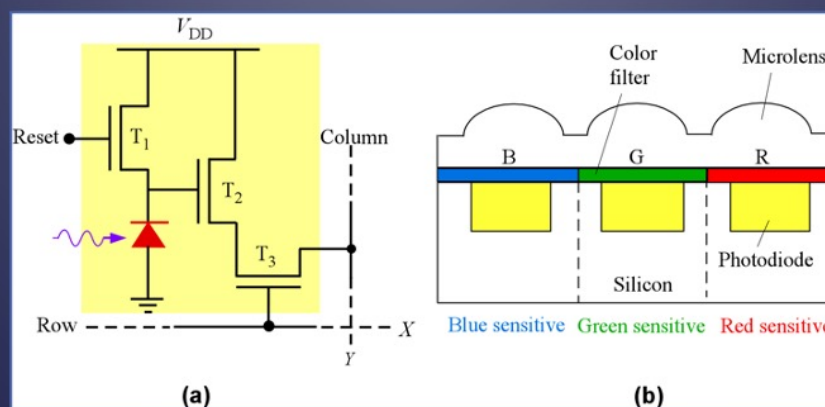


From: S.O. Kasap, *Optoelectronics and Photonics: Principles and Practices*, Second Edition, © 2013 Pearson Education, USA

Mnogi senzori slike, kao i različite *flat panel* TV tehnologije koriste AMA (**Active Matrix Arrays**). AMA je dvodimenzionalni niz piksela kod kojih svaki piksel posjeduje *thin film* tranzistor koji se eksterno može adresirati u cilju iščitavanja signala na izlazu senzora na poziciji datog piksela. U zavisnosti od primjene, aktivna matrica može sadržati od svega nekoliko piksela pa do nekoliko miliona piksela. TFT AMA tehnologiju je prvobitno razvio *Peter Brody*-a još 1970. Pojednostavljeni dijagram je prikazan na slici (a), dok je na slici (b) prikazan jedan piksel. Svaki piksel, osim tranzistora, sadrži fotodiodu i kondenzator kapacitivnosti C_{px} . Kada piksel prihvati svjetlost od određene tačke osvjetljenog objekta, fotodioda generiše struju I_{signal} kojom se puni kondenzator C_{px} . Signal predstavlja naelektrisanje Q_{signal} skladišteno u kondenzatoru C_{px} . AMA, dakle, čuva sliku kao naelektrisanje kondenzatora. Potrebno je samo izvršiti "očitanje" naelektrisanja.

Svaki piksel sadrži TFT čiji je *gate* povezan na određenu adresnu liniju, dok mu je *source* vezan za odgovarajuću *data* liniju, slika (b). Kada se adresira red a , vrši se očitavanje svakog piksela odnosno naelektrisanja sa kondenzatora C_{px} u okviru svakog piksela u redu a . Podaci se paralelno očitavaju. Moguće je skenirati sliku, red po red, počevši od vrha, sekvencijalno aktivirajući red po red. Dakle, svaki put kada se pristupi odgovarajućem redu, podaci o svakom pikselu (naelektrisanje Q_{signal} na kondenzatoru C_{px}) iz posmatranog reda se dobijaju paralelno.

AMA I CMOS SENZORI SLIKE



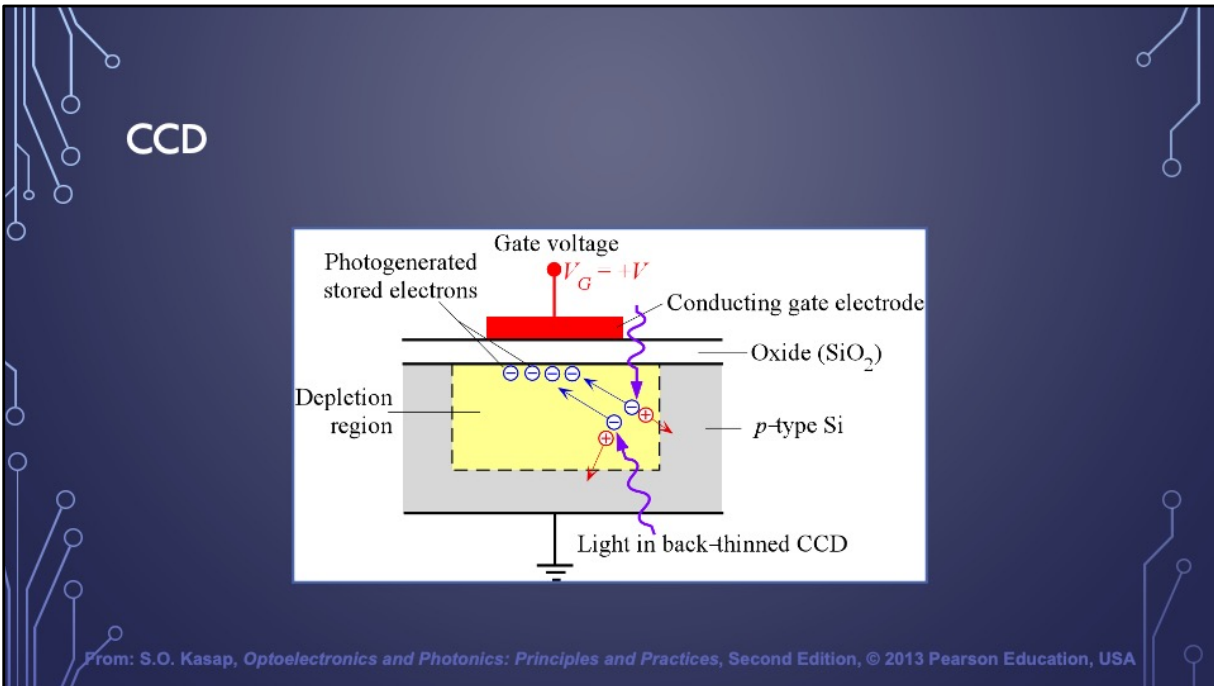
From: S.O. Kasap, *Optoelectronics and Photonics: Principles and Practices*, Second Edition, © 2013 Pearson Education, USA

CMOS senzor slike je u suštini AMA kod koga svaki piksel sadrži fotodiodu i jedan ili više MOSFET-ova za iščitavanje i pojačavanje električnog signala koji je generisan pod uticajem upadne svjetlosti. Postupak očitavanja je isti kao kod AMA senzora.

