

njihove površine. Cilj je da se dobije čista površina, bez oštećenja. To se postiže hemijskim nagrizanjem bilo u kiseloj ili alkalnoj sredini. Pri tome se teži da se sva oštećenja nastala pri sečenju izglade, čime se smanjuje verovatnoća da célija kasnije naprsne; odnosno, smanjuje se škart i povećava trajnost célije. Obrada u kiselinama (npr. 4% HNO_3 , 20% CH_3COOH , 16% HF) daje dobre rezultate, ali je skupa. Alkalna obrada (npr. zagrejanji NaOH jačine 30%) takođe je dobra, a jeftinija je oko deset puta i, sem toga, ne pričinjava ekološke probleme, ali se pri sečenju mora voditi računa o orientaciji kristala (zahteva orientaciju pločice $<100>$). Da bi se odstranilo zagađenje metala, pločice se ispiraju u razblaženom rastvoru HCl ili HNO_3 .

Hemijskim putem se takođe može da postigne hravost površine („tekstura“), koja poboljšava stepen apsorpcije svetlosti. Takva površina sačinjena je od bezbroj sitnih piramidalastih izbočina dimenzije oko jedan mikrometar. Ona, u stvari, ima ulogu antirefleksionog sloja, koji se na nju može i posebno naneti. Hrapavost se najčešće postiže obradom površine u hidrazin-hidratu.

Obrazovanje P-N spoja. Pri dopingovanju pločice radi stvaranja P-N spoja mora se voditi računa da se ne smanji vek manjinskih nosilaca u početnom materijalu, kao i većinskih nosilaca u sloju obrazovanom dopingovanjem. Ovo drugo se postiže tako što se nivo dopingovanja ograničava na nižu vrednost. Moguće je koristiti nekoliko tehnika:

- difuziju iz gasne faze na 850–950°C; ovo je najčešće korišćen postupak, ali nedostaci su mu u tome što je dopingovan sloj neravnomerni ako je tanak i što se sa zadnje strane takođe obrazuje dopingovan sloj, koji se mora odstraniti;

- difuziju iz čvrstog stanja, koje se pre zagrevanja nanosi samo na prednju površinu pločice; nanošenje se može izvesti na više načina (hemijskom depozicijom pare, centrifugalnim putem, prskanjem ili sito-štampom); izgleda da najviše obećava sito-štampa, koja se može automatizovati i ne zahteva skupu opremu;

- jonsku implantaciju, koja spada u najnovije tehnike; ona omogućuje izvanrednu kontrolu debljine sloja i stepena dopingovanja, ali se kristal, zbog oštećenja u jonskom bombardovanju, mora odgrejati, pri čemu se koristi laserski ili elektronski snop; ukoliko mu se dovoljno snizi cena, ovaj postupak će biti veoma privlačan za industriju zbog mogućnosti dobre kontrole i automatizacije;

- epitaksijalni porast dopingovanog sloja na uzorku metalurškog silicijuma, a ovaj je jeftin, tako da kompenzira višu cenu samog postupka epitaksiranja.

Priprema zadnje strane. Pošto se za potpunu apsorpciju solarnog spektra zahteva debljina silicijuma od oko 200 µm, nameće se problem prikupljanja strujnih nosilaca proizvedenih blizu zadnje strane pločice, koja je udaljena od p-n spoja. To se postiže uspostavljanjem slabog unutrašnjeg polja uz zadnju stranu, koje goni nosioce ka barijeri. Polje se uspostavlja tako što se sloj na zadnjoj površini dopinguje jače nego osnovni sloj. Na primer, ako je osnovni materijal p-tipa, onda će zadnja površina biti bogatije dopingovan p-sloj (on se tada obeležava s P^+), pa se dobija célija tipa $\text{n}^+ \text{pp}^+$, koja se naziva BSF-célija (célija s poljem uz zadnju površinu). Kao najpraktičniji način da se to postigne na materijalu p-tipa pokazalo se legiranje aluminijumskog sloja, koji se može naneti naparavanjem ili sito-štampom.

Metalizacija kontakata. Da bismo iskoristili najveći deo električne energije proizvedene u céliji, moramo da uspostavimo dobre omske kontakte s površinama célije i postignemo mali serijski otpor, uz dobro prianjanje i mogućnost zavarivanja („letovanja“) priključaka. Najčešće korišćeni metodi su:

- naparavanje slojeva Al/Ag ili Ti/Pd/Ag u vakuumu; ovaj proces je tehnološki veoma razvijen, ali je rasipan i skup, a koristi i skupe materijale;

- nenelektrično nanošenje nikla kroz masku metodom „fotorezista“; najozbiljniji problem u ovom postupku jeste oksidacija površine pločice, koja onemogućuje dobro prianjanje nikla i dovodi do prevelikog kontaktog otpora; to

može da se spreči prethodnim nanošenjem sloja paladijuma, koji se posle termalnog tretiranja vezuje sa silicijumom u paladijum-silicid; otpornost se tada može smanjiti mekim zavarivanjem; no paladijum je skup, pa je u novije vreme razvijen metod nanošenja dva sloja, najpre niklenog, a preko njega bakarnog; nikl predstavlja dobru difuzionu barijeru za bakar; ali i ovaj metod zahteva postupak fotomaskiranja da bi se definisala kontaktna mreža; sem toga, nije proveren u pogledu dugotrajnosti, a nije ni sasvim prihvatljiv s ekološke strane;

– sito-štampa, tehnika koja je dobro poznata u elektronskoj industriji i može lako da se automatizuje; proizvodni prinos je vrlo visok, oprema jeftina i lako se održava, a rasipanje materijala malo.

Metalizacija prednjeg kontakta obično se izvodi tako što se nanese srebrna pasta, koja zatim, pri zagrevanju, prodire kroz antirefleksioni sloj. Time se postiže dobro prianjanje i nizak kontaktni otpor. Zadnja strana se metalizuje najpre aluminijumskom pastom pa pastom od srebra i paladijuma. Primjenjuje se i samo jedna pasta, s mešavinom aluminijuma i srebra. Ovi postupci imaju prednost što se mogu kombinovati sa sito-štampom, koja se koristi pri uspostavljanju p-n spoja.

Antirefleksioni sloj. Ovaj sloj ima zadatak da smanji ne samo refleksiju svetlosti nego i brzinu površinske rekombinacije. Budući da silicijum ima visok indeks prelamanja (3–6), gubitak svetlosti usled refleksije na površini iznosi od 30 do 54 odsto, u zavisnosti od talasne dužine svetlosti. Antirefleksioni sloj treba da ima indeks prelamanja oko 2. Mogu se koristiti razni oksidi – SiO , SiO_2 , TiO , TiO_2 , Ta_2O_5 i drugi – koji smanjuju refleksiju na ispod 10 odsto. Sloj se nanosi naparavanjem u vakuumu, „spateringom“ (prskanjem), sito-štampom itd. Poslednja dva metoda su znatno jeftinija, mada daju nešto slabije rezultate. Dva sloja, recimo $\text{TiO}_2 + \text{SiO}_2$, mogu smanjiti refleksiju čak na oko 3 odsto.

Cena. Tehničko-ekonomske analize su pokazale da je u proizvodnji velikog obima (iznad milion kvadratnih metara

celija godišnje) moguće izabrati nekoliko različitih tehnologija koji bi mogli da obezbede postizanje postavljenog cilja (cena celije ispod 1 dolara/W). Izbor odredene tehnologije biće u prvom redu prilagođen osobinama osnovnog materijala od koga se celije spravljaju, a zavisiće, razume se, i od sklonosti pojedinih industrija, u skladu s iskustvima koja su one stekle, znanjima kojima su ovladale i licencama kojima raspolažu. Težnja da se postigne proizvodnja u jedinstvenom i neprekidnom nizu postupaka biće svakako od primarne važnosti u daljem razvoju automatizovane industrije solarnih celija.

Celije od amorfognog silicijuma. Tanki filmovi amorfognog silicijuma izgleda da nude nov način za proizvodnju jeftinih solarnih celija. U ovom pristupu donekle se šrtvuje stepen korisnosti da bi se dobili solarni paneli veće površine. Minimalna prihvatljiva efikasnost takvih celija zavisi od električne snage koja se u određenoj primeni zahteva na određenoj površini, ali opšte je usvojeno da treba da iznosi 8 odsto. Celije od tankih slojeva heterogene strukture $\text{CdS} - \text{Cu}_2\text{S}$ već premašuju ovu vrednost.

