

Efectul fotovoltaic, Celule solare

(Material orientativ pentru documentare și formare a unui nivel minimal de cunoștințe de bază.)

Istoric

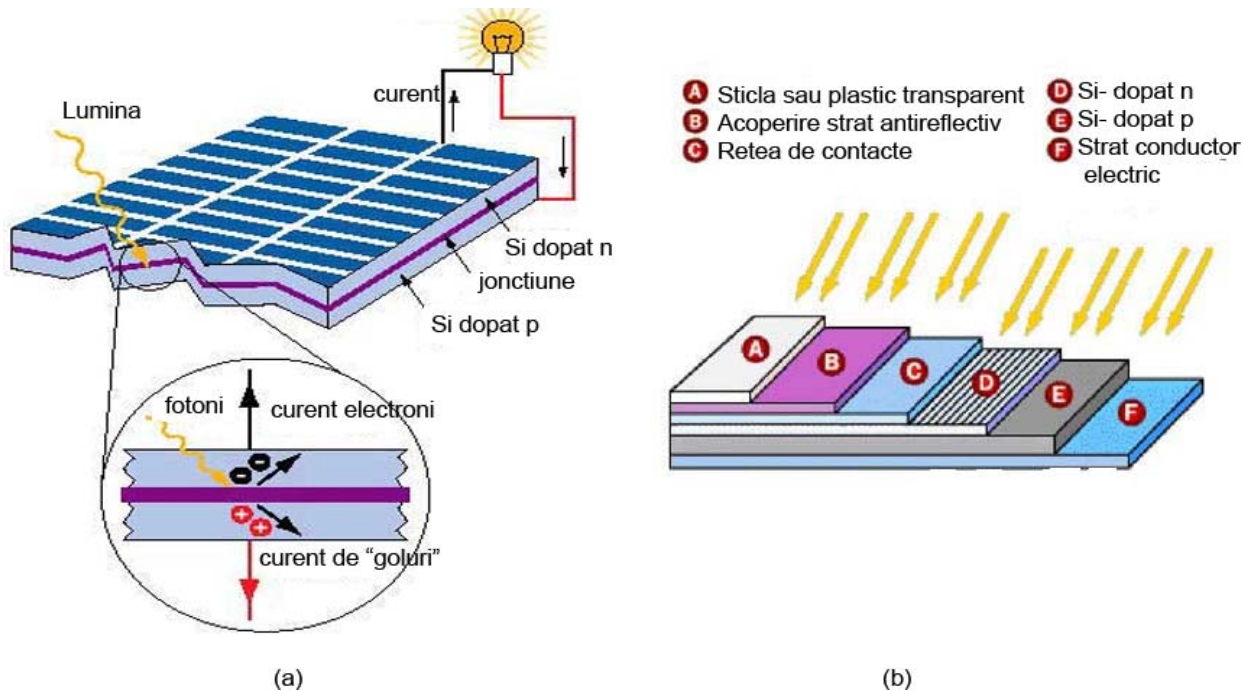
Efectul fotovoltaic este principalul proces fizic care stă la baza tehnologiilor de construcție a celulelor solare care convertesc lumina de la soare în electricitate. În anul 1839, Edmund Becquerel, fizician francez în vârstă de 19 ani, descoperă efectul fotovoltaic în timpul unui experiment cu o celulă electrolitică făcută din doi electrozi de metal. Acesta a descoperit că anumite materiale pot produce mici cantități de energie electrică atunci când sunt expuse la lumină.

Prima celulă solară a fost construită de Charles Fritts care a acoperit seleniu semiconductor cu un film subțire de aur pentru a forma o joncțiune metal semiconductor. Dispozitivul avea o eficiență de 1%. Celulele solare au devenit de uz practic ca surse de energie după ce Russel Ohl, în anul 1941, a dezvoltat tehnologia joncțiunilor p/n ce a permis atingerea unor eficiențe mai mari de 5% prin anii 1950-1960. Astăzi celulele solare dezvoltate la nivel de laborator ating eficiențe >20%, iar la nivel industrial se situează în medie la 13 % (vezi raportul comisiei Europene- bibliografie).

Vârsta modernă a tehnologiilor solare a venit în 1954 de la Bell Laboratories care dezvoltau experimente cu semiconductori, descoperind accidental ca siliciu dopat cu anumite impurități era sensibil la lumină. Daryl Chapin, Calvin Fuller și Gerald Pearson [D. M. Chapin, C. S. Fuller, and G. L. Pearson; J. Appl. Phys. 25, 676 (1954)] au inventat primul dispozitiv practic de conversie a energiei solare în energie electrică cu o eficiență de 6%. Prima baterie de celule solare a fost construită în aprilie, 1954. Primul panou solar a fost folosit pe satelitul Vanguard 1 lansat în Martie 1958 și era format din celule solare produse Hoffman Electronics. Acest eveniment a creat interes pentru producerea și lansarea de comunicații geostaționare cu sateliți alimentați cu energie electrică de la panouri solare.

În 1970 a fost creată prima heterostructură de GaAs pe care s-au construit celule solare de mare eficiență. Zhores Alferov [Alferov, Zh. I., V. M. Andreev, M. B. Kagan, I. I. Protasov, and V. G. Trofim (1970). *Fiz. Tekh. Poluprovodn* 4: 2378, Nobel Prize 2000] a creat primul heterotranzistor care a revoluționat telefonía mobilă și comunicațiile prin satelit. Tehnologia folosită MOCVD- Depunere chimică din fază de vapori a compușilor metaloorganici- dezvoltată în 1980 a permis elaborarea celulelor solare pe GaAs. În SUA prima celulă solară cu eficiența de 17% față de coeficientul AM0 (vezi anexa) a fost dezvoltată de Applied Solar Energy Corporation (ASEC). ASEC a dezvoltat celule cu “joncțiune duală” prin depunerea de GaAs pe substrat de Ge ce a permis tensiuni mari în circuit deschis. Celule cu joncțiune duală pe structuri GaAs au atins în anii 2007 o eficiență de 30% AM0.

