

UNIVERZA V LJUBLJANI
FAKULTETA ZA MATEMATIKO IN FIZIKO
ODDELEK ZA FIZIKO

FOTOCELICE

IZBRANA POGLAVJA IZ UPORABNE FIZIKE

Matej Andrejašič

Mentor: doc. dr. Primož Ziherl

Ljubljana, 2. 5. 2007

Povzetek

Fotocelice neposredno pretvarjajo energijo vpadle svetlobe v električno energijo z izkoriščanjem fotonapetostnega pojava. Zelo dobro raziskane in že precej komercialno uporabljene fotocelice so tiste, ki uporabljajo Sonce kot konstanten, dobro poznan in brezplačen vir. V seminarju se bomo osredotočili le na te – sončne celice.

Predstavili bomo nekaj lastnosti sončnega sevanja. Razložili bomo zgradbo, delovanje in izkoristke kristalne, trenutno komercialno najbolj uporabljene, in tankoplastne sončne celice, ki bo zaradi njenih prednosti v prihodnosti še kako pomembna. Dotaknili se bomo najpogostejših izgub v sončni celici, njene temperaturne odvisnosti ter odvisnosti od gostote svetlobnega toka in povedali še nekaj malega o povezovanju posameznih sončnih celic v module.

1 Uvod

Sonce je ena izmed najpomembnejših stvari, ki omogočajo življenje na Zemlji. V zadnjih letih gledamo nanj kot na izvor ogromne zaloge energije: če obravnavamo Sonce kot idealno črno telo s površinsko temperaturo okoli 5800 K, dobimo po Stefanovem zakonu za povprečno gostoto energijskega toka nad zemljino atmosfero $j = 1367 \text{ W/m}^2$. Na površino, ki je trenutno obrnjena proti Soncu, teče približno $0.7 j \pi R^2$ energijskega toka (R je radij Zemlje, najmanj 30% se je absorbira v atmosferi): torej Sonce obseva zemljino površino s povprečno močjo $1.2 \times 10^{17} \text{ W}$. Torej prejme v manj kot eni uri dovolj energije, da zadovolji vse energijske potrebe celotnega človeštva za obdobje enega leta. Količina prejete energije s Sonca je precej odvisna od geografske širine našega položaja na Zemlji, vremena in seveda ure merjenja. Povprečno letno obsevanje v Sloveniji znaša 1070 kWh/m^2 [1].

Pretvarjanje svetlobe v električni tok imenujemo fotovoltaika. Za pretvorbo uporabljamo sončne celice, ki so glede na zgradbo najpogosteje kristalne ali tankoplastne. Pri tem sodeluje direktno, difuzno in tudi odbito sončno sevanje. Z združevanjem več sončnih celic dobimo sončne module. Z združevanjem več modulov in z uporabo drugih elementov, kot so akumulatorji, regulatorji polnjenja in razsmerniki, lahko zgradimo poljubno močan sistem za oskrbo z električno energijo na kateri koli lokaciji, če je le na razpolago dovolj sončnega sevanja. Pridobivanje električnega toka na ta način je zanesljivo, ne vsebuje nobenih gibajočih se mehanskih delov in vzdrževalni stroški so majhni. Delovanje fotovoltaičnega sistema je tiho in ne onesnažuje okolja. V prihodnosti bo ta način pridobivanja električnega toka še zelo pomemben.

Količina pretvorjene energije ni določena samo z lastnostmi sončnega sevanja in lokalnimi značilnostmi, temveč tudi s tehnično rešitvijo sistema, ki pretvorbo opravlja. Oglejmo si princip delovanja in tipe sončnih celic.

2 Delovanje sončnih celic

2.1 Polprevodniki

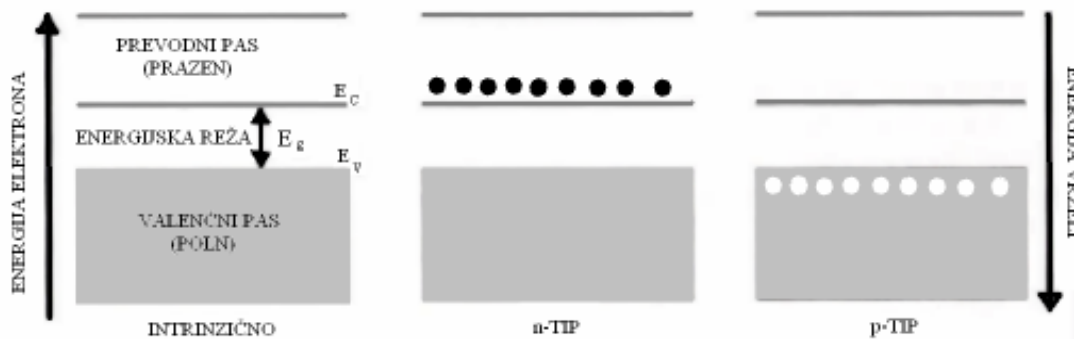
Sončne celice so narejene iz različnih polprevodnikov. Za polprevodnike že vemo, da imajo elektroni v njih energijski spekter razdeljen na pasove. Za polprevodnike je značilno, da je valenčni pas do vrha zaseden [2]. Naslednji višji energijski pas, to je prevodni pas, pa je popolnoma nezaseden (slika 1). To velja v osnovnem stanju pri zelo nizki temperaturi, ko zasedajo elektroni najnižja enoelektronska stanja, ki jih dopušča Paulijeva prepoved. Med prevodnim in valenčnim pasom je energijska reža.

Polprevodnik pri zelo nizki temperaturi ne prevaja električnega toka. Nosilci naboja, ki sodelujejo pri prevajanju, se pojavijo, če pridejo elektroni iz valenčnega pasu preko

energijske reže v prevodni pas. Potrebno energijo za ta prehod lahko dobijo z absorpcijo svetlobe ali pri sobni temperaturi od nihajočih gradnikov v kristalni mreži. Za vsakim od elektronov preostane v sicer zasedenem valenčnem pasu nezasedeno enoelektronsko stanje, ki mu pravimo vrzel. Vedno se skupaj s prevodniškim elektronom pojavi tudi vrzel, tako da nastane par. Z rekombinacijo pa tak par preneha obstajati. V polprevodniku moramo tako upoštevati dve vrsti nosilcev naboja: prevodniške elektrone z nabojem $-e_0$ in vrzeli z nabojem e_0 .

Polprevodnike lahko dopiramo: v polprevodniški kristal tipa n je primešana primes petvalentnega elementa, na primer arzen ali fosfor. Atom primesi ima torej pet zunanjih elektronov (rečemo mu donor), medtem ko ima atom polprevodnika štiri zunanje elektrone. Primes se veže v kristal s štirimi kovalentnimi vezmi, preostali peti najšibkeje vezani elektron pa pri sobni temperaturi zaradi termičnega nihanja atomov v kristalu preide v prevodni pas. Ta elektron preneha biti vezan ter postane last vsega kristala in lahko sodeluje pri prevajanju elektrike. Pri prevodnikih tipa n so večinski nosilci naboja elektroni (slika 1).

Polprevodnik tipa p dobimo, če polprevodniškemu kristalu primešamo trivalenten element (atomu takega elementa pravimo akceptor), na primer galij ali bor. Akceptorska primes ima en zunanji elektron manj kot čisti polprevodnik. Manjkajoči zunanji elektron v atomu trivalentne primesi opišemo v kristalu polprevodnika kot vrzel. Pri sobni temperaturi termično nihanje atomov vzbudi domala vse elektrone z vrha valenčnega pasu v enoelektronska stanja primesi. Ob tem nastanejo v valenčnem pasu vrzeli, ki so last vsega kristala in se gibljejo po njem približno kot proste. Tu so večinski nosilci naboja vrzeli (slika 1).

