

PRINCIP RADA *pn* SPOJA U SOLARNIM ČELIJAMA

Kristali su čvrsta tijela u kojima su atomi (ioni, molekule) pravilno raspoređeni i tvore tzv. kristalnu rešetku-mrežu linija koja dijeli kristal na jednake prostorne elemente, tzv. rešetke.

Ako se pravilni prostorni raspored čestica (atoma, iona ili molekula) javlja u velikom dijelu čvrstog tijela (makroskopske dimenzije), kristal se naziva monokristal. Ako pravilni prostorni raspored obuhvaća samo male dijelove tvari (područja atomskih dimenzija), naziva se polikristal. Tvari u kojima čestice nisu pravilno raspoređene nazivaju se amorfne tvari.

Veze među česticama (atomi, ioni, molekule) kristalne rešetke uglavnom su ionske, van der Waalsove, kovalentne i metalne, pa odatle slijedi podjela kristala na metale i nemetale, a nemetala na ionske, kovalentne i molekulske kristale.

KRISTAL SILICIJA

U kristalu silicija svaki je atom povezan s četiri valentna elektrona sa susjednim atomima silicija. Ovaj tip veze naziva se kovalentna veza. Dakle, silicij stvarajući kovalentnu vezu sa susjednim atomima tvori kristal.

Zbog svojih električnih svojstava silicij se naziva poluvodič. Ako je kristal silicija jako čist svi valentni elektroni se nalaze u kovalentnoj vezi. Kod temperature u blizini apsolutne nule svi valentni elektroni su lokalizirani i kristal silicija se ponaša gotovo kao savršen izolator. Ako izvana dovedemo kristalu energiju (kao što je svjetlo ili toplina) moguće je poremetiti raspored valentnih elektrona. Energija kovalentne veze kod silicija je 1,1 eV. Ako je dovedena ovalika (ili veća) količina energije u vezu elektron se može udaljiti od atoma i slobodno gibati u kristalnoj rešetci. Energija od 1,1 eV odgovara energiji fotona u blizini infracrvenog područja elektromagnetskog spektra. Fotoni koji imaju energiju manju od 1,1 eV neće pobuditi elektrone već će samo proći kroz kristalnu rešetku bez međudjelovanja s elektronom.

KRISTALI FOSFORA

Fosfor se nalazi u periodnom sustavu u grupi do silicija te ima 15 elektrona i 15 protona. Od 15 elektrona 5 elektrona su valentni elektroni i oni sudjeluju u stvaranju veze. Upravo činjenica da fosfor ima jedan valentni elektron više od silicija fosforu omogućava dopiranje Si čime je omogućeno nastajanje *pn* spoja.

DOPIRANJE

U procesu dopiranja nečistoća se dodaje u kristalnu rešetku silicija što mijenja njegovu elektronsku strukturu. Fosfor može zamijeniti neke od silicijevih atome u kristalu te se u tom slučaju fosfor se naziva dopant. Atom fosfora stvara četiri kovalentne veze, poput atom silicija, sa susjednim atomima silicija. Peti elektron fosfora koji nije uključen u vezu značajan je za vodljivost kristala. Navedeni elektron je slabo vezan za fosfor (energija vezanja je 0,045 eV) tako da se već pri sobnoj temperaturi fosfor može otpustiti elektron. Otpušteni elektron je slobodan za kretanje kroz rešetku. Električna vodljivost silicija se može precizno kontrolirati dodavanjem određene količine dopanta u kristalnu

rešetku. Kod tipičnih solarnih ćelija nalazi se jedan atom dopanta na 5 000 000 silicijevih atoma. Ovakav tip poluvodiča kod kojeg je dodana nečistoća s viškom elektrona naziva se *n*-tip poluvodiča.

NABOJ

Fosfor u kristalnoj rešetci silicija stvara kovalentnu vezu sa silicijem uz pomoć četiri elektrona isto kao i silicij međusobno. Preostali peti elektron od fosfora slabo je vezan za fosfor i već pri sobnoj temperaturi slobodno se giba kroz kristalnu rešetku. S obzirom da je fosfor otpustio elektron on ima 15 protona i 14 elektrona te je nabijen pozitivnim nabojem. Broj slobodnih elektrona u materijalu jednak broju iona te je stoga ukupni naboj kristala je nula. Kad bi postojala mogućnost da se dio elektrona ukloni materijal bi ostao nabijen pozitivnim nabojem. Prilikom formiranja PN spoja dio elektrona iz *n*-tip poluvodiča difundira u *p*-tip poluvodiča te se u *n*-tipu poluvodiča stvara lokalni pozitivni naboj.