Silicijum, međutim, ima nekoliko prednosti kao osnovni materijal, od kojih su najvažnije obilnost njegovih zaliha i razvijena tehnologija obrade. No sećenje kristala je skupo i rasipno, a polikristali se teško proizvode. Zato je poželjan jednostavan metod proizvodnje tankih celija velikih površina, koji bi smanjio početna ulaganja i, prema tome, brže povratio kako uloženi kapital, tako i uloženu energiju u proizvodnju tih celija. Zato su poslednjih godina izveštaji o pripremanju dopingovanog sloja amorfognog silicijuma direktnim razlaganjem silana i drugih gasova plazmom privukli pažnju mnogih istraživačkih grupa u svetu. Sada se proučavaju razni metodi proizvodnje slojeva amorfognog silicijuma i solarnih celija od njih.

Čist amorfnii silicijum (a-Si) može se pripremiti kondenzacijom silicijumske pare na hladnoj podlozi. Najveći broj silicijumskih atoma tada obrazuje tetraedarsku vezu u tankom sloju, ali nema nikakvog reda na većoj skali kakav se ima u monokristalu, gde se formiraju definisane oblasti

valentnih i provodnih elektrona. Prisustvo poremećenih veza (u pogledu rasporeda po uglovima) i nezadovoljenih (visećih) veza dovodi do pojave dodatnih dozvoljenih stanja u normalno zabranjenoj zoni između valente i provodne zone; zbog toga ivice tih zona nisu oštro definisane.

Zbog ovih dodatnih stanja u energetskom procesu, pokušaji da se modifikuje električna provodnost dodavanjem primesa imali su malo uspeha. Donedavno se, stoga, u amorfnom silicijumu nije mogla kontrolisati provodnost niti formirati p-n spoj.

Prodor je načinjen pre pet godina, kada su V. Sper i P. Lekomer, s Univerziteta u Dandiju, objavili da su dopingovali amorfni silicijum – ali posebnim metodom, za koji se sada zna da proizvodi leguru vodonika i silicijuma. Dopingovanjem ovog materijala može da se dobije bilo p-tip ili n-tip, i to širokog opsega električne provodljivosti.

Prvi način pripremanja materijala sastojao se u tihom pražnjenju indukovanim radiofrekventnim poljem na niskom pritisku u gasu silana, koji je sadržao male količine fosfina ili diborana. Pri tome je visoka energija plazme, u stvari, a ne toplota, izazivala dekompoziciju silana. Ovim procesom se vodonik tako ugrađuje u materijal da zadovolji neke od visećih veza i time reducira gustinu elektrona u procesu. Mada se može ugraditi do 20 odsto vodonika (po težini), to je više nego što je neophodno; u stvari, na višoj temperaturi vodonik napušta materijal. Ako se koriste pogrešni uslovi rasta amorfног sloja – visok pritisak, niska temperatura podlage, visoka snaga radiofrekventnog polja – može da se proizvede i polisilan koji ne daje dobre ćelije. Drugi načini ugradnje vodonika u haotičnu rešetku silicijuma dozvoljavaju da se materijal dopira skoro isto tako efektivno kao pri tihom pražnjenju; dobar materijal posebno daje „spattering“ silicijumske mete u atmosferi argona i vodonika.

Aparatura za tih pražnjenje koja se sada koristi na Univerzitetu Heriot-Vat u Edinburgu proizvodi n-tip silicijuma. Podloga se održava na 220°C , s tokom silana od $15 \text{ cm}^3/\text{min.}$, što daje pritisak od 10 Pa . Stepen depozicije

od 2 mikrometra na čas dobija se radiofrekventnim pražnjenjem od 20 W , a rezultujući sloj sadrži manje od 10 odsto silicijum-vodoničnih veza. Otud se vodonik ne gubi sve dok temperatura ne premaši onu na kojoj je vršena depozicija.

Zbog strukturalnog nereda koji u njemu vlada, amorfni silicijum absorbuje svetlost bolje nego kristalni. Njegov energetski procep ($1,6 \text{ eV}$) je širi nego u kristalu silicijuma ($1,1 \text{ eV}$) i bolje je usaglašen s energijom svetlosnih radijacija najintenzivnijih talasnih dužina. Optimalna debljina amorfnih ćelija stoga ne premaša jedan mikrometar. Ali iako su amorfni slojevi bolji apsorberi nego kristalni, teži je transport strujnih nosilaca kroz amorfno stanje, naročito transport materijala p-tipa; da bi se izbegao gubitak fotostruje usled brze rekombinacije elektrona i šupljina, koriste se ćelije s vrlo tankim slojevima. Uprkos povećanoj toleranciji takvih slojeva prema nečistoći materijala, njihova površina i električni kontakti moraju se ipak vrlo brižljivo tretirati ako hoćemo da ostanu stabilni u kompletiranom uređaju.

Najnoviji izveštaji govore da je ćelijama od amorfног silicijuma postignut stepen korisnosti od oko 8 odsto, a procenjuje se da može porasti i do 18 odsto. Američka firma Chronar iz Prinstona već je izgradila veću fabriku jeftinih amorfnih ćelija, a japanski proizvođači ih ugrađuju, kao solarne električne generatore, u džepne računare i digitalne časovnike. Tako su one iznenada izbile u prvi plan u trci za usavršavanje ćelije koja omogućuje dobijanje jeftine solarne električne energije.

Ćelije od CdS/Cu₂S i od GaAs. Pored silicijumskih ćelija, u kandidate za jeftine solarne generatore ubrajaju se i ćelije na bazi CdS/Cu₂S i GaAs. Analize pokazuju da nema suštinskih prepreka da ove ćelije zadovolje sve uslove za korišćenje solarne električne energije u velikim razmerama.

Ćelije od CdS-Cu₂S imaju tu prednost što se sastoje od vrlo tankih slojeva (debljine nekoliko mikrona) koji se jeftinim postupcima mogu nanositi na obično staklo. Razrađen je kompletan tehnološki postupak proizvodnje

CdS-ćelija stepena korisnosti od oko 6%; a u laboratorijskim uslovima postignuta je iskorišćenost i od 10%. Teorijski uvez, ove ćelije bi mogle da imaju stepen korisnosti do 16%. Nedavno je započela njihova industrijska proizvodnja u francusko-američkoj kooperaciji, i to jeftinim metodom prskanja („spreja“).

Galijum-arsenid je najpovoljniji materijal za solarne ćelije, jer njegov energetski procep iznosi 1,39 eV, što je optimalna vrednost za apsorpciju fotona solarnog spektra. Zbog toga se i vrednost dobijenog napona povećava na oko 1–1,2 V, a moguć je rad ćelija i na temperaturama do 150°C. Međutim, polazni materijal, GaAs, oko deset puta je skuplji od silicijuma, a i tehnologija izrade za sada je složenija. Ćelije od galijum-arsenida se najvećma koriste u uređajima s koncentratorima, jer mogu da rade pri koncentraciji svetlosti i od više hiljada puta. Na taj način, umesto da ćelije pokrivaju celu prijemnu površinu, ona se sastoje od znatno jeftinijeg ravnog plastičnog koncentratora Frenelovog tipa. Kao što smo pomenuli, GaAs-ćelijama moguće je postići visok stepen korisnosti, teorijski do 28%.