Arhitektura piksela se razlikuje u zavisnosti od primjene.

Kako je CMOS veoma zastupljena tehnologija, CMOS senzori slike se relativno jeftino mogu proizvoditi. Ukoliko je piksel aktivan (sa aktivnom komponentom), senzor se označava kao aktivni piksel senzor slike. Gotovo svi savremeni CMOS senzori slike su aktivni. Jedna moguća arhitektura aktivnog piksela sa fotodiodom je prikazana na slici (a). T_1 je *reset* tranzistor, T_2 je *source-follower (buffer)*, dok je T_3 prekidački tranzistor. Kada je T_1 zakočen, fotostruja puni parazitnu kapacitivnost fotodiode do određenog nivoa napona. Kada red X dobije signal, T_3 provodi i naponski signal sa fotodiode se preko *buffer*-a T_2 prenosi na kolonu Y . Piksel se potom resetuje, T_1 povezuje fotodiodu na V_{DD} kako bi se ispraznilo nagomilano naelektrisanje.

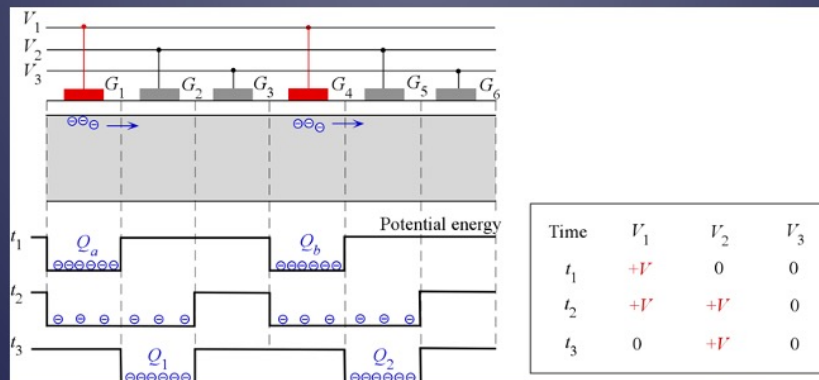
CMOS senzori slike imaju veliki broj prednosti. Standardna CMOS tehnologija omogućava integraciju kamera na čipu. Kamera na čipu sadrži mikrosočiva za svaki piksel, crveni, zeleni i plavi filter za svaki piksel (za slučaj *color imaging-a*), kako je prikazano na slici (b), analogno procesiranje signala i AD konverziju. Arhitektura na bazi aktivnih piksela može sadržati pojačavački stepen kako bi se povećala cjelokupna efikasnost.



CCD su senzori koji se najčešće koriste kod profesionalnih TV kamera i kao senzori slike digitalnih *still* kamera. Međutim, termin CCD generalno ne ukazuje na senzor slike već na čip koji je u mogućnosti da skladišti i prenese signal u formi naelektrisanja. CCD čip je integrirano kolo koje sadrži veliki broj piksela. Osnovni gradivni element ovog kola je MOS ili MIS uređaj, slika. Metalna elektroda je često transparentna za svjetlost. Parovi elektron-šupljine se generišu u oblasti prostornog tovara, pod uticajem svjetlosti koja se usmjerava sa gornje ili donje strane uređaja. CCD kod kojih se osvjetljavanje vrši sa donje strane uređaja imaju tanji p sloj (podlogu).

Kada se primijeni pozitivni napon na gejt $V_G = +V$, fotogenerisani elektroni u osiromašenoj oblasti se prikupljaju ispod sloja oksida, slika. Ukupno naelektrisanje ovih elektrona je proporcionalno intenzitetu upadne svjetlosti. Upravo ovo naelektrisanje čini električni signal koji nosi informaciju. Cilj je očitati naelektrisanje osvjetljenih piksela.