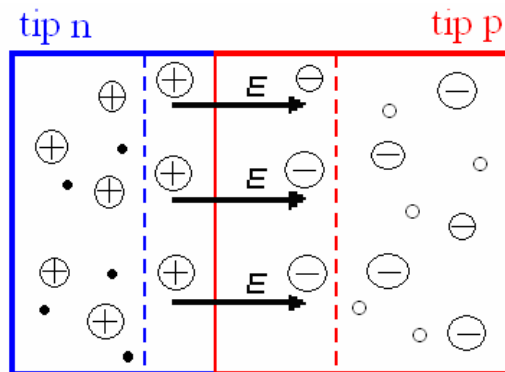


Slika 1: Energijski nivoji elektronov in vrzeli v intrinzičnem, polprevodniku tipa n in tipa p. Med prevodnim in valenčnim pasom je energijska reža širine E_g . Pri polprevodniku tipa n je presežek elektronov (črne pike), pri prevodniku tipa p pa presežek vrzeli (bele pike) [3].

2.2 Polprevodniška dioda

Ko ta dva tipa polprevodnika "staknemo" skupaj (slika 2), pride do difuzije nabojev preko stične površine. Elektroni iz polprevodnika tipa n pričnejo prodirati v polprevodnik

tipa p. Pri tem za sabo pustijo pozitivno nabito območje. Donerski atomi so namreč oddali elektron in so zato pozitivno nabiti. Vrzeli pa prodirajo iz polprevodnika tipa p v polprevodnik tip n in za sabo pustijo zaradi akceptorjev negativno nabito območje. Torej ob robu spoja v polprevodniku tipa p nastane presežek negativnega fiksnega naboja, v polprevodniku tipa n pa presežek pozitivnega. Ustvarjeni naboj povzroči električno polje, ki zavira nadaljnjo difuzijo delcev. Če nosilci ne bi imeli naboja in ne bi nastalo električno polje, bi delci prodirali tako dolgo, dokler ne bi bili enakomerno porazdeljeni po celotnem polprevodniku. Območje, kjer se poruši električna nevtralnost, imenujemo p-n stik oziroma prehodno področje. Včasih se doda še nekaj intrinzičnega materiala vmes, da dobimo širšo prehodno območje.



Slika 2: p-n stik. Med črtkanima črtama je p-n stik oz. prehodno območje. Zaradi presežka pozitivnega fiksnega naboja v polprevodniku tipa n in presežka negativnega naboja v polprevodniku tipa p nastane v sredini električno polje, ki zavira nadaljnji prehod elektronov in vrzeli [1].

S priključitvijo zunanje napetosti U na zgradbo se le-ta obnaša kot dioda. Če priključimo napetost v zaporni smeri, pozitivni priključek na polprevodnik tipa n in negativnega na polprevodnik tipa p, se električno polje na prehodnem območju še bolj poveča. Dobimo zelo majhen tok v nasprotni smeri I_o (temni saturacijski tok oziroma dark saturation current). Če zvežemo pozitivni priključek izvira z območjem p in negativnega z območjem n, torej v prevodni smeri, pa se tok skozi diodo močno poveča. Če upoštevamo, da je tok definiran z obratno smerjo potovanja elektronov, potem ima tu smer od polprevodnika tipa p proti polprevodniku tipa n oziroma od pozitivnega priključka proti negativnemu. Karakteristika polprevodniške diode je eksponentna:

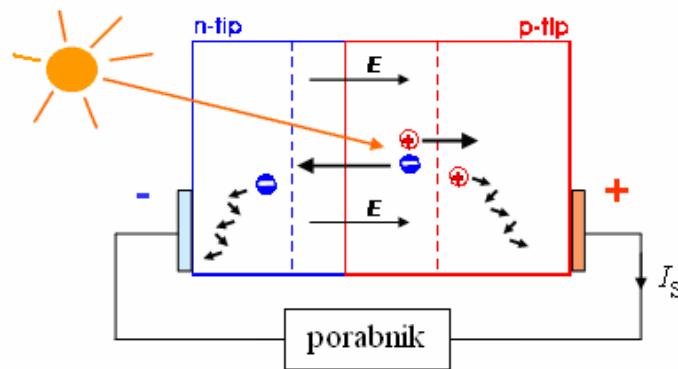
$$I = I_o \left[\exp\left(\frac{e_o U}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.1)$$

2.3 Osvetljena sončna celica

Poglejmo si, kaj se zgodi pri osvetljeni sončni celici. Fotoni vpadle svetlobe imajo energijo

$$E_f(\lambda) = \frac{hc}{\lambda} . \quad (2.2)$$

Na jasen dan prileti na kvadratni centimeter zemljinega površja vsako sekundo približno 4.4×10^{17} fotonov. Samo fotone z energijo, ki je večja od širine energijske reže, lahko sončna celica pretvori v električni tok. Le tak foton lahko namreč izbije elektron iz valenčnega pasu v prevodni pas, ko vstopi v polprevodnik. Ker za njim ostane vrzel v valenčnem pasu, tako nastane par elektron-vrzel. Odvečna energija, ki jo par elektron-vrzel še ima, se spremeni v toploto in ta za nas ni več uporabna. Električno polje loči in povleče elektrone iz prehodnega področja v polprevodnik tipa n in vrzeli v polprevodnik tipa p. Elektroni in vrzeli se nato v nevtralnem delu polprevodnika z difuzijo premikajo proti kontaktoma (slika 3). Ločitev elektronov in vrzeli povzroči napetostno razliko na kontaktih, ki ob priključitvi porabnika požene električni tok I_s . Le ta ima nasprotno smer od toka skozi polprevodniško diodo, ki je priključena na zunanjo napetost v prevodni smeri (2.1).



Slika 3: Delovanje sončne celice pri osvetlitvi. Ko prileti foton v celico, povzroči par elektron-vrzel. Električno polje loči in povleče elektrone iz prehodnega področja v polprevodnik tipa n in vrzeli v polprevodnik tipa p. Ločitev elektronov in vrzeli povzroči napetostno razliko na kontaktih, ki ob priključitvi porabnika požene električni tok I_s [1].

Lahko naredimo grobo oceno električne moči, ki jo lahko proizvedemo v takem polprevodniku. Če interpretiramo prehod elektronov čez energijsko režo kot električni tok, zanemarimo izgube in upoštevamo, da vsak foton izbije en elektron, dobimo za proizveden električni tok oceno $I = e_0 N A$, kjer je N število fotonov, ki padejo na polprevodnik in A površina polprevodnika izpostavljena svetlobi. Pri silikonski celici dobimo za gostoto toka največ $I / A = 44 \text{ mA/m}^2$. Teoretična zgornja meja za napetost proizvedena pri sončni celici je $U = E_g / e_0$. V praksi so te napetosti precej manjše.

