

toplota takođe može iskoristiti. Neki objekti, pak, zahtevaju propisano zagrevanje samo danju (škole, administrativne zgrade, sportski centri), a drugi pretežno uveče (kasarne), i sl.

Naučna primena sunčane energije za grejanje većih zgrada tek je počela u svetu. Mada je na više primera demonstrirano da su mogućnosti te primene velike, tek nam predstoji da ovladamo svim potrebnim znanjima i tehnologijama i steknemo neophodna praktična iskustva. Projektovanje pasivnog sistema grejanja je i za porodičnu zgradu dosta složeno, a za veće zgrade još nije razrađena kompletna inženjerska metodologija proračuna i dizajna. Osvajanje potrebnih metoda projektovanja većih solarnih objekata je danas veoma važan zadatak i izazov solarnim istraživačima i inženjerima kako u inostranstvu, tako i u nas. Treba naglasiti, međutim, da ipak raspolažemo određenim pozitivnim saznanjima i praktičnim rezultatima, koji se već mogu primenjivati.

Ima mnogo primera primene sunčeve energije za zagrevanje sanitарне vode u većim objektima, naročito hotelima, pa i kod nas. Desetine hotela na Jadranu snabdeveno je solarnim grejačima vode, neki čak i sistemi prijemnika od po više stotina kvadratnih metara. U svetu je primena sunčane energije za zagrevanje većih zgrada reda. No u poslednje vreme ozbiljno se pristupa projektovanju raznih krupnijih objekata na bazi pasivne solarne arhitekture. Navešćemo, ilustracije radi, neke od njih.

Aprila 1980. američka regionalna ustanova zadužena za primenu sunčane energije na severozapadu SAD (Western Sun) preselila se u jednu višespratnicu u Portlandu, koji je po klimi sličan Zagrebu. Želeći da demonstrira mogućnosti pasivne arhitekture, ova ustanova je odlučila da u adaptiranim prostorijama, koje su zauzimale sedmi i osmi sprat zgrade, primeni, pored mera konzervacije energije, neka rešenja pasivnog zahvata sunca. Postavljeni su sledeći zadaci:

– da se, pod teorijski optimalnim uslovima, postigne ušteda od 80 odsto u potrošnji energije u poređenju s

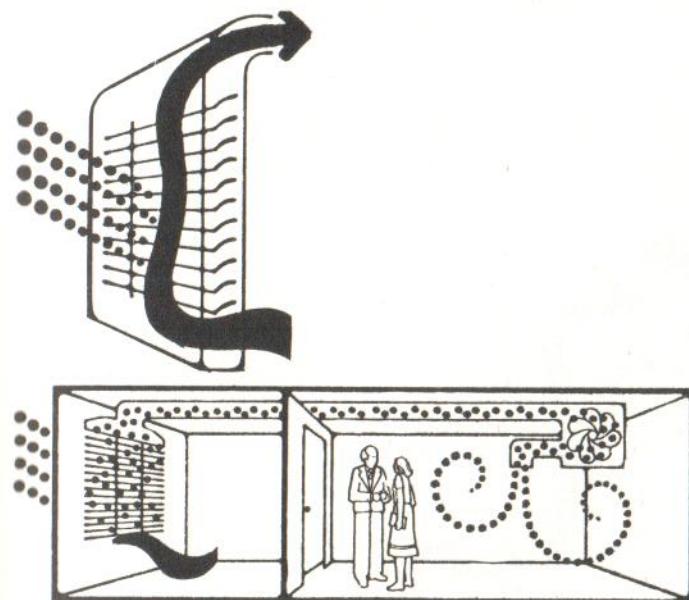
drugim spratovima zgrade, a najmanje 60 odsto u praktičnom korišćenju;

– da se postigne godišnja ušteda od 5 000 dolara na izdacima za grejanje i klimatizaciju;

– da se investicije za „solarizaciju“ povrate u roku od 5 godina;

– da se u prostorijama dobije normalno osvetljenje s instaliranom električnom snagom od oko  $10 \text{ W/m}^2$ .

Adaptacija je izvršena prema rešenjima dr Donalda Eitkena.



Sl. 56. Zahvat sunčane energije pomoću zavesa među prozorskim okнима.

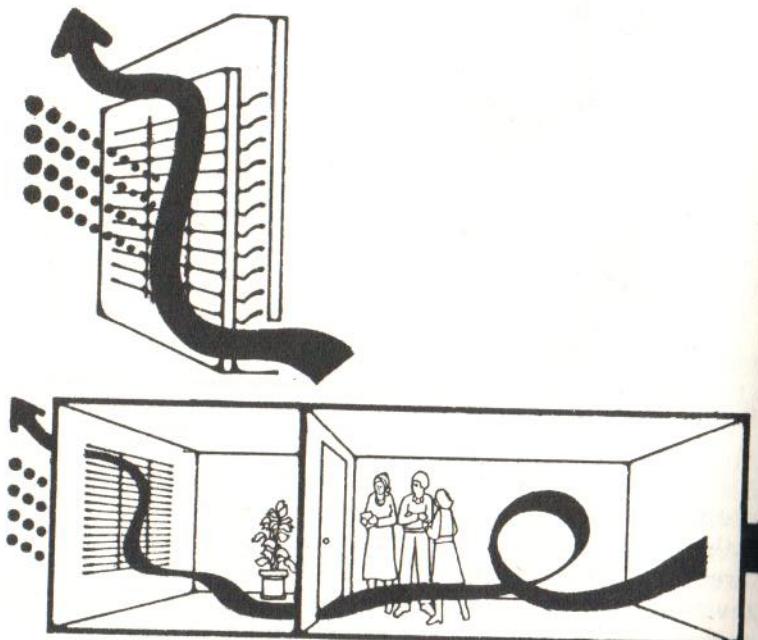
Na južnoj strani zgrade postavljeni su specijalni prozori s tamnim venecijanskim zavesama između dva stakla (sl. 55), koje apsorbuju Sunčevu zračenje (kako direktno, tako i difuzno). Vazduh zagrejan na ovim zavesama se posebnim kanalima, pomoću ventilatora, prebacuje u severni deo prostorija, zatim se vraća strujeći kroz prostorije ka prozorima. Venecijanske zavese imaju i

tu ulogu da spreće zasenjavanje u južnim prostorijama po sunčanom danu.

Zagrejane zavese leti pomažu da se kroz prostorije ostvari strujanje hladnog vazduha, koji se uvlači sa severne strane usled termosifonskog dejstva južnih prozora, kroz koje se izbacuje napolje (sl. 56).

Električno osvetljenje je rešeno kombinacijom svetlosti koja ulazi kroz prozore i veštačke svetlosti sijalica, čija se snaga automatski kontrolise u zavisnosti od količine primljene Sunčeve svetlosti. Opšte osvetljenje prostorija postiže se rasejanjem svetlosti na svetloj tavanici (indirektno osvetljenje). Nameštaj i tepisi su takođe svetlijih boja.

Postavljeni ciljevi su svi sem jednog zadovoljeni ovim rešenjima. U poređenju s drugim spratovima zgrade, koji imaju sličnu namenu, ušteda u izdacima za grejanje kuće



Sl. 57. Hlađenje zgrade u letnjem periodu.

kreće se od 47 do 70 posto, a godišnje iznosi 5 590 dolara pri ceni električne energije od 3,9 centi/kWh (oko 1,65 din/kWh). Međutim, cena adaptacije je bila viša nego što je planirano, pa se očekuje da će se investicija isplatiti tek u roku od 10,7 godina, ako cena električne energije ostane na sadašnjem nivou.

Drugi primer je jedna stambena zgrada na sprat koju je, u okviru planiranog solarnog naselja Sjenice u Sarajevu, projektovao Centar za planiranje urbanog razvoja Beograd-projekt u saradnji s autorom ove knjige. Zgrada ima po pet stanova na oba sprata, tj. ukupno 10 stanova, od po 80 m<sup>2</sup> u proseku.

Predviđena je dobra termoizolacija zgrade (za spoljne zidove  $k = 0,25 \text{ W/Km}^2$ ), tako da su toplotni gubici po m<sup>2</sup> korisne površine niski; njihov ukupni koeficijent iznosi 728 W/K. Zgrada se nalazi na južno orijentisanoj padini i okrenuta je dužom stranom prema jugu. Svaki stan ima verandu na južnoj strani, koja zahvata sunce, a pomoćne prostorije se nalaze na severnoj strani. Vazduh zagrejan u verandi odvodi se kanalima u tavanici do kamenog skladišta na severnoj strani, a zatim se kanalima u podu vraća u verandu. Svaki stan je, dakle, samostalna energetska jedinica.

