

SONČNE CELICE V DEBELOPLASTNI TEHNOLOGIJI

Marko Pavlin, Hipot-HYB, d.o.o., Trubarjeva 7, 8310 Šentjernej, Slovenija

Screen Printed Solar Cells

ABSTRACT

Historical invention and solar cells research is introduced with several facts. Technology and materials for cell manufacturing are presented. Thick film technology with three major steps (print, dry, fire) are chosen. Pastes preparation and production steps are described. Basic materials are CdTe and CdS, electrode materials are carbon and indium, substrate is borsilicate glass.

POVZETEK

V uvodu je opisan zgodovinski nastanek sončnih celic in nekaj splošnih podatkov. Sledi primer izbire tehnologije in materialov za izdelavo sončne celice. Izbrana je debeloplastna tehnologija, ki ima tri osnovne postopke: tiskanje, sušenje in žganje. Opisan je primer priprave past in postopkov izdelave celice. Osnovni pasti sta CdTe in CdS, elektrode so iz ogljika, srebra in indij-srebra. Tiskajo jih na podlago iz bor-silikatnega stekla.

1 Uvod

Hitro povečevanje porabe energije, pridobljene predvsem iz fosilnih goriv, je eden glavnih virov onesnaževanja okolja. Nove in čistejšje tehnologije, ki bi omogočale pridobivanje energije brez onesnaževanja, so zato velikega pomena za bodoči razvoj. Ena takih je pretvorba sončne energije v električno s sončnimi celicami. Ta oblika pridobivanja energije ima več prednosti:

- sonce je brezplačen vir, ki je prisoten povsod
- pretvorba je neposredna, brez premikajočih se delov
- izkoristek pretvorbe je neodvisen od velikosti sistema.

Raziskovanja polprevodnikov, ki so leta 1947 pripeljala do iznajdbe transistorja, so postavila tudi temelje sodobnim raziskavam sončnih celic. Prva sončna celica, ki je lahko pretvorila zadovoljivo količino sončne energije, je bila narejena iz silicija v Bellovih laboratorijih. Predstavili so jo leta 1954.

Razvoj in uporaba sončnih celic je bila dolgo časa omejena na uporabo v vesolju. Uporaba na zemlji, predvsem pri pridobivanju večje količine energije, je omejena s previsoko ceno. Znižamo jo lahko z:

- uporabo cenejših materialov
- zniževanjem cene proizvodnih postopkov
- večanjem izkoristka pretvorbe
- daljšanjem obstojnosti celic

Od sončne celice pričakujemo, da ima čimvečji izkoristek, da je sposobna proizvesti čimveč energije na čimmanjši površini po najnižji ceni. Pri izbiri materialov in tehnologij za izdelavo sončnih celic moramo upoštevati vsa naštetja dejstva.

Precejšnjemu napredku v razvoju sončnih celic so pripomogle tudi mnoge subvencije vladnih institucij, predvsem v ZDA in bivši Sovjetski zvezi. Primer takega projekta je iz leta 1978, ko so odobrili 1.5 milijarde dolarjev za razvoj, raziskave in demonstracijo uporabe

sistemov sončnih celic pri pretvorbi sončne energije v elektriko.

Danes je proizvodnja sončnih celic dosegla mejo 5000 DEM za kilovat maksimalne izhodne moči. Uravnavanje energije in dodatna oprema za proizvodnjo elektrike stane tudi približno toliko, kar podvoji ceno na 10000 DEM na kilovat. Za primerjavo: hidroelektrarna stane 300 DEM na kilovat, termoelektrarna pa 1400 DEM na kilovat.

Poleg proizvodnje energije za električna omrežja je prednost sončnih celic predvsem v tem, da je cena neodvisna od velikosti sistema. Kot zgled naj navedem, da je osvetlitev telefonske kabine s sončnimi celicami cenejša od napeljave električnih kablov iz omrežja, ki je oddaljeno 200 metrov. Takih primerov je mnogo, prednost pridobivanja elektrike iz sonca pa se pokaže povsod, kjer ni na voljo priključkov do omrežja ali pa je to predalet. Vsako leto proizvedejo za okrog 10 MW sončnih celic. Ta številka pa raste iz leta v leto.