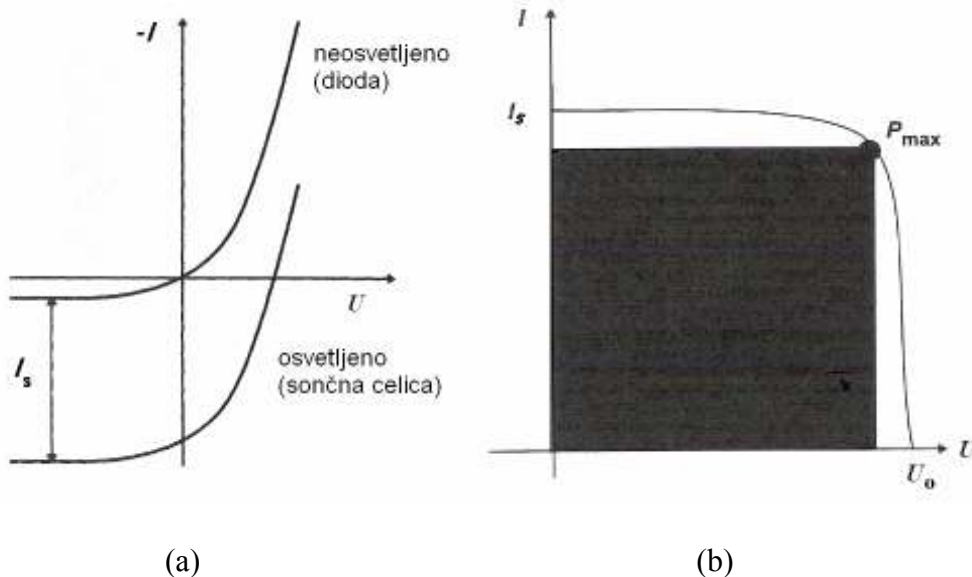
Če je stik p-n povezan s porabnikom in obenem osvetljen, je skupni tok vsota obeh prej opisanih:

$$I = I_s - I_o \left[\exp\left(\frac{e_0 U}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.3)$$

I_o in I_s sta seveda odvisna od sestave naše naprave [slika 4 (a)]. V točkah $I(U = 0) = I_s$ in $U(I = 0) = U_o$ sončna celica ne proizvede nobene moči, saj je takrat produkt IU enak 0. Največjo moč pa proizvede, ko je produkt IU maksimalen. To točko P_{\max} na grafu $I(U)$ imenujemo točka maksimalne moči [slika 4 (b)]. Velja torej:

$$P_{\max} = U_m I_m, \quad (2.4)$$

kjer sta U_m napetost in I_m tok pri maksimalni moči.



Slika 4: (a) Karakteristika osvetljene sončne celice in diode pod zunanjo napetostjo. Narisan je negativni tok v odvisnosti od napetosti. (b) Točka maksimalne moči P_{\max} na grafu $I(U)$. V tej točki proizvede sončna celica največ moči [3].

Izkoristek sončne celice η je definiran kot razmerje maksimalne proizvedene moči sončne celice P_{\max} pri standardnih testnih pogojih in moči svetlobe s katero je osvetljena sončna celica. Najbolj standardni pogoji so: gostota svetlobnega toka 1 kW/m^2 , standardni referenčni spekter vpadle svetlobe AM 1.5 (oznaka za spekter sončne svetlobe na Zemljinem površju na jasen dan) in pri temperaturi 25°C [4]. Torej:

$$\eta = \frac{P_{\max} / A}{1000 \text{ W/m}^2}. \quad (2.5)$$

Nekatere sončne celice se testira pri drugačnih pogojih. Za sončne celice, ki napajajo satelite, se uporablja referenčni spekter vpadle svetlobe AM0 (oznaka za spekter sončne svetlobe nad zemljino atmosfero).

2.4 Direktna in indirektna reža

Do sedaj smo predpostavljali, da se vsi fotoni z energijami, večjimi od energijske reže, absorbirajo v polprevodniku. Res obstajajo polprevodniki, ki vse take fotone absorbirajo že v debelini nekaj mikrometrov. Reče se jim polprevodniki z direktno energijsko režo (amorfni silicij, ...). Pri drugih pa je absorpcija bolj zapletena. To so polprevodniki z indirektno energijsko režo (kristalni silicij) (tabela 1). Zaradi nihanja kristalne mreže je absorpcija svetlobe slabša. Zato je za enako absorpcijo svetlobe, kot pri nekaj μm debeli plasti polprevodnika z direktno energijsko režo, potrebno tudi nekaj 100 μm debela plast polprevodnika.

material	energijska reža (eV)	tip energijske reže
kristalni Si	1.12	indirektna
amorfni Si	~ 1.75	direktna
CuInSe_2	1.05	direktna
CdTe	1.45	direktna
GaAs	1.42	direktna

Tabela 1: Širine energijskih rež in tipi energijskih rež za najpogostejše polprevodnike, uporabljene v sončnih celicah. Le kristalni silicij ima indirektno režo, zato mora biti debelina takih sončnih celic precej večja od celic, narejenih iz ostalih štirih polprevodnikov (tem pravimo tankoplastne celice) [3].

3 Tipi sončnih celic

Danes obstaja na trgu veliko različnih tipov sončnih celic, ki se razlikujejo po materialu in zgradbi. Še vedno pa razvijajo nove tipe, saj poskušajo dobiti čim večjo maksimalno moč, čim boljši izkoristek in čim nižjo ceno. Celice z izkoristki nad 30% so zaenkrat še v laboratorijih, medtem ko imajo celice za komercialne namene manjši izkoristek.

3.1 Kristalne silicijeve sončne celice

Za izdelavo fotovoltaičnih modulov iz kristalnega silicija potrebujejo proizvajalci štiri korake: od peska do čistega silicija, od čistega silicija do kristalnega silicija in naprej do rezin, od rezin silicija do sončnih celic in od sončnih celic do modulov. Cena končnih modulov pa je razdeljena na tri dele: 1/3 porabijo proizvajalci sončnih celic za nakup rezin kristalnega silicija, 1/3 za proizvodnjo sončne celice in 1/3 končne cene porabijo za izdelavo končnih modulov.

3.1.1 Silicij

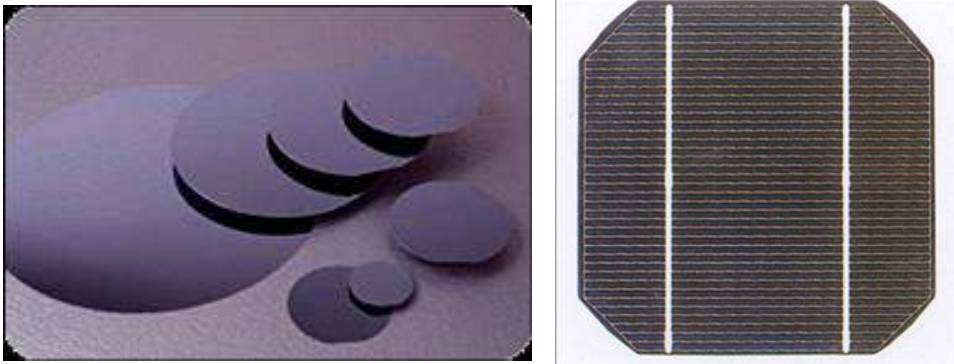
Glavni element za izdelavo sončnih celic je silicij, ki je zaenkrat najpogostejša surovina

za masovno proizvodnjo sončnih celic. Kot najpogosteje uporabljeni polprevodnik ima več dobrih lastnosti: v naravi se nahaja v zelo velikih količinah, saj v obliki oksidov SiO_2 sestavlja 1/3 zemeljske skorje. Je nestrupen, okolju prijazen, tudi odpadki ne predstavljajo težav. Lahko se tali, obdeluje in ga je sorazmerno enostavno oblikovati v monokristalno obliko. Njegove električne lastnosti (obstojnost do $125\text{ }^\circ\text{C}$) omogočajo uporabo silicijevih polprevodniških elementov tudi v najzahtevnejših pogojih.

