

## Curs 8

### Conversia energiei solare în energie electrică

#### Efecte fotovoltaice în semiconductori

Deși fizicianul francez Edmond Becquerel a descris pentru prima dată efectul fotovoltaic în 1839 totuși acesta a rămas o curiozitate a științei pentru următoarele trei sferturi de secol. La numai 19 ani, Becquerel a descoperit că anumite materiale ar putea produce cantități mici de curent electric când sunt expuse la lumină. Efectul a fost studiat la început în cazul materialelor solide cum ar fi seleniul care transformă lumina în electricitate cu eficiență de la 1% la 2%.

Pași importanți în comercializarea celulelor fotovoltaice s-au făcut abia în anii 1940 și la începutul anilor 1950 când procedeul Czochrolski a fost aplicat pentru obținerea siliciului cristalin extrem de pur. Prima celulă de siliciu cristalin a avut un randament de 4%. În prezent cele mai performante celule produc curent electric cu un randament de aproximativ 20%, deși circa 55% din energia solară luminoasă poate fi transformată în electricitate.

Efectul fotovoltaic și-a luat denumirea de la termenul “foto” care provine din grecescul “phos” cu înțelesul de lumină și termenul “volt” care provine de la fizicianul Alessandro Volta (1745-1827) care s-a ocupat în mod deosebit de electricitate. Deci fenomenul fotovoltaic sau fotovoltaica înseamnă în sens literar “lumină electrică” sau electricitate produsă sub acțiunea luminii. Efectul fotovoltaic este procesul fizic de bază prin care o celulă solară transformă lumina solară în electricitate. Lumina solară este compusă din fotoni sau radiație de energie solară. Acești fotoni conțin diferite cantități de energie corespunzătoare diferitelor lungimi de undă ale spectrului solar. Când fotonii lovesc suprafața unui semiconductor (componentul de bază al celulei solare) ei pot fi reflectați, absorbiți sau pot trece fără nici un efect. Numai fotonii absorbiți pot genera electricitate, deoarece energia acestora este transferată electronilor atomilor semiconductorului respectiv care își măresc energia proprie, trecând într-o bandă de conducție care generează curentul electric. Atomii de la care pleacă electronii rămân încărcăți pozitiv, producându-se goluri. Se stabilește astfel o regiune cu sarcină spațială pozitivă “regiunea n” și una negativă “regiune p”. Când fotonii luminii solare lovesc celula fotovoltaică, doar fotonii cu un anumit nivel de energie sunt capabili să elibereze electronii din lanțul lor atomic pentru a putea produce curent electric. Acest nivel de energie, cunoscut ca energia lățimii benzii de conducție este definit ca necesarul de energie pentru a putea deplasa electronul din banda de valență în banda de conducție făcând astfel posibilă conducția electrică. Semiconductorii fotovoltaici au lățimea benzii de conducție de 1-16 eV. Energia fotonului luminii variază în funcție de lungimea de undă a luminii. Spectrul luminii solare, de la infraroșu la ultraviolet, se încadrează în domeniul 0,5-2,9 eV. Deci sub acțiunea luminii, în general a cuantelor de radiație, proprietățile semiconductorilor și în special conductibilitatea electrică se modifică apreciabil ca urmare a generării de perechi de purtători gol-electron într-un număr suplimentar față de concentrațiile de echilibru. Aceasta constituie efectul fotoelectric intern, propriu semiconductorilor, care împreună cu efectul fotovoltaic stau la baza funcționării dispozitivelor optoelectronice.

Efectul fotovoltaic constă în apariția unei tensiuni electromotoare sub acțiunea luminii absorbite într-un semiconductor. Cele mai importante efecte fotovoltaice au loc în regiunea homojoncțiunilor sau heterojoncțiunilor p-n și la contactul metal-semiconductor adică acolo unde apare o barieră de potențial,

respectiv un câmp electric de contact. Sub acțiunea luminii poate fi generată o tensiune electromotoare și într-un semiconductor omogen datorită absorbției neuniforme a radiației în semiconductor. Într-adevăr, absorbția luminii fiind mult mai puternică lângă suprafața semiconductorului, numărul de perechi electron-gol generate și ca urmare concentrațiile de neechilibru ale purtătorilor vor fi mai mari în regiunile de lângă suprafața iluminată. Datorită acestor gradienti de concentrații, purtătorii vor difuza spre regiunea cu concentrații mai mici, adică spre fața opusă (neiluminată) a semiconductorului (figura 3.62).

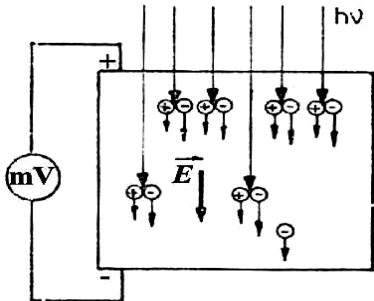


Figura 3.62. Apariția unei tensiuni electromotoare sub acțiunea luminii absorbite într-un semiconductor.

Deoarece electronii au o mobilitate în general mai mare decât a golurilor, ei se vor îndepărta mai rapid de regiunea în care au fost generați, încărcând cu sarcină negativă fața opusă a semiconductorului în raport cu fața iluminată care apare încărcată pozitiv.