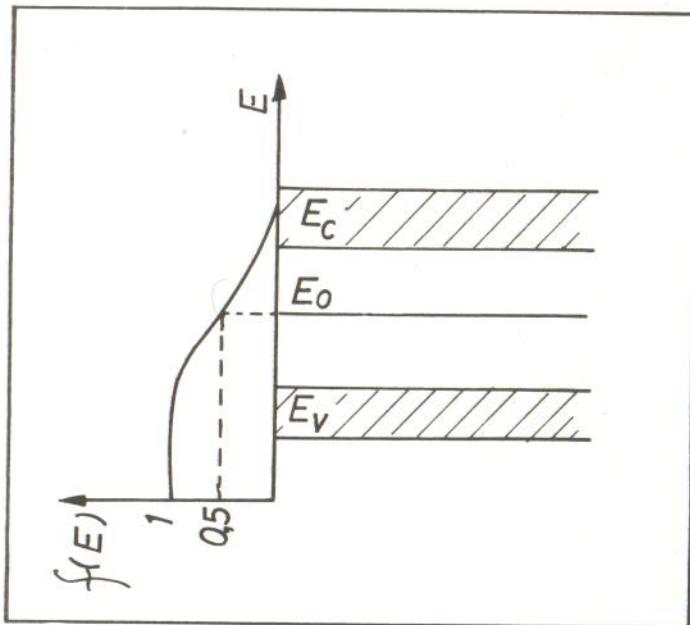
OSNOVNE JEDNAČINE RADA SOLARNE ĆELIJE

*Iz golemog crnog jajeta
Izleglo nam se neko sunce
Pozlatilo je u nama sve*

Vasko Popa

Fizičke procese u poluprovodniku najbolje ćemo razumeti služeći se energetskim dijagramima. Elektroni i šupljine predstavljaju čestice koje imaju spin jednak $h/2\pi$, gde je h Plankova konstanta, i stoga se vladaju prema Paulijevom principu, koji kaže da u jednom istom stanju može da se nalazi samo jedna čestica. Primenom pravila kvantne mehanike na mnoštvo ovakvih čestica, dolazi se do

zakona njihove raspodele po energijama. Taj zakon naziva se Fermijevom raspodelom i grafički je prikazan na sl. 67, gde ordinata predstavlja verovatnoću zauzetosti nekog stanja određene energije, koja je naneta po apscisi. Energija za koju je ova verovatnoća ravna jednoj polovini naziva se fermijeva energija, E_f , ili fermijev nivo. Broj nepopunjениh mesta ispod tog nivoa ravan je, očigledno, broju čestica u stanjima iznad njega.



Sl. 67. Fermijeva raspodela elektrona po energetskim stanjima u poluprovodniku.

Analitički izraz za Fermijevu raspodelu, tj. za verovatnoću zauzetosti energetskog stanja, glasi:

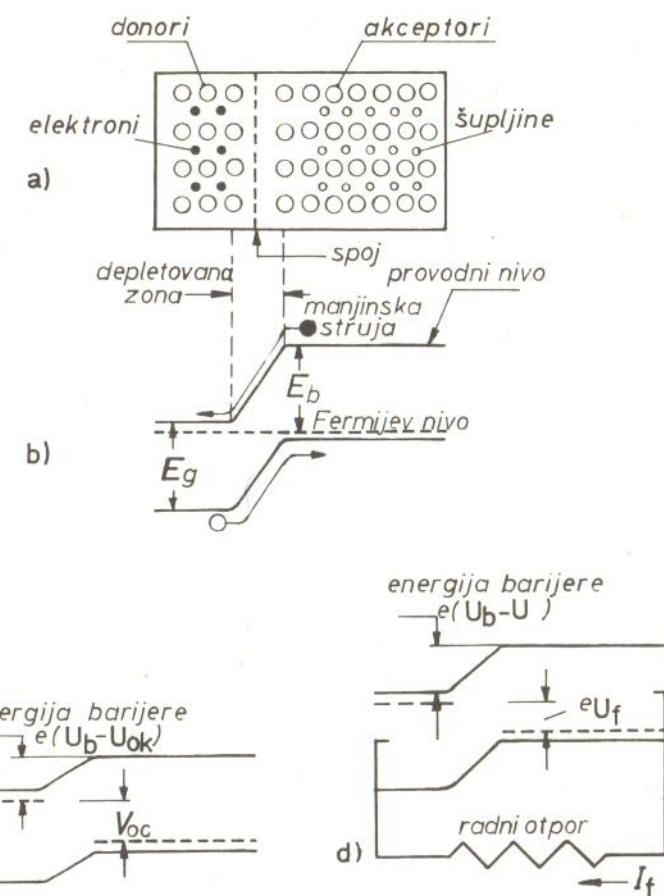
$$F(E_i) = \frac{1}{\exp[(E_i - E)/kT] + 1}, \quad (1)$$

gde je k Boltzmanova konstanta a T apsolutna temperatura.

Fermijev nivo je veoma važna veličina, koja nam pomaže da se snađemo u složenijim poluprovodničkim strukturama. Na primer, ako spojimo dva materijala koji imaju različitu raspodelu čestica po stanjima, onda će energetski položaji čestica morati da se tako uzajamno podese da im fermijevi nivoi budu zajednički, tj. na jednoj visini na energetskoj skali, jer verovatnoća zauzetosti stanja ne može da ima dve vrednosti u jednoj tački. U slučaju poluprovodnika, koji se karakteriše postojanjem procepa, fermijev nivo se nalazi unutar procepa, i to, za intrinzično čist materijal, tačno na njegovoj sredini. Dodavanjem primesa se fermijev nivo pomera: u materijalu n-tipa leži bliže provodnoj zoni, a u materijalu p-tipa bliže valentnoj zoni.

Sada možemo bolje da razumemo šta se dešava s elektronima i šupljinama kad se obrazuje p-n spoj. Izjednačavanje fermijevih nivoa u slojevima p i n znači, u stvari, promenu gustine šupljina i elektrona u njima, koja se ostvaruje procesom difuzije. Kao što smo ranije objasnili, to ima za posledicu stvaranje potencijalne barijere (sl. 68a).

Difuzija elektrona i šupljina kao većinskih nosilaca je složen proces koji stalno teče, ali kada se uspostavi ravnotežno stanje, difuzione struje kroz barijeru prosečno su jednakе nuli. Međutim, usled termalnih ekscitacija (ako je dioda u mraku), u n-sloju se stvaraju šupljine kao manjinski nosioci, koje takođe migriraju. Kada dospeju u blizinu spoja, zahvati ih električno polje barijere, koje je za njih povoljnog smera, i one „skliznu“ niz barijeru u p-sloj. Obrnuto se dešava s elektronima kao manjinskim nosiocima u P-sloju. Ovaj efekat dovodi do pojave struje manjinskih nosilaca kroz spoj, koja se naziva struja drifta u mraku ili, kraće, struja mрака. Ta struja, međutim, remeti ravnotežno stanje većinskih nosilaca, što rezultuje u njihovom dodatnom premeštanju, odnosno u dodatnoj difuzionoj struji, koja se naziva struja povratne difuzije. Struja mрака i ova struja su, razume se, jednakе po vrednosti a suprotnog znaka, tako da, u stvari, nemamo nikakvu neto struju kroz barijeru. Na sl. 68b prikazan je energetski dijagram za ovaj slučaj.



Sl. 68. Dijagram promene potencijalne barijere u fotonaponskoj celiji pri raznim uslovima.

Visina potencijalne barijere U_b i odgovarajuća energija $E_b = eU_b$ zavise od veličine energetskog procepa E_g ; E_b je približno jednaka E_g , ali je, po pravilu, uvek manja od nje.

Kao što smo objasnili, svetlost se u diodi apsorbuje pomoću fotoelektričnog efekta. Sunčev spektar sastoji se od fotonata različite energije, koja u ultraljubičastom delu iznosi

oko 3,5 eV, a u infracrvenom ispod 1 eV. Ako je energija fotona E_f veća od energije procepa (1,1 eV), onda će njegovu apsorpciju u kristalu pratiti prebacivanje elektrona iz valentne u provodnu zonu (tj. proizvodnja para elektron-šupljina). Ukoliko se to desi u n-sloju dovoljno blizu barijere, šupljine će difuzijom dospeti do nje i „skliznuti“ niz nju, kao i elektron u p-sloju. Time se u p-sloju stvara višak pozitivnog nanelektrisanja, a u n-sloju negativnog. U isto vreme se visina barijere smanjuje, što dovodi do pojave struje povratne difuzije. Pri tome se na krajevima diode, ukoliko je strujno kolo otvoreno, pojavljuje napon U_{ok} , čija vrednost zavisi, s jedne strane, od jačine svetlosti i , s druge, od barijere samog spoja. Napon U_{ok} je uvek manji od U_b . Zašto je to tako, razumeće se uz pomoć energetskog dijagrama (sl. 68c). Vidi se da pojava napona U_{ok} , indukovanih stvorenim nanelektrisanjem, razdvaja fermijeve nivoe za iznos U_{ok} , a to znači da se za toliko smanjuje i energija barijere samog spoja, koja, prema tome, sada iznosi $eU_b - eU_{ok}$. Potencijalna razlika U_{ok} naziva se napon otvorenog kola. Struja mraka nepovoljno utiče na taj napon i zato se teži da ona u ćelijama bude što manja.