Čisti silicij pridobivamo iz peska (SiO_2) s sledečimi postopki: osnovna surovina za izdelavo čistega silicija je metalurški surovi silicij, ki ga pridobivamo z redukcijo v elektropečeh pri temperaturi pri $1800\text{ }^\circ\text{C}$. Čistoča tako pridobljenega metalurškega silicija znaša 98-99%. Kot reducent služijo ogljene elektrode, celotna reakcija pa je sledeča: $\text{SiO}_2 + \text{C} \rightarrow \text{Si} + \text{CO}_2$. Tega potem z različnimi metodami čistijo toliko časa, dokler ni odstotek čistega silicija v pridobljenem materialu najmanj 99.9999999%. Glede na gostoto silicija, ki znaša 5×10^{22} atomov/ cm^3 , to pomeni 5×10^{13} atomov nečistoč / cm^3 .

3.1.2 Proizvodnja sončnih celic

Iz čistega silicija potem pridobivajo monokristalni in polikristalni silicij ter amorfni silicij. Bloke monokristalnega ali polikristalnega silicija nato žagajo in obdelujejo do končne oblike sončnih celic (slika 5). Samo pri žaganju gre v izgubo okrog polovica materiala. Po rezanju se rezine silicija jedka do globine nekaj mikrometrov. Na ta način odstranimo nepravilnosti v strukturi kristala, ki so nastale zaradi žaganja, obenem pa se rezine na ta način tudi očisti.



(a)

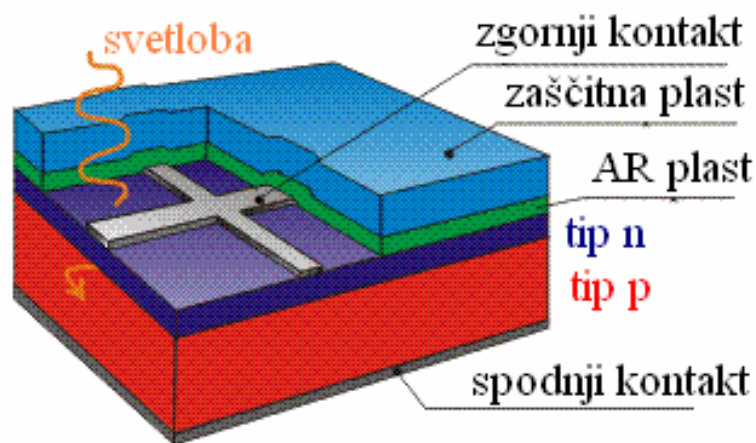
(b)

Slika 5: (a) Silicijeve rezine imajo ponavadi premer 10-15 cm in generirajo tok z gostoto okoli $35\text{mA}/\text{cm}^2$ (skupaj do 2 A/celico) pri napetosti približno 550 mV pri polni osvetlitvi. Debele so okoli 0.3 mm in so rezane iz monokristalnega ali polikristalnega ingota. (b) Silicijeva celica [1].

Začetna rezina silicija je ponavadi polprevodnik tipa p, dopirana z borom (slika 6). Nato naredimo z difuzijo fosforja p-n stik. Pri temperaturi $870\text{ }^\circ\text{C}$ difundiramo fosfor v plinasti obliki P_2O_5 v rezino iz sprednje strani. Debelina dopirane plasti narašča s časom, ki ga silicij prebije v plinastem P_2O_5 : po 15-30 min znaša okoli $0.5\text{ }\mu\text{m}$, kolikor je potrebno za optimalno delovanje celice. Tako nastane na vrhu rezine plast polprevodnika n in oksidna plast, bogata s fosforjem.

Rezine nato zložijo v obliko kocke ter jo jedkajo v kisikovi plazmi, s čimer odstranijo plast polprevodnikov tipa n na robovih. V naslednji fazi z mokrim kemijskim jedkanjem odstranijo še oksidne plasti na površinah rezin.

Na sprednji strani nato izdelajo mrežo kontaktov, tipično iz srebra, na zadnji pa površina kontaktov iz srebra, ki vsebuje 1% aluminijskega. Srebro na površino celic tiskajo preko maske, s posebnim postopkom. Nato potiskano celico sintrajo pri visokih temperaturah (okoli 700 °C). Trakovi kontaktov na površini so tipično širine 150-200 μm, med trakovi pa je tipično 3 mm. Za zaključek mreže sta še dva 2 mm široka trakova. Celotna mreža kontaktov skupaj potem zasenči okoli 9% vpadle svetlobe. Visoko zmogljive celice imajo tudi tanjše trakove kontaktov, da zmanjšajo senčenje (10-40 μm). Te nanašajo s posebno metodo fotolitografije, ki jo veliko uporabljajo v mikroelektroniki.



Slika 6: Silicijska sončna celica in njena zgradba. Električni tok, ki se generira v polprevodniku zaradi vpadle svetlobe, teče med zgornjimi in spodnjimi kontakti. Zgornji kontakti so narejeni v obliki tankih trakov, saj morajo prepuščati svetlobo. Celica je prevlečena s tanko plastjo dielektričnega antirefleksnega materiala (AR), da minimizira odboj vpadle svetlobe. Na vrhu je še zaščitna plast, da minimizira mehanske poškodbe [1].

Na koncu dodajo na vrhu celice še antirefleksno plast, ki ima lomni količnik med lomnim količnikom stekla in silicija: $n = \sqrt{n_{stek} \cdot n_{Si}} = 2.4$ in takšno debelino, da je refleksija minimalna. Primeren material, ki ga pogosto uporabljajo v fotovoltaični industriji, je titanov dioksid, pa tudi tantanov pentaoksid ali cinkov sulfid oziroma silicijev trinitrid, saj se je pokazalo, da izboljša električne lastnosti silicijske rezine. Z eno antirefleksno plastjo zmanjšamo refleksivnost na približno 9%. Tako znašajo izgube zaradi refleksije in senčenja kontaktov pri polikristalnih celicah 18%. Pri monokristalnih celicah ponavadi naredijo površino v obliki piramid in tako zmanjšajo skupne izgube na približno 14%. Kontakte delajo tudi že z novejšo tehnologijo. Po difuziji fosforja in po nanosu dielektrične antirefleksne plasti (silicijev trinitrid) naredijo z laserjem brazde (30-50 μm), ki jih potem napolnijo z nikljem, bakrom in srebrom. S tem izboljšajo stike med kontakti in plastjo polprevodnika n in zmanjšajo izgube.

Nato celice testirajo pri standardnih pogojih in jih razvrstijo po proizvedenem toku in napetosti. Potem tipično 36 celic s približno enakim izkoristkom zvežejo v modul. Celice s 15% izkoristkom dajo na koncu modul s približno 14 % izkoristkom.

3.1.3 Kristalni silicij

Kristalni silicij je lahko v dveh različnih oblikah: monokristalni in polikristalni. Ker je polikristal cenejši, je na tržišču v uporabi več slednjega. Med seboj se razlikujeta le v kristalni mreži. Monokristal je urejena kristalna mreža silicijevih atomov. V njegovi strukturi ni napak. Vsak silicijev atom je vezan s štirimi sosednjimi silicijevimi atomi, zaradi česar je struktura kristala zelo podobna diamantni. Polikristalni silicij je za razliko od monokristala sestavljen iz več posameznih kristalov. Ti kristali oziroma zrna imajo svoje mreže povsem naključno orientirane. Območja med temi zrnji so mejna področja in imajo strukturne in površinske napake. V teh območjih lahko zato nastaja električno polje, ki vpliva zaviralno na Transporte med zrnji.