SUPSTITUCIJA SILICIJA S BOROM

Atom bora koji ima pet protona i pet elektrona također može biti supstituent u kristalnoj rešetci silicija. Bor ima tri valentna elektrona s kojima će formirati kovalentnu vezu sa silicijem. Kod temperature u blizini apsolutne nule ovakav atom bora je stabilan. Međutim kod sobne temperature sustav ima dovoljnu količinu energije da susjedni elektron preseli na mjesto gdje nedostaje elektron. U tom slučaju atom koji je dodijelio svoj elektron boru ima pozitivnu šupljinu, tako se šupljina može pomicati od atoma do atoma. Navedeni proces se može promatrati kao gibanje elektrona između šupljina ili gibanje pozitivne šupljine kroz materijal. Atom bora u ovom slučaju ima jedan elektron više u odnosu na broj protona te ima negativan naboj.

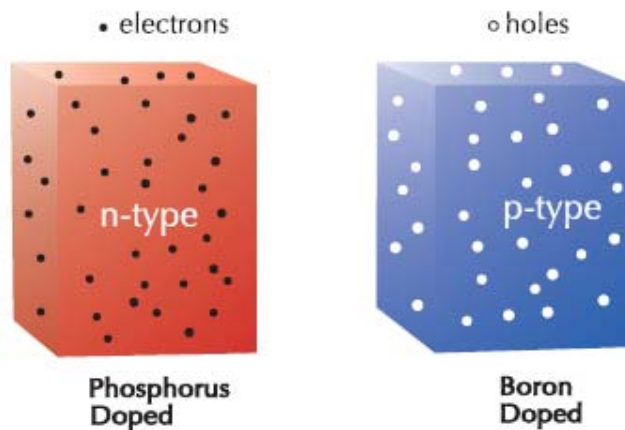
Ako se atom bora koristi za dopiranje silicija dobiveni materijal se naziva *p*-tip silicija. Dakle, dodavanje bora dovodi do generiranja pokretnih šupljina unutar silicija koje imaju pozitivan naboj pa se upravo zbog toga ovaj tip poluvodiča naziva *p*-tip.

KRETANJE ELEKTRONA I ŠUPLJINA

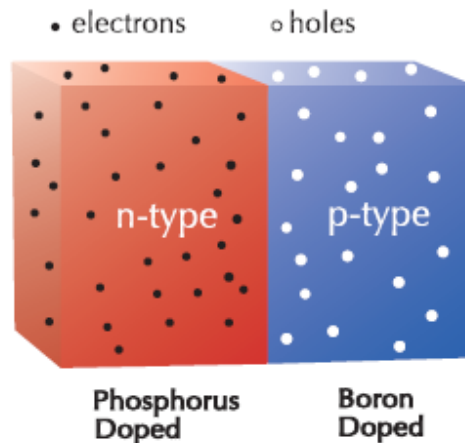
Kristal silicija sadrži pokretne elektrone ili šupljine što ovisi o vrsti dopiranja. S obzirom da elektroni i šupljine imaju naboj na njih možemo utjecati uz pomoć električnog polja. Gibanje naboja u kristalu je slučajno i ovakav tip gibanja se naziva difuzijski tok te je on posebno bitan u razumijevanju *pn* spoja i solarnih ćelija.

STVARANJE *pn* SPOJA

Ako jednu stranu poluvodiča dopiramo s borom (*p*-tip), a drugu fosforom (*n*-tip) stvorit ćemo PN spoj (**slika 1**). *n*-tip poluvodiča ima veliki broj slobodnih elektrona koji se mogu gibati kroz materijal. Pozitivno nabijeni atomi fosfora neutraliziraju negativan naboj elektrona, ali se ne mogu slobodno kretati kroz kristal. Slično tome *p*-tip poluvodiča ima veliki broj pozitivnih šupljina koje se mogu kretati kroz materijal. Pozitivni naboj šupljina neutraliziran je negativnim nabojem iona bora.