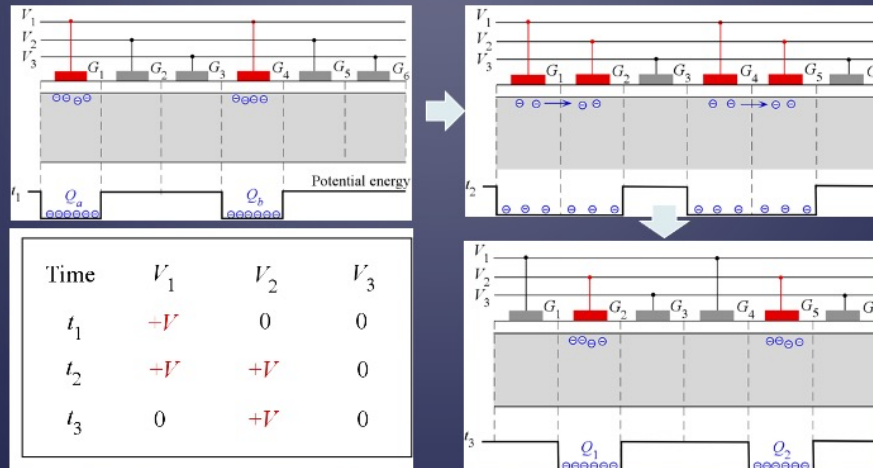
THREE-PHASE CCD



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

Kod **three-phase CCD**, postoje tri naponske linije V_1 , V_2 i V_3 za koje se povezuju gejtovi na sljedeći način: G_1 na V_1 , G_2 na V_2 , G_3 na V_3 , G_4 na V_1 i tako dalje, slika. V_1 , V_2 i V_3 su taktovani na odgovarajući način tako da pomjeraju naelektrisanje od piksela do piksela prema registru koji se nalazi na kraju. Ukoliko je u trenutku $t = t_1$, $V_1 = +V$, dok su $V_2 = V_3 = 0$, fotogenerisano naelektrisanje će biti smješteno ispod gejtova G_1 , G_4 itd. kao Q_a , Q_b , itd. Ukoliko je u narednom trenutku $t = t_2$, $V_1 = +V$, $V_2 = +V$, dok je $V_3 = 0$, naelektrisanje Q_a se dijeli između *well*-ova ispod gejtova G_1 i G_2 . Ukoliko je u narednom trenutku $t = t_3$, $V_1 = 0$, $V_2 = +V$, dok je $V_3 = 0$, naelektrisanje Q_a je skoncentrisano ispod gejta G_2 . Dakle, promjenom napona na gejtu, naelektrisanje Q_a se pomjera od gejta G_1 prema gejtu G_2 , i slično Q_b se pomjera od gejta G_4 prema gejtu G_5 i tako dalje. Naelektrisanje se, dakle, progresivno taktuje preko gejtova, od piksela do piksela, dok se ne stigne do samog kraja niza gdje se nalazi registar. CCD iščitavanje funkcioniše kao *shift* registar kod koga takt impulsi pomjeraju informaciju duž lanca. Upravo iz ovog razloga, ova kola se označavaju i kao CCD *shift* registri.

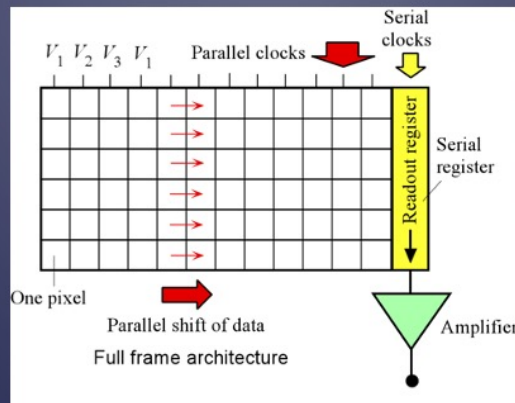
THREE-PHASE CCD



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

Ukoliko je u trenutku $t = t_1$, $V_1 = +V$, dok su $V_2 = V_3 = 0$, fotogenerisano naelektrisanje će biti smješteno ispod gejtova G_1 , G_4 itd. kao Q_a , Q_b , itd. Ukoliko je u narednom trenutku $t = t_2$, $V_1 = +V$, $V_2 = +V$, dok je $V_3 = 0$, naelektrisanje Q_a se dijeli između *well*-ova ispod gejtova G_1 i G_2 . Ukoliko je u narednom trenutku $t = t_3$, $V_1 = 0$, $V_2 = +V$, dok je $V_3 = 0$, naelektrisanje Q_a je skoncentrisano ispod gejta G_2 . Dakle, promjenom napona na gejtu, naelektrisanje Q_a se pomjera od gejta G_1 prema gejtu G_2 , i slično Q_b se pomjera od gejta G_4 prema gejtu G_5 i tako dalje. Naelektrisanje se, dakle, progresivno taktuje preko gejtova, od piksela do piksela, dok se ne stigne do samog kraja niza gdje se nalazi registar. CCD iščitavanje funkcioniše kao *shift* registar kod koga takt impulsi pomjeraju informaciju duž lanca. Upravo iz ovog razloga, ova kola se označavaju i kao CCD *shift* registri.

CCD ARHITEKTURE



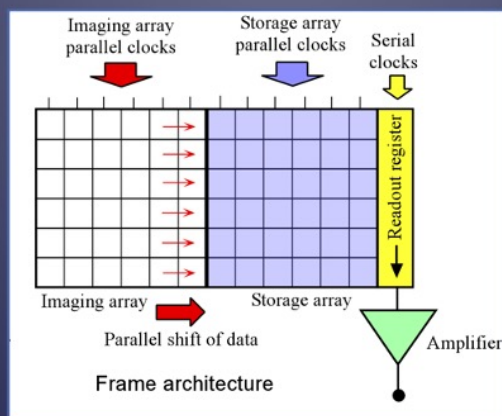
From: S.O. Kasap, *Optoelectronics and Photonics: Principles and Practices*, Second Edition, © 2013 Pearson Education, USA

Postoje tri osnovna tipa CCD tehnika iščitavanja na osnovu kojih se razlikuju sljedeće CCD arhitekture:

- **full frame**
- **frame**
- **interline transfer**

Kod *full-frame* arhitekture, senzor se sastoji od paralelnih CCD *shift* registara, serijskog CCD *shift* registra kao *read-out* registra i pojačavača, slika (a). Kolone podataka se vode prema serijskom registru, nakon projektovanja slike na niz, kada takt signal počne da prenosi naelektrisanja sa piksela na piksel prema izlaznom *shift* registru. Proces traje dok se sve kolone podataka ne prenesu na izlaz. Ova arhitektura ima najveću rezoluciju. Nedostatak ove arhitekture je u tome što može doći do zamućenja slike usljed „očitanja“, dok istovremeno na senzor djeluje svjetlost. Iz tog razloga se uvode mehanički *shutter*-i, koji blokiraju svjetlost dok se obavlja pomjeranje i očitavanje naelektrisanja. Mehanički *shutter*-i su spori i skloni oštećenjima. Ipak, ovu arhitekturu odlikuje visoka osjetljivost i mogućnost primjene u različitim uslovima osvjetljenosti.