Celice iz silicija so zelo dobro razvite. Moduli takih celic imajo precej dolgo življenjsko dobo (20 let ali več). Najboljše sončne celice iz kristalnega silicija imajo izkoristek okoli 24%. Komerzialne celice pa imajo izkoristke okoli 15-18% za monokristalni silicij in 13-15% za polikristalni silicij (tabela 3). Izkoristki komercialnih celic iz leta v leto naraščajo na račun optimizacij struktur in novih tehnologij.

material	debelina	komerc. izkoristek (%)	barva	slabosti	prednosti in perspektive
monokristalne Si sončne celice	0.3 mm	15-18 %	temno modre, črne z AR plastjo, sive brez AR plasti	dolgotrajni proizvodni postopki, potrebno žaganje rezin	najbolj raziskan material. Tudi v prihodnjih letih bo prevladoval na tržišč, posebej tam, kjer je potrebno veliko razmerje moč/površina.
polikristalne Si sončne celice	0.3 mm	13-15 %	modre z AR plastjo, srebrno-sive brez AR plasti	v primerjavi s tankoplastnimi tehnologijami daljši proizvodnji postopki, potrebno žaganje rezin	najpomembnejši material vsaj v naslednjih nekaj letih.
amorfne sončne celice	0.0001 mm +1-3 mm substrat	5-8 %	rdeče-modra, črna	manjša učinkovitost, krajša življenjska doba.	možna proizvodnja v obliki traku, ni žaganja rezin. Ob izboljšanju dolgoročnih lastnosti (izkoristek, življenjska doba) najbolj perspektiven material.
bakrov-indijev-diselenid (CIS)	0.003 mm + 3 mm steklen substrat	7,5-9,5% (modul)	črna	omejene zaloge indija v naravi	možnost znatnega znižanja proizvodnih stroškov.

kadmijev telurid (CdTe)	0.008 mm + 3 mm steklen substrat	6-9% (modul)	temno zelena, črna	strupene surovine	možnost znatnega znižanja proizvodnih stroškov.
--------------------------------	----------------------------------	--------------	--------------------	-------------------	---

Tabela 3: Pregled lastnosti najpogostejših materialov za izdelavo sončnih celic [5].

3.2 Tankoplastne sončne celice

V primerjavi s kristalnimi silicijevimi celicami tankoplastna tehnologija obljublja manjšo ceno končnih modulov, predvsem zaradi manjše porabe materiala in energije v proizvodnji. Poleg tega proizvajajo kar celotne module hkrati. Vprašati pa se je treba tudi, kako je z vplivom na okolje. Tankoplastne celice bodo prinesle manjše površine fotovoltaičnih modulov, manjšo porabo materiala, hitrejšo produkcijo in s tem manj porabljene energije, pa tudi veliko manj odpadnega materiala se pridela med proizvodnjo.

Čeprav je mogoče narediti veliko število različnih tankoplastnih celic, jih za komercialno uporabo v prihodnosti le nekaj izstopa. Ti obljublajo nizko ceno z zadovoljivim izkoristkom. To so amorfne silicijeve celice, polikristalne silicijeve tankoplastne celice, heterospojne celice bakrovega indijevega diselenida, heterospojne celice kadmijevega telurida (tabela 2). Vse te celice imajo aktivne plasti debeline 1000-10000 nm.

material \ izkoristki (%)	komercialna uporaba	uporaba pri velikih površinah $\sim 0.1 \text{ m}^2$	uporaba pri majhnih površinah	teoretična meja
amorfni silicij	5-8	10	13	~ 20
tankoplastni silicij	11	12	16	~ 25
bakrov indijev diselenid	8	14	16	~ 21
kadmijev telurid	7	11	16	~ 28

Tabela 2: Najboljši rezultati tankoplastnih celic (izkoristki v % pod standardnim AM 1.5 obsevanjem) [3].

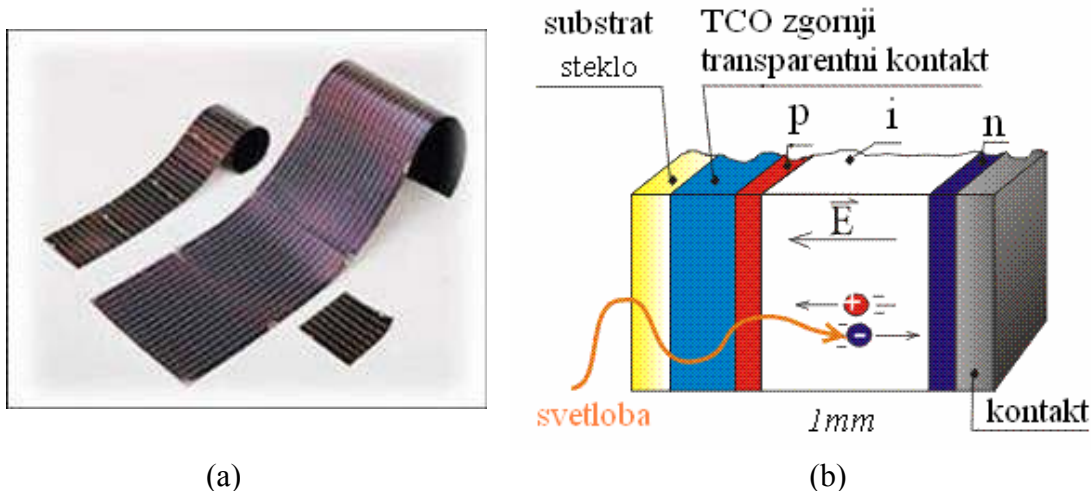
3.2.1 Amorfne sončne celice

Amorfni silicij pridobivajo iz čistega silicija. Pridobivajo ga v visokofrekvenčnih pečeh v delnem vakuumu, skozi katere ob prisotnosti električnega polja visokih frekvenc prepihujejo plinast silan in B_2H_6 ali PH_3 , s pomočjo katerih v silicij dodajajo bor ali fosfor.

Amorfni silicij se razlikuje od kristalnega silicija po tem, da je neurejen material, ki vsebuje veliko število strukturnih napak. Razdalje in koti med posameznimi atomi se lahko precej spreminjajo po materialu. In ravno ta slučajnost v strukturi močno vpliva na električne značilnosti materiala. Material ima zato direktno režo s širino okoli 1.75 eV (tabela 1).

Amorfne sončne celice so narejene iz amorfne silicija, ki vsebuje nekaj odstotkov vodika. Vodik precej zmanjšuje učinke neurejenosti materiala in omogoča, da ga lahko dopiramo bodisi kot polprevodnik tipa p ali tipa n. Ker imata dopirani plasti amorfne silicija povečano število strukturnih napak, je med njima vstavljena nedopirana (intrinzična) i-plast (slika 7). S tem se izboljšajo transport nosilcev naboja. Električno polje, ki nastane preko p-n spoja, se v taki p-i-n diodi raztegne čez celotno i plast in omogoča boljše ločevanje prostih nosilcev (elektronov in vrzeli). S to dodatno plastjo tako precej povečajo izkoristek sončne celice.