Câmpul electric care apare între cele două regiuni poartă denumirea de câmp Demper, iar efectul fotovoltaic respectiv se numește efect Demper. Tensiunea Demper, care poate fi măsurată cuplând un instrument adecvat între cele două fețe ale plăcuței semiconductoare este de obicei foarte mică (0,5-2 mV). O valoare mult mai mare de sute de milivolți a tensiunii generate se obține în cazul efectului fotovoltaic la joncțiunea p-n sau la contactul metal-semiconductor.

Din fizica semiconductorilor se știe că la contactul dintre un metal și un semiconductor sau la “contactul” dintre două regiuni semiconductoare de conductibilități diferite (adică la joncțiunea regiunii p cu o regiune n) apare un câmp intern de contact și respectiv, un potențial de contact (sau de difuzie).

În figura 3.63. se prezintă structura de benzi și procesele fizice care au loc într-o celulă solară cu joncțiune p-n care este iluminată perpendicular prin stratul de conducție n mult mai subțire decât stratul p care constituie “baza” celulei solare.

O mare parte din radiația incidentă va fi absorbită în material, iar altă parte, care în cazul siliciului poate

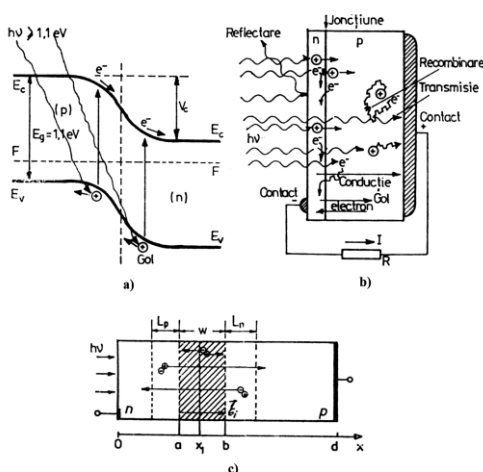


Figura 3.63. Structura de benzi și procesele fizice care au loc într-o celulă solară: a) sub acțiunea radiațiilor de energie  $h\nu$ , electronii sunt promovați din banda de valență în cea de conducție; b) închiderea circuitului electric într-o celulă solară; c) dirijarea electronilor spre zona  $n$  și a golurilor spre zona  $p$ .

atinge cca 25%, va fi reflectată de suprafața celulei, dacă aceasta nu este acoperită cu straturi antireflectante sau nu este preparată în mod special pentru a mări absorbția. Numai fotonii care au energia  $h\nu$  mai mare sau cel mult egală cu intervalul energetic al benzii interzise vor fi capabili să producă saltul electronilor din banda de valență în banda de conducție, adică să ducă la formarea de perechi electron-gol. Deoarece

intensitatea radiației luminoase scade cu distanța  $x$  (în cazul unidimensional) după legea:  $I = I_0 e^{-\alpha x}$  rezultă că lumina este absorbită cu preponderență în stratul  $n$ , și chiar în această regiune vor fi generate majoritatea perechilor de purtători electron-gol a căror concentrație scade treptat cu adâncimea (figura 3.63, b). În urma difuziei, fotopurtătorii generați vor ajunge la joncțiunea p-n, unde sunt separați sub acțiunea câmpului de barieră. Golurile vor fi dirijate spre regiunea p iar electronii spre regiunea n (figura 3.63, c). Astfel sub acțiunea luminii, în regiunea n se acumulează electroni deci rezultă o sarcină negativă suplimentară iar regiunea p apare încărcată pozitiv adică la bornele joncțiunii p-n apare o tensiune  $V_L$  care polarizează joncțiunea p-n în sens direct. Dacă circuitul extern se închide printr-o rezistență de sarcină  $R$ , atunci surplusul de electroni din regiunea n se vor deplasa prin circuitul extern spre regiunea p, dând naștere unui curent  $I_L$ , datorită iluminării fotocelulei (figura 3.63, b). Fotopurtătorii generați în regiunea de sarcină spațială de la joncțiunea p-n sau chiar cei care sunt generați în regiunea p, în urma pătrunderii unei părți a radiației incidente vor fi de asemenea antrenați și separați de câmpul intern al joncțiunii p-n dacă distanțele de la locurile în care au fost generați până la planul joncțiunii p-n sunt mai mici sau cel mult egale cu lungimile lor de difuzie  $L_n$  și  $L_p$ . În caz contrar ei se vor recombină în cea mai mare parte, iar fotocurentul generat va fi practic nul. Pentru a se evita acest lucru, grosimea regiunii de la suprafața celulei ( a regiunii n) trebuie să fie cât mai mică pentru a se obține un factor de colectare a purtătorilor cât mai ridicat.

Datorită faptului că sensul de deplasare a fotopurtătorilor este astfel încât sensul fotocurentului este opus curentului de difuzie caracteristic unei diode polarizate direct, prin rezistența de sarcină  $R$  va curge curentul rezultat:

$$J = J_s (e^{eV/KT} - 1) - J_L, \text{ unde:}$$

$J_s$  = curentul invers, de saturație;

$J_L$  = fotocurentul care apare ca urmare a generării de perechi de purtători de către fotonii absorbiți în semiconductor.

Tensiunea capătă o valoare maximă pentru  $R = \infty$  adică în circuit deschis, când  $J = 0$  ceea ce înseamnă că

$V_{CD} = \frac{KT}{e} \ln \left( \frac{J_L}{J_s} + 1 \right)$  în care  $V_{CD}$  este tensiunea la circuit deschis. În regim de scurtcircuit ( $R=0$ ) rezultă că

$V=0$  și deci  $J=J_{sc}=J_L$  adică mărimea curentului de iluminare este egală cu mărimea curentului de scurtcircuit.