Ako krajeve P-N spoja povežemo u zatvoreno strujno kolo radnog otpora R_o , dobijemo u njemu struju I_f . Budući da ćelija ima vlastiti unutrašnji otpor, R_s , koji se nalazi u seriji s otporom R_o , napon na krajevima diode, tj. radni napon U_o , biće manji od fotonapona U_f , stvorenog u diodi, za iznos $R_s I_f$, tj. $U_o = R_o I_f = U_f - R_s I_f$. Energetski dijagram za ovaj slučaj dat je na sl. 68d.

Odnosu između struje i napona u fotonaponskoj ćeliji, kao i zavisnosti tih veličina od svojstva p-n spoja, možemo dati matematičku formu i iz nje izvući precizne kvantitativne pokazatelje karakteristika ćelije. Polazimo od poznate jednačine ispravljačkog dejstva p-n diode:

$$I_d = I_e + I_h = I_o [\exp(eU/kT) - 1], \quad (2)$$

gde je I_d struja diode, I_e i I_h struje koje potiču od elektrona i šupljina, I_o struja zasićenja, U napon diode, k Boltzmanova konstanta i T absolutna temperatura. Ta jednačina prikazana je grafički na sl. 66. U ovom slučaju U predstavlja

spoljašnji napon primjenjen na krajevima diode. Pri vrlo velikom negativnom naponu se struja I izjednačuje s I_o , bez obzira na vrednost napona (zbog toga se i naziva strujom zasićenja). Tada je, dakle, struja takođe negativna i naziva se inverznom, jer potiče od kretanja manjinskih nosilaca u smeru inverznom onome struje većinskih nosilaca.

Kad diodu obasjamo, u njoj će se, kao što smo rekli, pojaviti struja I_{fi} , koja ima inverzni smer, i struja povratne difuzije I_d [koja odgovara struci diode u jednačini (2)], a u spoljnem kolu struja I_f . Tako imamo

$$I_{fi} = I_d + I_f = I_o [\exp(eV/kT) - 1] + I_f. \quad (3)$$

Zbog serijskog otpora R_s na krajevima diode, napon iznosi

$$U_f = U - R_s I_f.$$

Rešavajući jednačine (3) i (4) po U , dobijamo

$$U = kT/e \ln(I_d/I_o + 1). \quad (5)$$

Prema tome je

$$U_f = \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{I_{fi} - I_f}{I_o} + 1 \right) - R_s I_f. \quad (6)$$

Iz opisa principa rada ćelije jasno je da je fotonapon U_f uvek pozitivan, a struja I_f negativna. Jednačinu (6) stoga ima smisla crtati samo u jednom kvadrantu koordinatnog sistema ($U > 0, I < 0$). Ako prepostavimo da je R_s zanemarljivo malo, onda iz ove jednačine sledi da U - I kriva ima isti oblik za fotoćeliju kao i za diodu, samo što je pomerena naniže, očigledno zbog toga što je dominantna struja I_f , koja u spoljnem kolu ima suprotan smer od onog u diodi pri pozitivnom spoljnem naponu. Uticaj raznih vrednosti rednog otpora diode prikazan je na sl. 60.

U - I karakteristika fotonaponske ćelije se često, pogodnosti radi, crta u kvadrantu $U > 0, I > 0$, dakle kao da je struja I_f pozitivna.

Ne treba očekivati da će svaki par elektron-šupljina biti efektivan u proizvodnji struje. Postoji određena verovatnoća da se elektroni i šupljine ponovo uzajamno ponište

(procesom direktnе rekombinacije ili preko rekombinacionog centra) pre nego što dospeju na elektrode. To je naročito verovatno kada nastanu dalje od samog spoja, jer im je tada potrebno više vremena da dođu u oblast barijere, gde ih zahvata električno polje. Pri izboru materijala diode i pri njenom spravljanju mora se, stoga, voditi računa o tome da vek nosilaca bude dovoljno dug kako bi se proces rekombinacije sveo na najmanju moguću meru. Svaki izgubljeni par elektron-šupljina znači smanjenje i struje i napona celije, pa prema tome i njenog stepena korisnosti.

Iz jednačine 6 vidi se da se napon diode smanjuje s povećanjem struje njenog zasićenja I_o . Ova struja je obrnuto srazmerna veku strujnih nosilaca, te je i to razlog da se teži postizanju dužeg veka (manje brzine rekombinacije) nosilaca.

S druge strane, struja zasićenja raste s temperaturom, što znači da će na višoj temperaturi napon diode, a time i stepen korisnosti, biti manji. Ova zavisnost rada celije od temperature vrlo je složena i ne može se predstaviti jednostavnom funkcijom. Primera radi navedimo da će stepen korisnosti silicijumske celije upola opasti kada joj temperaturu podignemo sa sobne na 500 K. To ograničava mogućnost upotrebe silicijumskih solarnih celija u uređajima s koncentratorima.

PRIMENA SOLARNIH ĆELIJA

*Сонце јо прејнувам
а тоа се ојима и забегува
како сршеничка јри џрб
бо сагбена нок.*

Pagoban Pavlovski

Solarne celije se upotrebljavaju oko tri decenije i za to vreme stečeno je znatno iskustvo u vezi s praktičnim aspektima njihove primene. Ranije, dok je cena celija bila veoma visoka, njihova upotreba imala je opravdanje samo

u specijalnim slučajevima (npr. za snabdevanje električnom energijom satelita, radio-odašiljača na usamljenim mestima, usamljenih navigacionih stanica na moru i sl.). Poslednjih godina, međutim, cena celija pokazuje stalni pad i, uporedo s tim, domen njihove primene se sve više širi. Sada one delimično već konkurišu drugim energetskim izvorima (npr. kao pogonska snaga za pumpanje vode u neelektrificiranim naseljima, za osvetljenje na brodićima i u usamljenim kućama i sl.). Pošto je sve jasnije da će u toku ove decenije fotonaponski generatori postati konkurentni izvori elektroenergije na širem planu, u mnogim zemljama pristupilo se izgradnji oglednih postrojenja raznih namena, s ciljem da se na njima blagovremeno steknu praktična iskustva i proveri stvarna vrednost solarnih elektrana, a i, razume se, da se široj javnosti demonstriraju sve mogućnosti i prednosti solarne električne energije.

Najdalje su u tom pogledu odmakli SAD i Japan. U SAD su izgrađene veće solarne fotonaponske elektrane za pumpnu stanicu u Kaliforniji, snage 1 kW; za kuću u Karlajlu (Masačusets), snage 7 kW; za poljoprivrednu stanicu u Midu (Nebraska), snage 25 kW; za indijsko selo Šušalu, snage 3,5 kW; za kasarnu u Fort Noksu, snage 120 kW i mnoge druge. U Japanu je u toku realizacija projekta „Sanšajn“ (Sunčeva svetlost), prema kome će se u toj zemlji od sada do 1990. godine proizvodnja solarnih celija povećavati po godišnjoj stopi od 100 odsto.

Zemlje Evropske ekonomске zajednice, koje su ranije imale znatno skromnije ambicije od američkih i japanskih, pre tri godine prihvatile su zajednički plan i udružile sredstva za bržu primenu sunčane energije. U tom planu solarnim celijama pripada značajno mesto. Sada je evropski plan vrlo blizu američkom, u kome je godina 1986. određena kao rok za snižavanje cene solarnih generatora na konkurentnu vrednost od 700 dolara po kilovatu. Odgovarajući evropski rok zaostaje za američkim svega godinu-dve. U sledećoj glavi ove knjige iznose se detaljniji podaci o budućem razvoju na ovom polju, a sada ćemo se pozabaviti tehničkim aspektima primene solarnih generatora.

Povezivanje čelija u generator. Da bi se dobio električni generator određenih karakteristika (napona i snage), pojedine čelije se mogu vezati na red, čime se povećava napon generatora, ili paralelno, što rezultira u povećanju proizvodnje struje. U praksi se, pak, najčešće pribegava redno-paralelnoj vezi, čime se postiže i potreban napon i zahtevana snaga (struja).