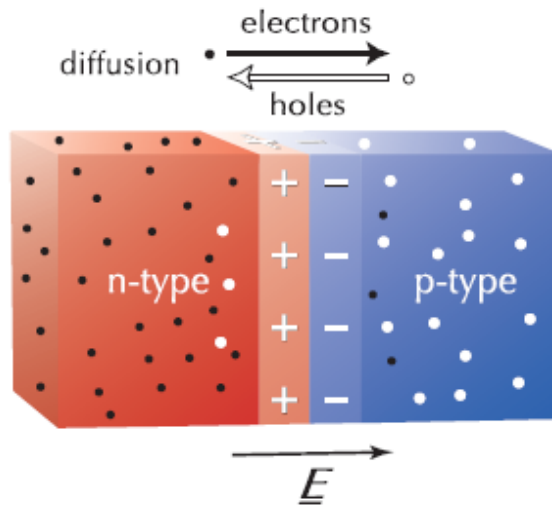


Slika 1. Dopirani silicij



Slika2. n-tip poluvodiča i p-tip poluvodiča u međusobnom kontaktu.

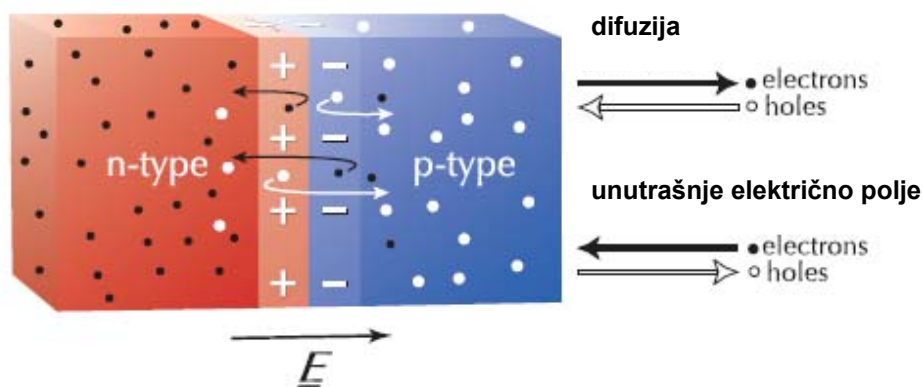
Na **slici 2** prikazan je slučaju kad su *p*-tip i *n*-tip poluvodiča u kontaktu. U *n*-tipu poluvodiča postoji veliki broj pokretnih slobodnih elektrona, ali u *p*-tipu poluvodiča ih ima ih jako malo. Stoga će slijed slučajnog termičkog gibanja elektroni iz *n*-tipa poluvodiča difundiraju u *p*-tip poluvodiča. S obzirom da u *p*-tipu poluvodiča postoji veliki broj pokretnih šupljina, a u *n*-tipu ih ima malo šupljine će difundirati iz *p*-tipa u *n*-tip poluvodiča. Za slučaj kad elektroni i šupljine ne bi imali naboj došlo bi do jednolike raspodijele unutar cijelog volumena. Kako elektroni difundiraju s *n*-strane u *p*-stranu poluvodiča ostavljaju pozitivno nabijeni fosfor u blizini međufaze, isto tako kao šupljine prelaze iz *p*-tipa u *n*-tip poluvodiča ostavljajući negativno nabijen bor na međufazi (**slika 3**).



Slika 3. Difuzija elektrona i šupljina dovodi do stvaranja unutrašnjeg električnog polja.

Upravo zbog toga na međufazi se uspostavlja *unutrašnje električno polje*. Nastalo polje je usmjereno od pozitivno nabijenih iona u *n*-tipu poluvodiča prema negativno nabijenim ionima u *p*-tipu poluvodiča. Pozitivne šupljine i negativni elektroni se pod utjecajem formiranog električnog polja kreću i to tako da se elektroni gibaju prema pozitivnom ionu fosfora, a šupljine prema negativnom ionu bora. Tako unutrašnje električno polje dovodi do kretanja elektrona i šupljina u suprotnom smjeru od smjera difuzije (**slika 4**).

Tok elektrona i šupljina se zaustavlja u trenutku kad se postigne ravnoteža jer pod utjecajem unutrašnjeg električnog polja elektroni počinju teći u suprotnom smjeru. U stanju ravnoteže ukupan tok elektrona i šupljina na kontaktu dva poluvodiča je jednak nuli. Iako nema ukupnog prijenosa naboja na kontaktu dva poluvodiča postoji električno polje koje je osnova za rad dioda, tranzistora i solarnih ćelija.



