

Energie fotovoltaica

1. Absorbția luminii
2. Cum se transformă energia luminoasă în electricitate?
3. Colecțarea sarcinilor
4. Doparea semiconductoarelor
5. Caracteristicile unui panou fotovoltaic
6. Modelul simplificat al unei celule fotovoltaice
7. Variatia puterii functie de temperatura
8. Variatia caracteristicilor functie de iradierea solară
9. Harta solară a României
10. Caracteristica tensiune-curent a celulei fotovoltaice
11. Radiatia solară
12. Componentele unui sistem fotovoltaic
13. Celula fotoelectrică
 - 13.1 Principiu de funcționare al celulei fotoelectrice
 - 13.2 Factorii de care depinde eficiența celulei solare
14. Tehnologii de fabricație ale celulelor solare
 - 14.1 Celule monocristaline
 - 14.2 Celule policristaline
 - 14.3 Celule amorfă
 - 14.4 Celule tandem
 - 14.5 Celule cu film subțire (CdTe, CIS, CIGS)
 - 14.6 Rândamentele diferitelor tehnologii
15. Caracteristicile fotocelulelor
16. Panouri fotovoltaice
 - 16.1 Construcția unui panou fotovoltaic
17. Sisteme fotovoltaice
 - 17.1 Categorii de sisteme fotovoltaice (independente sau conectate la rețea)
 - 17.2 Avantajele sistemelor fotovoltaice

Energia radiatiei solare: este forma de energie care, la scara timpului, conceputa in raport cu viata pe Pamant, este inepuizabila.

Cantitatea de energie primita de la soare corespunde anual cifrei de 1,5 miliarde de milioane de MWh, ceea ce reprezinta circa 23 000 de ori consumul actual de energie, sau de 5 - 10 ori ansamblul tuturor rezervelor de combustibili fosili cunoscuti, inclusiv minereul de uraniu.

Disponibilitatea acestei energii depinde de ciclul zi-noapte, de latitudinea locului unde este captata, de anotimpuri si de patura noroasa.

Energia solara termica se bazeaza pe producerea de apa calda utilizata in cladiri, sau in scopul de a permite actionarea turbinelor ca si in cazul centralelor termice clasice, pentru productia de electricitate, cu randamentul net intr-adevar mic, de 15%.

Energia solara fotovoltaica se bazeaza pe producerea directa de electricitate prin intermediul celulelor cu siliciu. Atunci cand straluceste si atunci cand conditiile climatice sunt favorabile, soarele furnizeaza o putere de 1 kW/mp. Panourile fotovoltaice permit convertirea directa in electricitate a 10 - 15% din aceasta putere. De ex. un acoperis fotovoltaic de 5x4 metri are o putere de 3kW si produce 2 - 6

MWh/an.

Energia solară fotovoltaică era foarte puțin semnificativă în 1999. Cresterea însă a acestei filiere se dovedește a avea importanță: între 2002 și 2003, ea a atins 43,4%. Puterea instalată în cadrul Uniunii Europene, a fost în 2003, de 562,3 MW. În fruntea listei țărilor Uniunii Europene se află Germania (397,6 MW), Olanda (48,63 MW), Spania (27,26 MW) și Italia (26,02 MW). Pentru comparație, iată aici puterile instalate în câteva alte țări, în 2003: Franța (21,71 MW), Portugalia (2,07 MW) și Belgia (1,06 MW). Se remarcă faptul că nu țările aflate în sudul Europei dezvoltă cel mai mult filiera fotovoltaică.

Efectul fotoelectric, respectiv transformarea energiei solare ("foton") în energie electrică ("volt") a fost descoperit în 1839 de fizicianul A. Becquerel.

Acest efect se bazează pe trei fenomene fizice simultane, strâns legate între ele:

- Absorbția luminii de către materiale
- Transferul energiei de la fotoni la sarcinile electrice
- Colectarea sarcinilor

1. Absorbția luminii

Fotonii compun lumina. Această poate penetra anumite materiale, sau chiar să le traverseze. În general, o raza de lumina care atinge suprafața unui mediu, poate suporta trei fenomene optice:

- a. *Reflexia*: lumina este "întoarsă" de către suprafață;
- b. *Transmisia*: lumina traversează obiectul;
- c. *Absorbția*: lumina penetrează obiectul și nu îl mai parasește, energia fiind restituată într-o altă formă.

Intr-un material fotoelectric, o parte a energiei fluxului luminos va fi restituată sub formă de energie electrică. Trebuie deci ca materialul să aibă capacitatea de a absorbi lumina vizibilă, aceasta fiind ceea ce se dorește să se convertă: lumina solară sau a altor surse artificiale.

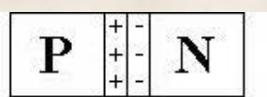
2. Cum se transformă energia luminoasă în electricitate?

Sarcinile elementare ce vor determina apariția unui curent electric în urma iluminării, sunt electroni (sarcini negative elementare, continut de materialele semiconductoare).

Fotonii vor ceda energie lor, electronilor periferici, ceea ce le va permite să se elibereze de atracția exercitată de nucleu. Acești electroni eliberati vor putea forma un curent electric, dacă sunt extrasi din material.

3. Colectarea sarcinilor

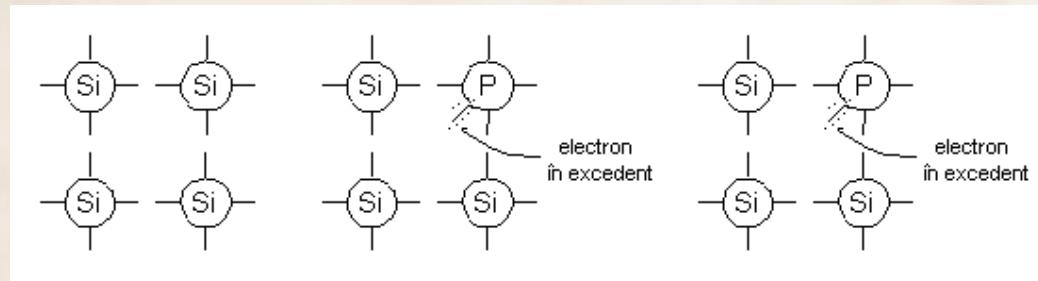
Pentru ca sarcinile eliberate prin iluminare să genereze energie, trebuie ca acestea să circule. Trebuie deci extrasă din materialul semiconductor și creat un circuit electric. Aceasta extractie a sarcinilor se realizează prin intermediul unei jonctiuni create special în semiconductor. Scopul este de a crea un camp electric în interiorul materialului, care va antrena sarcinile negative într-un sens, iar pe cele pozitive în celălalt sens. Aceasta se realizează prin doparea semiconductorului. Jonctiunea unei fotocelule cu siliciu este constituită dintr-o parte dopată cu fosfor (P), numita de tip "n", alipita unei parti dopate cu bor (B), numita de tip "p". La frontieră celor două parti se crează campul electric care separă sarcinile pozitive și cele negative (Figura 6).



Creare unui câmp electric

4. Doparea semiconductoarelor

Doparea unui material semiconductor reprezinta introducerea in structura materialului a unor sarcini excedentare, pentru a ameliora conductivitatea materialului.



Siliciu pur (figura a)

Siliciu N (figura b)

Siliciu P (figura c)

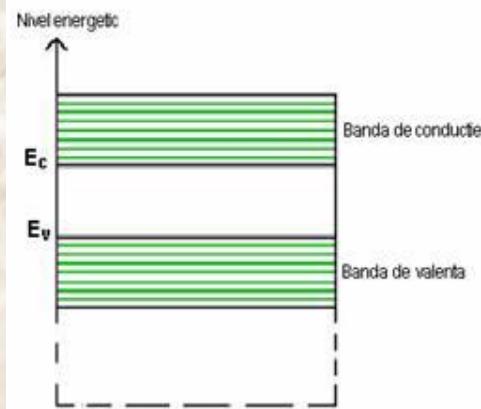
Reprezentarea schematica plana a atomilor de siliciu (4 electroni pe stratul exterior).

In stare pura, numita "intrinseca", siliciul nu este fotoconductor (figura a).

Fiind dopat cu fosfor (5 electroni pe stratul exterior), va aparea un excedent de sarcini negative. Materialul va fi potential "donor" de electroni, disponibili pentru conductia electrica. Acest tip de material este siliciul de tip "n" (figura b).

Se poate dota siliul cu bor (3 electroni pe stratul exterior), aparand un excedent de "goluri", respectiv de sarcini pozitive. Materialul va fi potential "acceptor" de electroni. Acest tip de material este siliciul de tip "p" (figura c).