Radni napon jedne silicijumske čelije osvetljene suncem pri AM1 kreće se od 0,5 do 0,6 V, galijum-arsenidne od 0,8 do 1 V, a kadmijum-sulfidne (Cu_2/CdS) od 0,5 do 0,7 V, te je jasno da će u većini primena napon jedne čelije biti nedovoljan. Štaviše, obično se na red mora vezati više desetina čelija. Snaga pojedine čelije, s druge strane, zavisi od njene površine. S razvojem tehnologije proizvodnje solarnih čelija raste njihova pojedinačna površina, ali će ona uskoro dostići optimalnu vrednost reda kvadratnog metra. Trenutno najveće čelije od silicijuma ili kadmijum-sulfida dostižu veličinu od oko 500 cm^2 . Svaka od njih daje struju od oko 10 A, odnosno snagu od oko 5 W. U zavisnosti od primene, određujemo potreban broj čelija i način njihovog sprezanja. No proizvođači obično nude gotove module s većim brojem čelija, obično spregnutih na red, pa se za specifične namene razmatra sprezanje modula u veće generatorske jedinice. Treba naglasiti da vrednost struje takvog modula određuje čelija najslabije karakteristike, pa se pri sastavljanju modula mora voditi računa da sve čelije imaju ujednačene karakteristike. Od silicijumskih čelija najčešće se prave moduli koji sadrže 33–36 redno vezanih čelija, tako da se na krajevima generatora pri prosečnoj sunčanosti dobija napon 13–18 V, koji je pogodan za opterećenje olovnih akumulatora nominalnog napona 12 V.

Iz U-I karakteristike solarnih čelija vidi se da je, u određenim granicama, dobiveni napon na njenim krajevima malo zavisao od jačine osvetljenja, dok je struja (a time i snaga) direktno сразмерna s ovom. Uz datu jačinu osvetljenja, maksimalna snaga dobija se, kao što smo objasnili, pri određenoj vrednosti radnog otpora, od koje se može odstupiti samo u uskim granicama. Ovo znači da se kao

prvi korak u primeni moraju uskladiti karakteristike generatora s radnim otporom, tj. s osobinama potrošača. Ukoliko odlučimo da više modula vežemo na red, moramo, kao i pri vezivanju čelija, voditi računa o tome da svi moduli imaju slične U-I karakteristike. Razjasnimo na jednom primeru kako ćemo odabrati solarni generator potrebnih karakteristika.

Pretpostavimo da se želi obezbediti izvor napajanja za prenosni televizijski prijemnik koji radi na jednosmernom naponu od 12 V. Jasno je da u ovom slučaju moramo da obezbedimo rezervoar električne energije za slučaj kada nema sunca, što ćemo učiniti korišćenjem olovnih akumulatora od 12 V. Potrebno je, pre svega, odrediti neophodnu veličinu, odnosno snagu solarnog generatora, kao i kapacitet akumulatora, a zatim i način vezivanja tih elemenata u električni sistem s TV-prijemnikom.

Neka TV-prijemnik zahteva snagu od 30 W, s tim da se u letnjem periodu prosečno koristi 10 časova dnevno, što zahteva energiju od $10 \times 3600 \times 30 = 1080000\text{ MJ}$ dnevno. Ako uzmemo u obzir stepen korisnosti akumulatora (0,9) i druge gubitke (oko 20 odsto), pomenutu količinu energije treba da podelimo s 0,7 da bismo dobili prosečnu energiju koju zahtevamo od solarnog generatora (1,543 MJ). Sada nam je potreban podatak o prosečnoj sunčanosti u mestu gde će se on koristiti. Na području Beograda se u letnjem periodu dobija na nagib od 30° srednja dnevna energija od 25 MJ/m^2 . Neka srednji stepen korisnosti generatora iznosi 0,12. Tada je neophodna površina generatora

$$A_G = \frac{1,543}{25 \times 0,12} = 0,51\text{ m}^2.$$

Korisno je da se specifikacija generatora izrazi i snagom dobijenom na suncu jačine 1000 W/m^2 , jer proizvođači obično navode tu karakteristiku generatora. Generator površine $0,51\text{ m}^2$ i stepena korisnosti od 0,12 imaće vršnu snagu od $0,51 \times 0,12 \times 1000 = 61\text{ W}$.

Kapacitet akumulatora određujemo prema energiji koju želimo da uskladištimo, uzimajući u obzir da ne

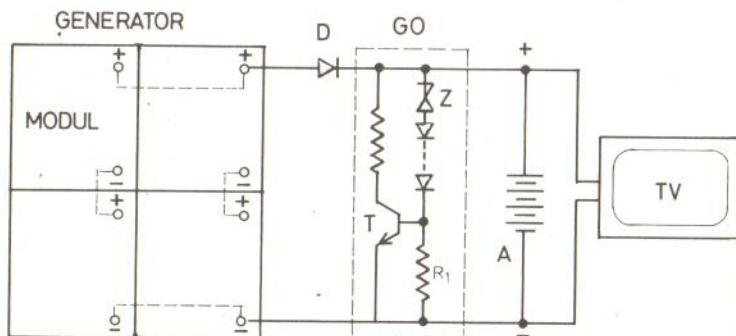
smemo rasterećivati akumulator ispod određene granice, npr. ispod 0,25 od njegove pune vrednosti. Ako se ograničimo na uskladištenje letnjeg dnevnog proseka energije, neophodni kapacitet akumulatora biće (računamo da koristimo 0,75 uskladištene energije)

$$Q_A = \frac{1,543}{0,75} = 2,05 \text{ MJ.}$$

Pošto akumulator radi na 12 V, to kapacitet izražen uobičajenim jedinicama (Ah) iznosi

$$Q_A = \frac{2,05 \times 10^6}{12 \times 3600} = 48 \text{ Ah.}$$

U ovom slučaju je, dakle, dovoljan akumulator manjeg kapaciteta. Ako bismo, pak, pod pretpostavkom da nastupi period lošeg vremena, želeli da imamo rezervu energije za nekoliko dana, onda kapacitet treba da povećamo za odgovarajući iznos, ali vodeći računa da ne preopteretimo solarni generator.



Sl. 69. Električno kolo u primeni solarnog generatora za napajanje televizijskog prijemnika.

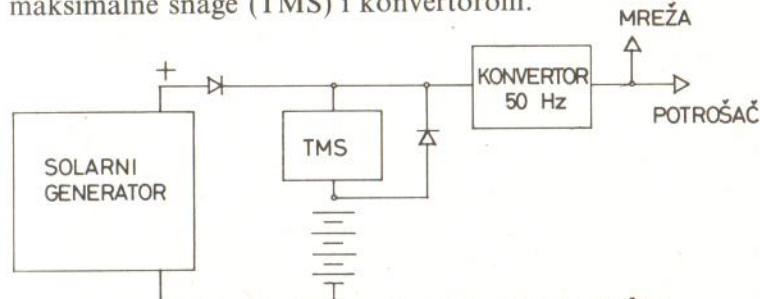
Šema električnog kola u ovoj primeni prikazana je na sl. 69. Solarni generator sastoji se od 4 identična modula, svaki snage 15 W i nominalnog napona 8 V, vezana u redno-paralelnu vezu, tako da se na krajevima dobija napon od 16 V (pri osvetljenju AM1), pogodan za opterećenje akumulatora napona 12 V. Na red s generatorom

vezana je dioda (D), koja sprečava da se akumulator rastereće preko solarnog generatora kada je ovaj neosvetljen. Paralelno s akumulatorom vezana je posebna elektronska jedinica, graničnik opterećenja (GO), sa zadatkom da ograniči struju opterećenja u akumulatoru pomoću tranzistora (T) i zener-diode (Z), koji, delujući kao promenljivi šant, primaju višak struje.

Šema solarnog generatora postaje nešto složenija ako postavimo zadatak da se radna tačka automatski prilagođava promenljivoj jačini Sunčevog zračenja, tako da generator stalno radi na tački maksimalne snage. Tada se upotrebljava specijalan elektronski uređaj, tragač maksimalne snage. U literaturi je opisano više raznih tipova tog uređaja. Rad jednog od njih zasniva se na okolnosti da se kod većine potrošača maksimalna snaga dobija kada su struja ili napon blizu maksimalne vrednosti. Elektronska digitalna jedinica stalno prati smer napona, ispravljujući ga jednosmernim naponskim pretvaračem.

Električna šema postaje još složenija pri povezivanju solarnog generatora s opštom elektrodistributivnom mrežom. Tada je potreban i pretvarač (konvertor) jednosmerne struje u naizmeničnu, koji može da bude elektromehanički, kakav se odavno koristi u elektrotehnici, ili elektronski na bazi tiristora, odnosno tranzistora, kao prekidačkih elemenata. U poslednje vreme izrađuju se tiristorski pretvarači snaga do 100 kW.

Na sl. 70 prikazana je blok-šema sistema s tragačem maksimalne snage (TMS) i konvertorom.