Pentru valoarea  $J_{sc}$  (când  $V=0$ ) cât și pentru  $V_{CD}$  (când  $J=0$ ), celula nu poate debita putere pe rezistența de sarcină. Puterea maximă care poate fi livrată în exterior (pe o rezistență de sarcină) este dată de relația

$$P_{max} = V_m \cdot I_m.$$

Randamentul de conversie al celulei solare este:

$$\eta = \frac{P_{iesire}}{P_{intrare}} = \frac{V_m I_m}{P_{radiatie}} = \frac{C_F J_{sc} V_{CD}}{P_{solara}} \text{ în care } C_F = \frac{I_m V_m}{V_{CD} J_{sc}} \text{ reprezintă factorul de umplere.}$$

Pentru celulele solare din semiconductori monocristalini (cum sunt Si, GaAs, CdTe, InP etc.) valorile tipice ale mărimilor definite mai sus sunt cuprinse, în funcție de material și performanțele tehnologice, în limitele:  $V_{CD} = 0,5-0,9V$ ,  $J_{sc} = 10-50 \text{ mA/cm}^2$ ,  $C_F = 0,6-0,8$  și  $\eta = 6-21\%$ .

## Tipuri de celule solare

Deși efectul fotovoltaic în materiale solide a fost descoperit încă din anul 1839 de către Becquerel la joncțiunea dintre un solid și un electrolit, prima celulă solară comercială cu randament de cca 6% a fost realizată abia în 1954, cu homojoncțiune p-n în siliciu monocristalin. În figura 3.64, a) se arată schema constructivă a uneia dintre primele tipuri de celule solare din siliciu, material folosit cu preponderență pentru fabricarea dispozitivelor fotovoltaice. Această preferință pentru utilizarea siliciului rezultă din faptul că valoarea lărgimii benzii interzise a acestui material este foarte aproape de valorile optime pentru care se obțin cele mai ridicate randamente de conversie (figura 3.64, b). De asemenea,

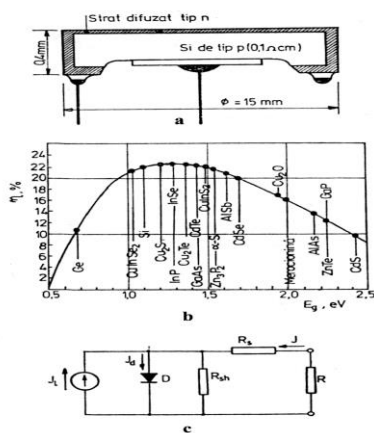


Figura 3.64. Celulă fotovoltaică de siliciu: a) schema constructivă a uneia din primele celule solare de siliciu; b) valorile lărgimii benzii interzise pentru mai multe celule fotovoltaice; c) schema echivalentă a celulei cu rezistența serie  $R_s$  și șunt  $R_{sh}$ .

În majoritatea cazurilor valoarea rezistenței șunt este mai mare de 1000 Ω. Din această cauză efectul acesteia este neglijabil. În schimb prezența rezistenței serie conduce la o cădere suplimentară de tensiune și deci la o pierdere din puterea debitată de celulă. Pentru a micșora cât mai mult valoarea rezistenței serie se caută micșorarea în primul rând a rezistenței de suprafață a stratului difuzat, adică a stratului pe care cade și în care practic este absorbită în întregime radiația incidentă. În acest scop contactul la suprafața iluminată se realizează sub forma unor benzi cu aspect de pieptene, obținându-se așa zisa celulă “grilată”. Lățimea benzilor și distanțele dintre ele sunt optimizate astfel încât să se realizeze un coeficient ridicat de colectare fapt care conduce la o creștere a randamentului celulei solare. Cu ajutorul unei geometrii optime pentru contactul grilei la suprafața stratului difuzat, au fost obținute în anul 1970 așa numitele “celule violete” cu randament de conversie ridicat (cca 16%) și cu rezistență sporită la radiații. În anii următori au fost aduse perfecționări celulelor solare din siliciu. În paralel cu dezvoltarea tehnologiilor de obținere a celulelor solare din siliciu au fost investigate o serie de alte materiale semiconductoare, care în concordanță cu prevederile teoretice, ar trebui să conducă la randamente sporite. Astfel, după cum rezultă din figura 3.64. b, materialele optime pentru realizarea celulelor solare sunt acelea ale căror valori ale benzii interzise sunt cuprinse între 1 și 2 eV. Dintre acestea fac parte, în afară de Si unele materiale compuse cum sunt : CdTe, InP, GaAs, AlSb, CuInS<sub>2</sub> și altele. Pe lângă necesitatea unei valori acceptabile pentru banda interzisă ( $V_{CD}$  cât mai mare) materialul semiconductor trebuie să mai satisfacă și alte cerințe în vederea utilizării sale pentru construcția celulelor solare. Astfel coeficientul de absorbție optică a materialului trebuie să aibă o valoare mare pentru ca radiațiile incidente să fie absorbite într-un strat superficial cât mai subțire. În acest fel se obține economie de material și o masă cât mai mică, acest ultim deziderat fiind foarte important pentru

maximul sensibilității spectrale a siliciului se află foarte aproape de regiunea corespunzătoare numărului maxim de fotoni în spectrul radiației solare iar valoarea relativ mare a benzii interzise ( $E_g = 1,1$  eV) conduce la o valoare ridicată pentru tensiunea  $V_{CD}$  în circuit deschis (cca 6 V) deci la valori mari ale puterii furnizate de celulă pe o rezistență de sarcină adecvată. Schema echivalentă a celulei solare, în care se ține seama de rezistența serie și de rezistența șunt, este reprezentată în figura 3.64, c).