Principiul de realizare



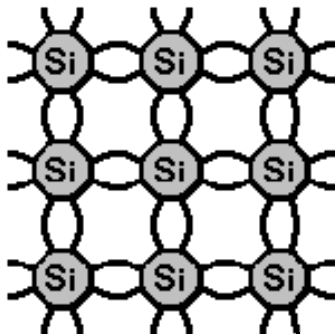
O celulă fotovoltaică este alcătuită din două straturi de siliciu semiconductor dopat. Fotonii din radiația solară ce cad pe siliciu sunt absorbiți inducând procese de generare de electroni liberi. Doparea siliciului cu diferite metale/nemetale intensifică generarea de sarcini electrice.

Doparea cu fosfor induce în siliciu sarcini negative suplimentare. Siliciu dopat cu fosfor se numește dopat n sau N-Si. Siliciu dopat n este un conductor electric mai bun decât siliciu monocristalin pur. (Fosforul are valența 5, iar siliciu valența 4, prin urmare orice impuritate cu valența mai mare decât a siliciului este capabil să doneze electroni suplimentari).

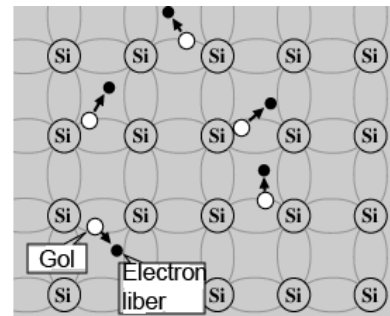
Doparea cu bor produce semiconductori de tip p (exces de sarcini pozitive). O lipsă de electroni generează locuri cu ioni pozitivi în siliciul dopat p . Aceste locuri încărcate pozitiv se numesc “goluri”.

Pentru a înțelege cum funcționează orice dispozitiv electronic, inclusiv celulele fotovoltaice este necesar în primul rând să vedem structura semiconductoarelor care stau la baza întregii electronice de astăzi. Germaniu și siliciu sunt reprezentativi, însă siliciul este cel mai intens utilizat în aplicațiile moderne.

Structură și dopare

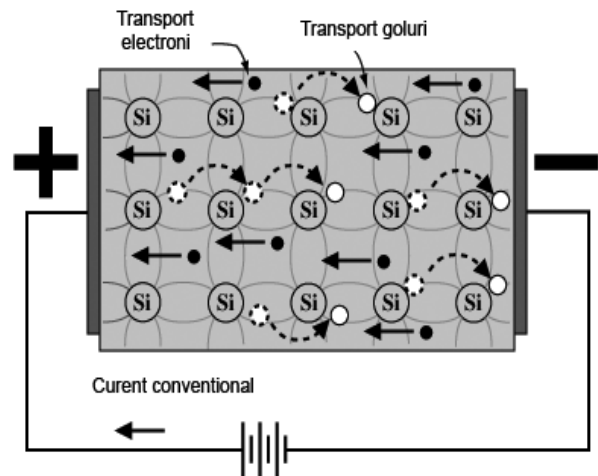


Structura siliciului pur este reprezentată printr-un cristal tridimensional în care atomii ocupă vârfurile unui cub după cum sunt dirijați și electronii săi de valență.



Siliciu este element din grupa a IV-a în Tabelul Periodic din care face parte și carbonul, germaniul. Caracteristica esențială a acestor elemente este ca fiecare atom are patru electroni de valență pe care îi poate pune în comun cu cei ai atomilor vecini formând legături. Dacă există un factor extern, de exemplu, temperatura, atunci cu creșterea ei, datorită agitației termice o parte din legături eliberează electroni în rețeaua cristalină. În consecință crește conductivitatea electrică a siliciului.

Locurile rămase neocupate de electroni (valențele libere) se numesc goluri. Concentrațiile de goluri (n_p) și electroni (n_e) sunt egale, iar semiconductorul se numește *intrinsec*. Transportul sarcinilor în semiconductorul intrinsec sub acțiunea unui potențial este prezentă sugestiv în figura alăturată.



Curentul care “curge” prin semiconductorul intrinsec este format din două componente: electroni și goluri. Electronii au avut nevoie pentru a “rupe” legatura covalentă de o anumită cantitate de energie minimă necesară pentru a putea trece liber în spațiile interstițiale ale rețelei de siliciu. Această energie minimă de a trece din stare legată (valență) în stare liberă (de conducție) se numește energia benzii interzise. Golurile rămân localizate pe stările energetice libere din zona de valență (bandă de valență) care are o structură de nivele de energie provenită din nivelele atomice de valență ale siliciului. Domeniul de energii pe care le iau electronii liberi formează banda de conducție.