2 Izbira tehnologije in materialov

Vir energije pri sončnih celicah je svetloba. Njen spekter je drugačen nad atmosfero kot pri tleh. Pri prehodu atmosfere se svetloba absorbira v plinih (predvsem O₂ in N₂...), v vodni pari in prahu. Od položaja sonca je odvisno kako dolga je pot skozi atmosfero. Heterospojna sončna celica je sestavljena iz dveh materialov, ki imata različni energijski reži. Eden ima široko režo in predstavlja le okno drugemu z manjšo energijsko režo, ki deluje kot kolektor. Površino zemlje dosežejo fotoni, ki imajo različne energije. V sončni celici so uporabni le fotoni z energijami, ki so večje od energijske reže (E_G) kolektorja. V tabeli I je podana povprečna količina fotonov, ki padejo na cm² v eni sekundi in njihova povprečna energija glede na vremenske razmere.

Tabela I. Število in struktura fotonov pri različnih pogojih

Pogoji	Gostota moči W/cm ²	Povpr. energija eV	N_{PH} 10 ¹⁷ S ⁻¹ cm ⁻²
Nad atmosfero	0.135	1.48	5.8
Ob morju, sonce v zenitu	0.106	1.32	5.0
Ob morju, sonce 60° od zenita	0.088	1.28	4.3
Povprečne razmere	0.089	1.43	3.9
Ekstremne razmere	0.059	1.18	3.2
Oblačen dan	0.012	1.44	0.52

Poleg atmosferskih in vremenskih vplivov moramo upoštevati še izgube (r) zaradi odbojev na posameznih plasteh sončne celice, ki jih izračunamo iz naslednje enačbe:

$$r = \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2} \quad (1)$$

n je določen empirično in je $1/\lambda$:

$$n^4 = \frac{173}{E_G} \quad (2)$$

Iz enačb (1) in (2) je razvidno, da je odboj zelo malo odvisen od velikosti energijske reže E_G in tako ne vpliva na izbiro materiala. Naslednje merilo, ki ga moramo upoštevati pri izbiri materiala, je kvantni izkoristek Q , ki podaja razmerje med nosilci, ki prispevajo k dejanskemu izhodnemu toku, in vsemi generiranimi nosilci $1/8$.

Najprej si oglejmo splošne enačbe, ki veljajo za p-n spoj v sončni celici. Osvetljen p-n (hetero-)spoj se vede kot tokovni generator s kratkostičnim tokom I_s , ki ima paralelno vezan nelinearen upor, skozi katerega teče tok:

$$I = I_0 \left(e^{\frac{qU}{kT}} - 1 \right), \quad (3)$$

kjer je k - Boltzmannova konstanta, T - temperatura, q - osnovni naboj, I_0 - zaporni tok nasičenja. Napetost odprtih sponk je U_0 . Breme, pri katerem je prenos moči največji, določimo iz pogoja:

$$e^{\frac{U_M q}{kT}} \left(1 + \frac{U_M q}{kT} \right) = \frac{I_s}{I_0} + 1 = e^{\frac{U_0 q}{kT}} \quad (4)$$

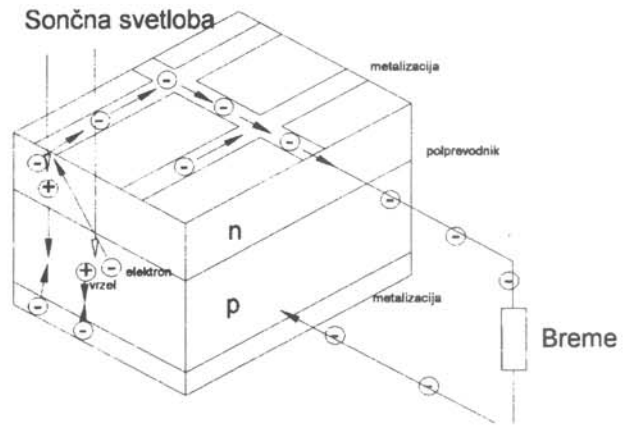
Takrat je napetost na izhodu U_M . Če želimo izračunati U_M , moramo določiti I_0 in I_s . Pri izračunu I_s si pomagamo s koeficientom kvantnega izkoristka Q ,

$$I_s = Q(1-r)(1-e^{-\alpha l})en(E_G) \quad (5)$$

V enačbi (5) nastopa r , ki je določen z enačbo (1), a je absorpcijska konstanta, l je debelina polprevodnika, ki absorbira svetlobo, in $n(E_G)$ je število fotonov, ki sodelujejo pri svetlobnih generacijah. Na sliki 1 je prikazan presek p-n spoja.