Iz rezervoara se po potrebi, pomoću ventilatora, forsira kretanje toplog vazduha tim kanalima.

Kao dopunski izvor grejanja predviđen je u svakom stanu gasni grejač, koji zagreva vazduh. Sistem kanala u podu i tavanici služi i za kruženje toplog vazduha zagrejanog grejačem, tako da se ostvaruje ušteda na investiciji u grejni sistem.

Proračuni pokazuju da u sarajevskim klimatskim uslovima oko 3/4 grejnih potreba u sezoni mogu da budu zadovoljeni suncem. Dopunska energija po jednom stanu iznosi svega oko 1 075 KWh za celu grejnu sezonu.

Na krovu zgrade nalazi se sistem solarnih prijemnika za zagrevanje vode, koji doprinosi smanjenju potrošnje energije u zgradbi.

Kao treći primer navešćemo projekt zatvorenog plivačkog bazena, koji je, na nivou idejnog rešenja, izradio autor ove knjige.

Bazen veličine  $18\text{ m} \times 10\text{ m}$  nalazi se u sali dimenzija  $26\text{ m} \times 18\text{ m}$ , čija je južna strana sva u dvostrukom staklu (dimenzije:  $26\text{ m} \times 5\text{ m} = 130\text{ m}^2$ ). Ostale strane i krov imaju dobru termoizolaciju ( $k=0,3\text{ W/Km}^2$ ), a iznutra su svetlo obojeni. Pod je takođe izolovan, na dubini od  $0,5\text{ m}$ , i pokriven tamnim pločicama. Na južnoj staklenoj fasadi predviđeni su pokretni zastori ( $k=0,5\text{ W/km}^2$ ), koji se u sumrak automatski navlače.

Sunčevi zraci koji prolaze kroz prozore završavaju put uglavnom u vodi i na podu. Vodena masa i masa poda, koje su dobro izolovane, čine, dakle, apsorber solarnog prijemnika i, u isto vreme, toplotno skladište. To obezbeđuje efikasnost zahvata sunčane energije i veliku stabilnost sistema.

Toplotni proračun ponašanja ovog objekta je dosta složen, tako da ćemo dati samo rezultat za januar.

Proračun pokazuje da u sali bazena u januaru dnevna prosečna apsorpcija sunčane energije iznosi  $900\text{ MJ}$ . S druge strane, dnevni toplotni gubici kreću se oko  $600\text{ MJ}$ , pod pretpostavkom da se održava temperatura vode od  $25^\circ\text{C}$ . Ostaje nam, dakle, višak od  $300\text{ MJ}$ , koji može da posluži za dogrevanje sveže vode, kojom se obnavlja voda u bazenu. Predviđeno je da se u pod ugrade kanali kojima će strujati bazenska voda prilikom filtriranja ili osvežavanja, zagrevajući se toplotom koju sunce ostavi u podu. Na taj se način može i regulisati temperatura sale u danima velikog priliva sunčane energije.

## IX SOLARNA ELEKTRIČNA ENERGIJA

*Sunce, jedino tebi sam žudeo biti ravan*

*Rastko Petrović*

U krugovima stručnjaka koji rade na iskorišćavanju sunčane energije obično se iznosila teza da je njen pretvaranje u toplotu već uspešno savladano s tehničke i ekonomskе strane, i stoga neposredno primenjivo u praksi, a da je dobijanje električne energije od sunca stvar dalje budućnosti, možda 21. stoljeća. Neki autori su s još više pesimizma gledali na mogućnost šire upotrebe solarne električne energije, osporavajući joj bilo kakvu značajniju ulogu u energetici budućnosti.

Ovakva shvatanja, međutim, više nisu opravdana, jer je u poslednje vreme postignut neslućen napredak u pretvaranju Sunčevog zračenja u električnu energiju, naročito direktnom konverzijom pomoću fotonaponskih solarnih celija. Štavise, sve je jasnije da će, po mogućoj vrednosti energetskog doprinosu, ovaj način iskorišćavanja sunčane energije po svoj prilici izbiti na prvo mesto.

Zanimljivo je da je Nikola Tesla davno predvideo ovakav razvoj solarne tehnike. U nedavno pronađenom intervjuu, datom australijskom novinaru Randolphu Bedfordu 1922. godine, Tesla je, između ostalog, rekao:

„Celokupna energija – talasi okeana, tok reka, veter, kiša, grad, sneg – sve su to proizvodi sunca. Mi čak upotrebljavamo flaširano sunčanu energiju u obliku uglja i nafte, ali, ipak, rasipanje sunčane energije još nije zaustavljen. A računica pokazuje da sunčana energija samo na prostoru od jedne kvadratne milje odgovara snazi od milion

konjskih snaga... koju bismo mogli da pretočimo u turbine. U vezi s tim, nauka će u budućnosti rešiti mnogo komplikovanije zadatke, kao, npr., stvaranje maštine koja će električnu energiju dobijati direktno od sunca. Ovome treba dodati da će se goriva – uz sunce i vodu jedini izvori energije – jednog dana iscrpsti..."

Postoji više načina da se sunčanom energijom proizvede električna. Neke od njih čovek odavno iskorišćava, ali to su uglavnom indirektni postupci. Kao što je istakao Tesla, hidroelektrična energija, energija vetrogeneratora, zatim energija dobijena iz termoelektričnih centrala koje koriste drvo, fosilna goriva, biljne otpatke, biogas i drugo sunčanog su porekla. Neki od ovih izvora su obnovljivi (voda, vetar, biomase) i njima pripada sve značajnija uloga u elektroprivredi. Ali do sada nije bilo sistematskog i ozbiljnog pristupa proizvodnji električne energije iz biomase, koje imaju tu prednost što se mogu čuvati i koristiti po želji. Sem toga, njihova proizvodnja se može planirati. Biljke, u stvari, predstavljaju gotovo idealne prijemnike sunčane energije, prijemnike koji je ne samo zahvataju nego i skladište.

## BIOKONVERZIJA

*Blagoslov ružama polja i cijelom ružinom rodu  
što je vrebao tajne mladosti sunčeva boga...*

*Tin Ujević*

Posljednjih godina korišćenju biomasa posvećuje se sve veća pažnja. Brojni istraživački radovi pokazali su da je u raznim podnebljima moguće odabratи pogodne brzorastuće biljke koje ne zahtevaju gotovo nikakvu obradu zemljišta niti posebna đubriva a mogu da daju dovoljan prinos da bi se ekonomski isplatila njihova eksplotacija kao gorivnog materijala za termoelektrane. Kao najpogodnije rastinje za tu svrhu smatraju se neke vrste korova, zatim morske trave i sl.

Slaba strana ovog pristupa je nizak sveukupan stepen korisnosti. Mada se u samom procesu fotosinteze iskoristi oko 18 odsto energije zračenja koje u njemu učestvuje (tj. pretvori u hemijsku energiju ugljenih hidrata), biljka kao celina ne može da zahvati svu sunčanu energiju koja pada na nju, tako da je prosečan stepen korisnosti u najboljem slučaju oko 4,5 odsto. Međutim, kad se uzme u obzir da sezona biljnog rasta ne traje celu godinu i da se biljkama ne može idealno prekriti zemljište, ovaj stepen je još niži. U našim krajevima kukuruz ima najveću sposobnost pretvaranja energije sunca u ugljene hidrate, postižući pri najboljem prinosu stepen korisnosti od oko 1 odsto. Sa sadašnjom cenom od oko 8 dinara po kilogramu, kukuruz je, po energetskom sadržaju, postao konkurent nafti.

Da bismo izračunali sveukupni stepen korisnosti u pretvaranju sunčane u električnu energiju, korišćenjem biomase, moramo još da uzmemo u obzir i učinak toplotne maštine, koja, zbog ograničenja nametnutih fundamentalnim zakonima termodinamike, nikad ne može da ostvari potpuno pretvaranje toplotne energije u mehaničku. U praksi stepen korisnosti dobrih toplotnih maština kreće se od 0,3 do 0,5.

Razmotrićemo to detaljnije u sledećem odeljku, na primeru solarnih termoelektrana.

Spomenimo ovde i upotrebu biomase za proizvodnju goriva koja bi mogla da zamene naftu (npr. alkohola, raznih ulja, metana i dr.). U nekim zemljama postavljeni su ambiciozni planovi proizvodnje alkohola. Tako u Brazilu alkohol, dobijen uglavnom iz šećerne trske, već zamenjuje u transportu oko 20 odsto naftе, a mnogi američki farmeri destiluju alkohol za svoje potrebe.