În schimb prezența rezistenței serie conduce la o cădere suplimentară de tensiune și deci la o pierdere din puterea debitată de celulă. Pentru a micșora cât mai mult valoarea rezistenței serie se caută micșorarea în primul rând a rezistenței de suprafață a stratului difuzat, adică a stratului pe care cade și în care practic este absorbită în întregime radiația incidentă. În acest scop contactul la suprafața iluminată se realizează sub forma unor benzi cu aspect de pieptene, obținându-se așa zisa celulă “grilată”. Lățimea benzilor și distanțele dintre ele sunt optimizate astfel încât să se realizeze un coeficient ridicat de colectare fapt care conduce la o creștere a randamentului celulei solare. Cu ajutorul unei geometrii optime pentru contactul grilei la suprafața stratului difuzat, au fost obținute în anul 1970 așa numitele “celule violete” cu randament de conversie ridicat (cca 16%) și cu rezistență sporită la radiații. În anii următori au fost aduse perfecționări celulelor solare din siliciu. În paralel cu dezvoltarea tehnologiilor de obținere a celulelor solare din siliciu au fost investigate o serie de alte materiale semiconductoare, care în concordanță cu prevederile teoretice, ar trebui să conducă la randamente sporite. Astfel, după cum rezultă din figura 3.64. b, materialele optime pentru realizarea celulelor solare sunt acelea ale căror valori ale benzii interzise sunt cuprinse între 1 și 2 eV. Dintre acestea fac parte, în afară de Si unele materiale compuse cum sunt : CdTe, InP, GaAs, AlSb, CuInS<sub>2</sub> și altele. Pe lângă necesitatea unei valori acceptabile pentru banda interzisă ( $V_{CD}$  cât mai mare) materialul semiconductor trebuie să mai satisfacă și alte cerințe în vederea utilizării sale pentru construcția celulelor solare. Astfel coeficientul de absorbție optică a materialului trebuie să aibă o valoare mare pentru ca radiațiile incidente să fie absorbite într-un strat superficial cât mai subțire. În acest fel se obține economie de material și o masă cât mai mică, acest ultim deziderat fiind foarte important pentru

utilizarea fotocelulelor în spațiul extraterestru. De asemenea, materialul semiconductor trebuie să permită dopajul (cu impurități acceptoare și donoare) pentru obținerea homojoncțiunilor p-n și să prezinte în urma dopajului o rezistență mai redusă. Alte cerințe care se impun materialului se referă la densitatea de stări din banda interzisă, la lungimile de difuzie, la timpii de viață al purtătorilor precum și la posibilitatea de a fi ușor pasivat. Dintre materialele semiconductoare menționate anterior, cele mai bune rezultate au fost obținute pentru celulele solare cu GaAs, care are  $E_g=1,4$  eV, CdTe cu  $E_g=1,5$  eV și InP cu  $E_g=1,3$  eV. În cazul homojoncțiunilor p-n cu GaAs, de-a lungul anilor au fost aduse perfecționări care au condus la creșterea randamentului de la 9-13% la 16% și chiar 20,5%.

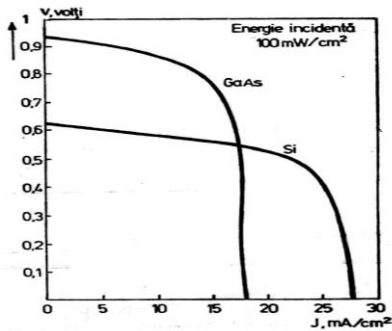


Figura.III.65. Caracteristicile J-V pentru fotocelulele Si și GaAs.

În figura 3.65. sunt reprezentate comparativ caracteristicile J-V pentru o fotocelulă cu Si și una cu GaAs în condiții de iluminare AM1 ( $100 \text{ W cm}^{-2}$ ).

Se observă că  $V_{CD}$  pentru celulele cu GaAs are o valoare mult mai mare decât în cazul celor cu Si, depășind ușor 0,9 V, în acord cu valoarea mai ridicată a lărgimii benzii interzise pentru GaAs.

Pentru celulele solare din InP-monocristal au fost obținute randamente de 5,6-7% (pentru iradiere cu  $70 \text{ mW/cm}^2$ ) iar la celulele p-n CdTe s-a obținut o eficiență de aproximativ 6% în condiții similare de iluminare. Celulele solare cu CdS au fost realizate în special sub formă de heterojoncțiuni de tipul pCu<sub>2</sub>S-nCdS, pCdTe-nCdS etc. inclusiv sub formă de straturi subțiri.

Heterojoncțiunile p-n se realizează între doi semiconductori caracterizați prin lărgimi diferite ale benzii interzise. Un asemenea exemplu îl constituie heterojoncțiunea pCuS-nCdS pentru care încă din 1954 s-au obținut randamente de cca 5-6%.