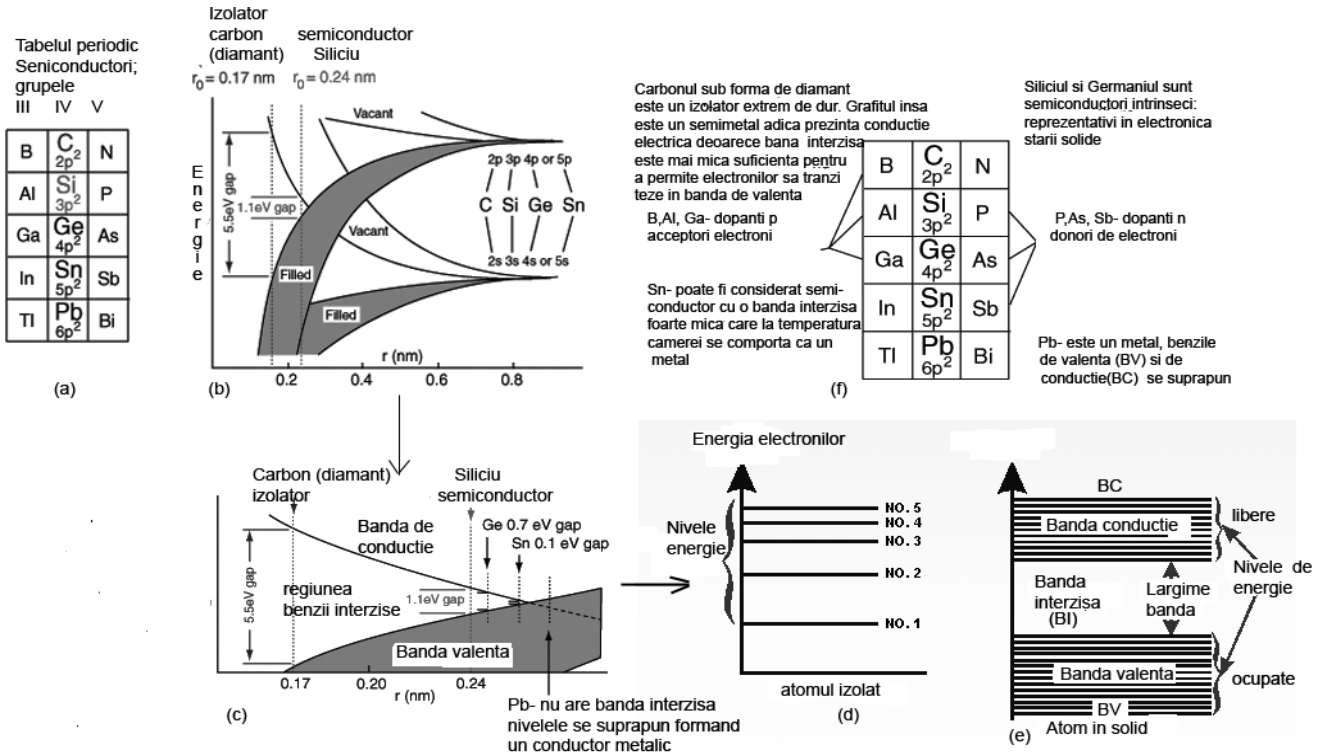
În concluzie electronii “sar” între pozițiile rețelei pentru a umple vacanțele lăsate de electronii eliberați. Ei se mișcă liber în zona de energii ce formează banda de conducție. Golurile se mișcă în banda de valență în sens opus. În exterior întotdeauna măsurăm un curent de electroni și nu de goluri.

Cum se formează structura de benzi?!

Atomii individuali au electronii dispuși pe nivele de energie. Electronii de pe ultimul nivel energetic sau electronii de valență sunt determinanți în inducerea caracteristicilor de conducție a materialelor.

Atunci când atomii sunt în stare liberă (vapori sau gaz) ei au configurația electronică conform descrierii din Tabelul Periodic (a).

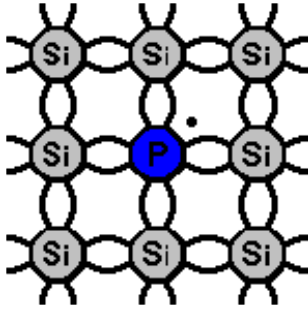
Prin condensare și solidificare distanța dintre atomi se reduce până la atingerea unor valori de echilibru care sunt dependente de natura atomului și structura nivelelor energetice a electronilor de valență.



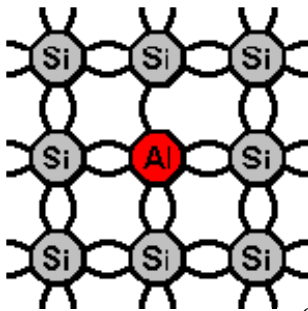
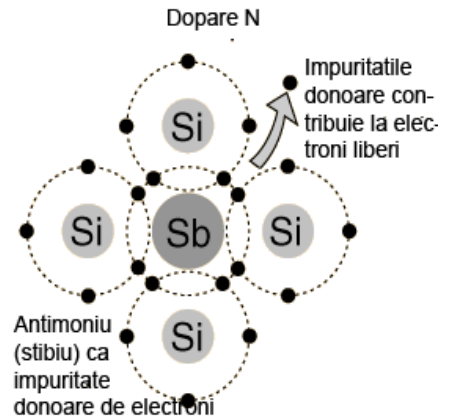
Deși au aceeași configurație electronică ns^2p^2 funcție de natura interacțiilor reciproce și a miezului ionic nivelele energetice ale atomilor se separă în subbenzi de valență pe care o ocupă electronii de valență și în benzi cu nivele energetice libere (banda de conducție) (b,c,d,e)

Lărgimea benzii interzise și natura conducției electrice este puternic determinată de distanța interatomică, diametrul atomilor, natura configurațiilor interne a restului de electroni (miezul ionic).