In figura de mai jos este prezentata structura energetica a materialelor semiconductoare, deci si a siliciului



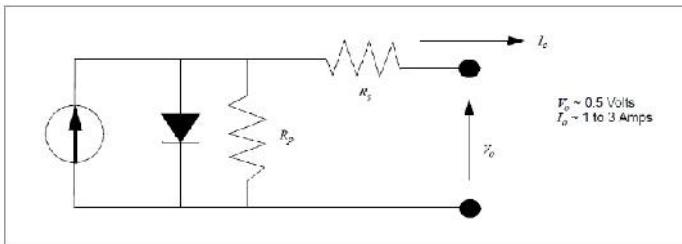
Grosimea totala a unei celule fotovoltaice este de cca. 0,3 mm, iar grosimea stratului n, este de cca. 0,002mm. Uzual, desupra electrodului negativ al celulei fotovoltaice, se amplaseaza un strat antireflexie, cu rolul de a impiedica reflexia radiatiei solare incidente pe suprafata celulei electrice solare, astfel incat o cantitate cat mai mare de energie sa fie transferata electronilor de valenta din cele doua straturi semiconductoare. Celulele fotovoltaice au dimensiuni uzuale de 10x10cm si mai recent de 15x15cm.

5. Caracteristicile unui panou fotovoltaic sunt:

- Tensiunea de mers in gol U_{OC} , respectiv, tensiunea la bornele celulei, atunci cand curentul debitat este nul

- Curent de scurtcircuit I_{sc} , respectiv curentul debitat de celula, atunci cand tensiunea la bornele sale este nula
- Tensiunea in punctul optim de functionare U_{MPP}
- Curentul in punctul de putere maxima I_{MPP}
- Putere maxima P_{MPP}
- Factor de umplere FF
- Coeficient de modificare a puterii cu temperatura celulei
- Randamentul celulei solare η

6. Modelul simplificat al unei celule fotovoltaice



De fapt, o celula este constituita din doua straturi subtiri de material semiconductor. Cele doua straturi sunt dopate diferit:

- pentru stratul n, aport de electroni periferici;
- pentru stratul p, deficit de electroni.

Intre cele doua straturi va aparea o diferență de potential electric. Energia fotonilor luminii, captată de electronii periferici (stratul n) le va permite acestora să depasească bariera de potential și să creeze astfel un curent electric continuu. Pentru colectarea acestui curent, se depun, prin serigrafie, electrozi pe cele două straturi semiconductoare. Electrodul superior este o grila ce permite trecerea razelor luminoase. Pe acest electrod se depune apoi un strat antireflectorizant, pentru creșterea cantitatii de lumina absorbita.

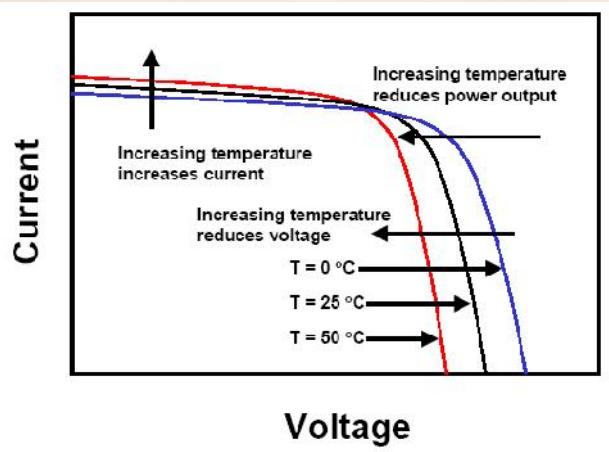
Rezistența serie a celulei, R_s , întâlnita de curentul lateral (orizontal) în stratul superior al celulei este responsabilă de reducerea puterii electrice furnizate de celula, în sarcină. Un design electric (structural) optim are în vedere minimizarea lui R_s prin utilizarea unui material cat mai bun conductor în construcția stratului superior, creșterea grosimii sale, contacte galvanice bune, și o geometrie optimă pentru gridul colector.

Pentru a elimina pierderile de energie solară incidentă și pentru protecția împotriva agentilor externi se aplică peste grila un material antireflector. Celula solară este închisă într-o capsulă din sticlă sau din material plastic transparent.

Randamentul unei celule depinde de iluminare și de temperatură.

7. Variatia puterii functie de temperatura

Temperatura este un parametru important, deoarece celulele sunt expuse radiatiei solare, fiind posibila încalzirea lor. În plus, o parte din energia absorbită nu este convertită în energie electrică: se disipa sub formă de căldură. Din aceste motive, temperatura celulelor este întotdeauna mai ridicată decât a mediului ambient.



Variatia caracteristicilor curent-tensiune ale celulelor fotovoltaice functie de temperatura jonctiunii, la iradiere solara constanta

Cu ajutorul figurii de mai sus se poate observa ca temperatura celulei are o importanta foarte mare asupra performantelor electrice. Cu cat temperatura este mai mica, cu atat celula este mai eficienta.

Sistemele fotovoltaice nu utilizeaza decat o mica parte din radiatia solara si de anumite lungimi de unda, pentru a produce energie electrica. Restul energiei primite la suprafata este transformata in caldura, ce conduce la cresterea temperaturii celulelor componente si la scaderea randamentului lor. In consecinta, cresterea productivitatii energetice a acestor instalatii presupune atat eficientizarea functionarii lor in domeniul electric, cat si studiul fenomenelor termice care au loc.

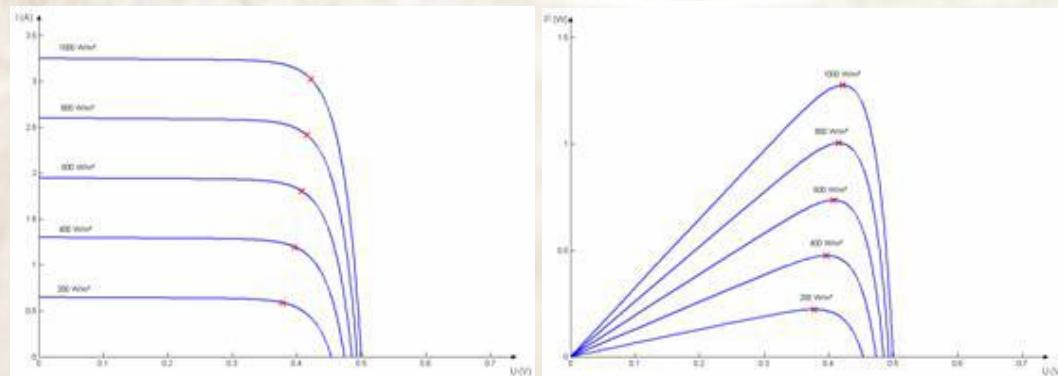
Fiecare grad de incalzire a celulei, determina o pierdere a randamentului de ordinul a 0,5 %. In mod empiric, s-a constatat ca photocurrentul creste putin cu temperatura (de ordinul a 0.05%/°K, in cazul celulelor cu siliciu).

De asemenea, se poate observa ca punctul de putere maxima poate avea variatii semnificative.

8. Variatia caracteristicilor functie de iradierea solara

Iluminarea influenteaza esential caracteristicile celulelor.

In figurile de mai jos sunt prezentate familii de caracteristici $I-U$ (curent-tensiune) si $P-U$ (putere-tensiune), pentru diferite valori ale iluminarii. Se poate considera ca tensiunea U este constanta, deoarece variația valorii U_{max} în funcție de iluminare, este infima. Pierderea de putere din acest motiv nu este semnificativa.

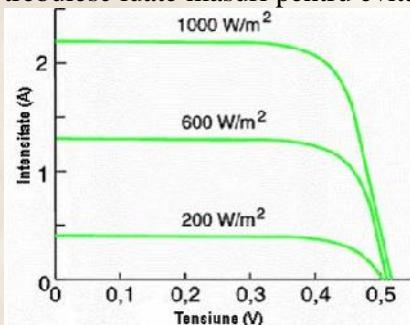


Pentru cresterea iluminarii celulelor, este de dorit ca acestea sa fie orientate astfel incat, razele Soarelui sa cada perpendicular pe ele. De exemplu, pe timpul iernii, un panou plasat orizontal este de doua ori mai putin eficient decat un panou inclinat, astfel incat incidenta radiatiei sa fie perpendiculara pe acesta.