Alkohol i metan mogu se dobiti i iz organskih otpadaka, koji svuda najčešće zagađuju okolinu. Korišćenjem biohemijskih procesa moguće je postići visok stepen iskorišćenosti otpadaka. U mnogim laboratorijama radi se na uzgoju specijalnih mikroba i bakterija koje bi služile za te svrhe.

Neki stručnjaci veruju da bi biokonverzija, kako se naziva dobijanje energije iz biomase, mogla da postane jedan od glavnih načina korišćenja sunčane energije.

## SOLARNE TERMOELEKTRANE

*Plavim nebom kada stvaraš  
Jasno sunce, sjajnog zraka,  
Ognjen-plamen kule stvaraš –  
Crna čeda od oblaka.*

Milorad Popović Šapčanin

Da bi se toplota proizvedena Sunčevim zračenjem efikasno pretvorila u mehaničku, odnosno električnu energiju, potrebno je postići visoke temperature. To sledi iz drugog zakona termodinamike, koji kaže da se mehanički rad može dobiti iz toplotne energije samo pri prelazu toplotne s tela više temperature ( $T_1$ ) na telo niže temperature ( $T_2$ ). Pri tome je najveći mogući stepen korisnosti toplotne mašine,  $\eta$ , dat odnosom  $\eta = (T_1 - T_2)/T_1$ , gde  $T_1$  i  $T_2$  predstavljaju apsolutne temperature. Još u prošlom stoljeću Sadi Carnot (Carnot) je pokazao da se samo pri optimalnom radnom ciklusu (koji se po njemu naziva karnoovski ciklus) može postići taj stepen korisnosti, a da je on u većini praktično ostvarljivih ciklusa znatno manji.

Lako se vidi da je stepen korisnosti utoliko veći ukoliko je veća temperaturna razlika  $T_1 - T_2$ . Tako ćemo za  $T_1 = 400\text{ K}$  i  $T_2 = 300\text{ K}$  imati  $\eta = (400 - 300)/400 = 0,25$  ili 25 odsto. Ako pak temperaturu  $T_1$  podignemo na  $800\text{ K}$ , stepen korisnosti će se povećati na 60 odsto. Pošto u praksi ne možemo da ostvarimo idealan ciklus, stvarne vrednosti stepena iskorišćenosti biće osetno manje.

Visoke temperature možemo da postignemo pomoću fokusirajućih prijemnika, o kojima smo govorili u glavi IV. Liničkim koncentratorima postižu se temperature do  $600\text{ K}$ , pa se takvi uređaji koriste u solarnim elektranama

manje snage, najčešće za pogon pumpi za vodu u manjim naseljima.

Tačkasti koncentratori omogućuju postizanje mnogo većih temperatura, te se koriste za elektrane velike snage, reda megavata. U svetu je, u raznim zemljama, izgrađeno nekoliko većih solarnih postrojenja ovog tipa, tzv. sunčanih kula. Opisaćemo ukratko neka od njih.

U Japanu su, u okviru ambicioznog projekta „Sunčev sjaj“, aprila 1981. godine u mestu Nio-Čo, oblast Kagava, puštene u pogon dve različite solarne termoelektrane, svaka snage  $1\,000\text{ kW}$  (pri snazi Sunčevog zračenja od  $0,75\text{ kW/m}^2$ ). To su probna postrojenja, čija je namena sticanje iskustva i razvoj tehnologije elektrana ovog tipa, sa snagom od više desetina i stotina megavata.

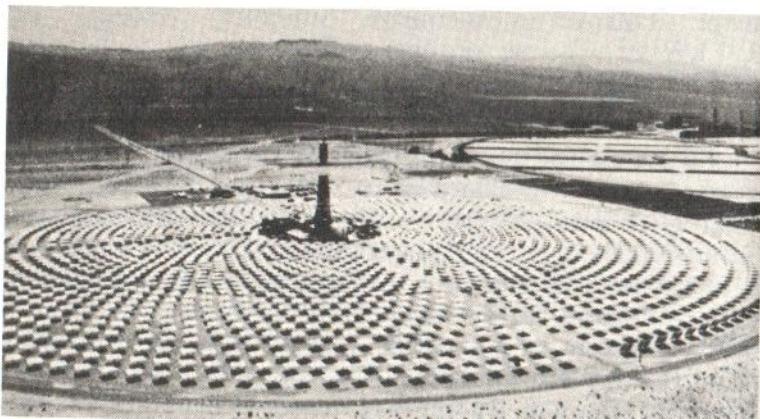
U jednom od tih postrojenja Sunčeva svetlost pada na ravna ogledala veličine  $3\text{ m} \times 1,5\text{ m}$  (ukupno ih je 2480). Ova ogledala su podeljena u 124 grupe, a svaka usmerava Sunčeve zrake prema linijskom paraboličnom koritu. U žiji te parabole nalazi se evakuisana staklena prijemna cev, kroz čiju osu prolazi metalna cev. Voda koja teče kroz ovu drugu zagreva se do  $640\text{ K}$  (na pritisku od  $3\text{ MPa}$ ) i primljenu toplotu odvodi u skladište, u kome se rastapa određena vrsta soli, a zatim u rezervoar pare pod pritiskom. Odатле se para po potrebi vodi u parnu turbinu. Uskladištena energija je u stanju da održava punu snagu elektrane u toku 3 časa. Stepen korisnosti, tj. odnos dobijene električne energije prema sunčanoj koja pada na ukupnu površinu ogledala, iznosi oko 12 odsto.

Druga japanska probna elektrana projektovana je na principu centralnog prijemnika na tornju i ravnih heliostatskih ogledala poređanih u ravni oko njega. Ogledala ima 807, a svako je veličine  $4\text{ m} \times 4\text{ m}$ . U kupastom prijemniku, prečnika  $8,5\text{ m}$ , voda se zagreva do  $520\text{ K}$  (na pritisku od  $4\text{ MPa}$ ). Pregrejana para se akumuliše u veliki rezervoar, tako da elektrana, kao i u prethodnom slučaju, može da radi 3 časa i kada nema sunca. Stepen korisnosti iznosi 10,3 odsto.

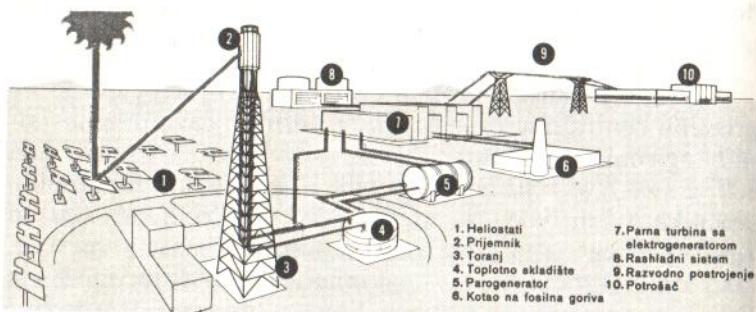
Obe ove elektrane uključene su u opšti elektroenergetski sistemi, kao istraživački objekti, biće u radu dve godine.

Njihove cene su, razume se, mnogo više od ekonomski prihvatljivih, jer se radi o eksperimentalnim postrojenjima. Ali krajnji cilj ovog poduhvata je postizanje konkurentnih cena solarne električne energije.

U SAD je nedavno puštena u rad slična elektrana. Pod rukovodstvom stručnjaka firme McDonnel Douglas, u Barstou u Kaliforniji izgrađeno je postrojenje s centralnim



Sl. 58a. Solarna termoelektrana sa heliostatima i sunčanom kulom u Barstou.



Sl. 58b. Šematski prikaz solarne termoelektrane u Barstou.

tornjem visokim oko 100 m i poljem od 1 800 ravnih heliostata, svaki površine  $60\text{ m}^2$  (sl. 58a i 58b). Njegova predviđena vršna snaga iznosi 10 MW, što je dovoljno za grad od 10 000 stanovnika (po američkim standardima). Očekuje se da će se postići stepen korisnosti od oko 15 odsto.

Ova solarna elektrana gradi se sredstvima federalne vlade. Ona će poslužiti za razvoj potrebne tehnologije, a sva saznanja predaće se na korišćenje privatnoj industriji. Ukoliko se pokaže da su elektrane tog tipa tehnički pouzdane i konkurentne po ceni proizvedene energije, pristupiće se gradnji takvih elektrana veće snage, od 100 MW i više.

I u Evropi se grade ogledne solarne elektrane slične opisanoj — jedna u Almeiri, u Španiji, snage 5 000 kW, a druga u Italiji, snage 2 000 kW.