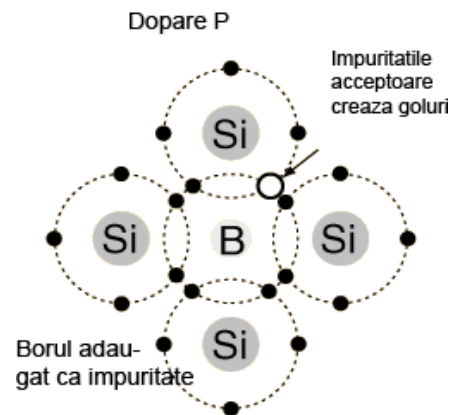
Dopare n și p



Introducerea de impurități cum ar fi arsen sau fosfor prin substituirea atomilor de siliciu induce o creștere a numărului de electroni, iar semiconductorul devine dopat n . Arsenicul sau fosforul sunt elemente din grupa a V-a din tabelul periodic, având 5 electroni de valență. Patru din ei formează legături chimice cu atomii de siliciu adiacenți. Al cincilea electron rămâne neîmperecheat și în consecință poate fi deplasat sub acțiunea unui câmp electric. *Semiconductorii cu exces de electroni se numesc de tip n .*



Dacă se introduc substituțional atomi cu trei electroni de valență (de exemplu Al din grupa a-III-a sau Ga) atunci se pot forma numai trei legături cu atomii adiacenți de siliciu. Cea de a patra legătură nu poate fi formată și în consecință avem un “gol” în cristal sau o lipsă de electroni. Experimentele arată că acolo unde există un loc liber atunci electronii se vor deplasa spre acel spațiu pentru a-l completa.



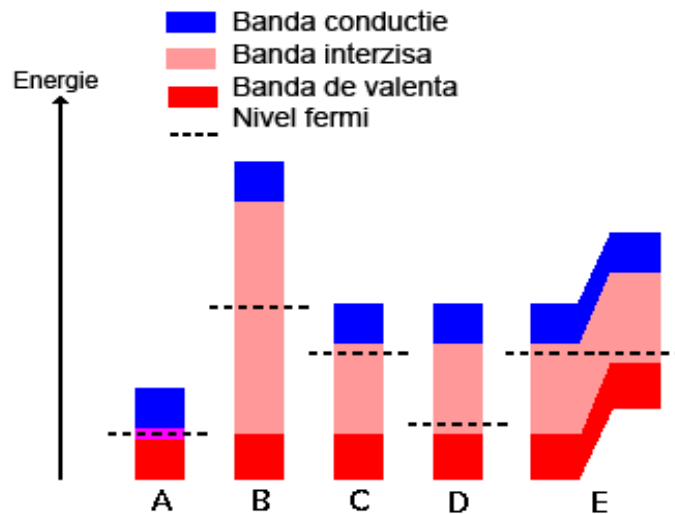
Electronii ce se deplasează să umple un gol va lăsa în urmă legătura covalentă “goală” pe care alți electroni vor încerca să o completeze. În acest sens golurile apar a se deplasa ca sarcini pozitive prin cristal. *Acesta este un semiconductor de tip p .*

Echilibrul termodinamic al purtătorilor de sarcini, potențialul chimic sau nivelul Fermi

Nivelul Fermi sau potențialul chimic

Pentru a înțelege cum funcționează joncțiunile din celulele solare este necesar să introducem o noțiune ce descrie echilibrul sarcinilor electrice din semiconductorii intrinseci sau extrinseci (dopați).

Într-un semiconductor intrinsec concentrațiile purtătorilor de sarcini sunt egale. Se pune întrebarea: care este nivelul maxim de energii pe care îl pot ocupa electronii?. Identic pentru goluri. La 0K unde agitația termică este nulă atunci electronii vor ocupa un nivel maxim al energiei, iar golurile unul minim, iar concentrațiile lor sunt egale. Pentru aceasta, termodinamica ne spune că potențialele chimice ale celor două componente trebuie să fie egale. Enrico Fermi dezvoltă aceasta teorie și deduce că la 0K energia maximă pe care o ocupă electronii se află la mijlocul benzii interzise pentru semiconductorii intrinseci (A, B).



Banda de conducție (BC): zona de energii unde conducția electrică (mișcarea liberă a electronilor) este posibilă. Electronii cu aceste energii se “eliberează” de atomii originali și se mișcă liber prin cristal.

Banda de valență (BV)– zona de energii unde conducția electrică nu este posibilă. Electronii sunt legați de atomi.

Banda interzisă- intervalul energetic dintre banda de valență și cea de conducție unde electronii nu pot rămâne. Ei trebuie fie să câștige energie pentru a trece în banda de conducție fie să piardă energie și să revină în banda de valență.

Nivel Fermi- acesta este cel mai înalt nivel de energie din cristal ce poate fi populat cu electroni la temperatura de 0K. Electronii cu energie mai mare decât valoarea E_F sunt disponibili pentru conducție, invers ei sunt legați în structura cristalului. Nivelul Fermi este identic ca semnificație cu potențialul chimic definit în termodinamică.

Diagrama A- reprezintă un conductor electric cum ar fi Cu sau Ag. BC și BV se suprapun, iar electronii trec liber fără a fi necesar un supliment de energie.

Diagrama B prezintă un izolator tipic (sticle, ceramici). Toți electronii sunt localizați pe structura atomică și necesită energii mari pentru a fi extrași în BC.

Diagrama C reprezintă un cristal dopat N de tipul Si sau Ge. Lărgimea benzii interzise este prezentă (0.5-3 eV), dar mult mai mică față de un izolator ($> 5\text{eV}$). Dacă el este dopat N, atunci electronii au suficientă energie termică pentru a sări în BC. Nivelul Fermi este deplasat înspre banda de conducție.

Diagrama D- reprezintă un semiconductor de tip P. Impuritățile de tip P tind să atragă și să rețină electronii liberi. Aceasta “trage” nivelul Fermi în jos spre banda de valență.