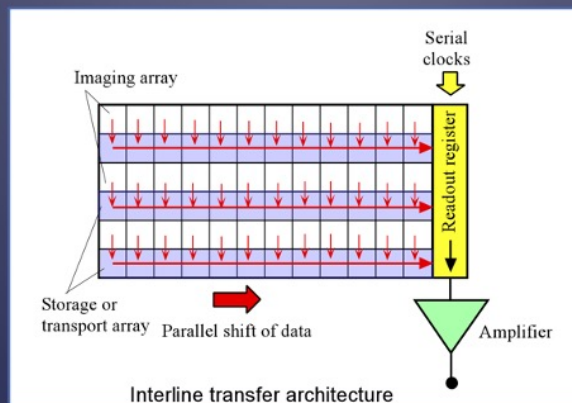
CCD ARHITEKTURA



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

Frame arhitektura, kako je prikazano na slici, je slična *full-frame* arhitekturi osim što se polovina niza koristi za skladištenje podataka kako bi se povećala brzina. Za *storage array* svjetlost je blokirana. Dakle, na ovaj način je izbjegnuta potreba za mehaničkim *shutter*-ima. Ideja je da se podaci pomjeraju od senzora veoma brzo kako bi se mogla snimiti sljedeća slika, što znači da je kod ove arhitekture postignuta veća brzina (*frame rate*), po cijenu redukovane rezolucije. U cilju povećanja rezolucije, potrebno je povećati površinu senzora, što znači i veću cijenu. Prilikom transporta naelektrisanja od *imaging array* prema *storage array*, može doći do zamućenja slike.

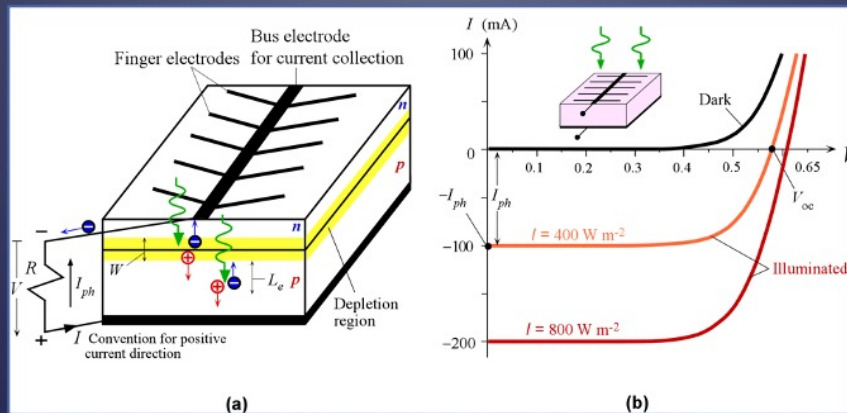
CCD ARHITEKTURE



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

Interline transfer arhitektura koristi svaki drugi red CCD niza za skladištenje i transport neposredno uz *imaging* niz kako je ilustrovano na slici. Prema transportnom redu svjetlost je blokirana, pa se podaci iz *imaging* reda paralelno prenose prema transport redu veoma brzo. Podaci se dalje pomjeraju duž transportnog reda prema izlazu. Na ovaj način gotovo da je eliminisan efekat zamućenja. Ipak, ukoliko je senzor izložen jakoj svjetlosti, može doći do „prelivanja“ naelektrisanja ispod maske što opet odgovara zamućenju slike. Prednosti ove arhitekture su nizak nivo šuma i potpuna *stop-motion* kontrola kao posljedica simultanog transporta naelektrisanja za sve piksele.

SOLARNE ČELIJE



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

Solarne ćelije konvertuju energiju upadnog zračenja u električnu energiju. Apsorbovani fotoni fotogenerišu nosioce naelektrisanja, koji potom “protiču” kroz spoljašnje opterećenje vršeći električni rad. Fotonaponski uređaji mogu biti bazirani na strukturi metal-poluprovodnik *Schottky* tipa, *pn* spoju, ili *pin* strukturi. Na primjer, Si *pn* solarna ćelija može sadržati tanki poluprovodnički sloj *n* tipa na debeloj podlozi *p* tipa, kako je prikazano na slici (a). Elektrode pričvršćene sa *n* strane moraju dozvoliti svjetlosti da „prodre” u uređaj, a istovremeno moraju imati malu serijsku otpornost. Iz prethodnih razloga, elektrode se nanose na površinu *n* poluprovodnika u formi niza *finger* elektroda. Van elektroda postoji AR sloj u cilju redukovanja refleksije svjetlosti. *n* sloj *pn* spoja ima veoma malu debljinu kako bi se omogućila apsorpcija većine fotona u okviru osiromašene oblasti ili u okviru *p* strane. Fotogeneracija parova elektron-šupljina se dešava uglavnom u ovim oblastima. Kod silicijuma, difuziona dužina elektrona L_e je veća nego difuziona dužina šupljina L_h što je i razlog formiranja strukture kod koje će se fotogeneracija dominantno odigravati (pored osiromašene oblasti) na *p* strani. Samo oni elektroni na *p* strani koji su na rastojanju manjem od L_e od oblasti prostornog tovara mogu doprinijeti fotostruji. Parovi elektron-šupljina fotogenerisani u oblasti širine W , slika (a), se razdvajaju i usmjeravaju pod uticajem polja. Elektroni *drift*-uju prema *n* strani dok šupljine *drift*-uju prema *p* strani, što rezultuje fotostrujom. Višak elektrona stiže do neutralne *n* oblasti, zatim preko

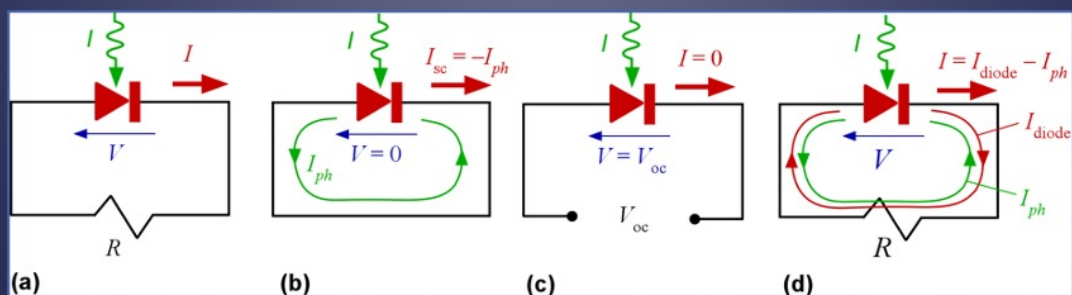
eksternog kola stiže do p strane gdje se rekombinuje sa viškom šupljina. Kao rezultat, postojaće kontinualna eksterna fotostruja sve dok je pn spoj osvijetljen. Važno je razumjeti da bez internog električnog polja ne bi bilo moguće usmjeriti nosioce naelektrisanja, pa ne bi bilo ni struje u eksternom kolu.