Postopek izdelave amorfne sončne celice je sledeč: najprej steklen substrat temeljito očistijo. Steklo je uporabno, ker je sorazmerno poceni, transparentno in vodoodporno. Sledi nanašanje sprednje kontaktne plasti TCO. V vakuumu pod vplivom visokofrekvenčnega električnega polja nanašajo plast amorfne silicija s p-i-n strukturo. Nato sledi še nanašanje zadnjih kovinskih elektrod. Za te je idealno, če so iz materiala z veliko reflektivnostjo, da se tisti fotoni, ki uspejo priti skozi celico, odbijejo in s tem povečajo absorpcijo celice. Najboljši material za to je srebro, vendar zaradi njegove cene raje uporabljajo aluminij.



Slika 7: (a) Amorfno silicijeva sončna celica (na primer v kalkulatorjih) in (b) njena zgradba. Optimalna struktura take celice je p-i-n, kjer pa je zgornji kontakt transparentna prevodna p plast. Takšna je na primer plast iz p dopiranega kositrovega oksida. Označimo jo z TCO (transparent conducting oxide – transparenten prevoden oksid) [1].

Da bi zagotovili uspešno zbiranje svetlobno generiranih elektronov in vrzeli, morajo biti posamezne plasti v amorfne sončnih celicah zelo tanke. Ker pa tanke celice ne bi absorbirale dovolj sončne svetlobe, jih običajno spojijo več zaporedno v tandemske celice.

Izkoristek komercialne amorfne silicijeve sončne celice je med 5-8% (tabela 3), za tandemske celice pa lahko precej več. Gostota toka znaša do 15 mA/cm^2 , napetosti neobremenjenih celic pa so do 0.8 V, kar je več kot pri kristalnih celicah.

3.2.2 Polikristalne silicijeve tankoplastne celice

Te celice imajo precej podobno sestavo kot že prej opisane navadne polikristalne silicijeve celice, le da tu uporabljajo drugačne postopke za pridobivanje polikristalne oblike silicija. Poleg tega pa so te precej tanjše in sicer znaša njihova debelina namesto nekaj 1000 μm le nekaj μm .

Ena dobra lastnost takih tankoplastnih celic je, da se z manjšanjem debeline celice I_0 (temni tok) manjša, s tem pa se napetost na celici veča. Na prvi pogled se z zmanjšanjem debeline celice zmanjša tudi absorpcijska pot fotonov, ki priletijo noter. To rešijo tako, da naredijo prednjo antirefleksno plast z obeh strani in zadnji kontakt z notranje strani razgiban oziroma v obliki majhnih piramid. Zadnji kontakt je tudi čim bolj refleksen. Tako se svetloba, ki pride skozi antirefleksno plast, bolj sipa. Nekaj tiste, ki pride do zadnjih kontaktov, se odbije in pri tem zopet precej sipa. Del te spet pride nazaj do antirefleksne plasti, kjer se je nekaj prepušča, nekaj pa zopet sipa na površini nazaj v celico in tako naprej. Tako se poveča absorpcijska pot na nekaj 100 μm . Manjša debelina celice ima še druge prednosti. Difuzijska globina pri dopiranju silicija mora biti precej manjša, tako lahko uporabljamo slabše materiale. Toleriran je tudi bolj dopiran silicij, kar nam da višje napetosti. Ker se tvorijo pari elektron-vrzel bližje p-n spoju, so tokovi v celici večji. To je torej precej dobra pot k učinkovitim in hkrati cenejšim sončnim celicam, ki jo zadnje čase precej raziskujejo.

3.2.3 Bakrov indijev diselenid (CuInSe_2 ali CIS)

Bakrov indijev diselenid (CIS) je polprevodnik z izredno visoko absorpcijo, tako da že zelo tanke plasti močno absorbirajo sončni spekter. Energijska reža materiala je dokaj nizka (1 eV) za sončno celico, zato je indiju dostikrat primešan germanij. Lahko bi naredili p-n spoj samo z dopiranjem CIGS, vendar ta spoj ni niti stabilen niti dovolj učinkovit. Zato na CIGS plast raje dodajo tanko plast kadmijevega sulfida (CdS), kar naredi izredno učinkovit heterospoj, pri čemer je CdS še prevlečen s TCO.

Čim več je germanija, tem večja je energijska reža in tem večje so napetosti na celici, tako da je potrebno manj celic na modul za enako skupno napetost. Maksimalna napetost pri CIS je samo približno 300-350 mV. Pri CIGS z 10-20% germanija pa napetost naraste na 450-500 mV na celico. To je že toliko kot pri kristalnih celicah, ki pa morajo imeti več celic združenih v posamezen modul. Tudi proizvodnja CIGS je zanesljivejša in cenejša od kristalnih celic.

Največji izkoristek CIGS celice je preko 16%. Moduli so trenutno v predkomercialni proizvodnji in dosegajo izkoristke okoli 8% (tabela 3).

3.2.4 Kadmijev telurid (CdTe)

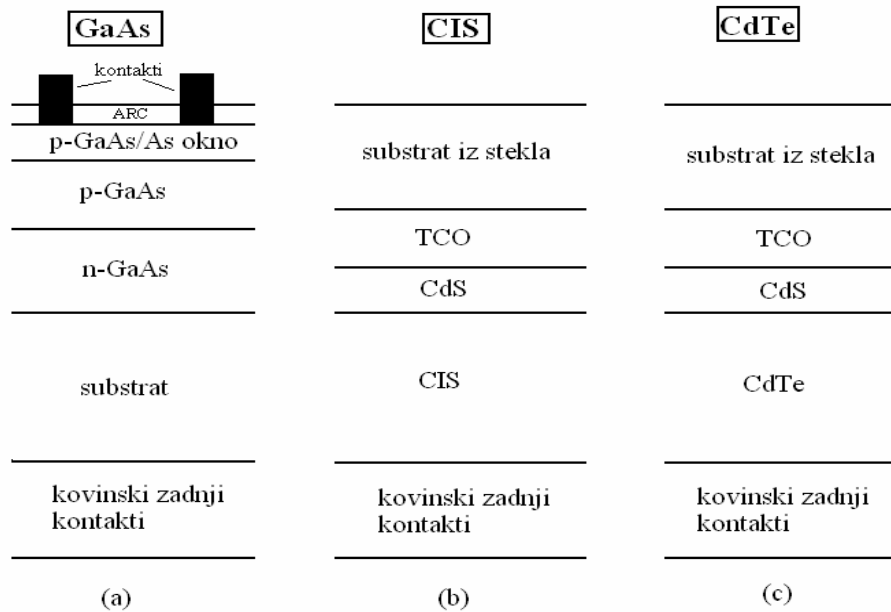
Polprevodnik kadmijev telurid (CdTe) lahko nanašamo na različne načine v obliki tankih plasti, ki so po termični obdelavi primerne za sončne celice. Sončne celice so zgrajene z depozicijo kadmijevega sulfida (CdS) na CdTe. S tem formiramo heterospoj. Večina

celic je na površini prekrita s transparentnim prevodnim oksidom (TCO), ki skrbi za zgornje kontakte.

Tankoplastni material, ki ga pridobivamo z elektrodepozicijo in naprševanjem, veliko obeta kot potencialna osnova nizkocenovnih fotonapetostnih sistemov. Slabost postopka so strupene surovine, ki jih uporabljajo pri proizvodnji. CdTe/CdS celice dosegajo izkoristke preko 16%. Moduli trenutno še niso komercialno dosegljivi, dosegali pa naj bi izkoristke okoli 7% (tabela 3).