Când punem în contact un semiconductor n cu unul p are loc un transfer reciproc de sarcini până când nivelele Fermi ale celor două se “echilibrează” (egalitatea potențialelor chimice). În consecință benzile de conducție și de valență se deplasează spre atingerea unei noi stări de echilibru (diagrama E). La interfața de contact dintre cei doi semiconductori se va forma un strat de sarcini electrice (strat de baraj) caracteristic jonctiunii $p-n$ ce va crea un câmp electric a cărui valoare maximă depinde de concentrațiile dopanților.

Acum este simplu de înțeles de ce semiconductorul n este expus la lumină într-o celulă solară. Sub acțiunea radiației incidente se generează perechi electron-gol care vor reduce bariera de potențial și va permite “curgerea” unui curent electric.

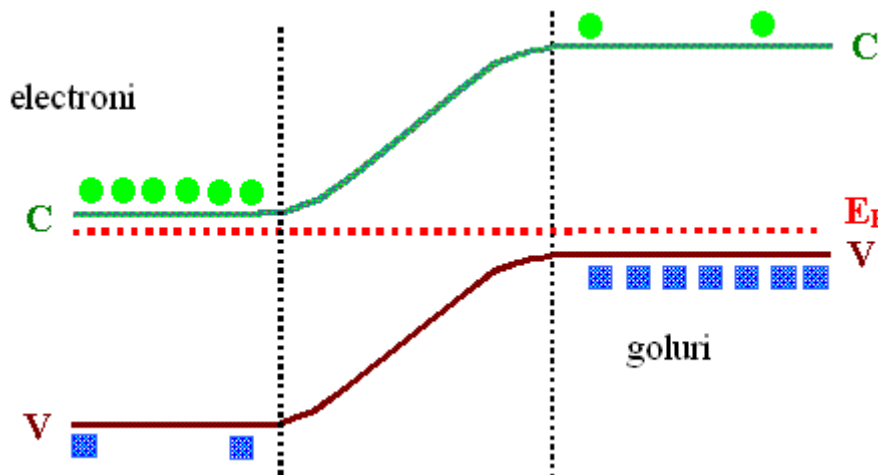
În concluzie, conversia cuantei luminoase în energie electrică poate fi făcută cu ajutorul semiconductorilor, pentru care excitarea electronului și generarea de perechi electron-gol indusă de cuanta luminoasă are un puternic efect asupra conductivității.

Nu este suficient ca electronii să fie excitați și să se miște liber, dacă nu este nici o forță care să îi facă să se miște. O astfel de forță poate fi provocată de prezența unui gradient al potențialului electric, cum ar fi cea găsită în joncțiunea p-n a semiconductorilor dopați.

Joncțiunea p-n (cum vede un student ecuațiile și formulele)

O componentă esențială a unei celule fotovoltaice este joncțiunea p-n. Joncțiunea p-n se formează atunci când un semiconductor de tip p și un semiconductor de tip n sunt în contact, deci au o suprafață comună. Inițial în joncțiunea p-n electronii vor merge în direcția n-p datorită densității de electroni mai mare în materialul de tip n decât în cel de tip p și datorită densității de goluri mai mare în banda de valență pentru materialul de tip p decât cel de tip n.

Putem determina condiția de echilibru în funcție de energia Fermi. Inițial, energiile Fermi (potențialele chimice) pentru materialul de tip p și cel de tip n, μ_p și μ_n , sunt diferite dar la echilibru $\mu_p = \mu_n$ (Fig. 1).



Numărul de electroni în banda de conducție poate fi determinat astfel:

$$n_c = \int_{E_c}^{E_f} n'(E) f(E) dE$$

, unde E_c și E'_c sunt limitele de energie din banda de conducție, $n'(E)$ este numărul de stări per unitatea de energie în interval și $f(E)$ este distribuția Fermi-Dirac. Dacă electronii sunt liberi rezultă că:

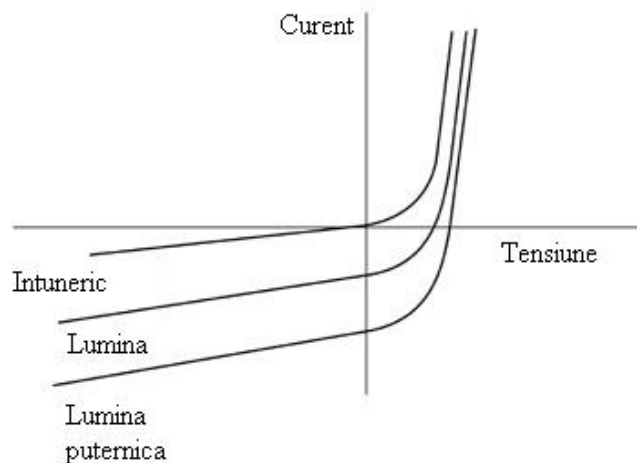
$$n'(E) = 4\pi h^{-3} (2m)^{3/2} E^{1/2}$$

,unde h este constanta lui Planck și m este masa electronului.

Celule Solare (versiunea expunerea la radiație semiconductorul p)

Sistemele fotovoltaice sunt sisteme ce produc energie electrică direct din radiația solara. Sistemele fotovoltaice sunt sisteme ce produc energie electrică fără a consuma combustibili fosil.

Jonctiunea $p-n$ poate fi folosită pentru a converti radiația solară în energie electrică. Celula solară este formată în așa fel încât materialul de tip p să poată fi expus la radiația solară incidentă, de exemplu prin depunerea unui strat subțire de material de tip p pe un semiconductor de tip n . În întuneric, curentul total dat de jonctiune este zero.