Sl. 70. Električno kolo za spregu solarnog generatora s opštom elektrodistributivnom mrežom.

X

BUDUĆNOST SUNČANE ENERGIJE

Doći će sunce, ledena dušo, i rasplinut će sablasti mraka...

*Doći će mlađani bog i velik će biti njegov trijumf;
klicat ćeš turobna dušo, i klicaj će tvoj biti ko prva ljubav;
ogromna će postati nada tvoja ko sjeme ljudsko,
ko tople usne moje, što pjevaju pjesmu sunca.*

Janko Polić – Kamov

Solarni pokret u svetu je danas dostigao velike razmere. To se može najbolje videti po tome što gotovo sve zemlje imaju više-manje obimne programe razvoja solarne energije. Neke čak imaju i najviše komisije za solarnu energiju, ravnopravne s komisijama za nuklearnu energiju. Ujedinjene nacije su prihvatile rad na solarnoj energiji kao jednu od značajnih aktivnosti na planu pomoći zemljama u razvoju, pa je u OUN održano i više konferencija posvećenih toj temi.

Ipak, sadašnji ideo sunčane energije, ako ne računamo hidroenergiju i biomase, u svetskim se razmerama još ne meri procentima. I dalje je, stoga, u centru pažnje energetskih stručnjaka pitanje: Ima li sunce kao energetski izvor kakvu značajniju budućnost?

Njegove prednosti su očigledne. Ono je, pre svega, obnovljiv izvor, praktično neograničen i vremenski i kvantitativno; zatim, ono je najčistiji od svih izvora, koji ne daje gotovo nikakve ekološki štetne proizvode niti direktno niti u tehnologiji, a ne nosi u sebi ni mogućnost opasnih nesrećnih slučajeva. Najzad, ono je svakome dostupan i neotuđiv izvor energije.

Ove prednosti niko ne osporava. Pitanje budućnosti solarne energije je stoga pitanje njene ekonomski prihvatljivosti.

Ona je, uopšte uzev, još skupa, naročito za one sa skromnijim investicionim sredstvima. U svetu nema jedinstvenog stava o tome da li će sunčana energija u daljem razvoju da savlada i tu značajnu ekonomsku prepreku. Stručna javnost u svetu, pa i u nas, uglavnom je podeljena na one koji veruju da će uspešno rešiti i problem ekonomski isplativosti solarnih uređaja, i one koji sumnjuju da će sunce ikada postati značajniji izvor energije.

Na stranicama časopisa „Galaksija“ vodila se prošle godine polemika upravo o toj temi između uglednog fizičara iz Zagreba Vladimira Paara i autora ove knjige. Profesor Paar je sažeto izneo najvažnije argumente onih koji ne veruju u svetliju perspektivu sunčane energije, na koje sam odgovorio u svojstvu njenog pobornika. Možda je najbolje da, kao reprezentativan prikaz oprečnih shvatanja, prenesemo tu polemiku u celini kako bi se sagledali argumenti i jedne i druge strane.

Vladimir Paar

SUNČEVA ENERGIJA – UZDANICA BEZ POKRIĆA

Sunce nije savršena stvar, jer se ne može pretvoriti u dječaka...*

Marija Čudina

Uz sve prisutniji okus nadolazeće energetske krize, danas se često, osobito u sredstvima javnog informiranja, pribjegava idejama o masovnom korištenju tzv. obnovljivih izvora energije. Sunčeva energija, tvrde njeni zagovornici, neiscrpna je, čista i besplatna. Dio jednog od jugoslavenskih otoka, na primjer Paga, bio bi, po njima, dovoljan za opskrbu čitave Jugoslavije svom potrebnom energijom.

* Stihove u članke dr Paara uneo B. L.

Ako javnost ovakve egzaltacije ne shvata kao informaciju EPP-tipa, u najmanju ruku je zbumjena. Zašto se, pored takvog obilja, u ovoj prenapregnutoj energetskoj bilanci uopće bakćemo naftom, ugljenom, uranom? Stvar, međutim, ni izdaleka nije tako jednostavna. U ovom napisu bacit ćemo jedan kritički pogled na problematiku Sunčeve energije.

Činjenica je da obnovljivi izvori sadrže goleme energije u usporedbi s potrebama civilizacije – dvadeset tisuća puta više – ali i bitnu manu: ta je energija izvanredno raspršena, rekli bismo izvanredno loše kvalitete. Toliko raspršena da je potrebno izvanredno mnogo truda, tj. opet energije, da bi se skupila i prilagodila za upotrebu. U neku ruku, čovjek se osjeća poput rode kojoj lisica nudi mnogo sočne juhe – u širokim i vrlo plitkim tanjurima. Prevelik zalogaj za današnji stupanj tehnologije. Iako se na prvi pogled zadatak može činiti jednostavnim, nije pronađeno niti se u bližoj budućnosti može očekivati neko krupnije rješenje koje bi obnovljivu energiju učinilo konkurentnom.

ISTORIJA KAO FARSA

Mogućih energetskih izvora ima posvuda, samo je pitanje koliko energije treba potrošiti da bi se izvor iskorištavao. Na tom banalnom pitanju lomi se većina energetskih alternativa današnjice, pa i Sunčeva energija.

Dobro je ponekad zaviriti u muzej starina: Pariz 1878 – parni kotao i pumpa na sunčani pogon; Pariz 1878 – frižider za proizvodnju leda na sunčani pogon; Kairo 1913 – parni stroj od 55 konjskih snaga na sunčani pogon; Danska 1910 – vjetroelektrične centrale – vjetrenjače proizvode električnu struju; Vermont 1942 – vjetroelektrična centrala od 1 250 kW; London 1980 – pumpa na energiju plime i oseke...

U najvećem dijelu svoje povijesti čovjek se, zapravo, obilno koristio obnovljivim izvorima energije i tek ih je nedavno napustio, upravo zbog toga što su bili skupi. Novi

izvori, nafta i ugljen, bili su jeftiniji. Povratak obnovljivim izvorima energije zapravo je povratak u prošlost. Ako se vraća, prošlost se vraća samo kao farsa, mogli bismo reći parafrazirajući Marksа. Povratak obnovljivim energetskim izvorima smislen je samo ako unosi novu kvalitetu. A za taj korak tehnologija izgleda nije zrela.

Kada danas govorimo o direktnoj primjeni Sunčeve energije od praktičnog interesa, radi se u prvom redu o zagrijavanju zgrada i vode pomoću Sunčeve energije. To u biti nije nova tehnologija, već predstavlja samo povratak na put starih Rimljana i Indijanaca, koji je uglavnom bio napušten poslednjih stotinjak godina. To je najjednostavniji način korištenja Sunčeve energije, s najmanje udjela nove tehnologije, a ipak najbliži komercijalnoj upotrebi. U tome je i suština sunčanoenergetskog paradoksa i njegova najslabija točka.

PORAZNI REZULTATI

Sunčani optimisti navode ove podatke: u SAD, domovini modernog solarnog pokreta, prodano je u 1977. godini 3.300 aktivnih sunčanih sistema za grijanje kuća, 63.000 sistema za grijanje vode i 35.000 sunčanih sistema za grijanje bazena za plivanje.

Ali, napominje jedan stručnjak iz Ministarstva za energiju SAD, „u ovom trenutku solarna industrija je elitistički fenomen. Tipični kupac je čovjek četrdesetih ili pedesetih godina, najčešće intelektualac s godišnjim prihodom od oko 50.000 dolara. Njegov motiv za kupnju sunčanog uređaja je statusni ili filozofski. Ekonomičnost tu nije faktor“.

Što sprečava masovni prođor sunčanog zagrijavanja? Cijena! U odnosu na uštedu goriva, sunčani uređaji za zagrijavanje uglavnom su još suviše skupi, tj. zahtijevaju suviše veliku početnu investiciju. Doduše, sunčano grijanje ne troši gorivo, ali ta ušteda vrlo sporo amortizira znatno veću cijenu samog uređaja. Nedavno završena opsežna

istraživanja u američkom gradu Augosti, koji je na geografskoj širini našeg Zadra, pokazuju da bi sunčani uređaj za aktivno grijanje kuća trebalo da radi punih 15 godina da bi se ekonomski isplatio u odnosu na konvencionalno zagrijavanje. Za prosječnog potrošača to nije privlačno. Nadalje, tehnologija sunčanog grijanja zahtijeva oko šest puta više radne snage nego, na primjer, grijanje na ugljen.