Najveći tehnički problem u ovoj vrsti solarne elektrane predstavlja prijemnik, koji treba da apsorbuje koncentrisano Sunčevu zračenje velike snage i da zahvaćenu energiju prenese u obliku topline na radni fluid. Centralni prijemnik obično ima veće razmere, tako da se ni približno ne može govoriti o koncentrisanju u tačku. Kao radni fluid upotrebljavaju se voda, pregrejana para, rastopljene soli ili metali, zatim gasovi, kao što su vazduh i helijum, i dr. Poseban problem, ne samo tehnički nego i naučni, predstavlja sama prijemna površina, koja treba da dejstvuje na visokoj temperaturi i da po apsorptivnoj sposobnosti bude slična absolutno crnom telu, a da u isto vreme bude slab emiter infracrvenog zračenja (tj. da bude selektivna).

Drugi važan naučni i tehnički problem jeste skladištenje topline na duži rok. Ako bi se on uspešno rešio, solarna termoelektrana bi postala pouzdan i svagda raspoloživ izvor energije, nezavisan od čudi sunca. Neke zanimljive ideje o rešenju tog problema sada se proučavaju.

## POLUPROVODNIČKA SOLARNA ĆELIJA

*Surovi će dani doći i uzeti  
Svaki po svoj deo od srca što bunca  
A ti ćeš se peti  
Peti neprestano do kobnog vrhunca  
Pružajući ruke i vapijuć: Sunca!*

*Jovan Dučić*

Nekoliko fizičkih efekata mogu da se iskoriste za pretvaranje solarnog zračenja u električnu energiju. Do sada najbolji rezultati postignuti su korišćenjem ispravljачkog svojstva poluprovodničkog p-n spoja. To je i jedini način da se energija fotona direktno, što znači jednim fizičkim procesom, pretvori u električnu energiju. Uredaj u kome se na toj osnovi Sunčev zračenje pretvara u električnu energiju naziva se fotonaponska ili, popularnije, solarna ćelija.

Solarnе ćelije na bazi silicijuma koriste se već četvrt veka kao solarni generatori električne energije za posebne namene, među kojima je naročito značajna njihova primena za snabdevanje satelita električnom energijom. Tu je od drugostepene važnosti cena solarnih generatora, koja je za širu primenu još visoka, a do punog izražaja dolaze one njihove osobine po kojima su oni najlegantniji izvori električne energije od svih danas poznatih. Nijedan drugi izvor, zaista, nema sve ove odlike:

- a) direktno pretvaranje Sunčevog zračenja u električnu energiju jednim fizičkim procesom;
- b) rad isključivo na bazi elektronike, bez ikakvih pokretnih elemenata;
- c) odsustvo bilo kakvih produkata koji bi zagadivali okolinu;
- d) teorijski neograničen, a i praktično izuzetno dug vek;

e) zanemarljivo mala masa materijala od koga je načinjen generator;

f) krajnja jednostavnost sklopa;

g) izrada od tako pristupačnog materijala kakav je kamen.

Jedina ozbiljna zamerka solarnim ćelijama odnosi se na visoku cenu njihove proizvodnje. Poslednjih godina, međutim, u celom svetu se ulaže veliki napor da se uprosti i pojeftini njihova proizvodna tehnologija, i u tome se postižu veoma ohrabrujući rezultati. Stručnjaci koji rade na usavršavanju solarnih ćelija veruju da će već sredinom ove decenije njihova cena pasti ispod jednog dolara po vatru, ispod tačke koja se označava kao kritična za njihovu šиру potrošnju. U energetskim planovima nekih zemalja, u prvom redu SAD i Japana, računa se s korišćenjem solarne električne energije u većim razmerama već u poslednjoj deceniji ovog stoljeća.

## PRINCIP RADA SOLARNIH ĆELIJA

*U kamenu spava malo sunce što će nas osvetliti.*

*Branko Miljković*

Solarna ćelija na bazi poluprovodničkog p-n spoja predstavlja uređaj čiji se rad zasniva na zakonima kvantne mehanike ili, određenije, na kvantnim procesima u čvrstom stanju. Stoga je za temeljno i detaljno razumevanje njenog funkcionisanja neophodno poznavati modernu fiziku čvrstog stanja, posebno fiziku poluprovodnika. Ipak, osnovni princip rada ćelije moguće je objasniti uprošćenim predstavama, pogotovo s obzirom da za mnoge p-n spoj nije nova struktura, jer se sreće kod dobro poznatih tranzistora. Ovde ćemo podrobnejše opisati solarnu ćeliju na bazi monokristala silicijuma, kakva se za sada najčešće koristi. U stvari, taj njen tip mogao bi se već nazvati klasičnim.

Najprećemo dati uprošćen prikaz principa rada ćelije, a oni koje interesuje nešto stručniji opis mogu ga naći u narednom odeljku.

*Elektroni i šupljine.* U osnovi p-n spoja leže određena svojstva kristala poluprovodnika, od kojih su najvažnija ona koja se odnose na njegovu električnu provodnost. U monokristalu silicijuma atomi obrazuju složenu kubnu rešetku, kao kod dijamanta, i to tako što je svaki silicijumov atom vezan s četiri druga atoma preko svoja četiri valentna elektrona. Na taj način, između svaka dva susedna atoma se ostvaruje veza posredstvom dva elektrona. Ta vrsta veze naziva se kovalentnom. U slučaju savršeno izgrađenih kristala, bez ikakvih defekata, svi valentni elektroni se nalaze u sparenim vezama, ukoliko se one ne raskinu. Na temperaturi bliskoj apsolutnoj nuli ( $0^{\circ}\text{K}$ ) svi elektroni su vezani i kristal se ponaša kao izolator, jer nema slobodnih elektrona koji bi služili kao strujni nosioci. Kada se, pak, kristal zagreje, usled termalne aktivnosti se kovalentna veza kida i elektroni se oslobođaju. Kažemo da se tada elektron prebacuje iz valentne u provodnu zonu. Energija neophodna za kidanje kovalentne veze naziva se energija veze ili energija procepa (procep je rastojanje između valentne i provodne zone na energetskoj skali). Za monokristal silicijuma ova energija – obeležimo je s  $E_g$  – iznosi 1,1 elektronvolt (eV).

Prebacivanje elektrona iz valentne u provodnu zonu ima još jednu značajnu posledicu. Naime, upražnjeno mesto u valentnoj zoni, koje ćemo nazvati „šupljina“, i sâmo se ponaša kao da je strujni nosilac sličan elektronu, samo pozitivnog zraka. To možemo razumeti ako zamislimo da valentni elektron iz susednog atoma uskoči na prazno mesto, tj. u šupljinu, za šta mu nije potrebna energija jer opet ostaje u istoj energetskoj zoni. Šupljina se tada, u stvari, premešta u susedni atom, i tako proces može da se prenosi na druge atome, što nam izgleda kao da se šupljina, odnosno pozitivno nanelektrisanje, premešta.

Ukratko, šupljine predstavljaju drugu vrstu strujnih nosilaca, kakve ne srećemo kod metala.

U stvarnosti nijedan materijal nije absolutno čist, već sadrži atome raznih nečistoća ili primesa. U pogledu uticaja na provodnost poluprovodnika, atomi primesa se mogu podeliti na dve vrste. Jednu vrstu čine oni koji imaju više, recimo pet, valentnih elektrona. Ako se takvim atomom zameni jedan atom silicijuma u rešetki, pojaviće se višak od jednog nesparenog elektrona, koji će biti slobodan bez obzira na temperaturu kristala. Atomi ove vrste nazivaju se donori, i u poluprovodniku su tada elektroni dominantni (većinski) strujni nosioci (obratiti pažnju na to da u ovom slučaju pojava slobodnog elektrona nije praćena stvaranjem šupljine). Zato se takav poluprovodnik naziva poluprovodnikom n-tipa (negativnog).

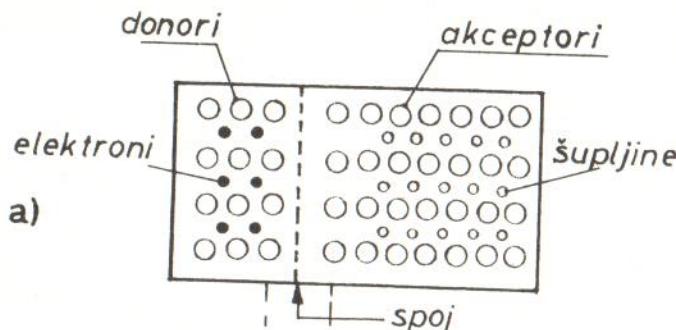
U drugu vrstu spadaju atomi koji imaju tri valentna elektrona. Oni ne mogu da obezbede sparivanje u potpunu kovalentnu vezu pa „pozajmljuju“ po jedan elektron iz susednih silicijumovih atoma, gde ostaju upražnjena mesta. A ona nisu ništa drugo do šupljine. Atomi ove vrste nazivaju se akceptorima, a odgovarajući tip poluprovodnika p-tip (pozitivni). Šupljine su u ovom slučaju većinski strujni nosioci.