In conditii standard STC ($1000W/m^2$, $25^\circ C$, AM1.5), puterea maxima a unei celule de siliciu de 10 cm^2 va fi de aproximativ $1,25\text{ W}$. Celula fotoelectrica elementara reprezinta, deci, un

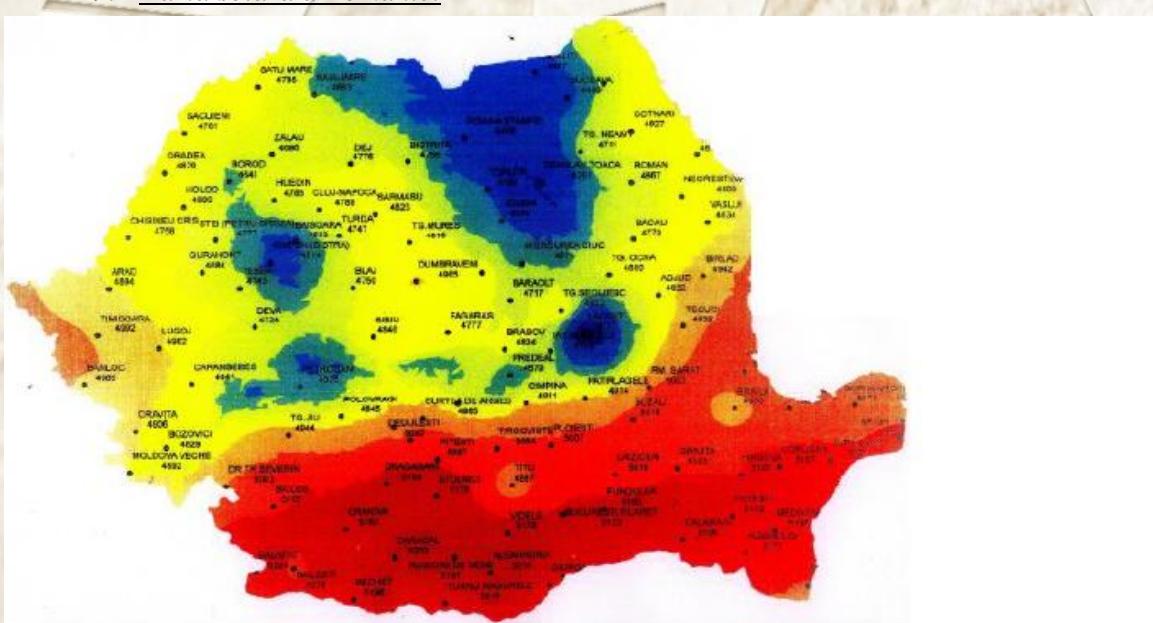
generator electric de foarte mica putere, insuficient pentru majoritatea aplicatiilor casnice sau industriale. In consecinta, generatoarele fotoelectrice sunt realizate prin conectarea in serie si/sau in paralel a unui numar mare de celule elementare. Aceste grupari se numesc module, care la randul lor vor forma panourile.

Aceasta conectare trebuie sa se realizeze cu respectarea anumitor criterii precise, tinand cont de dezechilibrele care se creeaza in timpul functionarii intr-o retea de fotocelule. Practic, chiar daca numeroasele celule care formeaza un generator, sunt teoretic identice, datorita inevitabilelor dispersii de fabricatie, ele au caracteristici diferite. Pe de alta parte, iluminarea si temperatura celulelor nu este aceeasi pentru toate celulele din retea. Din aceste motive trebuie luate masuri pentru evitarea deteriorarii celulelor (diode de protectie).



Tensiunea si intensitatea curentului electric asigurate de o celula fotovoltaica din siliciu, la diferite intensitati ale radiatiei solare

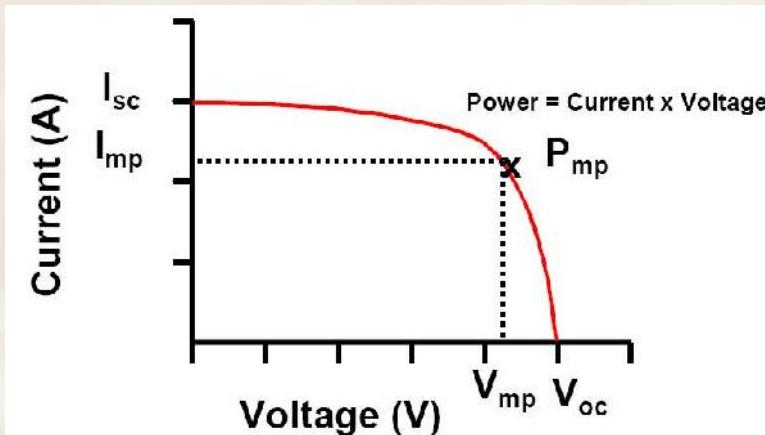
9. Harta solara a Romaniei



Legenda:

	Zona 0: $P_s > 1250 \text{ kWh/m}^2 \text{ an}$
	Zona I: $1250 \geq P_s > 1200 \text{ kWh/m}^2$
	Zona II: $1200 \geq P_s > 1050 \text{ kWh/m}^2$
	Zona III: $1050 \geq P_s > 950 \text{ kWh/m}^2$
	Zona IV: $P_s \leq 950 \text{ kWh/m}^2 \text{ an}$

10. Caracteristica tensiune-curent a celulei fotovoltaice are forma din figura de mai jos:



I_{mp} este curentul la puterea maxima a celulei, V_{mp} este voltajul la putere maxima al celulei, P_{mp} este puterea maxima a celulei, iar V_{oc} este tensiunea de mers in gol a celulei.

Produsul intre tensiunea si curentul celulei dau puterea celulei. Puterea debitata de celula are un maxim functie de tensiunea produsa.

Caracteristica tensiune-curent (U-I) a unui modul fotovoltaic depinde in principal de intensitatea radiatiei solare si de temperatura celulelor. Astfel pentru diferiti parametri meteorologici exista o caracteristica de functionare a generatorului fotovoltaic. La intersectia caracteristicii U-I cu caracteristica sarcinii de la bornele generatorului fotovoltaic se gaseste punctul de functionare P_{mp} .

Acest punct difera in general de punctul maxim de putere (MPP), la care sistemul poate functiona, cand intre generator si sarcina se realizeaza transferul optim de putere. In consecinta MPP depinde de conditiile de functionare ale generatorului fotovoltaic, dar si de caracteristicile electrice ale sarcinii de la borne. Scopul sistemelor de urmarire a punctului maxim de putere (MPPT) este de a mentine punctul de functionare cat mai aproape de MPP.

Pentru a realiza transferul maxim de putere dintre generatorul fotovoltaic si receptor se interconecteaza un convertor DC-DC.

Umbrirea unei singure celule a unui modul fotovoltaic conduce la scaderea productivitatii acestuia cu aproximativ 50%.

11. Radiatia solara

Radiatia solara care ajunge direct de la discul solar pe suprafata terestra se numeste radiatie solara directa.

Radiatia solara care ajunge pe suprafata terestra pe alte cai decat direct de la discul solar se numeste radiatie solara difusa.

Cantitatea totala de energie transmisa, pe toate lungimile de unda, prin radiatie directa sau difusa, la nivelul solului, se numeste radiatie solara globala.

12. Componentele unui sistem fotovoltaic

Componentele unui sistem fotoelectric depind de aplicatie: locuinta izolata sau in apropierea retelei, utilizarea unei baterii sau doar a energiei solare, existenta convertoarelor statice de putere.

Un sistem fotoelectric cuprinde:

- Celulele fotovoltaice

- Baterii de acumulatoare
- Regulatoare de sarcina
- Converteoare statice
- Alte componente

A. Celulele fotovoltaice

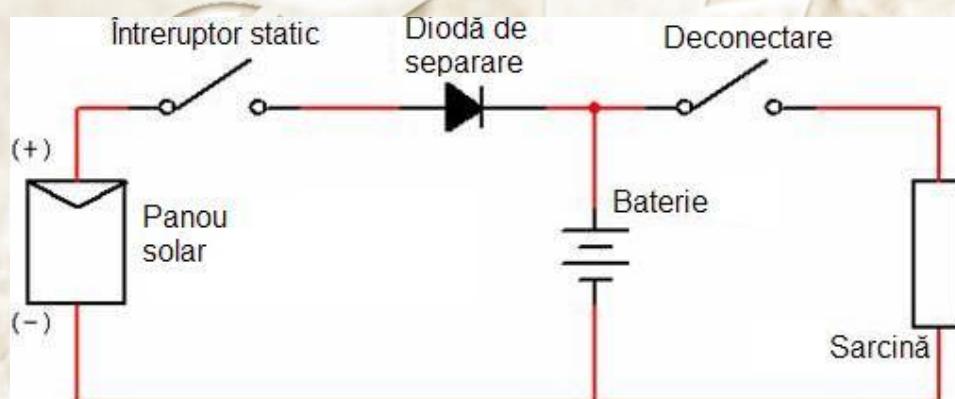
- nu pot fi asimilate cu nici un alt tip de generator clasic de energie electrica de curent continuu. Aceasta deoarece, celula fotovoltaica nu este nici sursa de tensiune constanta, nici sursa de curent constant. In prezent, randamentul conversiei energiei solare in energie electrica este slab. Aceasta inseamna ca, intr-o zona cu expunere nominala de 1000 W/m^2 , sunt necesari 12 m^2 de Panouri fotovoltaice pentru a furniza 1 kW_v , ceea ce determina un cost ridicat al watt-ului.

B. Regulatoarele de sarcina

In sistemele fotoelectrice se pot utiliza mai multe tipuri de regulatoare. Acestea controleaza fluxul de energie, trebuint sa protejeze bateria de supraincarcare (solara) si de descarcare grava (consumatori). De asemenea, regulatoarele asigura supravegherea si siguranta instalatiei.