Generații de celule solare

Celulele solare sunt clasificate în trei generații care indică ordinea în care ele au căpătat importanță practică-comercială. În prezent prima generație de celule solare este și cea mai larg

comercializată ocupând aproape 90% din piață în 2007 [Hirshman, William P; Hering, Garret; Schmela, Michael (March 2008), *Market Survey: Cell & Module Production* <http://www.photon-magazine.com/>]

Prima generație

Sunt dispozitive unijoncțiune construite pe siliciu monocristalin. Joncțiunile *p-n* pe siliciu monocristalin ating limita teoretică în eficiență de 31 % [Green, Martin A (Aprilie 2002), "Third generation photovoltaics: solar cells for 2020 and beyond", *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures* **14** (1-2): 65–70]. Rata de amortizare a investiției este estimată la 5-7 ani (vezi bibliografie, Photovoltaics_payback)

A doua generație

Celule solare în strat subțire. Sunt rezultatul dezvoltării unor noi tehnologii alternative de producție: depunerile din faza de vapori, electrodepuneri, pulverizare ultrasonică, procese ce simplifică metodele de fabricație și costurile per celulă solară. A doua generație de materiale de mare succes sunt: CdTe (telurida de cadmiu), CuInGaSe (selenide Cu Indiu Cadmiu), siliciu amorf, siliciu micromorfic. Aceste materiale sunt depuse secvențial în filme subțiri pe substraturi de sticlă, ceramică sau chiar plastice.

CIGS- cupru-indiu-galiu-diselenid: este un compus I-III-VI₂ cu caracteristici de material semiconductor. Materialul este o soluție solidă de Cu-In-Se (abreviere CIS) și seleniura de galiu cu formula chimică, CuIn_xGa_(1-x)Se₂, unde x ia valori între 0 și 1. Structura semiconductorului este tetraedrică de tipul calcopiritelor cu lărgimea benzii interzise variind continuu de la 1 eV (x=1, CuInSe₂) la 1.7 eV pentru CuGaSe₂ (x=0)

Celule DSC- celule solare cu sensibilizatori pe bază de coloranți. Descoperite de Grätzel sunt celule solare care exploatează transferul de electroni de la un colorant printr-un electrolit solid sub acțiunea radiației solare.

CdTe- Teluridele de cadmiu sunt utilizate ca ferestre optice în infraroșu și ca material pentru celulele solare. De regulă este utilizat un sandwich de CdTe-CdS pentru a forma o joncțiune fotovoltaică *p-n*.

Comercializarea acestor tehnologii este încă dificilă. În 2007 compania First Solar a realizat o centrala fotovoltaică de 200MW din celule solare CdTe. Würth Solar comercializează GICS producând 15MW. Nanosolar comercializează tehnologie GICS cu o capacitate de producție de 430MW în 2008.

A treia generație de tehnologii

Se referă la îmbunătățirea performanțelor electrice ale generației a doua (tehnologiile planare pe straturi subțiri) menținând prețurile de cost cât mai mici.

Cercetările curente au ca scop atingerea eficienței de conversie de 30-60%. Ele pot depăși limitele teoretice de conversie calculate pentru o jonctiune $p-n$ pe siliciu monocristalin în anii 1960 de către Shockley și Queisser (limita Schockley). Limita estimată de 31% pentru 1 soare (1370 W/m^2).

O alta direcție este de a concentra radiația solară pe arii de celule fotovoltaice utilizând oglinzi Fresnel. Se pot atinge prin concentrare aproximativ 46000 de soari și în consecință un randament sporit.

Celulele fotovoltaice multijonctiune sunt proiectate să absoarbă spectrul solar de la infraroșu la UV ceea ce va permite să funcționeze și pe perioada nopții.

Eficiența celulelor solare funcție de tehnologia utilizată (compilare NIST-Japan)

Tip	Eficiența conversiei	Fiabilitate	Cost	Productia de energie	Alte caracteristici	Aplicatii principale
Single-crystal-silicon cell	14 17				Abundant records of use	Satellite use Power-generation use
Polycrystalline-silicon cell	12 15	○		○	Suitable for volume production in future	Power-generation use
Amorphous-silicon cell	6 9	○			Tends to deteriorate rapidly. Suitable for flexible products	Consumer-product use (Electric calculators, wristwatches, etc.)
Single-crystal-compound cell (GaAs)			×		Heavy and fragile	Satellite use
Polycrystalline-compound cell (CdS, CdTe, CuInSe ₂ ,etc.)	○	○	○	○	Low material availability. Some materials contain environmental pollutants.	Consumer-

Pentru avansați

Efectul fotovoltaic- teorie (pentru avansați)

Constă în apariția unei tensiuni electromotoare într-un semiconductor iluminat.

Interacțiunea dintre un solid și undele electromagnetice determină, printre alte fenomene, absorbția radiației incidente. În cazul semiconductorilor, unul din mecanismele absorbției constă în tranziția unui electron din banda de valență în banda de conducție (în urma absorbției unui foton). În consecință numărul purtătorilor de sarcină liberi crește, ceea ce determină creșterea conductivității electrice, fenomen numit **fotoconductibilitate** (sau efect fotoelectric intern). Generarea perechilor electron-gol sub secțiunea luminii este o condiție necesară pentru producerea efectului fotovoltaic dar nu și suficientă. Noii purtători de sarcină trebuie să se redistribuie, determinând apariția unei diferențe de potențial între suprafața iluminată și cea neiluminată. Redistribuirea poate fi determinată de:

- 1) generarea neuniformă a purtătorilor de sarcină într-un semiconductor omogen (efectul Dember);
- 2) un câmp intern local din semiconductor care poate fi realizat prin doparea diferită a semiconductorului (joncțiune p-n);
- 3) un gradient al timpului de viață al purtătorilor de sarcină;
- 4) prezența unui câmp magnetic (efectul fotoelectromagnetic), etc.