Razočaranju potrošača u SAD doprinose i dosta loši rezultati rada sunčanih uređaja. Oni su, zapravo, prilično porazni: u jednoj analizi samo 15% sunčanih uređaja za grijanje kuća funkciralo je normalno tokom prve godine rada. Pored problema nepouzdanosti, 27% uređaja gotovo da i nije postiglo uštenu energije. A za onih najboljih 15% uređaja ušteda je iznosila samo 37% energije koja se potroši uz konvencionalno zagrijavanje. U objašnjenjima tih loših rezultata spominju se problemi s cijevima, ventilima, veličinom panela, curenjem tekućine, itd. – u prvom redu problemi postavljanja i održavanja uređaja. U nedavnom izvještaju Savezne službe za procjenu tehnologije SAD kaže se: „Napori na polju primjene Sunčeve energije pretrpjeli su izvestan neuspjeh, obeshrabrujući time dalji interes i razvoj“.

SOLARNI RAJSFERŠLUS

Ekonomičnost i pouzdanost osnovni su problemi sunčanih uređaja za zagrijavanje. Najveći napori usmjereni su, stoga, na konstrukciju jeftinih sunčanih sistema za grijanje. Međutim, suština problema je u tome što za korištenje Sunčeve energije treba na desetke puta veća količina materijala i znatno više radne snage nego za proizvodnju jednake količine energije na konvencionalan način. To su značajni ograničavajući faktori mogućem sniženju cijene uređaja. Neki u šali kažu da je ovdje možda potrebniji genij čovjeka koji je izmislio rajsferšlus nego genij jednog Ajnštajna.

U obzir valja uzeti još jedan značajan aspekt problema sunčanog zagrijavanja, osobito u zemljama siromašnim

izvorima energije: energiju potrebnu za konstrukciju sunčanih uređaja. Naglo uvođenje sunčanog zagrijavanja vode i zgrada, doduše, smanjilo bi potrošnju konvencionalne energije na stambenom i komercijalnom sektoru, ali bi znatno povećalo potrebe za kognacionalnom energijom u industriji. Naročito bi porasla potrošnja energije zbog povećane proizvodnje aluminija i čelika, koji su u velikim količinama potrebni za sunčane uređaje. Stoga se u slučaju sunčanog zagrijavanja mora razmatrati ukupna energetska bilanca.

Aktivno zagrijavanje kuća pomoću Sunčeve energije bilo bi krupniji energetski „zalogaj“, no uglavnom ga je blokirala barijera ekonomičnosti. Međutim, već sada se u izvjesnoj mjeri može računati s dva manja „zalogaja“. To su pasivno grijanje zgrada (u osnovi staroindijanska metoda) i grijanje vode (u osnovi starorimska metoda).

ARHAIČNA METODA

Pasivno grijanje zgrada, tj. pažljiva konstrukcija zgrade tako da tokom zime upija i zadržava što veću količinu Sunčeve energije, kao i grijanje vode pomoću Sunčeve energije, može u mnogim predjelima biti ekonomično. Sunčani grijaci za vodu mogu se dosta rentabilno koristiti u uvjetima gdje za vrućih sunčanih dana treba mnogo tople vode, recimo u hotelima na morskoj obali. U stvari, jednostavni sunčani grijaci za vodu već dugo se upotrebljavaju u sunčanim podnebljima Kipra, Izraela, Australije, Japana. U vrućem Izraelu oko 30 posto stanovništva koristi Sunčevu energiju kao glavni energetski izvor za grijanje vode, sigurno ne bez ekonomske računice. Opsežne analize provedene u hladnjim SAD, koje je objavila Savezna služba za procjenu tehnologije, pokazuju da su sunčani sistemi za dobivanje tople vode u kućanstvima, na većem dijelu teritorija SAD, približno konkurentni dobivanju tople vode pomoću električne energije.

Još je jedan značajan izvor konfuzija i neslaganja. To je sklonost da se određenim tehnologijama, koje su nužne za

uspješno korištenje Sunčeve energije, prišije etiketa „sunčane“. Međutim, te tehnologije mogu se isto tako uspješno koristiti i uz druge energetske izvore. Kuća koja je izgrađena da koristi Sunčevu energiju kao osnovni toplinski izvor, mora biti dobro toplinski izolirana i pažljivo projektirana. Zagovornici Sunčeve energije kažu: boljom tehnologijom i promjenom ponašanja treba smanjiti energetske potrebe do te mjere da se one značajnim dijelom mogu zadovoljiti pomoću Sunčeve energije. Međutim, ne smije se zaboraviti da štednja podjednako dobro ide uz svaki energetski izvor. U spoju s konvencionalnim energetskim izvorima mogla bi se postići čak i veća ekonomičnost nego uz Sunčevu energiju. Korištenje otpadne topline, koja se sada „baca“ i u ogromnim količinama ispušta u zrak i vodu, može postati ekonomično i prije sunčanih sistema. U tom smislu, sunčano grijanje može biti skup način da se zadovolje znatno smanjene energetske potrebe toplinski izolirane zgrade [...]

Ovaj polemični pogled na zagrijavanje zgrada i vode pomoću Sunčeve energije mogli bismo zaključiti ovako: u izvjesnom energetskom vakuumu narednih nekoliko desetljeća ta će se arhaična metoda vjerovatno koristiti u ograničenim razmjerima. No, u daljoj budućnosti, kada se razviju novi efikasni izvori energije, izrazito negativne osobine sunčanog zagrijavanja, tj. potreba velike količine materijala i radne snage, vjerovatno će je izbaciti iz upotrebe.

PRESKUPI ELEKTRICITET

Kako stoje stvari s korištenjem Sunčeve energije za dobivanje kvalitetnijih oblika energije, mehaničkog ili električnog? Očito, to se može ostvariti primjenom sunčanih kolektora koji fokusiranjem Sunčeve svjetlosti postižu visoku temperaturu. Iako takvi uređaji imaju stogodišnju i ne baš uspješnu povijest, neki stručnjaci ipak smatraju da bi u budućnosti mogli odigrati stanovitu ulogu, osvježeni

boljom tehnologijom, kompjuterskom kontrolom i, osobito, budućim znatnim poskupljenjem nafte.

Svu složenost problema sunčanog elektriciteta najzorijije ćemo shvatiti iz slijedećeg podatka. Uz sadašnju tehnologiju, velika sunčana električna centrala snage 1.000 MW imala bi samo u sunčanim reflektorima ugrađeno 400.000 tona čelika, 50.000 tona stakla i 2.000.000 tona betona. Usaporemo to s materijalom ugrađenim u nuklearnu elektranu od 1.000 MW: 50.000 tona čelika, i 500.000 tona betona. Dakle, za sunčanu električnu centralu trebalo bi 8 puta više čelika i 4 puta više betona nego za nuklearnu, i dodatnih 50.000 tona stakla. Zagadivanje zraka koje bi izazvala proizvodnja i prerada tog materijala bilo bi također veliko. Količina otrovnih plinova, sumpornih i dušikovih oksida i ugljičnog monoksida odgovarala bi jednogodišnjem zagađivanju zbog elektrane na ugljen od 1.000 MW, dok bi količina dimnih čestica bila čak 10 puta veća.

Sve u svemu, uz tridesetgodišnji radni vijek, takva sunčana elektrana bila bi, s obzirom na zagadivanje zraka, nešto prljavija od elektrane na zemni plin i znatno prljavija od nuklearne elektrane, ali čišća od elektrane na ugljen. A cijena gradnje takve elektrane? Preko tri puta veća od cijene nuklearne elektrane ili elektrane na ugljen.

S druge strane, sunčanoelektrične energetske lepeze su fotonaponske ćelije, izum ovog stoljeća. Njihova budućnost je vjerovatno svjetlica, doduše prilično daleka budućnost. Tu se koriste posebni materijali, poluvodiči, koji su inače pridonijeli revoluciji u elektronici. Te ćelije direktno pretvaraju energiju Sunčeva zračenja u električnu energiju, ali s efikasnošću od najviše desetak posto. Sistem s velikim brojem spojenih fotonaponskih ćelija, koji bi u nekom sunčanom podneblju zauzimao prostor od blizu stotinjak četvornih kilometara, mogao bi davati snagu od tisuću megavata. Međutim, cijena takve sunčane centrale bila bi daleko, čak nekoliko desetaka puta previsoka. Na polju fotonaponskih ćelija potreban je još znatan znanstveni i tehnološki napredak da bi postale ekonomične. Prema procjeni specijalne komisije Američkog fizikalnog društva,

problem su toliko složeni da nije vjerojatno da će fotonaponska sunčana energetika značajnije ući u primjenu prije 2010. godine.