Exista trei categorii principale de regulatoare:

- Regulatoare serie, care contin un interuptor intre generatorul fotoelectric si bateria de acumulatoare, pentru intreruperea incarcarii.



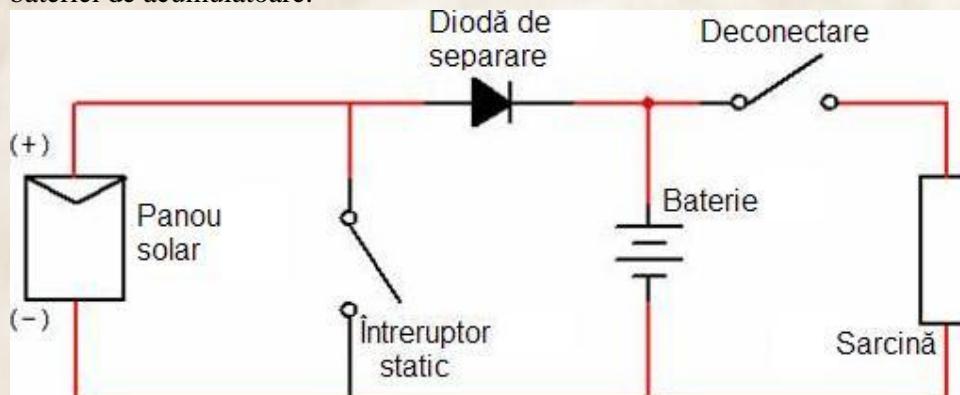
Schema de principiu a regulatorului serie.

Intreruptorul de incarcare este in serie cu bateria. El se deschide cand bateria este incarcata.

Avantaj: tensiunea la bornele interrupatorului este mica.

Dezavantaj fata de regulatoarele de tip paralel: interruptorul determina o cadere de tensiune suplimentara intre panouri si baterie.

- Regulatoare paralel, care scurtcircuiteaza generatorul fotoelectric la finalul incarcarii bateriei de acumulatoare.



Schema de principiu a regulatorului paralel.

Pe durata incarcarii, panourile fotovoltaice sunt conectate direct la baterii. Cand acestea sunt incarcate, panourile sunt scurtcircuite. Dioda de separare trebuie neaparat sa fie prevazuta in schema, pentru a nu scurtcircuita bateria atunci cand intreruptorul este inchis. Aceasta dioda asigura si blocarea curentului nocturn, ce ar putea sa apara intre baterie si panou.

Intreruptorul static este de cele mai multe ori un tranzistor MOSFET.

Dezavantaje:

- Intreruptorul este solicitat de intreaga tensiune a panoului, putand deci sa apara probleme de protectie la supratensiuni.
- Solicitarea termica a intreruptorului poate fi importanta la valori mari ale curentului.
- Regulatoare ce urmaresc punctul de putere maxima (MPPT - Maximum Power Point Tracking), care permit extragerea din campul de celule, in permanenta, a maximului de putere.

Regulatoarele MPPT sunt concepute pentru a asigura extragerea puterii maxime din panourile fotovoltaice. Aceasta permite recuperarea maximului de energie, indiferent de temperatura si iluminare. In permanenta, tensiunea si curentul sunt măsurate, pentru deducerea puterii extrase din panou. Puterea este comparata cu valoarea anterioara a acesteia. In urma compararii, tensiunea la bornele panoului este crescuta sau redusa.

Avantaj: Functioneaza intr-o plaja foarte larga de temperaturi, ceea ce asigura recuperarea excesului de energie pe durata iernii.

Dezavantaj: Investitia devine rentabila in urma analizei pierderilor induse de regulatorul MPPT si de convertoarele c.c.-c.c.

C. Converttoarele statice

In functie de aplicatie, se utilizeaza convertoare statice pentru adaptarea puterii generate la necesitatile sarcinii.

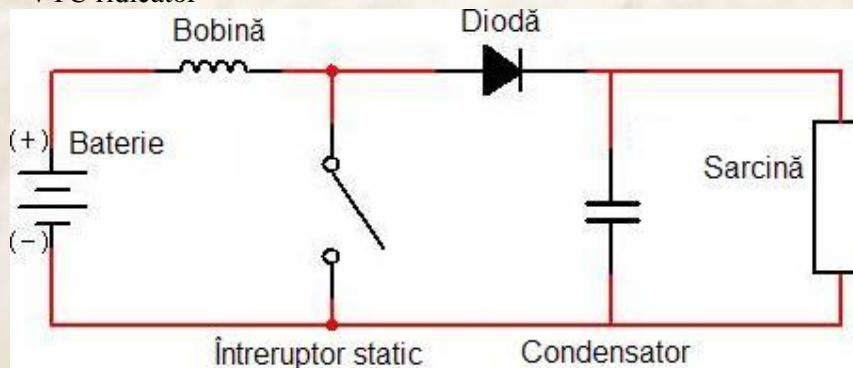
In principal, exista convertoare c.c.-c.c., care adapteaza tensiunea de c.c. furnizata de panourile fotoelectrice la necesitatile sarcinii si convertoare c.c.-c.a., care transforma energia de c.c. in c.a., pentru alimentarea sarcinilor corespunzatoare.

Convertoare c.c.-c.c.

Aceste convertoare, (Variatoare de Tensiune Continua - VTC), transforma o tensiune continua (a bateriei), tot in tensiune continua, cu valoare medie diferita, pentru alimentarea sarcinilor de c.c.

Există două tipuri de astfel de VTC: ridicator și coborator.

• VTC ridicator



Schema de principiu a unui VTC ridicator.

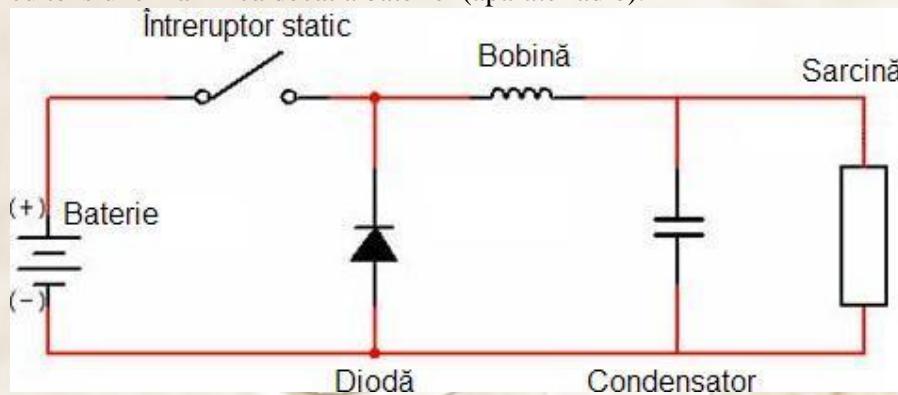
Pe intervalele cand intreruptorul este inchis, in bobina se inmagazineaza energie de la baterie. La deschiderea intreruptorului, tensiunea de autoinductie a bobinei, impreuna cu sursa,

determina aparitia unei supratensiuni, ce este transferata condensatorului si sarcinii. Dioda (numita "de separare") impiedica descarcarea condensatorului pe intervalele cand intreruptorul este inchis. Condensatorul filtreaza tensiunea continua la iesire, reducandu-i pulsatiile.

Randamentul unor astfel de convertoare este de 70%, putand atinge 85 - 90% pentru cele mai performante.

- VTC coborator

Tensiunea la iesire este mai mica decat a bateriei, fiind utilizate pentru alimentarea sarcinilor cu tensiune mai mica decat a bateriei (aparate radio).



Schema de principiu a unui VTC coborator.

Pe intervalele cand intreruptorul este inchis, bateria debiteaza curent sarcinii, ce parcurge bobina. Cand intreruptorul este deschis, energia inmagazinata in bobina, asigura mentinerea nulii a curentului, ce se va inchide pe aceste intervale, prin dioda (numita "de nul").

Randamentul acestor convertoare este de 80 - 90%.

D. Alte componente

In aceasta categorie intra elementele conexe, dar care sunt indispensabile bunei functionari a sistemelor fotoelectrice: protectiile contra descarcarilor atmosferice, disjunctoare si sigurante fuzibile.

Deoarece panourile solare sunt echipamente scumpe, ele trebuie protejate pentru a evita deteriorarea lor. Pericolele sunt multiple:

- Perturbatii induse de comutatiile elementelor din componenta convertoarelor statice de putere. Se pot utiliza filtre pentru eliminarea armonicilor.
- Functionarea sarcinii: panourile se deterioreaza repede daca absorb putere electrica. Se pot utiliza diode care sa impiedice circulatia curentului in sensul nedorit.
- Descarcari atmosferice.

13. Celula fotoelectrica

13.1 Principiu de functionare al celulei fotoelectrice

O celula fotoelectrica poate fi asimilata cu o dioda fotosensibila, functionarea ei bazandu-se pe proprietatile materialelor semiconductoare.

Celula fotoelectrica permite conversia directa a energiei luminoase in energie electrica.

Principiul de functionare se bazeaza pe efectul fotoelectric.