Kvocient Q je odvisen od absorpcijskega koeficienta α , življenjske dobe manjšinskih nosilcev τ in hitrosti površinskih rekombinacij s . Značilne vrednosti so zbrane v tabeli II.

Iz tabele II je razvidno, da je izkoristek najboljši, ko je debelina plasti n dosti manjša od difuzijske dolžine (L). Podobno je tudi, kadar so hitrosti površinskih rekombinacij majhne. Absorpcijski koeficient leži med $10^4 \text{ cm}^{-1} < \alpha < 10^6 \text{ cm}^{-1}$. Za čim večjo absorpcijo mora biti debelina plasti n približno obratno sorazmerna absorpcijskemu koeficientu: $l \approx \alpha^{-1}$.



Slika 1. Presek osvetljenega p-n spoja

Tabela II. Vrednosti kvantnega izkoristka Q pri različnih parametrih

s [cm-s]	L [cm]	α [cm ⁻¹]	l [cm]	Q
0	0.01	1000	0.001	0.61
0	0.001	1000	0.001	0.47
0	0.001	1000000	0.001	0.65
0	0.000001	1000	0.001	0.00006
100	0.001	1000	0.001	0.61
∞	0.01	1000	0.001	0.25
∞	0.001	1000	0.001	0.23
∞	0.001	1000000	0.001	0.001
∞	0.000001	1000	0.001	0.00006

Če vzamemo, da je difuzijska dolžina L desetkrat daljša od debeline plasti n (l), lahko določimo interval življenjskih dob nosilcev. Za omenjeni primer so med 10^{-7} in 10^{-11} sekunde.

$$L = \sqrt{D\tau} \quad (6)$$

Izračun zapornega toka I_0 začnemo z enačbo (7).

$$I_0 = Ae^{-\frac{E_G}{kT}} \quad (7)$$

Koeficient A je (8):

$$A = \frac{b}{1+b^2} kT(\mu_n + \mu_p) \left(\frac{1}{\sigma_n L_p} + \frac{1}{\sigma_p L_n} \right) \sqrt{N_c N_v} \quad (8)$$

Iz obeh enačb sledi, da je tok I_0 funkcija energijske reže (E_G).

3 Izračun maksimalnega izkoristka η_{MAX}

Za izračun η_{MAX} je dovolj, če določimo razmerje I_s/I_0 za razne valovne dolžine in da iz enačbe (4) določimo U_{0q}/kT . Refleksijske in rekombinacijske vplive zaradi enostavnosti zanemarimo.

V Tabeli III so zbrani podatki za različne polprevodniške heterospoje. Heterospojna materiala imata dve različni energijski reži. Manjša naj bi bila okrog 1,4 eV, druga pa čim večja. Heterospoj je osvetljen prek materiala z večjo režo, ki omogoči transport fotonov preko vsega vidnega spektra, vključno s fotoni nižjih energij. Ta transport je pomemben, ker se energijska pretvorba dogaja v samem spoju, druge pretvorbe pa le znižujejo izkoristek sončne celice. Mehanski vplivi lahko močno znižajo izkoristek, ker v spoj vnašajo nove rekombinacijske centre. Zaradi tega morata biti koeficienta temperaturnega raztezka čim bolj enaka za oba materiala v heterospoju.

Tabela III. Heterospoji, ki so primerni za sončne celice

p	n	min. E_G [eV]	ΔE_G [eV]	E_s [eV]	U_D [V]	razlika razt. [%]	η_{MAX} [%]
ZnTe	CdSe	1.7	0.65	0	0.61	33	6
ZnTe	CdTe	1.44	0.82	0.04	1.28	30	14
CdTe	CdS	1.44	0.98	0	1.02	9	17
CdTe	ZnSe	1.44	1.23	0.19	1.43	21	21
CdTe	$Zn_{0.35}Cd_{0.65}$	1.44	1.44	0	1.22	2	23

Iz tabele najprej izločimo p-ZnTe/n-CdTe in p-CdTe/n-ZnSe zaradi energijskega skoka na mestu spoja (E_s). Ostanejo trije heterospoji. Največji izkoristek ima p-CdTe/n- $Zn_{0.35}Cd_{0.65}$. Zanimiv je tudi p-ZnTe/n-CdTe. Heterospoj med materialoma p-ZnTe/n-CdSe pa ima omejen izkoristek zaradi majhne razlike med režama.