3.2.5 Galijev arzenid (GaAs)

Pogost material za izdelavo visokoučinkovitih fotovoltaičnih celic. Zaradi visoke cene se uporablja predvsem v koncentriranih sistemih in v astronautiki. GaAs je polprevodnik z direktno režo. Izkoristki so do 25%, pri koncentriranem sončnem sevanju do 28%. Posebne izvedbe pa presegajo izkoristke 30%.



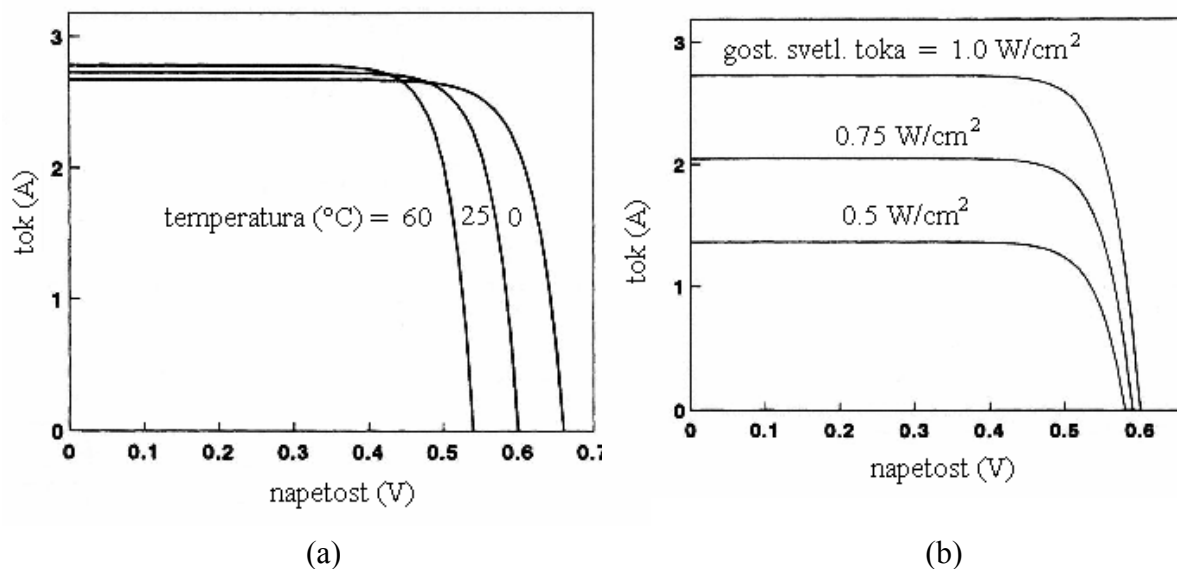
Slika 8: Struktura tankoplastnih celic po plasteh iz (a) GaAs; (b) CIS; (c) CdTe [3].

Obstajajo tudi še drugačne tankoplastne celice. Ljudje se veliko ukvarjajo tudi s polimeri. Da se jih dopirati, uporabni so kot diode in še precej poceni so lahko. Tudi za uporabo pri sončnih celicah se jih je veliko testiralo in prišli so do precej vzpodbujajočih rezultatov. Vendar za enkrat še niso primerni za komercialno uporabo. Ne uporabljajo pa se samo polprevodniki. Obstajajo tudi sončne celice, ki pretvarjajo sončno energijo v električni tok z organskimi molekulami z najboljšimi izkoristki do 10%.

4 Temperaturna odvisnost in odvisnost od gostote svetlobnega toka

Temperatura celice ima velik vpliv na proizvedeno moč celice. Še posebej vpliva na napetost v celici, ki pada z večanjem temperature [slika 9 (a)]. Padec napetosti pri celici iz silicija je približno $2.3 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ [3]; groba ocena je tudi, da izkoristek pade za 0.5% na vsako dodatno stopinjo [1]. Temperaturna odvisnost toka v celici pa je ponavadi zanemarljiva. Sončne celice bi bilo potrebno za boljši izkoristek dodatno hladiti vendar to prinese dodatne stroške. Za izvenlaboratorijsko uporabo je že dovolj dobro prezračevanje in izogibanje dodatni termični izolaciji okolice.

Tok v celici je odvisen od števila fotonov z večjo energijo od energijske reže, ki padejo na celico. Z večanjem gostote svetlobnega toka povečamo število vpadnih fotonov in s tem generirani tok v celici [slika 9 (b)]. Odvisnost napetosti od gostote svetlobnega toka pa je ponavadi zanemarljiva.



Slika 9: (a) Vpliv temperature na karakteristiko sončne celice. Z večanjem temperature se napetost na celici manjša. (b) Karakteristike sončne celice pri različno močnih osvetlitvah. Čim večja je gostota svetlobnega toka, tem manjši je tok skozi celico [3].

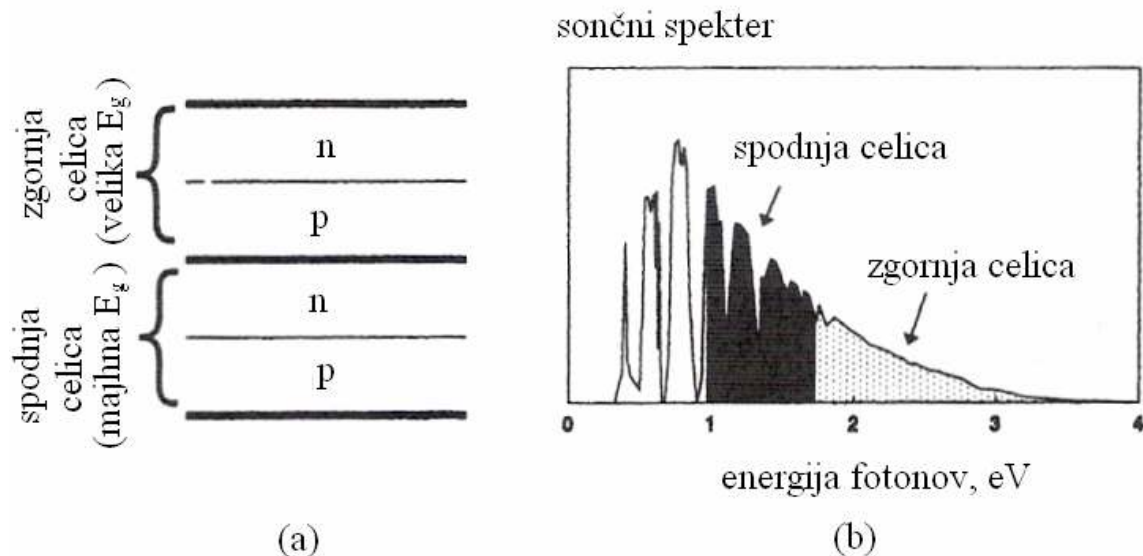
5 Izgube

Zgoraj opisana karakteristika sončne celice $I(U)$ (2.3) velja samo za idealno celico, torej brez izgub. Do kakšnih izgub pa lahko vse pride?