Deși natura fenomenelor care au loc în heterojoncțiuni este destul de complexă, un prim model al unei heterojoncțiuni abrupte a fost dat în 1962 de către Anderson. Unul dintre factorii importanți care condiționează performanțele unei heterojoncțiuni îl constituie gradul de potrivire al rețelei cristaline a celor doi semiconductori aduși în contact. Se impune ca pentru cei doi semiconductori, care trebuie să aibă același tip de rețea, constantele de rețea să nu difere între ele cu mai mult de 0,5-2%. O diferență mică între acești parametri există în cazul GaAs ( $a = 5,654 \text{ \AA}$ ) și Ge ( $a = 5,658 \text{ \AA}$ ), AlAs ( $a = 5,661 \text{ \AA}$ ) și GaAs ( $a = 5,654 \text{ \AA}$ ), InP și CdS, CdS și CdTe etc. Datorită posibilităților largite pe care le prezintă realizarea diferitelor tipuri de heterojoncțiuni, precum și avantajelor tehnologice și economice (consum redus de material în cazul structurilor monocristal-strat subțire), fabricarea celulelor solare cu diferite tipuri de heterojoncțiuni a căpătat o mare amploare, mai ales în ultimul deceniu. O selecție din vasta literatură științifică dedicată acestui domeniu o prezentăm numai ca informare. S-au obținut spre exemplu următoarele randamente de conversie în cazul heterojoncțiunilor : 18,5% pentru nAlAs/pGaAs în condiții AM 1,5 , 14,4% pentru nIn-SnO<sub>2</sub>/pInP în condiții AM 2, 15% pentru CdS/InP în condiții AM 2 și cu strat antireflectant de SiO<sub>2</sub>, 8% pentru strat CdS/CdTe monocristal, 6-8% pentru Zn<sub>0,1</sub>Cd<sub>0,9</sub>S/CdTe, 12% pentru strat CdS/CuInSe<sub>2</sub> monocristal etc.

O altă categorie de celule solare este aceea a celulelor cu barieră Schottky (BS) care se obține la contactul dintre un material și un semiconductor. În cazul celulelor BS, materialul trebuie să fie suficient de

subțire pentru a permite pătrunderea unei cantități cât mai mari de lumină (în general de radiație) incidentă pe celulă, deși iradierea se poate face și prin regiunea posterioară a dispozitivului, adică prin semiconductor. Lumina absorbită în metal poate excita un număr de electroni care pot trece în semiconductor peste barieră, dar acest număr este redus. Cea mai mare cantitate de fotopurtători va fi generată de către lumina absorbită în regiunea sărăcită (de lățime  $\omega_0$ ) și parțial în adâncimea semiconductorului. Fotopurtătorii generați în regiunea  $\omega_0$  și în semiconductor vor fi separați rapid de câmpul de contact întocmai ca la o joncțiune p-n. Ca și la celulele cu homojoncțiune p-n, fotocurentul debitat pe o rezistență de sarcină va face ca dispozitivul să fie polarizat direct, deși natura curentului de întineric - care curge în sens invers - este diferită în cazul celor două categorii de celule.

Datorită posibilității alegerii unui număr mare de perechi metal-semiconductor și mai ales datorită simplității și economicității procesului tehnologic (se evită procesele de difuzie care cer temperaturi ridicate) au fost realizate celule solare cu barieră Schottky cu mai multe categorii de semiconductori (Si, GaAs, CdTe, CdS, InP, CuInS<sub>2</sub> etc) inclusiv sub formă de straturi subțiri. Celulele solare cu barieră Schottky pot fi modificate în urma introducerii unui strat subțire izolator între metal și semiconductor rezultând o structură MIS sau MOS (în cazul în care izolatorul este un oxid). Acest strat intermediar reduce curenții de scurgere ai barierei Schottky și atât timp cât nu împiedică colectarea purtătorilor, poate contribui la îmbunătățirea performanțelor celulelor solare cu asemenea structură. Variante diverse de celule solare MIS, SIS, MISIM, OSOS etc. au fost realizate cu diferite metale, oxizi și materiale semiconductoare, inclusiv sub formă de straturi subțiri. Pe asemenea structuri au fost obținute randamente de peste 10% în unele cazuri pentru Si de tip n sau p, precum și pentru alți semiconductori, ceea ce este destul de convenabil avându-se în vedere tehnologia relativ ieftină de producere a celulelor respective.

### **Celule solare cu straturi subțiri**

Straturile subțiri metalice, semiconductoare și izolatoare (în general oxizi) sunt utilizate foarte mult în construcția celulelor solare chiar în cazul celulelor cu semiconductori monocristalini fiind folosite pentru contacte, acoperiri antireflectante, straturi izolatoare ( de exemplu în structuri MIS) pentru protecție sau pasivare etc. Pe de altă parte, în vederea realizării economiei de material semiconductor și a unui preț de cost mai redus, atenția cercetătorilor s-a îndreptat spre posibilitatea obținerii celulelor solare în întregime sub formă de straturi subțiri. Această posibilitate a fost demonstrată încă din 1954, când Reynolds și colaboratorii săi au obținut celule solare cu heterojoncțiuni pCu<sub>2</sub>S/nCdS cu randament destul de mare pentru acest tip de celule. Cu toate că de atunci până în prezent au fost studiate și realizate celule solare cu straturi subțiri și din alte materiale (CdTe, CdSe, Si, GaAs, InP etc) cele mai multe lucrări au fost destinate heterojoncțiunilor Cu<sub>2</sub>S/CdS sau altor variante pe CdS- strat subțire pentru care au și fost obținute rezultate din ce în ce mai bune în ceea ce privește randamentul de conversie.