V tabeli IV so zbrani osnovni podatki za sončne celice, izdelane na osnovi opisanih heterospojnih struktur. Celice so bile narejene s tankoplastnimi postopki našanja /2/.

Na hitro lahko ocenimo, da je debeloplastna tehnologija s tiskanjem in žganjem v tunelskih pečeh najcenejša. Oprema, ki je potrebna za izdelovanje debeloplastnih slojev je relativno poceni. Pri pripravi past je potrebno malo več napora, vendar je priprava enkratna za veliko količino paste. Na žalost bolj konkretne primerjalne cenovne analize med tankoplastnimi in debeloplastnimi sončnimi celicami ni, vsekakor pa se je pametno osredotočiti na heterospoje, ki se jih da izdelati s tehnologijo debeloplastnih hibridnih vezij. V literaturi je najbolj uveljavljen heterospoj med CdTe in CdS. Japonci (Matsushita Electric) so se precej ukvarjali s praktično izdelavo takih sončnih celic. Če podatki iz literature še veljajo, se take sončne celice že izdelujejo za široko porabo, izkazalo pa se je, da so konkurenčne drugim celicam.

Tabela IV. Uporabni heterospoji

	p-ZnTe/n-CdSe	p-CdTe/n-CdS	p-CdTe/ n- $Zn_{0.35}Cd_{0.65}$
J_0 [nA/cm ²]	50	3	2
J_s [mA/cm ²]	10,3	19,8	25,3
U_0 [V]	0,61	0,90	0,93
U_P [V]	0,50	0,77	0,79
J_P [nA/cm ²]	10,3	19,3	24,9
F	0,82	0,83	0,84
η [%]	5,9	17,0	22,6

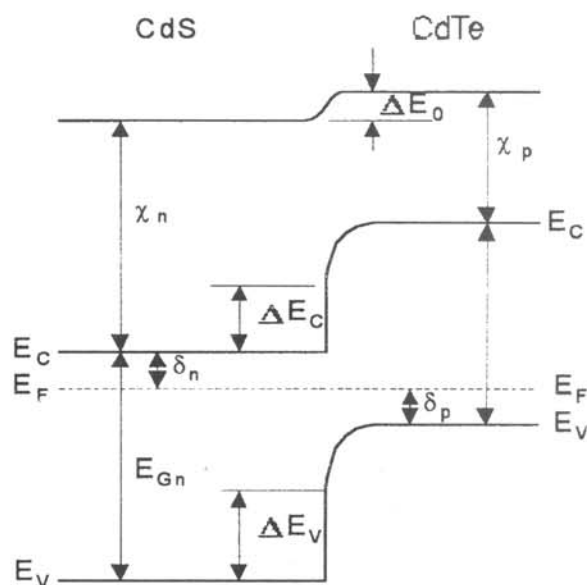
4. CdS/CdTe heterospoj

Osnovna struktura natiskane sončne celice je heterospoj med n-CdS in p-CdTe. Energijski nivoji obeh materialov so zbrani v tabeli V.

Tabela V. Energijski nivoji CdTe in CdS

		CdTe	CdS
Izstopno delo	χ	4,28 eV	4,5 eV
Energijska reža	E_G	2,42 eV	1,44 eV

Na sliki 2 je položaj energijskih nivojev po formiranju spoja. V temperaturnem ravnovesju sta Fermijeva nivoja poravnana.