Într-un semiconductor intrinsec, banda de conducție este nepopulată la 0K și este separată printr-o bandă interzisă E_g de banda de valență ocupată. Diferența dintre valoarea maximă a energiei în banda de valență și valoarea minimă în banda de conducție determină valoarea minimă a intervalului de energie interzis.

Într-un semiconductor extrinsec, nivelele energetice ale impurităților se găsesc în zona interzisă, mai aproape de marginea inferioară a zonei de conducție pentru atomii donori și în vecinătatea marginii superioare a zonei de valență pentru atomii acceptori. Deoarece diferența de energie dintre nivelele impurităților și marginea zonei de valență sau de conducție este mică ($\approx 0,01$ eV) chiar la temperatura camerei, energia termică este suficientă pentru ionizarea

acestor atomi. Acest lucru explică creșterea conductibilității electrice determinate de impurități.

Pentru majoritatea semiconductorilor intervalul de energie interzis E_g are valori între 0,2 și 2,3 eV. Deci vor produce tranziția electronului din B.V. în B.C. fotonii cu frecvențe de cel puțin:

$$\nu = \frac{E_g}{h} \quad (1)$$

Intervalului energetic 0,2 – 2,3 eV îi corespunde intervalul de lungimi de undă 6,2 – 0,5 μm , deci fotonii din domeniul vizibil și infraroșu sunt cei ce determină tranziția.

Dacă notăm cu n_0 și p_0 concentrațiile electronilor și golurilor în lipsa iluminării și la echilibru termic, sub acțiunea unui câmp electric E apare un curent de drift cu densitatea:

$$\vec{j} = \vec{j}_n + \vec{j}_p = n_0 e \vec{v}_n + p_0 e \vec{v}_p \quad (2)$$

Ținând cont de legătura dintre vitezele v_n și v_p și mobilitățile μ_n și μ_p ($v_n = \mu_n E$, $v_p = \mu_p E$), se obține:

$$j = e(n_0 \mu_n + p_0 \mu_p) E = \sigma_0 E \quad (3)$$

deci

$$\sigma_0 = e(n_0 \mu_n + p_0 \mu_p) \quad (4)$$

Dacă în urma iluminării concentrațiile electronilor și golurilor se modifică cu Δn și Δp , $\Delta n = \Delta p$, schimbarea conductivității va fi:

$$\frac{\Delta \sigma}{\sigma_0} = \frac{\Delta n \mu_n + \Delta p \mu_p}{n_0 \mu_n + p_0 \mu_p} = \frac{(1+b)\Delta n}{n_0 b + p_0} \quad (5)$$

În relația (5) s-a notat $b = \mu_n / \mu_p$.

Notăm cu α coeficientul de absorbție definit ca raportul dintre cantitatea de energie absorbită de unitatea de volum în unitatea de timp și energia incidentă pe unitatea de suprafață în unitatea de timp. Se poate arăta că atunci când $\alpha d \ll l$ (unde d – grosimea stratului semiconductor) intensitatea radiației este uniformă în probă și deci Δn și Δp nu variază în probă. Dacă însă $\alpha d \gg l$, intensitatea radiației la distanța z în probă este:

$$I(z) = I_0(1 - \beta)e^{-\alpha z} \quad (6)$$

unde β este coeficientul de reflexie la suprafața iluminată. În consecința va apare un gradient de concentrație care va determina apariția unor curenți de difuzie pentru goluri și electroni. Considerând o variație liniară a concentrației, densitățile curenților de difuzie sunt:

$$j_n = eD_n \frac{\partial n}{\partial z} \quad (7)$$

$$j_p = -eD_p \frac{\partial p}{\partial z} \quad (8)$$

unde D_n și D_p sunt coeficienții de difuzie. Curentul total va fi suma dintre curentul de drift (3) în prezența iluminării și cel de difuzie:

$$j_z = e(n\mu_n + p\mu_p)E_z + e\left(D_n \frac{\partial n}{\partial z} - D_p \frac{\partial p}{\partial z}\right) \quad (9)$$

Ținând cont că: $n = n_0 + \Delta n$, $p = p_0 + \Delta p$ și $\Delta n = \Delta p$, rezultă:

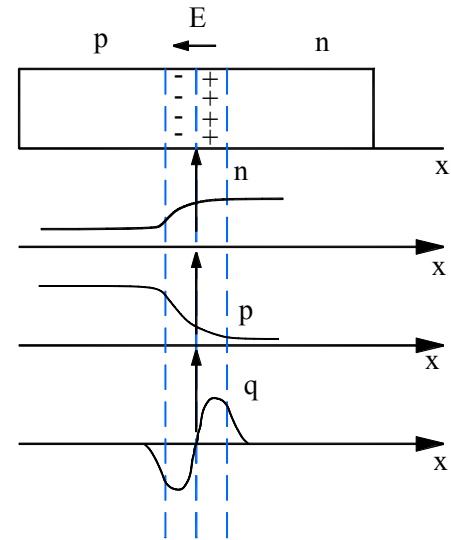
$$j_z = e(n\mu_n + p\mu_p)E_z + e(D_n - D_p) \frac{\partial \Delta n}{\partial z} \quad (10)$$

Așadar, în circuit deschis ($j_z=0$) între fața iluminată și cea neiluminată apare un câmp electric:

$$E_z = \frac{(D_n - D_p) \frac{\partial \Delta n}{\partial z}}{n\mu_n + p\mu_p} \quad (11)$$

și deci o diferență de potențial V . Dacă $D_n=D_p$ (atunci când $\mu_n = \mu_p$) atunci $E_z=0$ și $V=0$.