Strujno naponska karakteristika tipične Si solarne ćelije je prikazana na slici (b). *Dark I-V* karakteristika odgovara karakteristici direktno polarisanog pn spoja. Pod uticajem svjetlosti, *dark I-V* karakteristika se translira prema dolje za iznos koji je jednak fotostruji I_{ph} . Fotostruja je proporcionalna intenzitetu upadne svjetlosti:

$$I_{ph} = KI$$

gdje je K specifična konstanta uređaja.

SOLARNE ČELIJE



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

Kod kratko spojene solarne ćelije struja $I_{sc} = -I_{ph}$, i predstavlja važnu karakteristiku solarne ćelije, slika (b). Ukoliko je solarna ćelija u otvorenom kolu, eksterna struja je naravno jednaka 0, dok je napon otvorenog kola V_{oc} , slika (c). Ovaj napon odgovara tački presjeka I - V karakteristike sa V -osom. Fotogenerisani elektroni koji su usmjereni ka n strani ne mogu dalje, pa se nagomilavaju na n strani. Slično, fotogenerisane šupljine se nagomilavaju na p strani. Jasno je da postoji višak pozitivnog naelektrisanja na p strani u odnosu na n stranu, odnosno da postoji pad napona. U stvarnosti, stvari su još malo složenije. Naime, višak elektrona na n strani neutralizuju neki od pozitivnih donorskih jona iz oblasti prostornog tovara. Višak šupljina neutralizuju neki od negativnih akceptorskih jona iz oblast prostornog tovara. Kao posljedica, interno električno polje slabi, pa je samim tim i ugrađeni napon V_0 redukovan. Zapravo, redukcija napona V_0 se manifestuje kao napon na terminalima V_{oc} .

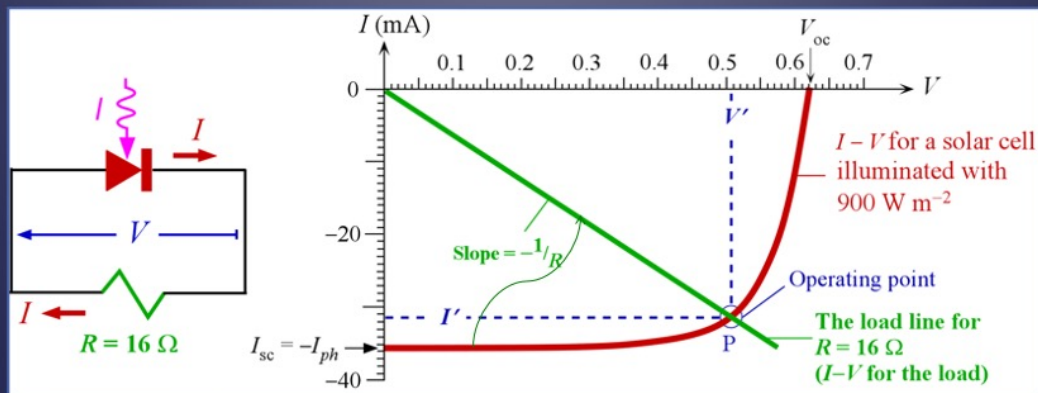
Pretpostavimo da postoji eksterno opterećenje R , kako je prikazano na slikama (a) i (d). Eksterna struja (ne struja I_{ph}) će teći kroz R i generisaće pad napona V na krajevima opterećenja. Disipirana snaga na opterećenju iznosi IV . Očigledno bi bilo da je napon V na krajevima opterećenja R napon direktne polarizacije pn spoja i da se kao posljedica ovog napona generiše struja I_{diode} (kao struja direktno polarisanog pn

spoja), čiji smjer je suprotan smjeru struje I_{ph} . Ukupna struja sada iznosi:

$$I = -I_{ph} + I_{diode}$$

Sa povećanjem intenziteta svjetlosti, povećava se struja I_{ph} i pomjera prema dolje strujno-naponsku karakteristiku diode.

SOLARNE ČELIJE



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

Kada je opterećenje vezano za solarnu ćeliju, slika (a), kroz opterećenje teče ista struja kao i kroz solarnu ćeliju:

$$I = -\frac{V}{R}$$

Radna tačka kola (I' , V') kola predstavlja presjek karakteristike diode i linije opterećenja.

Snaga isporučena potrošaču je $P_{out} = I'V'$. Maksimalna snaga se isporučuje potrošaču kada je površina pravougaonika ograničenog I i V osom maksimalna, što se ostvaruje promjenom otpornosti potrošača ili promjenom intenziteta svjetlosti, kada je $I' = I_m$ i $V' = V_m$. Fill faktor (FF) koji predstavlja FOM (*Figure of Merit*) solarne ćelije se definiše kao:

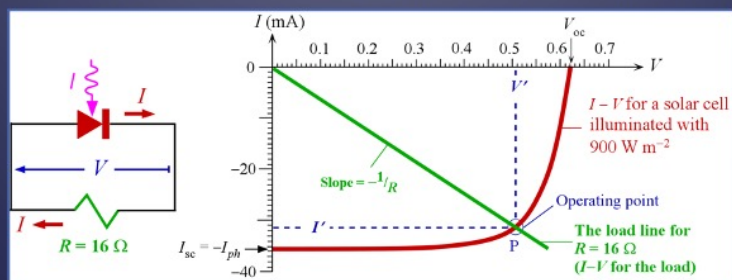
$$FF = \frac{I_m V_m}{I_{sc} V_{oc}}$$

FF je mjera koliko je $I-V$ kriva solarne ćelije blizu pravougaonom (idealnom) obliku. Jasno je da je poželjno da FF vrijednost bude što bliža jedinici, što je naravno

ograničeno eksponencijalnom karakteristikom pn spoja. Tipično je FF vrijednost oko 70 % - 85 % u zavisnosti od strukture uređaja.