Efectul fotoelectric, respectiv transformarea energiei solare ("foton") in energie electrica ("volt") a fost descoperit in 1839 de fizicianul A. Becquerel.

Acest efect se bazeaza pe trei fenomene fizice simultane, strans legate intre ele:

- Absorbtia luminii de catre materiale
 - Transferul de energie de la fotoni la sarcinile electrice
 - Colectarea sarcinilor
- a) Absorbtia luminii

Fotonii compun lumina. Acesteia pot penetra anumite materiale, sau chiar sa le traverseze. In general, o raza de lumina care atinge suprafata unui mediu, poate suporta trei fenomene optice:

- *Reflexia*: lumina este "intoarsa" de catre suprafata;
- *Transmisia*: lumina traverseaza obiectul;
- *Absorbtia*: lumina penetreaza obiectul si nu il mai paraseste, energia fiind restituita intr-o alta forma.

Intr-un material fotoelectric, o parte a energiei fluxului luminos va fi restituita sub forma de energie electrica. Trebuie deci ca materialul sa aiba capacitatea de a absorbi lumina vizibila, aceasta fiind ceea ce se doreste a se converti: lumina solară sau a altor surse artificiale.

b) Transferul de energie de la fotoni la sarcinile electrice

Sarcinile elementare ce vor determina aparitia unui curent electric in urma iluminarii, sunt electroni (sarcini negative elementare, continuti de materialele semiconductoare).

Fotonii vor ceda energia lor, electronilor periferici, ceea ce le va permite sa se elibereze de atractia exercitata de nucleu. Acesti electroni eliberati vor putea forma un curent electric, daca sunt extrasi din material.

c) Colectarea sarcinilor

Pentru ca sarcinile eliberate prin iluminare sa genereze energie, trebuie ca acestea sa circule. Trebuie deci extrase din materialul semiconductor si creat un circuit electric.

Aceasta extractie a sarcinilor se realizeaza prin intermediul unei jonctiuni create special in semiconductor. Scopul este de a crea un camp electric in interiorul materialului, care va antrena sarcinile negative intr-un sens, iar pe cele pozitive in celalalt sens. Aceasta se realizeaza prin doparea semiconductorului. Jonctiunea unei fotocelule cu siliciu este constituita dintr-o parte dopata cu fosfor (P), numita de tip "n", alipita unei parti dopate cu bor (B), numita de tip "p".

Doparea unui material semiconductor reprezinta introducerea in structura materialului a unor sarcini excedentare, pentru se ameliora conductivitatea materialului.

In stare pura, numita "intrinseca", siliciul nu este fotoconductor.

Fiind dopat cu fosfor (5 electroni pe stratul exterior), va aparea un excedent de sarcini negative. Materialul va fi potential "donor" de electroni, disponibili pentru conductia electrica. Acest tip de material este siliciul de tip "n".

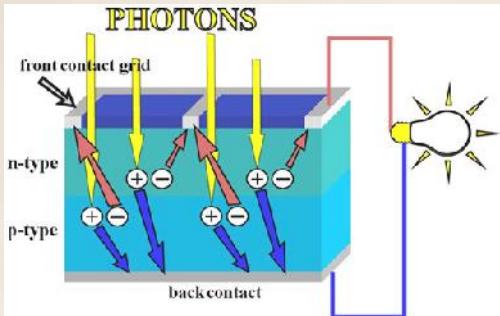
Siliciul se poate dopa cu bor (3 electroni pe stratul exterior), aparand un excedent de "goluri", respectiv de sarcini pozitive. Materialul va fi potential "acceptor" de electroni. Acest tip de material este siliciul de tip "p".

La frontieră celor două parti se creează campul electric care separă sarcinile pozitive și cele negative.

De fapt, o celula este constituită din două straturi subțiri de material semiconductor. Cele două straturi sunt dopate diferit:

- Pentru stratul N, apor de electroni periferici
- Pentru stratul P, deficit de electroni.

Intre cele două straturi va apărea o diferență de potențial electric. Energia fotonilor luminii, captată de electronii periferici (stratul N) le va permite acestora să depășească bariera de potențial și să crezeze astfel un curent electric continuu. Pentru colectarea acestui curent, se depun, prin serigrafie, electrozi pe cele două straturi semiconductoare. Electroful superior este o grilă ce permite trecerea razelor luminoase. Pe acest electrood se depune apoi un strat antireflectorizant, pentru creșterea cantității de lumina absorbită.



Principiul de functionare al celulelor fotovoltaice.

13.2 Factorii de care depinde eficiența celulei solare

O celula fotovoltaica transforma doar o parte din energia radianta în energie electrica, restul se pierde ca urmare a unei serii de procese ce se petrec în timpul conversiei:

- procese care intervin cand energia este sub forma de radiatie (pierderi de radiatie)
- procese care intervin dupa ce energia radianta a fost transferata semiconducatorului
- pentru fiecare proces se poate defini cate o "eficienta parciala"
- eficienta celulei rezulta ca un produs al tuturor "eficientelor pariale"
- patrunderea luminii prin suprafata
- absorbtia incompleta
- generarea purtatorilor
- pierderi de curent datorate recombinarii
- pierderi de tensiune
- jumata din energia absorbita de la soare se pierde sub forma de caldura. Aceasta pierdere face ca maximum de eficienta sa fie în jur de 25%.

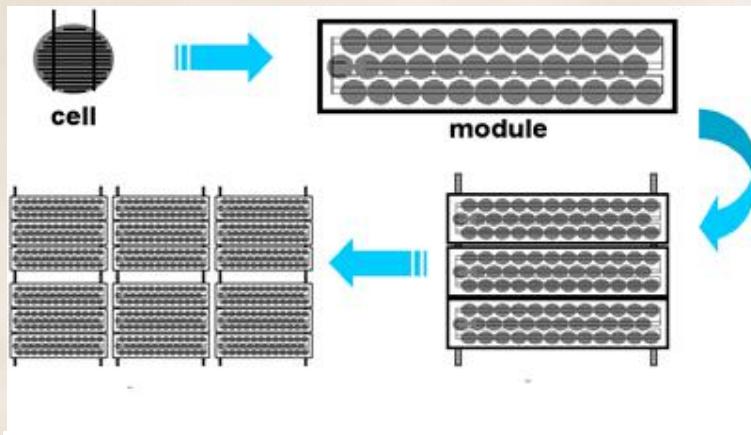
In apropierea unei jonctiuni p-n are loc o difuzie a purtatorilor de sarcina majoritari in regiunea unde ei sunt minoritari. In acest mod se stabileste o regiune cu sarcina spatiala pozitiva in regiunea n si o alta regiune cu sarcina negativa in regiunea p. Intre cele doua sarcini apare un camp electric orientat de la semiconducotorul n catre semiconducotorul p. Se stabileste astfel o **bariera de potential** care impiedica difuzia purtatorilor de sarcina prin jonctiune. In consecinta, dupa o miscare initiala de purtatori majoritari intr-un sens (current de difuzie) si minoritari in sens opus (current de drift) se realizeaza un echilibru dinamic in care jonctiunea prezinta doua zone neutre separate printr-un camp electric (cu un potential de bariera).

Cand un foton loveste jonctiunea, se intampla urmatoarele fenomene:

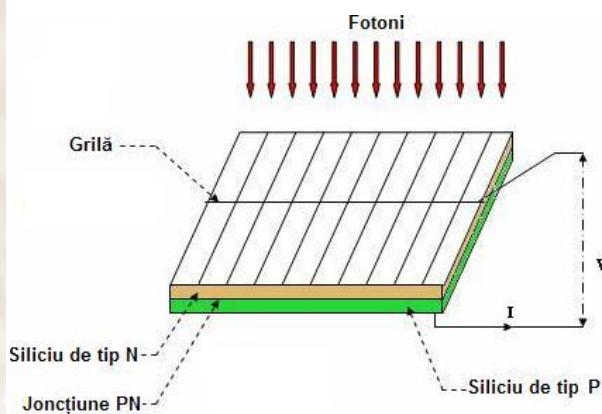
- Fotonul traverseaza materialul daca energia lui este mai mica decat energia necesara unui electron pentru a trece de pe banda de valenta pe banda de conductie;
- Fotonul este absorbit (in caz contrar celui de mai sus). Fotonul creeaza o pereche de electroni – gauri. Daca energia fotonului este mai mare decat cea necesara pentru „eliberarea” unui electron, cristalul se incalzeste.

O data perechile electroni-gauri formate in jonctiunea p-n, atat electronii, cat si gaurile sunt libere sa se miste in cristal. Campul electric format va atrage electronii in zona catodica si gaurile in zona anodica a jonctiunii, formand astfel un curent continuu, care poate fi folosit de catre un consumator.