U poluprovodniku n-tipa pored elektrona kao većinskih strujnih nosilaca postoji i mali broj šupljina, koje tada predstavljaju manjinske strujne nosioce. Situacija je, razume se, obratna u poluprovodniku p-tipa.

*P-n spoj.* Kao što smo istakli, kristal silicijuma po pravilu nije potpuno čist, već je ili p-tipa ili n-tipa, u zavisnosti od proizvodnog postupka. Posebno interesantna struktura dobija se kada se na jednoj površini pločice kristala jednog, recimo n-tipa postavi element iz koga se razvija drugi, u ovom slučaju p-tip (ili obrnuto). Takva dvoslojna struktura naziva se p-n spoj (sl. 59).

Lako se može pokazati da ovakav spoj ima ispravljačko svojstvo, odnosno da predstavlja diodu. U p-tipu su glavni (većinski) strujni nosioci šupljine, a u n-tipu elektroni. Stoga, ako p-n spoj priključimo na izvor napona tako da p-sloj bude na pozitivnom polu a n-spoj na negativnom, kroz diodu će se lako uspostaviti struja, jer je smer

električnog polja povoljan i za šupljine u p-sloju i za elektrone u n-sloju. S povećavanjem napona naglo raste struja kroz diodu. Ako, pak, promenimo polarnost napona, smer polja postaje nepovoljan i jedinu struju obrazovaće manjinski nosioci, elektroni u p-sloju i šupljine u n-sloju. Povećanje napona neće u ovom slučaju dovoditi do porasta struje, jer nedostaju strujni nosioci. U prvom slučaju kažemo da je dioda priključena na napon u direktnom smeru, a u drugom – u inverznom.



Sl. 59. Šematski prikaz p-n spoja.

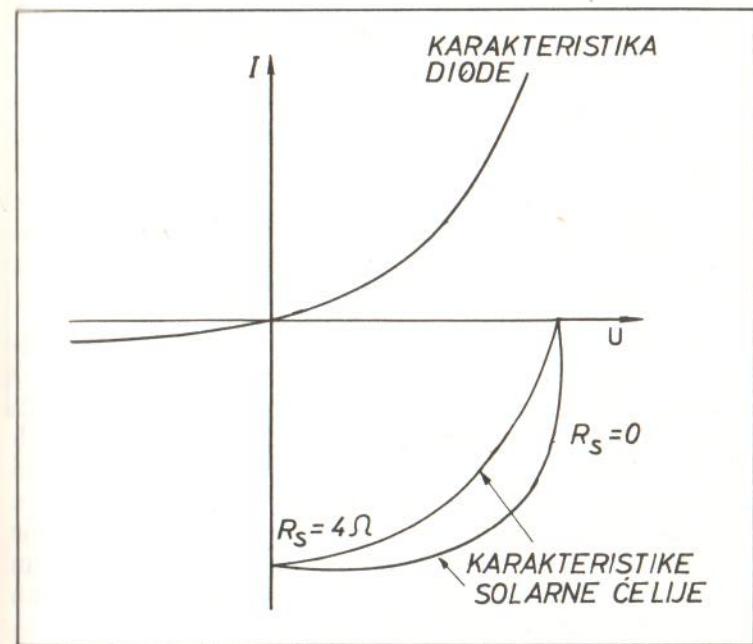
Dijagram zavisnosti struje od napona naziva se U-I karakteristikom diode. Na sl. 60 prikazana je tipična karakteristika silicijumske diode.

Poluprovodničke diode koriste se u elektronici već nekoliko decenija i predstavljaju nezamenjive elemente u mnogim elektronskim kolima. Ima ih više vrsta, a razlikuju se po materijalu od koga su načinjene (silicijumske, germanijumske i dr.) ili po konstruktivnim detaljima i karakteristikama. No ovde nas interesuje primena diode kao fotonaponskog elementa.

*Sopstveni napon (barijera) diode.* P-n dioda ima jedno svojstvo koje je vrlo značajno, zapravo bitno za njenu primenu u fotoelektričnoj konverziji. To svojstvo sastoji se u spontanom uspostavljanju napona između slojeva p i n, što je posledica težnje elektrona da, kao da je u pitanju neki gas, uspostave jednaku prosečnu gustinu u svim delovima

kristala (proces difuzije). Tako će iz n-sloja, gde im je gustina velika, elektroni prelaziti u sloj p, gde ih ima malo. Na isti način šupljine migriraju iz sloja p u sloj n.

Ipak, ravnomerna gustina elektrona i šupljina po celoj diodi ne uspostavlja se iz sledećeg razloga. Čim neki elektron pređe iz n-sloja u p-sloj, on iza sebe ostavi višak



Sl. 60. Karakteristike diode i solarne celijske.

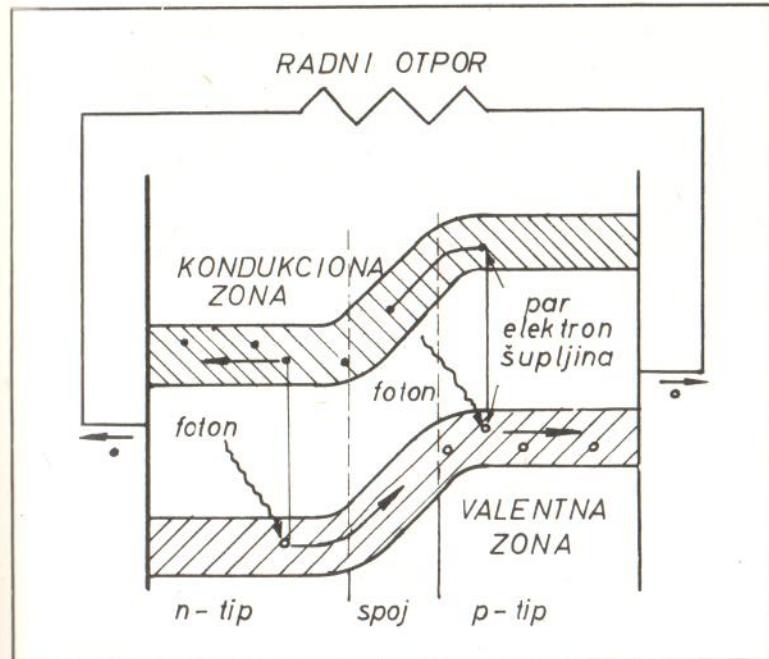
pozitivnog nanelektrisanja (jer je pre toga n-sloj kao celina bio neutralan), a donosi višak negativnog nanelektrisanja u p-sloju. Kao posledica toga javlja se mali napon, i to inverznog smera, koji se protivi prelasku novih elektrona; no on nije dovoljan da ga i spreči. S prelaskom svakog novog elektrona, međutim inverzni napon se povećava, da bi u jednom trenutku dostigao vrednost koja predstavlja nepremostivu prepreku za dalji prelazak elektrona. Taj napon naziva se potencijalnom barijerom p-n spoja.

Barijera se obrazuje na samom spoju; njena širina kod silicijuma iznosi oko 3 mikrometra. Visina barijere približno je jednaka energetskom procepu (za silicijum 1,1 eV), ali je u praksi uvek manja od njega. (Treba uočiti da je ovaj napon inverzan s gledišta polarnosti diode, ali bi, s obzirom da se sada dioda javlja kao izvor napona, u spoljnem kolu proizveo struju kakva se javlja pri direktnom smeru napona.) Sa šupljinama se odigrava proces identičan ovome i one takođe doprinose unutrašnjem (inverznom) naponu između slojeva p i n.

Uspostavljanje unutrašnje barijere ne znači da je prestalo svako kretanje elektrona i šupljina kroz spoj. Poneki elektron se vrati u n-sloj a šupljina u p-spoj, što dovodi do novih prelazaka preko barijere da bi se uspostavilo ravnotežno stanje. Radi se, dakle, o procesu dinamičke ravnoteže u kome je samo srednja struja kroz barijeru ravna nuli.