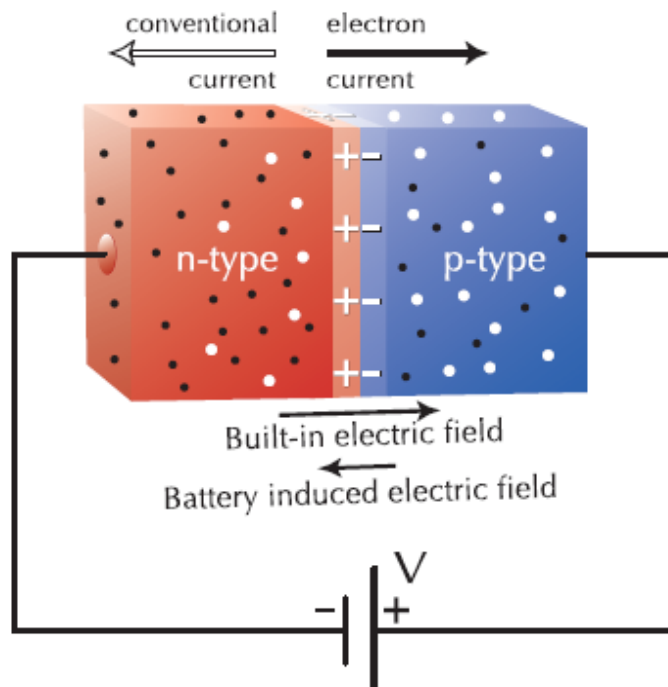
Slika 4. Kretanje elektrona i šupljina uslijed difuzije i uslijed djelovanja unutrašnjeg električnog polja

SLOJ PROSTORNOG NABOJA

Na kontaktu p i n-tipa poluvodiča javlja se sloj prostornog naboja u kojem nema pokretnih elektrona i šupljina već postoji samo naboj iona dopanata. Kao rezultat toga kontakt poluvodiča ima visoki otpor i ponaša se kao čisti nedopirani silicij. Ponašanje nastalog električnog polja može se modificirati primjenom *vanjskog električnog polja*. Ako je vanjsko električno polje djeluje u istom smjeru kao i električno polje unutar *pn*-spoja otpor *pn*-spoja raste, a ako je električno polje suprotno od električnog polja unutar *pn*-spoja otpor *pn*-spoja se smanjuje.

NAPON U PROPUSNO SMJERU

Ako je vanjski izvor spojen tako da je pozitivan pol spojen na *p*-tip poluvodiča, a negativan na *n*-tip poluvodiča struja može teći kroz spoj (**slika 5**). Unutrašnje električno polje je suprotno u odnosu na vanjsko električno polje tako da se unutrašnje električno polje smanjuje zbog djelovanja vanjskog polja. Stoga sloj prostornog naboja postaje tanji, a otpor *pn*-spoja je manji. Ako je primijenjeni napon dovoljno veliki otpor *pn*-spoja može postati zanemariv. Kod silicija se to događa kod napona 0,6 V. Kod manjih napona od 0-0,6 V otpor je značajan, a kod napona iznad 0,6 V otpor je zanemariv te se dobiju znatno veće struje.