SOLARNE ČELIJE

Primjer: Posmatra se solarna ćelija za koju je povezano otporno opterećenje od $16\ \Omega$. Pretpostavimo da solarna ćelija ima površinu $1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ i da je osvijetljena svjetlošću intenziteta 900 W/m^2 . Koliko iznose struja i napon u kolu? Kolika snaga je isporučena potrošaču? Koliko iznosi efikasnost solarne ćelije u kolu? Ukoliko se pretpostavi da solarna ćelija u režimu koji je blizak maksimalnoj isporučivoj snazi, koliko iznosi FF?

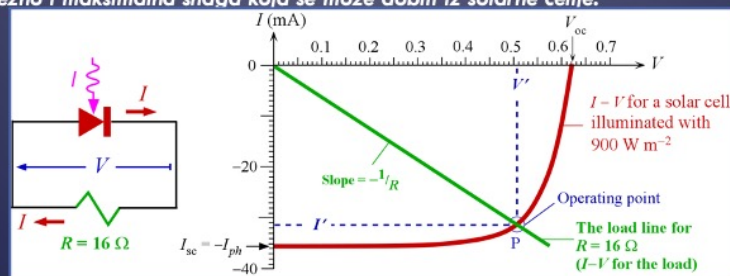


SOLARNE ČELIJE

Rješenje: Sa slike se može očitati približna vrijednost struje $I' \approx -31.5 \text{ mA}$ i napona $V' \approx 0.505 \text{ V}$, što znači da je snaga isporučena potrošaču:

$$P_{out} = |I'V'| = 15.9 \text{ mW}.$$

Ovo nije obavezno i maksimalna snaga koja se može dobiti iz solarne ćelije.



SOLARNE ĆELIJE

Rješenje:

Snaga upadne svjetlosti:

$$P_{in} = 900 \frac{W}{m^2} * 1 \text{ cm}^2 = 0.09 \text{ W.}$$

SOLARNE ČELIJE

Rješenje:

Snaga upadne svjetlosti:

$$P_{in} = 900 \frac{W}{m^2} * 1 \text{ cm}^2 = 0.09 \text{ W.}$$

Efikasnost iznosi:

$$100 * P_{out} / P_{in} = 17.7 \text{ \%}.$$

SOLARNE ČELIJE

Rješenje:

Snaga upadne svjetlosti:

$$P_{in} = 900 \frac{W}{m^2} * 1 cm^2 = 0.09 W.$$

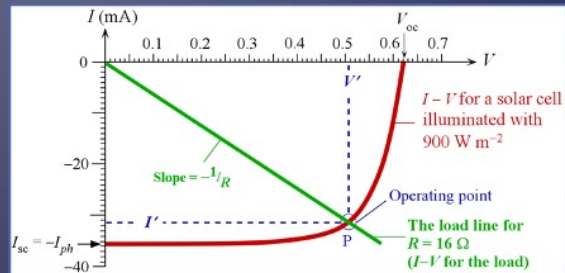
Efikasnost iznosi:

$$100 * P_{out} / P_{in} = 17.7 \%$$

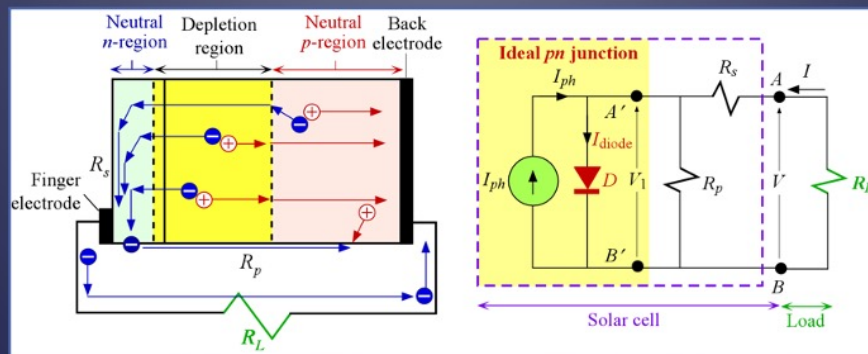
FF se može izračunati kao:

$$FF = \frac{I_m V_m}{I_{sc} V_{oc}} = 0.72,$$

pri čemu je $I_{sc} = -35.5 mA$, dok je $V_{oc} = 0.62 V$.



SOLARNE ČELIJE



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

Solarne ćelije mogu značajno odstupati od idealizovanog prikaza solarne ćelije bazirane na pn spoju iz uvodnog dijela. Razmotrimo osvijetljenu solarnu ćeliju koja pobuđuje otporno opterećenje R_L i pretpostavimo da se fotogeneracija obavlja unutar osiromašene oblasti. Fotogenerisani elektroni treba da prelaze površinom poluprovodnika kao bi stigli do najbližeg "prsta" elektrode, slika (a). Putanje svakog od elektrona po površini n poluprovodnika uvode efektivnu serijsku otpornost R_s u fotonaponsko kolo. Takođe postoji i serijska otpornost od neutralne p oblasti, ali je ona generalno mala u odnosu na otpornost putanja elektrona do *finger* elektroda. Na slici (b) je prikazano ekvivalentno kolo solarne ćelije bazirane na pn spoju. Osjenčeni dio se odnosi na slučaj idealne pn diode. Proces fotogeneracije je predstavljen izvorom konstantne struje I_{ph} , koji generiše struju koja je proporcionalna intenzitetu svjetlosti. Tok fotogenerisanih nosilaca naelektrisanja kroz spoj dovodi do povećanja napona V_1 na spoju, i ovaj napon dovodi do struje diode I_{diode} . Struja I_{diode} je prikazana kao struja idealne diode D na slici (b). Napon V je napon koji se mjeri na izlaznim terminalima solarne ćelije:

$$V = V_1 + R_s I$$

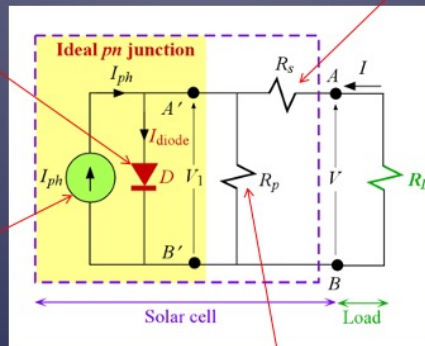
Ekvivalentno kolo prikazano na slici (b), van osjenčenog pravougaonika sadrži serijsku otpornost R_s , koja onemogućava "idealni" režim. Mali dio naelektrisanja takođe može

da teče kroz kristalnu površinu (ivicama uređaja), što se može predstaviti otpornošću R_p , paralelno idealnoj diodi. Obično R_p značajno manje utiče od R_s na vrijednost izlaznog napona solarne ćelije.

SOLARNE ĆELIJE

$$I_{diode} = I_0 \left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right)$$

$$I_{ph} = KI$$

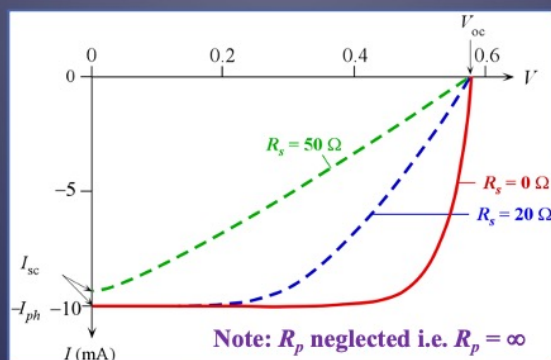


Series resistance

Shunt or parallel resistance

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

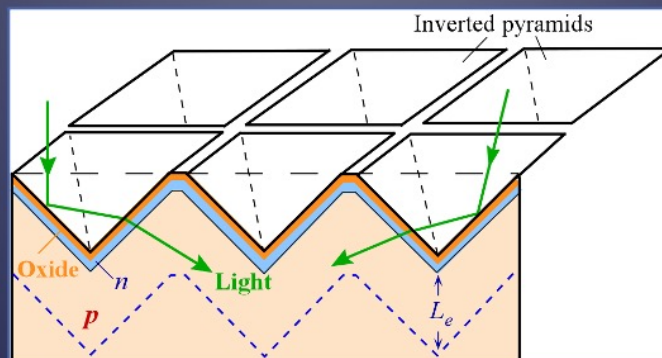
SOLARNE ČELIJE



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

Serijska otpornost R_s može značajno da ugrozi performanse solarne ćelije, kako je prikazano na slici. Očigledno je da maksimalna dostupna snaga opada sa povećanjem otpornosti R_s , što znači da R_s redukuje efikasnost uređaja. Takođe se može uočiti da serijska otpornost ne utiče na napon V_{oc} .

STRUKTURA SOLARNIH ČELIJA I EFIKASNOST



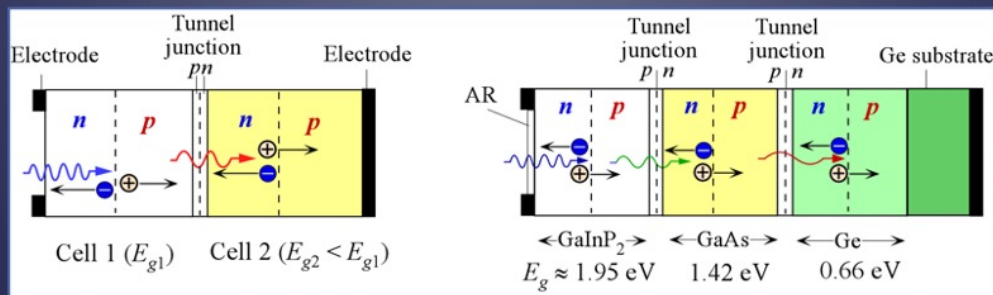
From: S.O. Kasap, *Optoelectronics and Photonics: Principles and Practices*, Second Edition, © 2013 Pearson Education, USA

Većina solarnih ćelija se bazira na kristalnom silicijumu kao najrasprostranjenijoj tehnologiji. Jedan od najvažnijih parametara solarnih ćelija je **efikasnost** koja se definiše kao odnos maksimalne izlazne snage uređaja po jedinici snage upadnog zračenja pod definisanim uslovima. Spektar Sunčeve svjetlosti se razlikuje na različitim visinama u odnosu na površinu Zemlje zbog efekata apsorpcije i rasijanja u atmosferi, koji opet zavise od talasne dužine svjetlosti. Najčešće korišćen standard za poređenje solarnih ćelija je **AM1.5 solarni spektar** koji predstavlja Sunčevo zračenje koje stiže na površinu Zemlje sa integrisanim intenzitetom (za sve talasne dužine) od 1000 W/m^2 na temperaturi od 25°C .

Tipične Si solarne ćelije imaju efikasnost od 18 % do 25 %. Refleksija svjetlosti sa površine solarne ćelije mora biti minimizovana, kako bi se povećala efikasnost. Najefikasnije među Si solarnim ćelijama su PERL (*Passivated Emitter Rear Locally diffused cells*) čiju površinu predstavljaju "invertovane" piramide, slika, kojima se "hvata" što je moguće više upadne svjetlosti. Uobičajena refleksija svjetlosti od ravne površine kristala dovodi do gubitaka svjetlosti, dok refleksije unutar piramida dozvoljavaju još nekoliko "dodatnih šansi" za refleksiju. Struktura je takva, da se nakon refrakcije svjetlosti foton nađe u zoni manjoj od difuzione dužine elektrona u odnosu na oblast prostornog tovara, slika. Značajni faktori koji redukuju efikasnost solarne ćelije su neapsorbovani fotoni čija je energija manja od E_g (velike talasne

dužine), kao i fotoni kratkih talasnih dužina koji se apsorbiraju blizu površine. Ovi nedostaci se donekle prevazilaze upotrebom heterostruktura.