Slika 2. Položaj energijskih nivojev v heterospoju CdS/CdTe

Višina bariere za injekcijo elektronov je:

$$\Delta E_0 = (\chi_p + E_{Gp} - \delta_p) - (\chi_n + \delta_n) \quad (9)$$

V enačbi (9) nastopata $\delta_p = E_F - E_V$ v CdTe in $\delta_n = E_C - E_F$ v CdS. Iz diagrama je razvidno, da se pojavijo nezveznosti v energijskih nivojih. Obe nezveznosti ΔE_V in ΔE_C sta podani z enačbama (10) in (11):

$$\Delta E_C = \chi_p - \chi_n \quad (10)$$

$$\Delta E_V = (\chi_n + E_{Gn}) - (\chi_p + E_{Gp}) \quad (11)$$

Enačbo (10) vstavimo v enačbi (9) in (11) in dobimo:

$$\Delta E_0 = \Delta E_{Gp} + \Delta E_C - \delta_n - \delta_p \quad (12)$$

$$\Delta E_V = (E_{Gn} - E_{Gp}) + \Delta E_C$$

Svetloba vstopa na strani n-CdS. Fotoni z energijami $E_{Gp} < h\nu < E_{Gn}$ preletijo CdS in se absorbirajo v CdTe. V osiromašenem pasu pride do generacij parov elektron-vrzel. Prednosti takega heterospoja je več. Ker ima CdS precej široko režo, je več možnosti, da potencialni fotoni preletijo to plast in opravijo svoje delo v najbolj učinkovitem področju, v spoju. Področje generacij je pomaknjeno v globino, zato je manjša možnost, da bo prihajalo do površinskih rekombinacij. Druga prednost je, da je lahko plast CdTe debelejša, hkrati pa ima CdTe praktično idealne lastnosti [1/].

Elektroni z energijami nad 1,44 eV se absorbirajo v CdS. Za to potrebujemo le nekaj μm materiala, kar poceni izdelavo. Za primerjavo: pri Si potrebujemo okrog 20 μm za absorpcijo fotonov z energijami nad 1,1eV. Zaradi velike absorpcije se večina generacij zgodi v neposredni bližini spoja, kjer je vgrajeno polje največje. Zaradi tega ne potrebujemo nosilcev z dolgimi difuzijskimi dolžinami. To pomeni, da lahko uporabimo polikristalne strukture. CdTe je kristalografsko stabilen material [3/], zaradi česar je lahko obstojnost sončnih celic daljša.

Teoretična izvajanja na začetku tega članka so prikazala maksimalni teoretični izkoristek sončnih celic. Za heterospojne celice na osnovi CdS/CdTe se je izkazalo, da imajo največji izkoristek okrog 11%. Celice s takim notranjim izkoristkom so narejene z epitaksijsko rastjo CdS na CdTe.

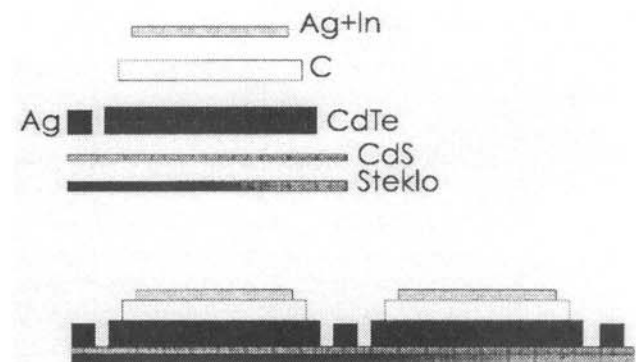
5 Debeloplastne sončne celice

Priprava CdS/CdTe heterospoja je možna na več načinov. Tankoplastno naparevanje ali kemijski nanos sta sicer zelo čista in kvalitetna postopka, vendar zahtevata specifično opremo, ponovljivost pa je slaba. Za množično proizvodnjo je najbolj primeren postopek tiskanja in sintranja, ki ga uporabljamo v našem podjetju pri izdelavi hibridnih vezij. Debeloplastna tehnolo-

gija je tudi ponovljiva, tehnološke postopke pa se da dobro nadzorovati.

5.1 Struktura celice

Oblika in presek celice sta prikazana na sliki 3 [3/]. Podlaga je borsilikatno steklo (npr. Corning 7059), tiska se pet različnih pasti (CdTe, CdS, C, Ag+In in Ag).



Slika 3. Presek strukture celice

5.2 Steklina podlaga

Podlaga je borsilikatno steklo, npr. Corning 7059, ki vsebuje minimalno količino alkalnih elementov. Pred uporabo je potrebno čiščenje.