Într-o joncțiune $p-n$, ca urmare a difuziei electronilor din domeniul n în domeniul p și difuziei golurilor în sens invers, apare un câmp electric în stratul de baraj și corespunzător o diferență de potențial (fig. 1). Acest câmp electric împiedică continuarea difuziei și în același timp duce la apariția unor curenți de drift care se opun celor de difuzie. În stare de echilibru, curenții de difuzie vor fi egali cu cei de drift, astfel încât curentul rezultat va fi nul.



Dacă joncțiunea $p-n$ este iluminată, se vor crea perechi electron-gol în exces. Dacă $ad \gg l$, fluxul de fotoni va varia exponențial cu adâncimea, conform relației (6). Electronii în exces creați în regiunea p pot difuza prin joncțiune și coboară bariera de potențial spre zona n . Golurile în exces create în zona n pot difuza și ele prin joncțiune. Apare astfel o sarcină pozitivă pe fața p și una negativă pe fața n . Aceste densități de sarcină micșorează diferența de potențial de la j_0 la $j_0 - V$.

Ecuția de curent -tensiune este:

$$j = j_0 \left(e^{\frac{eV}{kT}} - 1 \right) + j_L \quad (12)$$

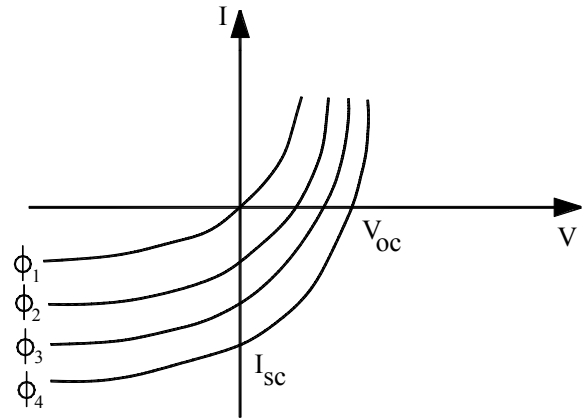
unde: j_0 – densitatea curentului invers la saturație în absența iluminării, V – tensiunea aplicată joncțiunii, k – constanta lui Boltzmann, j_L – curentul de generare independent de V și direct proporțional cu intensitatea iluminării (determinat de perechile electron-gol generată de lumina incidentă).

Relația (12) este ilustrată în fig. 2, pentru iluminări diferite ale joncțiunii. Pentru $j=0$ se obține din relația (12) tensiunea în circuit deschis V_{oc} :

$$V_{oc} = \frac{kT}{e} \ln\left(1 - \frac{j_L}{j_0}\right) \quad (13)$$

Curentul de scurt circuit se obține punând condiția $V=0$ în relația (13). Rezultă:

$$j_{sc} = j_L \quad (14)$$



$$\Phi_4 > \Phi_3 > \Phi_2 > \Phi_1$$

Coeficientul masic de aer (AIM)

AIM caracterizează spectrul solar după ce radiația solară a trecut prin atmosferă. El este folosit la caracterizarea performanțelor celulelor solare în condiții standardizate definite de simbolul AM și un număr. De exemplu AM1.5 este universal folosit de a caracteriza puterea generată de panourile solare.

Descriere

Radiația solară este foarte apropiată de un radiator ideal echivalentă cu radiația spectrală a unui corp negru la temperatura de 5800K. Radiația solară traversând atmosfera reacționează cu anumiți compuși chimici care adsorb anumite lungimi de undă din spectru.

Cel mai bun exemplu este absorbția ultravioletelor de către ozon în atmosfera superioară ce reduce dramatic cantitatea de lungimi scurte de undă să ajungă pe pământ. O componentă mult mai activă sunt vaporii de apă care adsorb spectrul solar pe diverse lungimi de undă. Oxigenul, bioxidul de carbon și azotul contribuie și ei la adsorbția radiației solare. Prin urmare spectrul solar ce ajunge la suprafața pământului este restrâns între infraroșu îndepărtat și ultraviolet apropiat.

Împrăștierea radiației în atmosferă deasemeni joacă un rol important. Din acest motiv când soarele este la apus drumul radiației este mai lung, iar împrăștierea radiației cu lungimi

mici de undă este împrăștiată mai mult. Soarele la apus arată de culoare roșie datorită fenomenelor de împrăștiere. Pentru o grosime l_0 a atmosferei funcție de unghiul de incidență a radiației, θ , ea parcurge un drum mai lung:

$$l = l_0 / \cos \theta$$

Raportul l / l_0 este coeficientul masiv al aerului [Peter Würfel (2005). The Physics of Solar Cells. Weinheim: Wiley-VCH.]

Spectrul solar în afara atmosferei corespunzător radiației corpului negru la 5800K va avea AM0 semnificând “zero atmosfere”. Celulele folosite pentru tehnologia spațială cum ar fi comunicațiile prin satelit sunt în general caracterizate folosind AM0.

Spectrul solar la nivelul apei mării când soarele este perpendicular coeficientul este AM1 ceea ce semnifică o atmosferă. Celulele solare pe bază de siliciu nu sunt sensibile la spectrul pierdut în atmosferă. Ele sunt dependente de lărgimea benzii interzise care este corespondentă energiei fotonilor din spectrul vizibil. Prin urmare celulele solare sunt mai eficiente la AM1 decât la AM0.

Panourile solare în general operează sub o anumită grosime a atmosferei dacă soarele este incident sub un unghi de vizibilitate diferit de cel de la ecuator. Deoarece dezvoltarea celulelor solare este concentrată în SUA, Japonia, EUROPA se ia în considerare standardul AM1.5, adică 1.5 grosimea atmosferei ceea ce corespunde un unghi de zenit solar de 48°. Este considerat standardul terestru de caracterizare a panourilor solare.

Panourile solare ce operează la poli va trebui să fie folosit AM2 iar cele care operează la altitudini mari atunci AM<1.