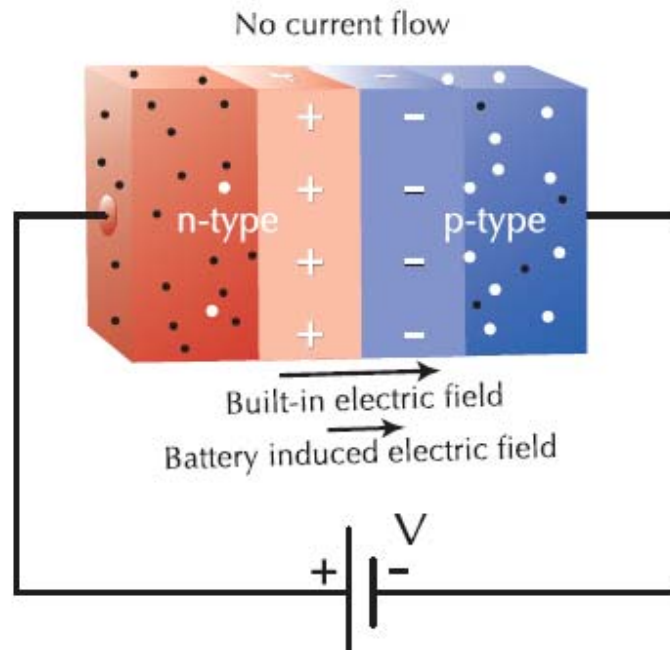


Slika 5. *pn*-spoj kad je vanjski izvor spojen u propusnom smjeru

NAPON U ZAPORNOME SMJERU

Ako je vanjski izvor spojen tako da je pozitivan pol spojen na *n*-tip poluvodiča, a negativan na *p*-tip poluvodiča nema toka struje (ili je struja jako malena) (**slika 6**). Unutrašnje električno polje je paralelno s vanjskim električnim poljem tako da se unutrašnje električno polje povećava zbog djelovanja vanjskog polja. Kako se povećava

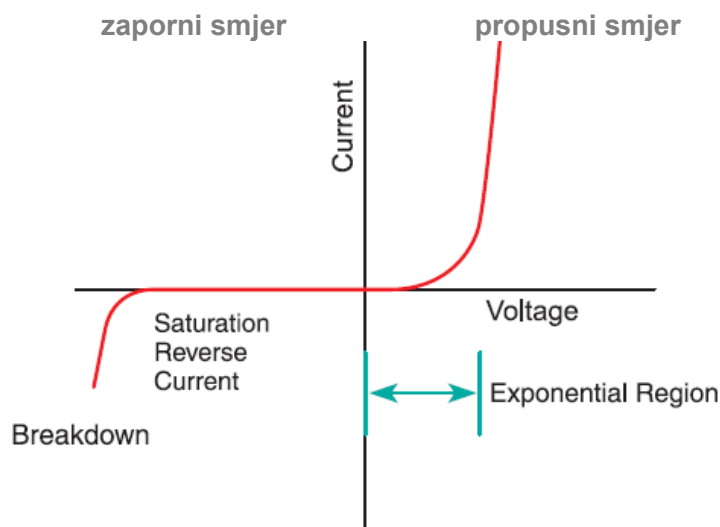
vanjsko električno polje sloj prostornog naboja postaje sve deblji, a otpor veći. Kroz takav otpornik može teći mala struja, ali se najčešće smatra da je ta struja jednaka nuli.



Slika 6. *pn*-spoj kad je vanjski izvor spojen u zapornome smjeru

Strujno naponska karakteristika *pn*-spoja je prikazana na **slici 7**. U zapornom smjeru otpor je veliki tako da kroz spoj protječe jako mala struja. Kod velikih vrijednosti napona kad napon premaši vrijednost maksimalnog zapornog napona može doći do proboja spoja.

U propusnom smjeru otpor se eksponencijalno smanjuje s primijenjenim naponom. Od 0-0,5 V dioda ima značajan otpor, a kako se napon približava vrijednosti 0,6 V eksponencijalna ovisnost otpora dovodi do toga da se otpor drastično smanjuje



Slika 7. Strujno-naponska karakteristika pn-spoja.

Vidimo da je važno svojstvo *pn*-spoja njegovo ispravljačko djelovanje: on mnogo lakše vodi struju kad je *p* strana pozitivna, a *n*-strana negativna odnosno kad je napon u propusnom smjeru nego kad je napon u zapornom smjeru. Dakle, *pn*-spoj radi kao dioda. Veza između vanjskog napona i jakosti struje kroz *pn*-spoj, tzv. I-U karakteristika diode koja se može prikazati jednadžbom:

$$I_d = I_0 \left(\exp \frac{eU}{kT} - 1 \right)$$

Gdje je I_d struja diode, I_0 struja zasićenja diode, e elementarni naboj, T temperatura, k Boltzmanova konstanta i U je napon.