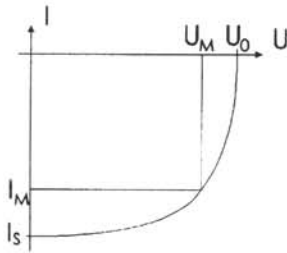
5.3 Plast CdS

Kadmijev sulfid je dosegljiv v obliki prahu. Je osnova za izdelavo paste, vendar je pred uporabo potrebna kalcinacija v dušikovi atmosferi pri temperaturi 700°C. Ta postopek traja približno eno uro. Kalciniran prah zdrobimo v terilnici z dodajanjem destilirane vode. Končna velikost zrn naj bi bila 1 do 2 μm . Posušen prah zmešamo s 5 do 10 % CdCl_2 . Pasto žgemo v dušikovi atmosferi. Organski nosilec v pasti je propilen-glikol, ki ga dodamo toliko, da nastane pasta primerne gostote za tiskanje. Za tisk uporabimo sito gostote 51 lukenj/ cm^2 . Po tisku sušimo eno uro pri temperaturi 120°C na zraku. Temu sledi sintranje v tunelski peči pri temperaturah od 580°C do 690°C.

Mikrostruktura, ki nastane med postopkom sintranja, je odvisna od hitrosti izparevanja klorovih ionov iz plasti CdS. Oblika mikrostrukture vpliva na plastno upornost CdS in s tem na izkoristek sončne celice. Ostanek Cl ionov v CdS poveča serijsko upornost. Odvisnost plastne upornosti CdS od ostanka klora je prikazana na sliki 5. Poleg absolutne količine CdCl moramo nadzorovati tudi hitrost izparevanja med sintranjem. Podloge so položene v pogreznjene keramične nosilce, ki so pokriti s keramično ploščo, v kateri je več lukenj, enakomerno razporejenih po vsej površini. Ta pokrovka predstavlja neke vrste sito, ki uravnava hitrost izparevanja Cl. Če so podloge nepokrite in je izparevanje hitro, dobimo velika zrna. Specifična upornost take mikrostrukture je okrog 500 Ωcm . Optimalna površina lukenj pri 100 cm^2 veliki pokrovki je 1,4 cm^2 . V takih razmerah sintranja in pri enournem profilu z mak-

simalno temperaturo 690°C dobimo plast CdS s plastno upornostjo okrog 110 Ω. V plasti ostane okrog 0,1 mas.% Cl, ki deluje kot šibek donor v CdS.

Upornost CdS močno vpliva na lastnosti sončne celice, predvsem na izkoristek. Pri plastnih upornostih nad 400 Ω pade izkoristek pod 6%. Lastnosti sončne celice pri plastni upornosti CdS okrog 110 Ω so: $\eta=8,1\%$, $U_0=0,73V$, $J_S=22,2 \text{ mA/cm}^2$, $FF=0,5$. Polnilni faktor (FF) pomeni razmerje med največjo izhodno močjo in produktom med tokom kratkega stika in napetostjo odprtih spolk.



$$FF = \frac{P_M}{I_S U_0} \quad (13)$$

5.4 Plast CdTe

Surovini za izdelavo paste sta kadmijev in telurjev prah, ki ju v ekvimolarnem razmerju zmešamo v krogelnem mlinu ob dodatku destilirane vode. Velikost zrn suhega prahu mora biti okrog 0,5 μm. Pasto formiramo iz 99,5% prahu Cd+Te in 0,5% CdCl₂. To mešanico redčimo s propilen-glikolom do ustrezne viskoznosti, ki je primerena za tiskanje. Za tiskanje uporabimo sito z gostote 62 lukenj na cm². Tiskamo na plast CdS in sušimo pol ure pri temperaturi 100°C na zraku. Za sintranje uporabimo tunelsko peč z enournim profilom pri temperaturi 620°C v dušikovi atmosferi. Podlage morajo biti v enakih posodah z enakimi pokrovkami kot pri žganju plasti CdS. Med žganjem nastane plast CdTe, ki na meji s plastjo CdS ustvari heterospoj.