KRITIČNA PITANJA

Postoje dva kritična sunčanoenergetska pitanja s kojima se susreću energetski planeri. Prvo, koliko Sunčeva energija može doprineti u srednjoročnom energetskom razdoblju, od godine 1985. do 2010? Drugo, kako treba razvijati sunčane tehnologije da bi u dugoročnom energetskom razdoblju, tj. nakon godine 2010, bile konkurentne?

Odgovor na prvo pitanje je jednostavan: doprinos Sunčeve energije u srednjoročnom razdoblju, tj. od 1985. do 2010, zavisi ponajviše o tome koliko su potrošači spremni platiti da štede gorivo. Sada razmjerno velika cijena sunčanih uređaja, čak i onih najjednostavnijih i najekonomičnijih, koji služe za zagrijavanje zgrada i vode, čini prepreku širem korištenju. Za takve uređaje početne investicije su suviše velike u odnosu na konvencionalni način zagrijavanja, koji glavne troškove, one za gorivo, ravnomjerno raspoređuje kroz više godina. S druge strane, sunčane električne tehnologije su još mnogo dalje od mogućnosti ekonomične primjene.

DVA SCENARIJA

Ministarstvu za energiju SAD nedavno je podnesen izvještaj specijalne komisije CONAES Akademije znanosti. U izradi te studije sudjelovalo je nekoliko stotina istaknutih američkih znanstvenika i praktičara. Vjerojatno je to dosad u svijetu najkompetentnija energetska procjena. Komisija CONAES razradila je dva sunčanoenergetska scenarija za SAD do 2010. godine.

Umjereni scenarij zasniva se na prepostavci da osim poreznih olakšica, koje su već uvedene, neće biti drugih

državnih intervencija na energetskom tržištu u korist Sunčeve energije, da će cijene energije umjereno rasti, te da u sunčanoenergetskim tehnologijama neće biti nekih bitno novih otkrića. U tom slučaju, prodor Sunčeve energije bi do godine 2010. bio vrlo malen. Niti u godini 2000. ne bi dostigao tisućiti dio današnje ukupne energetske potrošnje u SAD. Prema tim analizama, sunčani sistemi za zagrijavanje počeli bi značajnije ulaziti u upotrebu tek poslije 2000. godine, ali ni u godini 2010. ne bi dosegli 1% ukupne energetske potrošnje, čak ni ako realna cijena konvencionalne energije poraste nekoliko puta. S druge strane, sunčanoelektrične tehnologije ne bi bile ekonomične ni u 2010. godini.

Drugi, ekstremni scenarij zasniva se, pak, na pretpostavci da će se do 1985. godine razvijati sistem oštре državne intervencije na energetskom tržištu u korist Sunčeve energije. U prvom redu, znatno bi se dotiralo njezino uvođenje, a oštro bi se oporezivala i postepeno zabranjivala izgradnja drugih tipova energetskih postrojenja. Pokretač tog ekstremnog sunčanog scenarija bila bi, dakle, snažna intervencija države na energetskom tržištu, a ne ekonomske zakonitosti. U praksi, to bi značilo zakonsku prisilu, bez obzira na cijenu, da se poslije 1990. godine obavezno uvodi sunčano grijanje prostorija i vode u sve novoizgrađene zgrade i u industrijska postrojenja. Po tom scenariju, u godini 2000. oko 10% ukupne energije otpadalo bi na direktnu Sunčevu energiju.

UBOD KOMARCA

Ovaj scenarij može se smatrati gornjom granicom mogućnosti koje su tehnološki izvedive. Ukupna cijena uvođenja takvog scenarija bila bi, prema današnjim procjenama, preko tri puta veća od cijene ekvivalentne energije iz konvencionalnih izvora, na primjer ugljena i urana. Potrebne državne dotacije iznosile bi fantastičnih 2.000 milijardi dolara! Zaista je smiješna priča o besplatnoj i svima pristupačnoj Sunčevoj energiji.

Ipak, valja se pitati o motivima koji navode na razmatranje takvog ekonomski besmislenog scenarija. Da ih iznesemo. Sunčeva energija ima izvjesne političko-ekonomsko-ekološke prednosti: smanjenje ovisnosti o uvoznoj nafti, povećanje raznolikosti energetskih izvora, što smanjuje osjetljivost na energetske poremećaje, i, napokon, Sunčeva energija ipak je čistija od energije iz ugljena. I, što je osobito važno, u SAD su posljednjih godina prilično ojačali ekološki obojeni pokreti koji se bore i protiv nuklearne energije i protiv ugljena. Ako bi ta dva energetska izvora političkom borbom bila izbačena iz upotrebe, onda bi zaista trebalo ići na znatno skuplju Sunčevu energiju. Međutim, gotovo je sigurno da se to neće dogoditi. Kao što reče urednik časopisa „World Oil“: „Energetski utjecaj Sunčeve energije u ovom stoljeću neće biti mnogo značajniji od uboda komarca u stražnjicu slona“.

AMERIČKO OTREŽNJE

Potrebno je dobro poznавanje osnova svih obećavajućih sunčanih tehnologija kako bi se početkom slijedećeg stoljeća došlo do točke u kojoj se može na temelju realističkih usporedbi odabrati najpogodnija kombinacija dugoročnih energetskih izvora: Stoga treba obavljati dugoročna istraživanja na širokom planu, uz velika finansijska ulaganja, a bez prevelike koncentracije na dokaz izvedivosti pojedinačne, još nedovoljno zrele tehnologije. U stvari, prerani demonstracijski projekti određenih sunčanih tehnologija mogu imati suprotno djelovanje. Njihovi rezultati mogli bi se uzeti kao dokaz da te tehnologije nikad neće postati ekonomične. Dosadašnja znanstvena i razvojno-istraživačka politika u SAD na polju Sunčeve energije mogla bi postati primjer takvog pogrešnog usmjerenja. U tom smislu, ne iznenađuje što u SAD dolazi do sunčano-energetskog otrežnjavanja. Američka administracija najavljuje bitno smanjenje državnog financiranja na polju Sunčeve energije, sa 577 milijuna dolara u 1981. na 220

milijuna dolara u 1982. godini, u korist istraživanja na polju nuklearne energije i niza fundamentalnih istraživanja.

Do vrlo sličnih zaključaka došlo se i u SSSR. Sovjetski energetičari kažu: „Obnovljivi izvori energije primjenjivat će se u određenim područjima koja su pogodna za njihovo ekonomično korištenje, no u vrlo ograničenim razmjerima... Do kraja 20. stoljeća ne očekuje se učešće Sunčeve energije u iole značajnijim razmjerima u pokriću rastućih energetskih potreba čovječanstva“.

Sve u svemu, možemo očekivati da će doprinos Sunčeve energije, kao i drugih obnovljivih energetskih izvora, u ovom stoljeću ostati prilično skroman. Pretjerano kratkoročno očekivanje od tih energetskih izvora u javnosti je dosta raširena, pa čak i opasna zabluda današnjice. Narednih nekoliko desetljeća treba poduzeti krupne i odlučne akcije usmjerene prema ugljenu, nafti, zemnom plinu, nuklearnoj energiji i hidroenergiji, ali na sve višoj tehnološkoj razini i uz sve veći angažman, tj. uz sve više cijene. Zavodljive iluzije o velikim mogućnostima sunčane energetike mogu biti vrlo štetne ukoliko pridonesu odlaganju ili usporavanju znatno većeg angažiranja na polju fosilnih i nuklearnih tehnologija, koje su jedine stvarne energetske nade narednih nekoliko desetljeća.

Naravno, one ograničene mogućnosti korištenja u kojima Sunčeva energija može biti ekonomična valja iskorištavati, ali na osnovu kompletnih ekonomskih računica, s osobitom pažnjom na faktor uvoza.

Branko Lalović

KO SE BOJI SUNČEVE ENERGIJE?

...Sunčeve žice idu od neba pa do zemlje,
napete kao strune. Golema harfa sja. Mnogo je ruku dira.

Vladimir Nazor

Na Sunčevim zracima danas je zaista bezbroj ruku. Mnogi pokušavaju, baš kao da su inspirisani ovim divnim