Energija fotonov z večanjem valovne dolžine svetlobe pada (2.2). Največja valovna dolžina, pri kateri imajo fotoni še dovolj veliko energijo za zbitje elektrona v prevodni pas, znaša pri siliciju približno $1.15 \mu\text{m}$. Sevanje z večjo valovno dolžino povzroča le segrevanje sončnih celic. Foton lahko povzroči nastanek le enega para elektron-vrzel, zato se tudi pri manjših valovnih dolžinah od mejne (energija širine energijske špranje)

pojavi se višek fotonov, ki prav tako le segrevajo celico. Ta problem lahko rešimo s tandemsko celico (slika 10). Ta je sestavljena iz več celic, zloženih ena nad drugo. Celice se med sabo razlikujejo po širini energijske špranje. Tako lahko k proizvodnji parov elektron-vrzel sodeluje več fotonov s širšega spektra sončeve svetlobe.

Učinkovitost sončnih celic zmanjša tudi rekombinacija para elektron-vrzel. Z njo se zmanjša tako napetost kot seveda tudi tok skozi celico. Do rekombinacije najpogosteje pride na mestih nečistoč in nepravilnosti kristalne mreže oziroma tudi na površini polprevodnika in na stikih med polprevodnikom in kovinskimi kontakti. Zato zunanje površine polprevodnika in kontakte prevlečejo s plastjo oksida, ki preprečuje rekombinacijo. Isti pomen ima zgornja plast p-GaA/As pri GaAs sončnih celicah (slika 8).



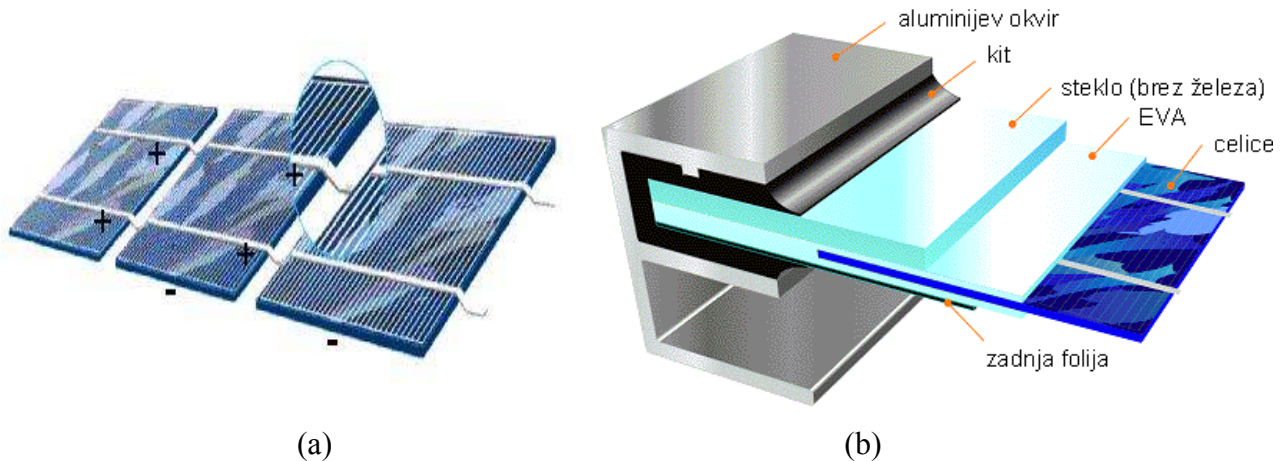
Slika 10: (a) Zgradba tandemske celice. Ta je sestavljena iz dveh celic, lahko pa jih je tudi več. (b) Sončni spekter. Ker imajo celice v tandemski celici različne energijske reže, absorbirajo v večini fotone z različnega dela spektra [3].

V kristalnih materialih je transport naboja z difuzijo nosilcev naboja po kristalu v večini zadovoljiv. Pri amorfni tankoplastni celici, ki vsebuje še dodatno intrinzično plast med polprevodnikoma tipa n in p, pa je lahko problem v dovolj velikem električnem polju, da potegne nosilce naboja vsakega na svojo stran.

Lastne izgube sončne celice nastopajo zaradi kontaktne mreže, ki zastira pot sončni svetlobi, zaradi notranje upornosti celice in zaradi refleksije sončnega sevanja na površini celice. Te izgube lahko zmanjšamo tako, da prestavimo oba kontakta na zadnjo stran celice. Na zgornjo stran celice nanesejo tudi antirefleksno plast. S tem zmanjšajo reflektivnost vpadle svetlobe do 10%. Še bolj pa jo zmanjšajo z večjim številom teh plasti oziroma naredijo zgornjo plast v obliki majhnih piramid. Tako se lahko nekaj odbite svetlobe absorbira nazaj v celico. S tem lahko zmanjšajo reflektivnost tudi do 1%. Lahko naredijo tudi zadnji kontakt refleksiven, tako da se fotoni ujamejo v celici.

6 Moduli

Za večino aplikacij so celice sestavljene v module z večjim številom celic, vezanih v serijo. Celice med seboj vežejo tako, da je zgornji kontakt ene celice povezan s spodnjim kontaktom druge celice [slika 11 (a)]. Med seboj povezane celice laminirajo med vrhnjim steklom in steklom ali plastiko na zadnji strani. Takšen laminat nato običajno uokvirijo z aluminijem [slika 11 (b)].



Slika 11: (a) Način vezave posameznih celic. Celice so med seboj vezane tako, da je zgornji kontakt ene celice povezan s spodnjim kontaktom druge celice. (b) Prerez zgradbe modula [1].

7 Zaključek

Ugotovili smo torej, da so danes najbolj raziskane in najbolj uporabljene sončne celice iz kristalnega silicija. Silicija je v naravi veliko, postopki proizvodnje celic nezapleteni. Vendar bodo tankoplastne celice vseeno precej razburkale prihodnost na tem področju. Te so precej tanjše, zato je potrebno manj materiala in manj energije za proizvodnjo, na koncu imamo manj odpadnega materiala in vse to skupaj prinese manjše cene končnih izdelkov. Tudi njihovi izkoristki se hitro približujejo izkoristkom kristalnih celic. Mislim, da bo v prihodnosti fotovoltaika še kako pomemben način pridobivanja energije in zato se splača veliko vlagati vanjo, še posebej, če bi radi našim potomcem zapustili čim bolj neokrnjeno naravo.

8 Dodatek: Zgodovina

- 1839 Becquerel odkrije fotovoltaični pojav. Opazi, da se napetost med elektrodama, ki sta potopljeni v elektrolit, poveča, če je srebrna plošča t.i. "mokre baterije" osvetljena.
- 1877 Adams in Day objavita prvo poročilo o fotonapetostnem pojavu v trdni strukturi iz selena.
- 1954 Chapin, Fuller in Pearson izdelajo prvo silicijevo solarno celico z difundiranim

- spojem z obetavnim 6-odstotnim izkoristkom.
- 1958 Izstreljen Vanguard I, prvi satelit, ki so ga z energijo oskrbovale sončne celice. Sistem je deloval neprekinjeno 8 let. Istega leta so američani izstrelili še satelita Explorer III in Vanguard II, Sovjeti pa satelit Sputnik III.
- 1974 Prva amorfna Si celica.
- 1983 Prva sončna elektrarna s kapaciteto preko 1 MW.
- 1985 Prva silicijeva solarna celica z učinkovitostjo nad 20 %.
- 1989 Prvo zaporedje solarnih celic z učinkovitostjo nad 30 % [1,5].

9 Viri

[1] <http://lpvo.fe.uni-lj.si/>

[2] J. Strnad, *Fizika četrta del* (DMFA, Ljubljana, 2005)

[3] T. Markvark, *Solar electricity* (John Wiley & Sons, London, 2000)

[4] <http://www.pvresources.com/>

[5] <http://www.pv-platforma.si/>