Începând cu anul 1954, cea mai mare parte a producției de celule solare în special cu Si monocristalin a fost utilizată pentru alimentarea cu energie electrică a sateliților, navelor cosmice și stațiilor orbitale, astfel încât problema prețului acestor celule nu s-a situat pe primul plan. Pentru aplicațiile terestre însă, prețul pe Watt-oră sau kWh se punea cu stringență, urmărindu-se micșorarea drastică a acestuia pentru ca celulele solare să poată intra în competiție cu celelalte surse de energie. Prețul ridicat, mai întâi sute apoi zeci de

dolari pentru un Wh al celulelor cu siliciu monocristalin sau cu GaAs (monocristalin) a impus căutarea unor tehnologii și materiale mai ieftine dintre care tehnologiile proprii straturilor subțiri s-au dovedit foarte promițătoare. Pentru realizarea celulelor solare se pot folosi straturi monocristaline (epitaxiale, benzi etc.) policristaline sau amorfe. Straturile monocristaline, în special cele epitaxiale, necesită suportți cristalini-deci scumpi- și temperaturi ridicate de depunere ceea ce conduce la un preț ridicat al celulelor solare. Straturile policristaline sau cele amorfe necesită temperaturi mici de depunere și suportți ieftini, necristalini, rezultând un preț mic pe Wh. Totodată se pot obține celule de suprafețe mai mari și productivități ridicate, datorită proceselor de automatizare.

Celulele solare cu homojoncțiuni p-n pe straturi subțiri prezintă avantajul înțelegerii mai complete a mecanismelor care au loc în aceste structuri, teoria pentru asemenea dispozitive fiind clarificată de-a lungul anilor. Dezavantajul principal constă în aceea că pentru obținerea regiunilor p și n sunt necesare dopări puternice iar în acest caz viteza de recombinare superficială- la suprafața supusă iluminării- va fi foarte mare, fapt care micșorează factorul de colectare deci și performanțele celulei solare. Cele mai răspândite structuri de celule solare cu straturi subțiri sunt cele cu heterojoncțiuni p-n cu barieră Schottky, acestea din urmă în variantele MIS. MISIM, SIS și altele. Pentru asemenea structuri sunt însă necesare eforturi care trebuie depuse în continuare pentru înțelegerea teoretică a fenomenelor ce au loc în respectivele dispozitive și a mecanismelor lor de funcționare.

Materialul semiconductor în care sunt generate perechi electron-gol, sub acțiunea luminii (în general a radiațiilor ionizate) trebuie să aibă un coeficient de absorbție al luminii cât mai mare pentru ca majoritatea fotonilor să fie absorbiți într-un strat cât mai subțire deasupra joncțiunii p-n sau în vecinătatea contactului metal-semiconductor, în cazul celulelor cu barieră Schottky. Din acest punct de vedere, într-un strat subțire de GaAs de cca 1 μm grosime este absorbită o cantitate de radiație care ar putea fi absorbită într-o plăcuță de Si de 100 μm. Astfel straturile subțiri de GaAs par mai convenabile decât straturile subțiri de Si pentru obținerea celulelor solare, deși randamentul de conversie pentru celulele de GaAs- strat subțire s-au dovedit a fi destul de mici. Pe de altă parte, straturile subțiri de siliciu amorf s-au dovedit a fi potrivite pentru obținerea celulelor solare, datorită absorbției puternice a radiației în grosimi de cca 1-2 μm (echivalent cu 50-100 μm de siliciu cristalin). Materiale puternic absorbante sunt: CuInSe<sub>2</sub>, Cu<sub>2</sub>S, CdTe și altele. Astfel Cu<sub>2</sub>S absoarbe aproximativ 90% din lumina solară incidentă pe strat, corespunzătoare energiei mai mari decât energia benzii sale interzise ( $E_g = 1,2 \text{ eV}$ ) pe o grosime de minim 0,4 μm, fapt care a făcut ca în combinație cu CdS să permită obținerea uneia dintre cele mai promițătoare tipuri de celule solare. În celulele Cu<sub>2</sub>S/CdS, deoarece ambele materiale sunt puternic absorbante, lumina poate fi absorbită pe distanțe foarte scurte în structura celulei. De fapt aproape 90-99% din radiația incidentă, în intervalul spectral cuprins între ultraviolet și 1000 nm, va fi absorbită în stratul subțire de Cu<sub>2</sub>S. Grosimea optimă a acestui strat s-a dovedit a fi în jur de 2000 Å. Dacă stratul de Cu<sub>2</sub>S este mai subțire se pierde răspunsul spectral corespunzător lungimilor mari de undă și în același timp va crește rezistența serie. Dacă respectivul strat este prea gros, fotopurtătorii vor fi creați prea departe de joncțiune (scade factorul de colectare) iar răspunsul spectral corespunzător lungimilor mici de undă va fi afectat. Grosimea optimă a stratului de GaS poate fi cuprinsă între 5 și 25 μm. Deoarece stratul de CdS este