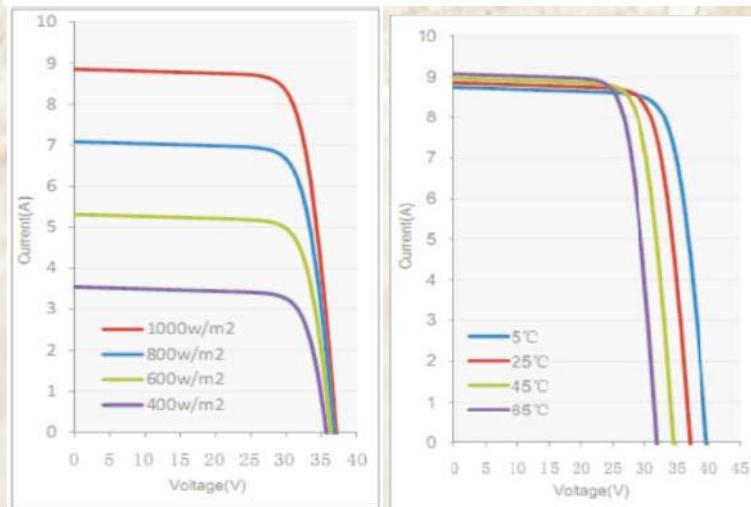
Celulele fotovoltaice sunt conectate in circuite electrice serie sau/si paralel pentru a produce tensiuni, curenti si puteri mai mari. Modulele fotovoltaice sunt formate din celule imbracate in materiale protectoare. Aceste sisteme sunt componente ale instalatiilor. Principiul de cuplare al instalatiilor este prezentat in figura de mai jos:



Schema unei celule elementare.



Caracteristicile celulei fotovoltaice a - la variatia radiatiei solare; b - la variatia temperaturii



14. Tehnologii ale celulelor solare

Cel mai utilizat material pentru realizarea fotocelulelor este siliciu, un semiconductor de tip IV. Acesta este tetra-valent, ceea ce inseamna ca un atom de siliciu se poate asocia cu patru alti atomi de aceeasi natura.

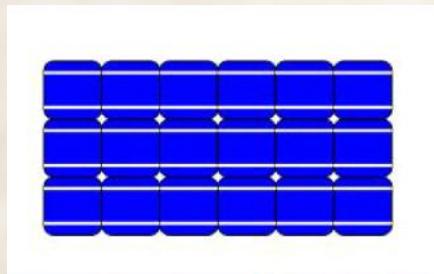
Se mai utilizeaza arseniura de galiu si straturi subliri de CdTe (telura de cadmiu), CIS (cupruindiu-diseleniu) si CIGS.

Există mai multe tipuri de celule fotovoltaice:

- Celule monocristaline
- Celule policristaline
- Celule amorfă
- Celule CdTe, CIS, CIGS

14.1 Celule monocristaline

In urma racirii sale, siliciul cristalizează, dând naștere unui singur cristal. Acesta se decupează în fâșii subțiri pe care sunt aplicate apoi celelalte straturi componente ale unei celule PV. Culoarea lor este în general albastru uniform.



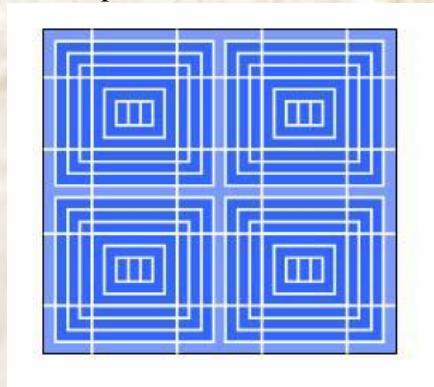
Ele se prezintă sub formă unor placătă rotunde, patrate sau pseudo-patrate.

Randamentul lor este de 12 - 16%. Totuși, ele au două dezavantaje:

- Pretul ridicat
- Durată mare de amortizare prin energia furnizată

14.2 Celule policristaline

In timpul cristalizării se formează mai multe cristale. Decuparea în fâșii conduce la realizarea de celule compuse din mai multe cristale. Acestea sunt de asemenea albastre, dar se pot distinge diverse motive formate în urma cristalizării. Avantajele acestei tehnologii sunt: randament bun al celulelor ($\approx 13\%$), pret de producție mai scăzut. Dezavantaje: randament scăzut în cazul unei slabe iluminări. Sunt cele mai utilizate celule la nivel industrial, pentru producerea de panouri PV, având cel mai bun raport calitate preț.



14.3 Celule amorfă

Aceste celule sunt realizate dintr-un suport de sticlă sau material sintetic, pe care se depune un strat subțire de siliciu (organizarea atomilor nu este regulată, ca în cazul unui cristal). Culoarea are o tonă gri.

Randamentul lor este de 5 - 10%, mai mic decât al celulelor cristaline, dar prețul este bun.

Dezavantajele sunt un randament scăzut în cazul intensităților mari ale radiației solare și degradarea materialului într-un timp relativ scurt de funcționare.

Ele au avantajul de a avea cost scăzut de producție și se comportă mai bine în cazul unei

slabe iluminari, fiind mai performante la temperaturi mai ridicate.

14.4 Celule tandem

Celulele tandem se realizeaza prin asocierea tipurilor de celule prezentate mai sus, sub forma de straturi. Aceasta combinatie conduce la absorbirea unui spectru mai larg al radiatiei electromagnetice pentru producerea de energie electrica. In acest fel se amelioreaza randamentul de conversie, fata de o celula simpla. Costul de productie in acest caz este evident mai ridicat.

14.5 Celule cu film subtire (CdTe, CIS, CIGS)

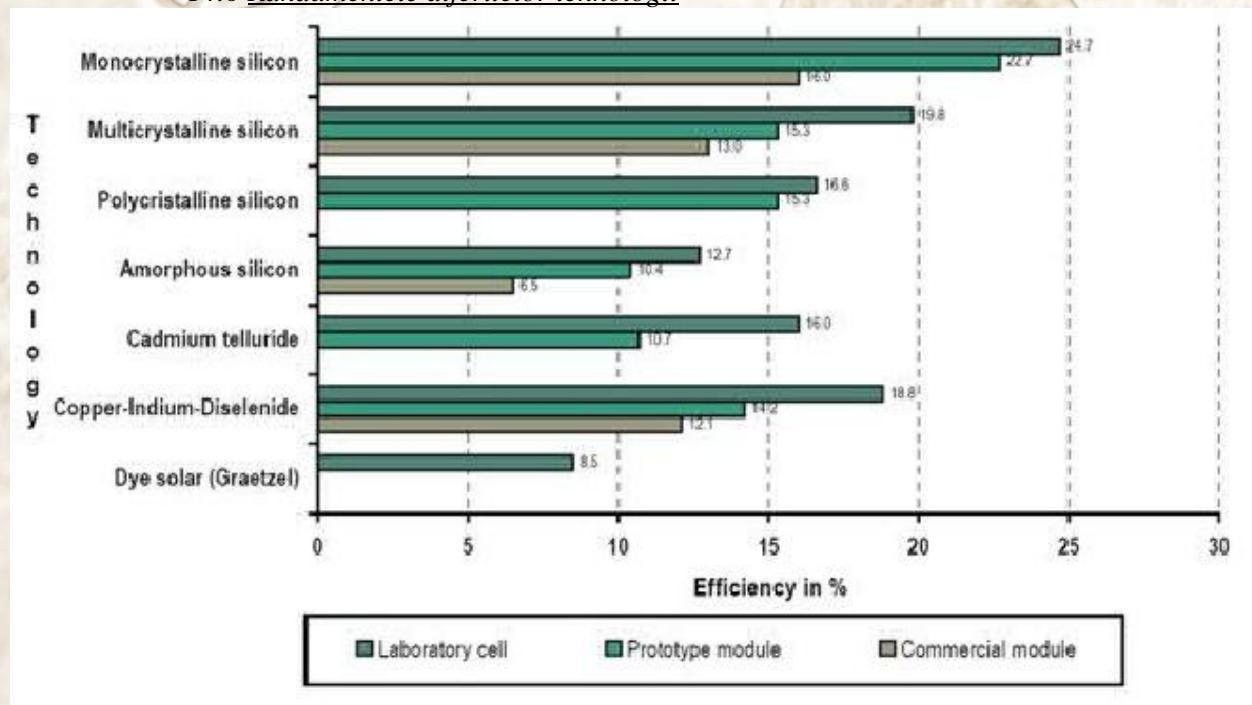
Tehnologiile CdTe, CIS si CIGS sunt in curs de dezvoltare sau de industrializare.

Aceasta tehnologie presupune reducerea cantitatii de material folosita la producerea de celule PV, dar poate conduce si la o scadere a randamentului de conversie. Acest tip de celule a devenit des utilizat din prisma costurilor scazute de fabricatie, greutatii reduse a panoului si flexibilitatii lor.

- Celulele cu CdTe se bazeaza pe telura de cadmiu, material interesant datorita proprietatii de absorbtie foarte mare. Totusi, dezvoltarea lor risca sa fie franaata datorita toxicitatii cadmiului.
- Celulele cu CIS (CuInSe2) se bazeaza pe cupru, indiu si seleniu. Acest material se caracterizeaza printr-o buna stabilitate sub actiunea iluminarii. Ele au proprietati de absorbtie excelente.
- Celulele cu CIGS sunt realizate din aceleasi materiale ca si cele cu CIS, avand ca particularitate alierea indiului cu galiu. Aceasta permite obtinerea unor caracteristici mai bune.