**Fotonaponski efekat.** Svetlost ima moć da fotoelektričnim efektom izbacuje elektrone iz atoma, u ovom slučaju iz valentine zone u provodnu. U fotoelektričnom efektu kvanti svetlosti, fotoni, svu svoju energiju  $E_f = h \cdot f$  — gde je  $h$  Plankova konstanta a  $f$  frekvencija — predaju elektronima sudarajući se s njima. Kad god se tako proizvede slobodan elektron, onda, razume se, iza njega u atomu ostane šupljina. Prema tome, kada se p-n spoj obasja svetlosnim zracima, sa obe strane spoja (barijere) remeti se ravnotežno stanje koje je prethodno postojalo u diodi.

Posmatrajmo sada šta će se dogoditi s parom elektron-šupljina koji foton stvori npr. s desne strane barijere (na sl. 61), tj. u p-sloju. Elektron će se pod dejstvom polja barijere kretati nalevo („skliznuti niz barijeru“), tako da će se u p-tipu pojaviti višak pozitivnog nanelektrisanja (šupljina) u poređenju s pređašnjim ravnotežnim stanjem. A dospevši u n-sloj, elektron mu donosi višak negativnog nanelektrisanja. U slučaju para elektron-šupljina koji foton proizvede na levoj strani, šupljina je ta koja prelazi u p-tip, te se u konačnom ishodu dobija isti efekat kao u prethodnom slučaju.

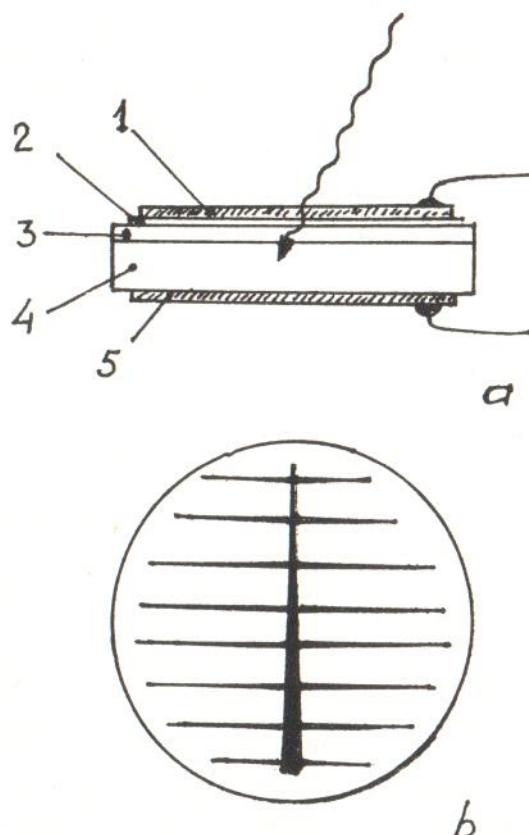


Sl. 61. Šematski prikaz fotonaponskog p-n spoja.

Spoljašnji posmatrač, koji se služi voltmetrom priključenim na krajeve p-n spoja, pojavu šupljina u p-sloju i elektrona u n-sloju registrovaće kao pojavu napona na diodi  $U_f$ , i to iste polarnosti kao kod direktnog, tj. pozitivnog smera, ali, kao što smo maločas objasnili, budući da je sada dioda generator a ne potrošač, struja će imati suprotan smer (tj. negativan) ukoliko diodu vežemo u zatvoreno strujno kolo. Tako se kriva na  $U$ - $I$  karakteristici diode pomera u donji desni kvadrant (sl. 60). Ako diodu kratko spojimo, imaćemo fotoelektričnu struju kratkog spoja,  $I_{ks}$ , koja je srazmerna jačini osvetljenosti diode.

Kada je kolo diode prekinuto (otvoreno), na njenim krajevima pojaviće se maksimalan mogući napon za datu jačinu osvetljenosti, i to je napon otvorenog kola,  $U_{ok}$ , koji takođe zavisi od te jačine, ali joj nije direktno srazmeran, već se menja približno kao njen logaritam.

*Fotonaponska dioda kao generator.* Da bismo iskoristili električnu energiju proizvedenu u diodi, vezujemo ovu u zatvoreno strujno kolo čiji je radni otpor  $R_o$ . Sama dioda, kao i svaki električni generator, ima sopstveni otpor,  $R_s$ , koji se nalazi u seriji s radnim otporom i stoga smanjuje korisni napon na krajevima  $R_o$ . Otpor diode potiče od otpornosti njenih slojeva (p i n), kao i od otpora površinskih slojeva, preko kojih se prikuplja nanelektrisanje.

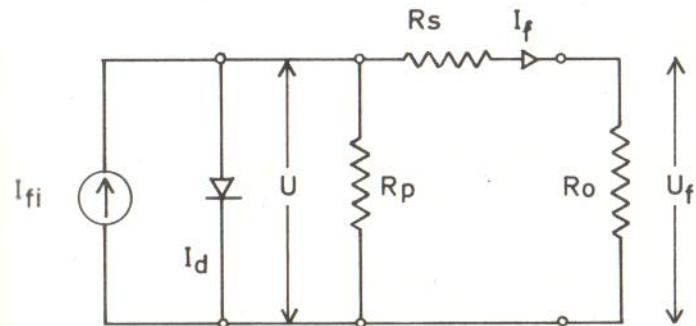


Sl. 62. Solarna ćelija: a – poprečni presek (1 – prednja elektroda, 2 – antirefleksioni sloj, 3 – n-sloj, 4 – p-sloj, 5 – zadnja elektroda); b – izgled prednje elektrode.

Najveći doprinos serijskom otporu diode daje površinski sloj na licu ćelije (tj. na onoj strani na koju pada svetlost). Taj sloj treba da propusti što je moguće veći deo svetlosti do barijere i zato mora da bude vrlo tanak, ali i da ima nisku otpornost – dakle, mora da bude metalizovan. Stoga se ide na kompromis, pa se lice ćelije pokriva mrežom metalizovanih linija (obično od nikla ili kalaja), preko kojih se nanelektrisanje prikuplja i odvodi u spoljno kolo. Da bi se izračunao njihov optimalni raspored i oblik, koriste se kompjuteri. U većine komercijalnih ćelija metalizovane linije imaju oblik dvostranog češlja (sl. 62).

Sem serijskog otpora, dioda ima i određenu provodnost, koja se može predstaviti paralelnim otporom („šantom“)  $R_p$ .

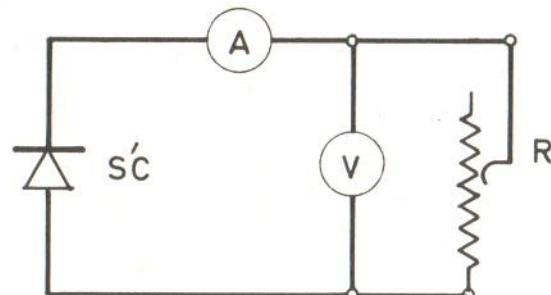
Uzimajući u obzir sve te otpore, možemo da nacrtamo električno kolo solarne ćelije (tzv. ekvivalentnu šemu, sl. 63).



Sl. 63. Ekvivalentno kolo solarne ćelije.

*Karakteristika solarne ćelije.* U praktičnoj primeni solarne ćelije cilj nam je da najveći deo proizvedene energije u njoj prebacimo u radni otpor. Uspeh u tome zavisiće, kao i kod drugih generatora, od vrednosti radnog otpora  $R_o$ . Radi pravilnog izbora radnog otpora moramo, otud, da raspolazemo U-I karakteristikom ćelije snimljenom za razne vrednosti tog otpora. Električna šema prema kojoj se

snima ova karakteristika data je na sl. 64, a na sl. 65 prikazana je tipična karakteristika silicijumske solarne ćelije snimljena za Sunčevu osvetljenje AM1 (tj. za jačinu osvetljenja od približno  $1 \text{ kW/m}^2$ ; videti glavu II). Svaka tačka na toj krivoj daje vrednost struje i napona za određenu vrednost radnog otpora.

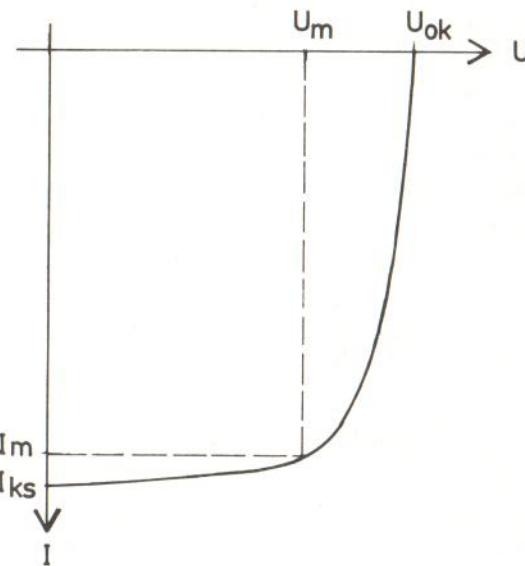


Sl. 64. Električna šema za merenje karakteristike solarne ćelije (otpor  $R$  bira se u zavisnosti od vrste i veličine ćelije i tipično iznosi nekoliko oma).