policristalin, iar dimensiunile cristalitelor depind de grosimea stratului, acesta trebuie să aibă 5-10  $\mu\text{m}$ . Simplificat, procesul tehnologic actual de obținere a celulelor solare cu  $\text{Cu}_2\text{S}/\text{CdS}$  constă în depunerea- prin evaporare termică în vid- a unui strat policristalin de CdS de 10-20  $\mu\text{m}$  grosime, pe un suport placat cu Cu și Zn. Peste stratul de CdS se formează un strat subțire de  $\text{Cu}_2\text{S}$  prin scufundarea structurii cu stratul de CdS într-un mediu apos cu CuCl la temperatura de 20<sup>0</sup>C, timp de câteva zeci de secunde. Stratul de  $\text{Cu}_2\text{S}$  poate fi depus și prin evaporarea în vid a CuCl, urmată de un tratament termic adecvat sau prin pulverizare catodică reactivă. Contactul superior este realizat sub forma unei grile de Au, Cu sau Ag iar întreaga celulă este capsulată într-un înveliș transparent, de regulă din material plastic. În tabelul 3.13. sunt prezentate caracteristicile câtorva celule solare cu straturi subțiri.

Material semicond.	Barieră	Grosime peliculă, $\mu\text{m}$	Strat suport	$\eta$ , %
Si (policrist.)	p-n	30	Grafit	3,6
GaAs	Pt	50	Mo	5
GaAs	$\text{Cu}_2\text{Se}$	15	Al	4,6
InP	CdS	10	Grafit	2,8
CdS	$\text{Cu}_2\text{S}$	2	Sticlă	4,9
CdTe	$\text{Cu}_2\text{Te}$	10	Sticlă	6,0
Si (amorf)	p-i-n	1,6	Sticlă	2,4
Si (amorf)	Au	2-3	Sticlă	4,0
Organic	Ge	0,05	Sticlă	0,1

Tabelul 3.13. Caracteristicile a câtorva celule solare cu straturi subțiri.

### **Tendințe în obținerea și perfecționarea celulelor solare**

Celulele solare cu semiconductori solizi pot fi folosite ca sursă independentă de energie electrică - în urma conversiei directe a energiei solare - atât în spațiul extraterestru cât și în aplicații terestre. Este evident că în funcție de destinație și de locul utilizării, aceste celule trebuie să îndeplinească anumite condiții.

Pentru aplicații extraterestre se pune mai întâi problema greutateii modulelor cu celule solare, apoi cea a randamentului dispozitivelor și cea a rezistenței lor la radiațiile penetrante și la condițiile de temperatură severe. Celulele solare din siliciu monocristalin, cu randamente de peste 12-14% s-au dovedit foarte potrivite pentru a lucra în cosmos deși aceste celule sunt totuși influențate de radiațiile penetrante. Pentru a mări rezistența la radiații s-a apelat la “celule violete” și la “celule negre” la care suprafața iluminată este special prelucrată pentru a mări gradul de absorbție al luminii incidente. De asemenea au fost elaborate celule solare dopate cu litiu, dopant care conferă respectivelor celule o rezistență mărită la radiații.

Arseniura de galiu reprezintă de asemenea o variantă importantă pentru fabricarea celulelor solare destinate funcționării în spațiul cosmic. Deși mai puțin rezistente la radiații de mică energie (electroni, protoni), celulele din GaAs sunt mult mai rezistente decât cele din Si la radiația de energie înaltă. Prin protejarea celulelor cu un ecran subțire, transparent, care absoarbe radiațiile de mică energie, aceste celule devin mult mai tolerante decât cele de Si pentru toată gama de radiații. Pe de altă parte, celulele solare din GaAs și  $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$  pot lucra în regim de înaltă intensitate a luminii sau în lumină concentrată ceea ce



lărgeste aria de aplicabilitate a acestora chiar și în condiții terestre. Trebuie amintit că prețul pe Wh în cazul Ga As este cu 1-2 ordine de mărime mai mare decât în cazul celulelor din Si, datorită costului ridicat al materialelor inițiale și al tehnologiilor de realizare. În privința tehnologiilor celulelor solare din  $Ga_{1-x}Al_xAs$  sau GaAs, acestea s-au perfecționat continuu, iar randamentul celulelor solare a crescut mai ales datorită obținerii straturilor epitaxiale de bună calitate prin epitaxii din fază lichidă, ajungând la peste 20% în cazul celulelor din GaAs.

Pentru aplicațiile terestre, în vederea intrării în competiție cu alte surse de energie, celulele solare trebuie să satisfacă câteva cerințe principale și anume:

- să aibă un preț de cost redus;
- să posede un coeficient de conversie a energiei solare cât mai ridicat;
- să aibă o durată lungă de funcționare;
- materialele din care sunt fabricate să nu fie deficitare.