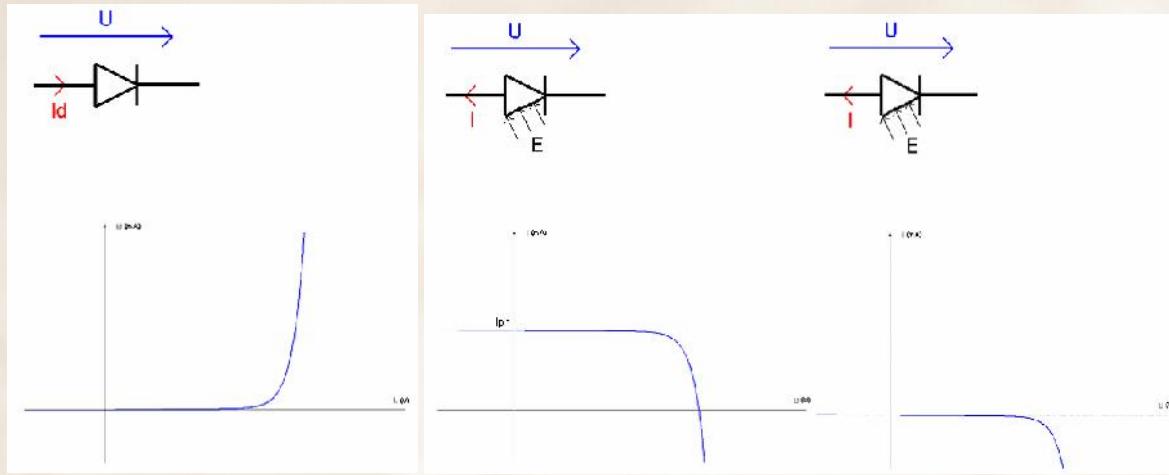
In tabelul urmator sunt sintetizate valorile randamentului tipic si teoretic ce poate fi obtinut cu aceste diferite tehnologii.

14.6 Randamentele diferitelor tehnologii



15. Caracteristicile fotocelulelor

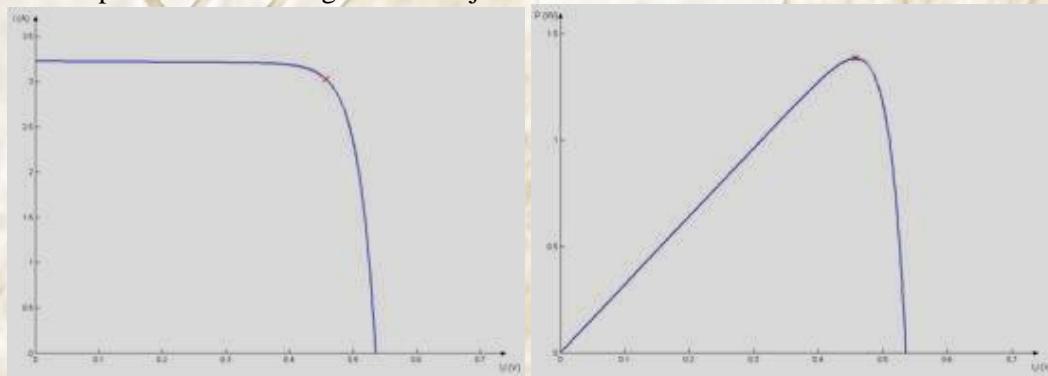
In figurile de mai jos sunt prezentate caracteristicile unei diode si ale unei fotocelule in doua situatii: cand este expusa iluminarii si cand iluminarea este nula.



Cand celula este iluminata, ea produce un curent cu atat mai mare cu cat iluminarea este mai intensa. Curentul este deci, proportional cu iluminarea. Caracteristicile sunt similare, dar decaleate in jos cu curentul I_{ph} (fotocurent), corespunzator intensitatii iluminarii.

Trebuie observat ca, pentru a se obtine caracteristica curent-tensiune ca in figurile de mai sus, se considera ca sens de referinta al curentului, sensul opus lui I_d , respectiv sensul fotocurentului I_{ph} .

Se poate obtine, de asemenea, caracteristica de putere $P = f(U)$, care, pentru anumite conditii de iluminare si temperatura, pune in evidenta un punct de functionare la puterea maxima, asa cum se poate observa in figura de mai jos.



Caracteristica curent-tensiune poate fi determinata experimental, conectand celula la o rezistenta variabila, prin modificarea valorii acesteia putandu-se obtine diferite puncte de functionare.

15.1 Parametrii celulei fotovoltaice

Randamentul energetic al unei celule este raportul dintre puterea electrica maxima si puterea incidenta:

$$\eta = \frac{P_m}{E \times S}$$

in care:

- E - iluminarea [W/m^2];
- S - suprafata activa a panourilor [m^2].
- P_m - puterea maxima masurata in conditiile STC (Standard Test Conditions), respectiv in spectrul AM1.5, la o temperatura de 25°C si iluminare de 1000 W/m^2 .

AMx desemneaza conditiile atmosferice in care se desfasoara determinarile, in functie de grosimea straturilor traversate de razele soarelui, constitutia lor etc.

Exemple:

- AM0: fara atmosfera, la mare altitudine, 1353 W/m^2 ;

- AM1: Soarele la zenith ($A=90^\circ$);
- AM1.5: Soarele la 48° , 833 W/m^2 ;
- AM2: Soarele la 30° .

Valorile Air Mass (AM)

AM-0 - distributia spectrala si fluxul total al radiatiei extraterestriale, similar cu radiatia corpului negru la 5800K .

AM-1 - distributia spectrala si fluxul total al radiatiei la ecuator la nivelul marii la amiaza cand soarele este la zenith si lumina strabate cea mai scurta distanta

AM1.5 - Spectrul standard al luminii solare la suprafata pamantului este : AM1.5G (unde G reprezinta indicele pentru radiatia globala) sau AM1.5D (care include doar radiatia directa). Numarul "1.5" indica ca lungimea pe care o strabate radiatie este de 1.5 ori mai mare decat cea mai scurta cale, cand soarele este la zenith

Iridianta, notata cu G sau E , reprezinta puterea luminoasa incidenta normal pe unitatea de suprafata; se masoara in W/m^2 sau kW/m^2

Iridatia, sau insolatia, reprezinta energia luminoasa incidenta pe unitatea de suprafata intr-un interval de timp precizat; se masoara in Ws/m^2 sau kWh/m^2

Indicele de masa a aerului, AM, este o masura a gradului de absorbtie a energiei luminoase pe masura ce strabate atmosfera terestra.

Radiatia solara

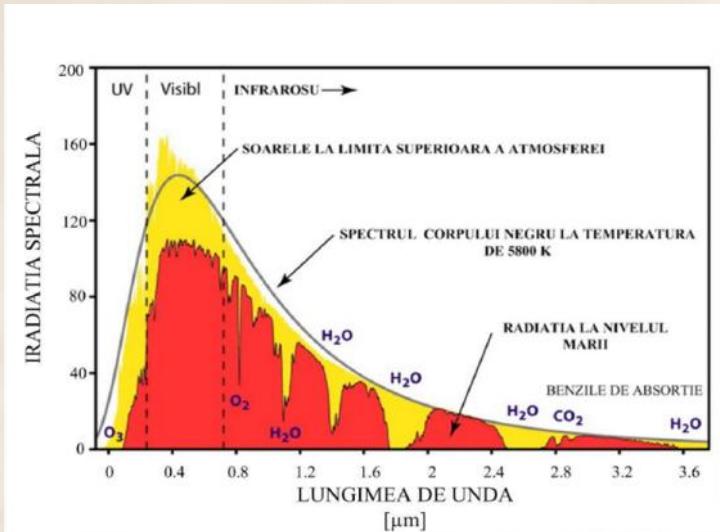
Datorita trecerii sale prin atmosfera, radiatia solara este supusa fenomenelor de absorbtie, difuziune si transmisie, fiind redusa cu aproximativ 30%. La nivelul Pamantului, radiatia solara se poate clasifica in:

- radiatia directa – componenta paralela, provenita de la discul solar si masurata dupa directia normalei la suprafata.
- radiatia difuza – radiatia primita de o suprafata plana provenita din toata emisfera vazuta de pe acea suprafata, cu exceptia discului solar.
- radiatie reflectata – este rezultatul reflexiei razelor de catre suprafete reflectante; aceasta componenta depinde de albedoul suprafetei respective.
- radiatia globala – radiatie directa si radiatie difuza.