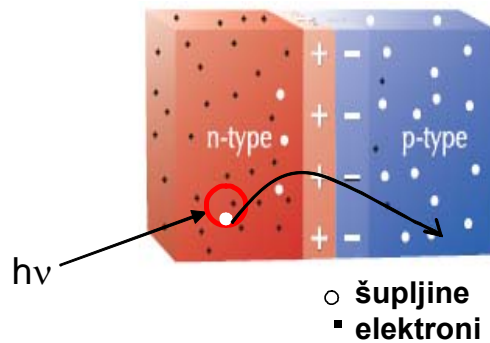
KAKO RADI SOLARNA ČELIJA

Većina solarnih ćelija su *pn*-spoj velike površine. Osunčane ćelije generiraju struju i napon koji su posljedica električnog polja unutar *pn*-spoja. Ako promatramo solarnu ćeliju u kojoj su *p* i *n* poluvodič kratko spojeni preko vanjske žice u slučaju kad ćelija nije osvijetljena nema struje, ako se ćelija osvijetli struja će teći od *p*-tipa poluvodiča prema *n*-tipu poluvodiča.

Osvjetljavanjem solarne ćelije do nje je dovedena energija koja pobuđuje elektrone iz kovalentne veze silicija i time se kida veza. Dovedena energija ne pobuđuje sve elektrone u vezi već pobuđuje samo jedan mali dio elektrona jer bi se u protivnom silicij rastalio, a to se ne događa. Pobuđeni elektroni, slično kao elektroni koje je otpustio fosfor, mogu se slobodno kretati kroz rešetku. Slično tome nastale šupljine se mogu kretati kroz rešetku, poput šupljina formiranih dodatkom nečistoće bora. Ako se nakon pobuđivanja nastali elektroni i šupljine nađu u blizini dolazi do njihove rekombinacije, a električna energija se gubi kao toplina. U slučaju da se dogodi veliki broj rekombinacija solarna ćelija neće biti u funkciji.

Elektroni i šupljine mogu nastati u bilo kojem dijelu diode odnosno u sloju prostornog naboja, u *p*-tipu poluvodiča ili u *n*-tipu poluvodiča. Uslijed djelovanja unutrašnjeg

električnog polja u pn -spoju elektrone privlači pozitivan naboj u n -tip poluvodiča, a šupljine negativan naboj u p -tipu poluvodiča. Dakle kroz pn -spoj struja teče od n -tipa prema p -tip poluvodiča (suprotno od toka elektrona). Svi parovi elektrona i šupljina koji su formirani oko pn -spoja bit će razdvojeni ako dodifundiraju do pn -spoja prije nego što dođe do rekombinacije (**slika 8**). U prethodnom tekstu je spomenuto da se elektroni i šupljine slobodno gibaju kroz materijal. Nastali naboj može dovesti do toka struje kroz vanjsku žicu što se i može izmjeriti ako se spoji ampermetar u krug. Dobivena struja se naziva *struja kratkog spoja*.



Slika 8. Nastajanje para šupljina i elektrona i njegovo razdvajanje u električnom polju

U slučaju kad vanjski krug nije spojen uslijed osvjetljenja solarne ćelije na p -strani će se akumulirati šupljine, a na n -strani elektroni (vanjsko električno polje). Dobiveni napon solarne ćelije naziva se *napon otvorenog kruga*, a možemo ga izmjeriti spajanjem voltmetra u strujni krug. Za silicij on iznosi 0,6 V po jakom suncu.

Ako se vanjsko električno polje u propusnom smjeru primjeni na pn -spoj struja će teći kroz spoj. Struja koja ide kroz spoj prilikom razdvajanja parova elektrona i šupljina odnosno struja generirana uz pomoć svjetla (struja pod djelovanjem unutrašnjeg električnog polja) suprotnog je predznaka u odnosu na struju pod djelovanjem vanjskog električnog polja. Ove dvije struje se mogu međusobno poništiti, a napon kod kojeg se to događa je napon otvorenog kruga. Za solarnu ćeliju od silicija ta vrijednost iznosi 0,6 V.

Da bi se dobila korisna snaga iz solarne ćelije potrebno je spojiti odgovarajući otpornik preko vanjskih izvoda iz ćelije. Otpornik određene vrijednosti otpora će dati maksimalnu snagu (točka maksimalne snage) odnosno maksimalnu moguću količinu energije koja se može dobiti iz solarne ćelije. U slučaju kad je otpor u krugu jako velik nema struje, a napon se približava naponu otvorenog kruga. U slučaju kad je otpor jako malen ćelija se ponaša kao da je kratko spojena, kroz vanjski krug će teći struja, ali će dobiveni napon biti jako mali te je za oba navedena slučaja dobivena mala vrijednost snage.

Da bi se dobila željena vrijednost snage za obavljanje korisnog rada u praksi potrebno je spojiti niz solarnih ćelija.