SOLARNE ČELIJE



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

Jedna od efikasnih heterostruktura poznata je kao **tandem** solarna ćelija ili **multijunction** solarna ćelija. *Multijunction* solarne ćelije koriste dvije ili više ćelija u tandemu, ili kaskadno, kako bi se povećala apsorpcija fotona upadne svjetlosti, slika (a). Prva ćelija je napravljena od materijala sa širim energetskeg procjepom i apsorbuje samo fotone energije veće od energije energetskeg procjepa E_{g1} . Druga ćelija apsorbuje fotone koji prolaze kroz prvu ćeliju i imaju energiju veću od energije energetskeg procjepa druge ćelije E_{g2} . Ćelije moraju biti povezane, kako bi nosioci naelektrisanja mogli da prolaze. Veza se ostvaruje korišćenjem visoko dopiranog veoma tankog pn spoja između dvije ćelije koji služi kao *tunneling* spoj. Svi slojevi se nanose specijalnim tehnikama rasta na jedinstvenoj podlozi. Veoma visoka efikasnost je postignuta troslojnom strukturom prikazanom na slici (b). Slojevi su formirani tehnikom rasta na podlozi od germanijuma i svaka ćelija je np spoj. Postoje dva veoma tanka tunelska spoja koji povezuju ćelije u tandemu kako je prikazano na slici (b), koji pospješuju prolazak nosilaca naelektrisanja. Gornja ćelija je od materijala čija je $E_g \approx 1.95 \text{ eV}$ ($\lambda_g = 0.64 \mu\text{m}$), druga $E_g \approx 1.42 \text{ eV}$ ($\lambda_g \approx 0.87 \mu\text{m}$) i treća $E_g \approx 0.66 \text{ eV}$ ($\lambda_g \approx 1.9 \mu\text{m}$). Tri ćelije imaju veoma širok spektralni opseg i u mogućnosti su da prihvate značajan procenat solarnog zračenja. Efikasnost prikazane ćelije je 29.5 %.

SOLARNE ČELIJE

Primjer: Solarna ćelija osvijetljena svjetlošću intenziteta 500 W/m^2 ima struju $I_{sc} = -16 \text{ mA}$ i napon $V_{oc} = 0.50 \text{ V}$. Koliko iznosi struja kratkog spoja I_{sc} i napon otvorenog kola V_{oc} ukoliko se intenzitet upadne svjetlosti udvostruči.

SOLARNE ČELIJE

Primjer: Solarna ćelija osvjetljena svjetlošću intenziteta 500 W/m^2 ima struju $I_{sc} = -16 \text{ mA}$ i napon $V_{oc} = 0.50 \text{ V}$. Koliko iznosi struja kratkog spoja I_{sc} i napon otvorenog kola V_{oc} ukoliko se intenzitet upadne svjetlosti udvostruči.

Rješenje: Kako struja kratkog spoja odgovara fotostruji, kada se intenzitet svjetlosti poveća dva puta, i struja će se povećati 2 puta. Dakle, $I_{sc} = -32 \text{ mA}$.

SOLARNE ČELIJE

Primjer: Solarna ćelija osvjetljena svjetlošću intenziteta 500 W/m^2 ima struju $I_{sc} = -16 \text{ mA}$ i napon $V_{oc} = 0.50 \text{ V}$. Koliko iznosi struja kratkog spoja I_{sc} i napon otvorenog kola V_{oc} ukoliko se intenzitet upadne svjetlosti udvostruči.

Rješenje: Kako struja kratkog spoja odgovara fotostruji, kada se intenzitet svjetlosti poveća dva puta, i struja će se povećati 2 puta. Dakle, $I_{sc} = -32 \text{ mA}$.

Strujno naponska karakteristika solarne ćelije ima sljedeći oblik:

$$I = -I_{ph} + I_0 \left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right)$$

SOLARNE ČELIJE

Primjer: Solarna ćelija osvjetljena svjetlošću intenziteta 500 W/m^2 ima struju $I_{sc} = -16 \text{ mA}$ i napon $V_{oc} = 0.50 \text{ V}$. Koliko iznosi struja kratkog spoja I_{sc} i napon otvorenog kola V_{oc} ukoliko se intenzitet upadne svjetlosti udvostruči.

Rješenje: Kako struja kratkog spoja odgovara fotostruji, kada se intenzitet svjetlosti poveća dva puta, i struja će se povećati 2 puta. Dakle, $I_{sc} = -32 \text{ mA}$.

Strujno naponska karakteristika solarne ćelije ima sljedeći oblik:

$$I = -I_{ph} + I_0 \left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right)$$

Za određivanje napona V_{oc} , struju treba izjednačiti sa nulom. Ako se uzme u obzir da je $V_{oc} \gg V_T$,

dobija se: $V_{oc} = V_T \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_0} \right)$.

SOLARNE ČELIJE

$$V_{oc1} = V_T \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_0} \right)$$

$$V_{oc2} = V_T \ln \left(\frac{2I_{ph}}{I_0} \right) = V_T \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_0} \right) + V_T \ln 2 = V_{oc1} + V_T \ln 2 \approx 0.52 \text{ V}$$

LITERATURA

- S. O. Kasap, *Optoelectronics and Photonics*, Pearson Education Limited, 2013
- John G. Webster, Halit Eren, *Measurements, Instrumentation, and Sensors Handbook, Electromagnetic, Optical, Radiation, Chemical, and Biomedical Measurements*, CRC Press, Taylor and Francis Group, 2nd Edition, 2014
- Didier Decoster, Joseph Harari, *Optoelectronic Sensors*, Wiley, 2009.
- John P. Dakin, Robert G. W. Brown, *Handbook of Optoelectronics*, Taylor and Francis Group, 2006