Pošto je električna snaga  $P$  data proizvodom napona i struje ( $P = U \cdot I$ ), u primeni ćelije se radni otpor bira tako da ovaj proizvod dostigne maksimalnu vrednost. Postoje računski metodi da se ona iznađe, pri čemu se obično koristi kompjuter, ali se ona može približno odrediti i grafičkim putem – biranjem tačke s onim vrednostima  $U$  i  $I$  za koje će površina pravougaonika koji one obrazuju s koordinatnim osama (sl. 65) obuhvatiti najveći deo ispod površine krive. Ta tačka se nalazi na samom „laktu“ krive i zato je direktno uočljiva.

U praksi je često dat potrošač (tj. radni otpor), pa se ide obrnutim redom, tj. traže se ćelije čija karakteristika odgovara datom radnom otporu kao optimalnom. Obično se ćelije podešavaju prema otporu tako što se vezuju na red ili u paralelu.

Najveću vrednost napon ima pri otvorenom kolu  $U_{ok}$  (tada je  $R_o$  beskonačno), a struja pri kratkom spoju  $I_{ks}$  ( $R_o=0$ ). Te tačke leže na apscisi, odnosno ordinati. Za Sunčevu svetlost AM1, vrednosti ovih veličina kod najboljih silicijumskih ćelija iznose:  $U_{ok}=0,60 \text{ V}$ ,  $I_{ks}=-42 \text{ mA/cm}^2$ . Očigledno da je proizvod  $U \cdot I$  u nekoj tački karakteristike uvek manji od proizvoda  $U_{ok} \cdot I_{ks}$ . Prema tome, i za optimalnu radnu tačku, u kojoj je korisna snaga maksimalna ( $P_{max}=U_m \cdot I_m$ ), odnos  $U_m \cdot I_m / U_{ok} \cdot I_{ks}$  je manji od jedinice. Taj odnos se naziva faktor ispune (na engleskom fill factor) i u stručnoj literaturi se obično obeležava skraćenicom ff. Kod silicijumskih dioda on je obično manji od 0,80.



Sl. 65. Tipična karakteristika silicijumske solarne ćelije.

Za razne vrednosti osvetljenja imaćemo razne  $U$ - $I$  karakteristike ćelija. Pošto u praksi Sunčevu zračenje znatnije menja intenzitet, to se nameće problem stalnog podešavanja radnog otpora u zavisnosti od jačine osvetljenosti. O tome će biti više reći u odeljku o primeni ćelija.

Ostaje nam još da definišemo stepen korisnosti čelije,  $\eta$ . To je odnos iskorišćene energije prema sunčanoj energiji koja pada na ukupnu površinu čelije. Računajući energiju u sekundi, tj. snagu, dobijamo da je stepen korisnosti

$$\eta = \frac{U_m I_m}{I_s \cdot A},$$

gde je  $I_s$  snaga Sunčevog zračenja koje dospeva na jedinicu površine čelije, a  $A$  predstavlja njenu površinu.

U slučaju da se koristi modul (panel) s više čelija, za površinu  $A$  uzima se ukupna površina modula, uključujući i praznine između pojedinih čelija.

Na kraju ovog odeljka istaknimo još jednom da je dobijena električna energija rezultat prebacivanja elektrona iz valentne u provodnu zonu. Taj rad vrše fotoni. Prema tome, u solarnoj čeliji imamo direktnu transformaciju energije zračenja u električnu energiju, transformaciju koja se ostvaruje jednim jedinim procesom. Po toj osobini p-n spoj predstavlja jedinstven izum.

*Stepen korisnosti solarne čelije.* Da bismo videli od čega sve zavisi stepen korisnosti solarne čelije, treba da razmotrimo efekte pri kojima se energija upadnog zračenja gubi pre konverzije u električnu energiju isporučenu radnom otporu. Najvažniji takvi efekti su:

(1) Optička refleksija na površini čelije. Taj gubitak svetlosti može se smanjiti na oko 3% specijalnom obradom površine radi nanošenja tzv. antirefleksionog sloja.

(2) Sunčev spektar sadrži izvestan broj fotona čija je energija manja od energetskog procepa između valentne i kondukcione zone. Ti fotoni ne stvaraju strujne nosioce i ne doprinose struji čelije. Za silicijumske čelije ( $E_{procepa} = 1.1 \text{ eV}$ ) njihov energetski ideo u Sunčevom spektru iznosi oko 23%.

(3) Fotoni energije veće od 1.1 eV, mada stvaraju parove elektron-šupljina, predaju kristalu više energije nego što je potrebno, i taj višak predstavlja gubitak (oko 33%).

(4) Osetljivi deo čelije nije dovoljno debo da bi se apsorbovali svi fotoni, pa se jedan broj fotona gubi, bilo tako što se apsorbuje na zadnjem kontaktu ili što prolazi kroz čeliju. Ovaj gubitak se može smanjiti ispod 1% izborom reflektujućeg zadnjeg kontakta, koji vraća fotone u p-n spoj.

(5) Napon koji se postiže na krajevima čelije uvek je manji od energetskog procepa, što znači da se ne koristi sva energija predata elektronu pri njegovom prebacivanju iz valentne u kondupcionu zonu. Na taj način se gubi oko 17% energije.

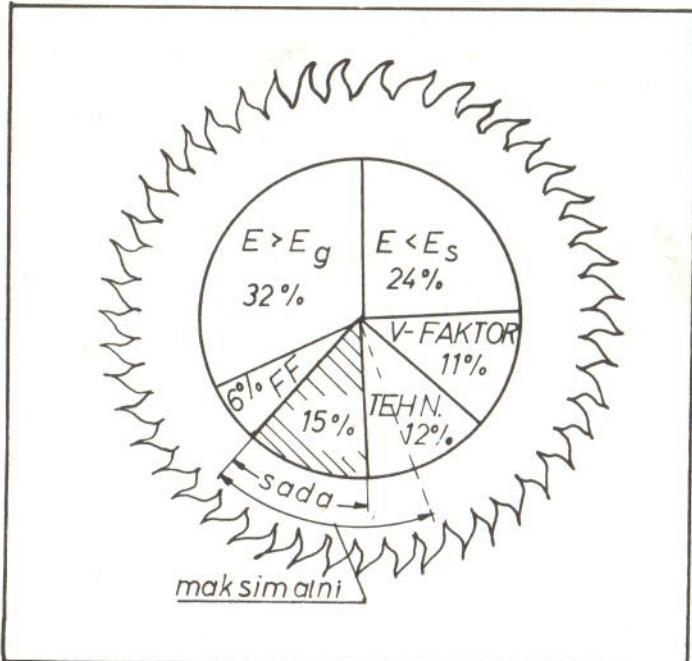
(6) Pošto je U-I karakteristika čelije data eksponencijalnim zakonom, to proizvod  $I_m \cdot U_m$  nikad ne može da bude jednak površini ispod krive. Postoje i drugi efekti koji smanjuju taj faktor ispunе, tako da on u najboljem slučaju može da dostigne 0,8. Dakle, ovde se gubi oko 5% početne energije zračenja.

(7) Elektroni i šupljine proizvedeni zračenjem imaju ograničen vek i neki ne stižu do elektroda, već se rekombinuju. Dakle, efikasnost prikupljanja strujnih nosilaca nije potpuna i gubitak nastao ovim putem iznosi oko 4%.

(8) Najzad, gubitak snage na serijskom otporu diode iznosi oko 1%.

Kad se ovi gubici sabiju i oduzmu od ulazne svetlosne snage, dobija se ostatak od 13%. Neki od njih su uslovjeni fundamentalnim fizičkim zakonima i ne mogu se smanjiti, dok su neki zavisni od tehnologije. Uz pretpostavku da se ovi drugi smanje na minimum, za teorijski maksimalan stepen iskorišćenosti silicijumskih čelija dobija se vrednost od 22%. Do sada najbolji objavljeni rezultati na laboratorijskim uzorcima iznose 18%, a za čelije u masovnoj proizvodnji postiže se iskorišćenost do 16%. Na sl. 66 data je hematska raspodela „solarnog kolača“ u silicijumskoj čeliji.