Siliciul rămâne în continuare cel mai indicat material pentru celulele solare deoarece: materia primă din care se extrage (în principal  $SiO_2$ ) există în cantitate mare pe Pământ, tehnologia siliciului este bine pusă la punct, iar raportul cost/performanță este acceptabil. Deși prețul pe Wh al celulelor solare din siliciu a scăzut mult în ultimii 20-25 ani este necesar ca în viitor să fie micșorat în continuare, astfel încât după anul 2000 să ajungă sub 0,2 \$ pentru un Wh. Au fost dezvoltate noi tehnologii de extragere și purificare a siliciului și au fost adoptate noi direcții de prelucrare a acestuia pentru obținerea celulelor solare cu preț de cost micșorat. Cele mai promițătoare rezultate se pare că vor fi obținute prin folosirea metodelor de creștere a benzilor monocristaline de siliciu (dezvoltate de companiile Tyco- USA, Toshiba și Toyo Silocon- Japonia). Prin această metodă, o bandă (panglică) monocristalină este obținută în mod continuu, prin tragere verticală sau orizontală din topitură suprasaturată. Fâșia monocristalină are fețe plan paralele lucioase, care nu mai necesită prelucrări ulterioare în vederea producerii de celule solare ci numai pe cele de formare a joncțiunilor, contactelor, stratului reflectant și încapsulării. În acest fel costul celulelor solare poate fi micșorat cu aproape un ordin de mărime, deși randamentul acestora rămâne destul de mic. Pentru mărirea randamentului celulelor solare cu homojoncțiuni p-n monocristaline, s-a urmărit micșorarea pierderilor energetice, în special a acelor datorate: reflexiei radiației incidente, vitezei mari de recombinare superficială, valorii rezistenței serie și a valorilor mici pentru lungimile de difuzie.

În vederea măririi factorului de colectare prin micșorarea vitezei de recombinare superficială au fost create celule solare cu câmp intern, atât în regiunea stratului difuz cât și în regiunea posterioară a bazei, lângă contactul posterior. Prezența unui gradient de concentrație în aceste regiuni dă naștere unui câmp intern suplimentar, care întoarce fotopurtătorii generați, dirijându-i spre joncțiunea p-n, unde acționează câmpul electric de separare. Deși necesită o operație suplimentară de difuzie, au fost obținute diferite variante de celule solare cu câmp superficial posterior, cu randamente care se apropie de 20% pentru siliciu și GaAs.

Alte tipuri îmbunătățite de celule solare cu homojoncțiuni monocristaline se referă la: celulele cu bandă interzisă variabilă, pentru acoperirea unei mari regiuni din lungimile de undă ale spectrului solar, celulele cu strat de inversie la suprafața iluminată, celulele "tandem" formate din mai multe joncțiuni p-n suprapuse. Toate aceste tipuri de celule au fost create pentru obținerea unui randament global mai ridicat.

Pentru micșorarea ariei ocupată de panourile fotovoltaice și pentru a realiza totodată economie de material deci pentru a realiza un preț de cost mai mic, numeroase studii și experimentări au fost dedicate lucrului celulelor fotovoltaice în lumină concentrată. În acest regim pot lucra cu predilecție celulele GaAs, care pot funcționa și la temperaturi mai ridicate decât cele cu Si. Au fost experimentate celule solare cu GaAs cu concentrare de până la 2700 și chiar 5000 sori, pe când cele de siliciu funcționează acceptabil în lumină concentrată de circa 50-100 sori. Precauții speciale trebuie luate în cazul acestor celule mai ales în ceea ce privește micșorarea drastică a rezistenței serie, deoarece la randamente mari ele sunt caracterizate prin valori ridicate ale curentului, lucru care poate conduce la pierderi mari de putere pe rezistența internă (serie) a dispozitivului. În acest scop se adoptă o grilare specială, optimizată pe calculator și în multe cazuri realizată sub formă de rețea deasă prin fotolitografiere.

Tot pentru nevoile terestre au fost efectuate studii de fezabilitate și proiectate mari centrale cosmice (de 5000-10000 MW) cu panouri fotovoltaice, energia electrică obținută fiind transmisă și recepționată pe Pământ prin microunde.

Tehnologiile bazate pe heterojuncțiuni, în special pe straturi subțiri, pe structuri BS sau de tip MIS, SIS, MISIM, OSOS etc. capătă de asemenea o mare extindere datorită evitării proceselor de difuzie pentru realizarea joncțiunilor, obținând astfel un preț mai mic pentru celulele solare. Este adevărat că în cazul materialelor policristaline, randamentele sunt de regulă mai mici, dar se estimează că randamente minime de cca 10%, corelate cu un preț de cost foarte mic, creează premise favorabile dezvoltării acestor tipuri de celule solare și intrării lor în competiție cu alte categorii de conversie energetică. S-au obținut randamente de peste 10% pentru celule  $\text{Cu}_2\text{S}/\text{CdS}$  și de peste 17% pentru structuri SIS.

### **Centrale electrice solare**

Centralele electrice solare funcționează după ciclul termodinamic cunoscut, în care energia solară este utilizată pentru încălzirea și vaporizarea fluidului de lucru, înlocuind astfel combustibilii clasici. La 19 noiembrie 1976, pentru prima dată în istoria energiei, o centrală electrică solară a debitat energie electrică pe o rețea națională de distribuție. Este vorba de centrala Odeillo (din Pirinei- Franța) care este realizată prin utilizarea mai multor heliostate și a concentratorului parabolic al cuptorului solar, instalat cu mult timp înainte în această localitate. Centrala de la Odeillo dezvoltă o putere de 64 kW (figura 3.66.).

În prezent sunt în funcțiune în mai multe țări centrale electrice solare (Israel, SUA, Franța etc.).

Deoarece radiațiile solare nu pot fi captate continuu timp de 24 ore, este necesar ca instalațiile solare să fie prevăzute cu mijloace de stocare a energiei termice, care să permită funcționarea instalației pe o anumită perioadă, în condiții de cer acoperit și chiar noaptea.