5.5 Ogljikova elektroda

Osnovni pogoj za velik izkoristek sončne celice je majhna notranja upornost. Zato potrebujemo dober ohmski kontakt med CdTe in kovinsko elektrodo. Zaradi kompenzacijskih mehanizmov je kontaktiranje CdTe dokaj težavno. Lahko ga ustvarimo z naparevanjem kovin, vendar je naš cilj izdelati sončno celico zgolj z debeloplastno tehnologijo. Naparjeni kontakti so dragi zaradi težavnih toplotnih obdelav in slabe ponovljivosti. Poleg tega imajo kratko obstojnost. Zaradi tega natisemo na CdTe vmesno plast ogljika, ki deluje kot vmesnik med CdTe in srebrno elektrodo. Ogljikova

pasta je standardna, ki se uporablja pri tisku, npr. nizkoohmskih potenciometrov. Sestavljena je iz 34% grafita, 9% fenola, 8% vinila in 49% topil. Pesti dodamo primesi (ponavadi Cu) v zelo majhnih količinah. Te difundirajo v plast CdTe in ga dopirajo z akceptorji. Mehanizmi vplivov primesi na lastnosti sončne celice še niso raziskane. Eksperimentalno je bilo dokazano /6/, da je imela celica največji izkoristek z žganjem ogljikove paste 30 min pri 400°C v dušikovi atmosferi, z dodatkom 1,5 mol% kisika in ogljikovo pastjo s 50 do 100 ppm dodanega bakra. Ob drugih optimalnih postopkih so imele tako izdelane celice izkoristek okrog 12% do 13% pri velikosti 0,78cm². Bolj praktične celice z velikostjo 10x10cm² so imele izkoristek 9,1%. Drugi podatki za take celice: $U_0=1,478V$, $I_S=0,757A$ in $FF=0,531$.

6. Sklep

Celoten članek je nastal ob študiju potencialnih možnosti razvoja in proizvodnje sončnih celic z obstoječo opremo v proizvodnji HIPOT-Hybrid, d.o.o. Prototip zaenkrat še ni bil narejen. Naslednji korak je poskusna izdelava ene celice. V svetu se s takimi vrstami sončnih celic ukvarjajo Japonci, predvsem Matsushita, v Evropi pa na univerzi v Pragi, v skupini pok. profesorja Kužela. Oboji so izdelali prototipe, Matsushita pa ima celo proizvodnjo.

Med vsemi znanimi vrstami sončnih celic so heterospojne precej obetavne. Če ob tem upoštevamo še ceneno debeloplastno tehnologijo, se vsekakor splača raziskovati v tej smeri. Sončne celice s spojem CdTe/CdS zaenkrat še niso dosegle masovne proizvodnje, nasprotno pa se heterospojne celice na osnovi ClnSe/CdTe masovno proizvajajo. Pogača pretvornikov sončne energije se večja iz leta v leto in upam, da se nam bo v prihodnosti uspelo dokopati do delčka le-te.

7 LITERATURA

- /1/ N. Kayama, H. Matsumoto, A. Nakano, S. Ikegami, H. Uda: Jpn. J. Appl. Phys. 19, (4), (1980),703
- /2/ H. Uda, A. Nakano, K. Kurybayashi, Y. Komatsu, H. Matsumoto, S. Ikegami: Jpn. J. Appl. Phys. 22, (12) (1983) 1822
- /3/ S. Ikegami: Technical Digest of the International PVSEC-3, (1987) 677
- /4/ K. Yamaguchi, N. Nakayama, H. Matsumoto, S. Ikegami: Jpn. J. Appl. Phys. 16, (7) (1977) 1203
- /5/ A.L. Fahrenbruch et al: Appl. Phys. Lett. 25, (10) (1974) 605
- /6/ H. Uda et al: Jpn. J. Appl. Phys. 22, (12) (1983) 1832
- /7/ K. Kuribayashi et al: Jpn. J. Appl. Phys. 22, (12) (1983) 1828
- /8/ J.J. Loferski: J. Appl. Phys. 27, (7) (1956) 777
- /9/ W. Hoagland: Scientific American, Sep. 1995, 136
- /10/ R. Hill: Physics World, Jan. 1990, 17
- /11/ Funkshau 14, (1987) 14
- /12/ J. Touškova, D. Kindl, L. Dobiašova, J. Toušek, R. Kužel: Proceedings of Miel-SD .94 (1994) 277