Stepen korisnosti veoma zavisi od veličine energetskog procepa, koji kod silicijuma nije najpovoljniji. Za galijum-arsenid, čija energija procepa iznosi 1,39 eV, teorijski maksimalan stepen korisnosti iznosi 29%.



Sl. 66. Šematski prikaz raspodele „solarnog kolača“ u silicijumskoj ćeliji (segment označen „sada“ predstavlja procenat sunčane energije koji se iskorišćava u sadašnjim komercijalnim ćelijama, a segment označen „maksimalni“ je najveći mogući procenat korisnosti).

## TEHNOLOGIJA SOLARNIH ĆELIJA

*I pokaži mi kako pretvaraš  
Kamen u sunconosni oblak.*

Vasko Popa

Za izradu solarnih ćelija može da se koristi desetak poluprovodničkih materijala: germanijum, Ge; silicijum, Si; indijum-fosfid, InP; galijum-arsenid, GaAs; kadmijum-

sulfid, CdS; kadmijum-telurid, CdTe; aluminijum-antimonid, AlSb; galijum-fosfid, GaP; kadmijum-selenid, CdSe; i drugi. Pri tome se ne koristi samo direkstan p-n spoj na bazi jednog materijala, kakav smo opisali, nego i razne strukture u kojima se unutrašnje električno polje (barijera) postiže spojem raznih poluprovodničkih materijala (tzv. heterogeni spoj, npr. Cu<sub>2</sub>S/CdS) ili kombinacijom poluprovodnika jednog tipa (p ili n) s metalom (s tzv. šotkibarijerom, npr. Au/Si). U naučnoj literaturi opisano je nekoliko desetina ćelija od raznih materijala, ali sve osnovne zahteve za širu upotrebu do sada su uspele da ispune samo ćelije na bazi silicijuma, galijum-arsenida i bakar-sulfida/kadmijum-sulfida.

Koristeći neki od objavljenih recepata, nije teško načiniti solarnu ćeliju. Gotovo da nema zemlje u svetu u kojoj se neka laboratorijska radnja ne bavi usavršavanjem na ovom polju. U mnogim zemljama u razvoju započeta je i maloserijska proizvodnja solarnih ćelija (Indija, Egipat, Irak, Alžir, Meksiko i dr.). Koliko je tehnologija solarnih ćelija pristupačna i najskromnijoj laboratorijskoj radnji, ilustrovaču sledećim primerom.

Na nedavno održanoj Međunarodnoj konferenciji o solarnim ćelijama (Kan 1980), kojoj sam prisustvovao, primetio sam grupu mladića i devojaka koji su izgledali premladi da bih ih uvrstio u studente. Pitao sam se otkud oni na uglednoj naučnoj konferenciji. Slučaj je htio da na banketu priređenom povodom Konferencije budem za istim stolom s tim omladincima. Tada sam otkrio „tajnu“ njihovog učešća na njoj. Oni su u jednoj engleskoj srednjoj školi, u okviru pronalažačkog kluba, uspeli da od priručnih sredstava načine solarne ćelije na bazi tankog sloja kadmijum-sulfida, pa su kao dobitnici nagrade jednog lista poslati na tu konferenciju.

Ali problem razvoja tehnologije ćelija dobija sasvim druge dimenzije kada se postavi cilj da one, kao solarni električni generatori, konkurišu drugim izvorima električne energije. Kao što dosadašnje iskustvo pokazuje, taj problem tada zahteva angažovanje velikog naučnog i industrijskog potencijala, dostupnog samo industrijskim velesilama.

Sada, posle jedne decenije ogromnih napora širom sveta, prilično je jasno koji tehnološki postupci mogu da doprinesu ostvarenju postavljenog cilja – dobijanju solarne električne energije po konkurentnim cenama. Ovde ćemo detaljnije govoriti samo o silicijumskim čelijama, koje su se do sada najviše koristile.

Kao osnovni materijal, silicijum je najpopularniji iz više razloga. Pre svega, to je veoma rasprostranjen materijal (čini 26 odsto Zemljine kore) i lako se nalazi, jer predstavlja osnovni sastojak mnogih stena, na primer kvarcnih (kvarc je, u stvari,  $\text{SiO}_2$ ). Zatim, silicijum nije toksičan niti gradi jedinjenja koja bi bila štetna po okolini, relativno lako se dobija i prerađuje i već odavno upotrebljava u poluprovodničkoj industriji. Najzad, silicijum pruža mogućnost automatizovane proizvodnje jeftinih čelija, čiji stepen korisnosti može dostići 20 odsto.

Kao polazni materijal u izgradnji silicijumskih čelija služi kvarčni pesak (silicijum-dioksid,  $\text{SiO}_2$ ), iz koga se dobiva silicijum manje čistoće, tzv. metalurški silicijum, koji se, dalje, pretvara u jedinjenje  $\text{SiHCl}_3$  (trihlor-silan), da bi se iz ovoga ponovo dobio silicijum nešto veće čistoće, u obliku polikristala (poluprovodnička gradacija silicijuma). Čelije koje su do sada najviše korištene bile su izrađivane od monokristala silicijuma, sečenog u pločice debljine 0,2 do 0,5 mm. Postupak dobijanja monokristala je, međutim, skup i neekonomičan s gledišta utroška energije, pa se, kao jedan od prvih koraka u pojedinjenju čelija, prešlo na proizvodnju polukristalnog silicijuma. No i to se pokazalo nedovoljnim za postizanje postavljenog cilja. Ekonomski analize su, naime, pokazale da silicijum za solarne čelije, odnosno solarna gradacija silicijuma, mora da bude nekoliko puta jeftinija od poluprovodničke gradacije, čija cena trenutno iznosi oko 65 dolara/kg. Ispostavlja se da je prečišćavanje silicijuma preko trihlorilana ono što najviše utiče na cenu, pa je poslednjih godina uloženo mnogo truda da se taj korak zaobiđe. U tome je i postignut uspeh na dva-tri načina. Tako američka firma Union Carbide sada raspolaže kompletним industrijskim postupkom proizvodnje dovoljno čistog silicijuma za solarne čelije po ceni

ispod 15 dolara/kg. Ali taj postupak, pored toga što je zaštićen patentima, zahteva velika ulaganja i zamašnu proizvodnju, pa će se ceo svet verovatno snabdevati silicijumom, kao i do sada, iz malog broja izvora.

Američka firma Solarex uspela je da razradi postupak kojim se iz kristala solarnog stepena čistoće dobija polukristal velikih dimenzija (kristal krupnozrnaste strukture u kome su defekti prisutni samo na granicama monokristalnih zrnaca). Nedavno su načinjene čelije od polukristala površine  $22\text{ cm} \times 22\text{ cm}$ , koje na suncu daju snagu od 5 W.

No i kada se dobije jeftin kristal silicijuma (bilo da je to monokristal, ili polikristal ili polukristal), ostaje problem njegovog sečenja u pločice. Ono je ne samo skupo nego i dovodi do velikog otpada silicijuma, jer je debljina reza testera veća od debljine samih pločica. Zato se u nekim industrijskim laboratorijama u Japanu i SAD pristupilo razradi postupka pri kome se silicijumski kristal izvlači iz otopine u obliku traka debljine 0,2–0,5 mm, optimalne za solarne čelije. I u tome je postignut uspeh, pa su već na tržište izbačene čelije u obliku pravougaonih pločica većih površina (npr.  $10 \times 20\text{ cm}$ ), načinjene od tih traka. Izvlačenje traka zahteva tehnologiju veoma visokog nivoa i potpuno je pod kontrolom velikih kompanija. Ipak, svet treba da bude zahvalan svima koji su se poduhvatili ovako teškog zadatka i uspešno ga rešili.

Postupak proizvodnje čelija od pločica, bilo da se ove isecaju iz kristalnih šipki ili iz traka, dosta je složen. On obuhvata desetak koraka, ali izgleda da je svaki od njih moguće rešiti na zadovoljavajući način kako u pogledu proizvodne cene, tako i u pogledu automatizacije. Sada se razvoj industrijske tehnologije za proizvodnju solarnih čelija nalazi u završnoj fazi, tj. u fazi prelaska na visokoautomatizovanu serijsku proizvodnju. Na bazi dosadašnjih iskustava može se dati recept za najvažnije korake u proizvodnji čelija od silicijumskih pločica.

*Priprema pločica.* Pošto se silicijumske pločice pažljivo iseku, tako da ne dođe do većih mehaničkih oštećenja, koja bi kasnije izazvala pukotine i lomljenje, pristupa se obradi