Pentru functionarea panourilor PV, radiatia directa este cea mai importanta. In cazul unui cer senin, aceasta are cea mai mare intensitate atunci cand soarele se gaseste la punctul sau de maxim spre Sud in emisfera nordica si spre Nord in emisfera sudica. Acest lucru se datoreaza celei mai scurte distante pe care undele electromagnetice trebuie sa le parcurga de-a lungul atmosferei terestre

Spectrul solar

In figura de mai jos, sunt date distributiile spectrale ale corpului negru la diferite temperaturi si aproximativa spectrului soarelui, pentru comparatie.



NASA a evaluat fluxul energetic incident la nivelul Pamantului (fara atmosfera) la 1367 W/m². Practic, radiatia ajunsa pe Pamant, la nivelul solului, nu este decat cel mult 1000 W/m², iar aceasta valoare se poate obtine, la latitudinea noastra, doar pe durata a catorva zile pe an.

Randamentul unei celule este, in general, destul de scazut, de ordinul 10 - 20%. Au fost obtinute randamente mai bune cu materiale noi (in laborator, arseniura de galu AsGa ofera un randament mai mare de 25%), cu tehnologii experimentale (tehnologia multistraturi), deseori dificile si costisitoare pentru a fi puse deocamdata in practica. In aceste conditii, materialul fotoelectric cel mai utilizat este siliciul, care reprezinta o solutie economica. Pentru astfel de celule, randamentul energetic nu depaseste 15%.

Totusi, firma SunPower produce in mod curent panouri cu randament 22%, ceea ce face ca un sistem tipic de 4kW (c.a. nominal), sa poata fi realizat cu doar 15 panouri de 315 W, ce ocupa o suprafata de 24,6 m², fata de panourile „clasice” de 160 W, care ar ocupa 38 m² (30 panouri).

Pe baza caracteristicilor curent-tensiune si putere-tensiune, se pot obtine si alti parametrii:

- *Curentul de scurtcircuit I_{SC}* , respectiv curentul debitat de celula, atunci cand tensiunea la bornele sale este nula. Practic, acest curent este foarte apropiat de fotocurentul I_{ph} .
- *Tensiunea in gol V_{CO}* , respectiv, tensiune la bornele celulei, atunci cand curentul debitat este nul.
- Intre cele doua extreme, exista un optim care ofera puterea maxima P_{max} sau MPP (Maximum Power Point).
- *Factorul de forma*, care arata cat de apropiata este caracteristica reala de cea ideală, respectiv raportul:

$$FF = \frac{P_m}{V_{co} \times I_{sc}}$$

Pentru celulele cristaline factorul de forma variaza intre 0,75 si 0,85, iar pentru cele amorse intre 0,5 si 0,7.

16. Panouri fotovoltaice

Celulele fotovoltaice de constructie moderna produc energie electrica de putere ce nu depaseste 1,5÷2 W la tensiuni de 0,5÷0,6 V. Pentru a obtine tensiuni si puteri necesare consumatorului celulele fotovoltaice se conecteaza in serie si/sau in paralel. Cea mai mica instalatie electrica formata din celule fotovoltaice interconectate in serie si/sau in paralel, incapsulate pentru a obtine o rezistenta mecanica mai mare si a proteja celulele impotriva mediului se numeste *panou fotovoltaic*. La proiectarea modulelor fotovoltaice se ia in consideratie folosirea frecventa a acestora pentru incarcarea acumulatoarelor

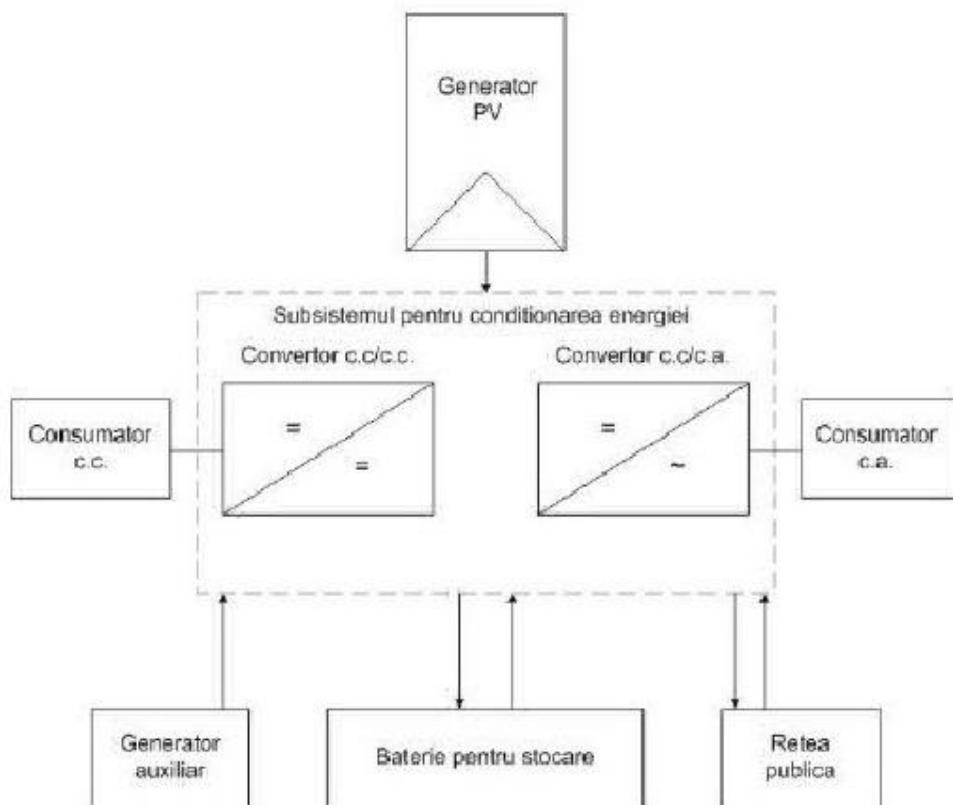
electrice, tensiunea carora este de 12÷12,5 V. Astfel, in conditii de radiatie standard, tensiunea maxima trebuie sa fie 16÷18 V, iar tensiunea de mers in gol 20÷22,5 V. O singura celula genereaza in gol circa 0,6 V si trebuie sa conectam in serie 33÷36 celule pentru a obtine tensiunea necesara.

Pentru a obtine tensiunea si puterea necesara consumatorului de energie electrica modulele fotovoltaice pot fi conectate in serie, paralel sau serie-paralel.

16.1 Construcția unui panou fotovoltaic

- Un geam (de cele mai multe ori geam securizat monostrat) de protecție pe față expusa la soare,
- Un strat transparent din material plastic (etilen vinil acetat, EVA sau cauciuc siliconic) în care se fixeaza celulele solare,
- Celule solare monocristaline sau policristaline conectate între ele prin benzi de cositor
- Caserarea feței posterioare a panoului cu o folie stratificata din material plastic rezistent la intemperii fluorura de poliviniliden (Tedlar) si Polyester,
- Priza de conectare prevazuta cu dioda de protecție respectiv dioda de scurtcircuitare si racord,
- O rama din profil de aluminiu pentru protejarea geamului la transport, manipulare si montare, pentru fixare si rigidizarea legaturii

17. Sisteme fotovoltaice



Pentru asigurare continua a consumatorului cu energie electrica multe sisteme fotovoltaice contin acumulatoare de energie electrica.

Modulul fotovoltaic reprezinta un generator de curent continuu (c.c.). Adesea insa, consumatorul de energie este de curent alternativ. Energia electrica produsa pe cale fotovoltaica are un caracter variabil, alternanta zi/noapte, cer senin/ser acoperit provoaca variatia intr-o gama mare a fluxului de energie si a tensiunii generate de modulul fotovoltaic.

Astfel, apare necesitatea conditionarii fluxului de energie, folosind convertoare electronice: c.c./c.c., care indeplinesc si functia de monitorizare a procesului incarcare/descarcare a acumulatorului, c.c./c.a pentru transformarea curentului continuu in curent alternativ.

Pentru a evita supradimensionarea generatorului fotovoltaic, adesea se foloseste o sursa auxiliara de energie, fie un grup electrogen, fie un generator eolian sau chiar reteaua electrica publica. Toate aceste componente trebuie sa fie interconectate, dimensionate si specificate pentru a functiona intr-un sistem unic, numit sistem fotovoltaic.

17.1 Sistemele fotovoltaice se divizeaza in doua categorii principale:

- a. conectate la retea (grid-connected) sau care functioneaza in paralel cu reteaua electrica publica
- b. sisteme fotovoltaice autonome (stand - alone PV system).

Sistemele fotovoltaice conectate la retea pot fi divizate in sisteme pentru care reteaua electrica publica joaca rolul de sursa auxiliara de energie (grid back-up), cele, in care excesul de energie produsa pe cale fotovoltaica este furnizata in retea (grid interactive PV system) si centrale electrice solaro-electrice (multi MW PV system) furnizata in retea (grid interactive PV system) si centrale electrice solaro-electrice (multi MW PV system) care furnizeaza toata energia produsa in retea.

Conectarea surselor de energie regenerabila la reteaua electrica, ridica probleme de natura tehnica (dificultati in reglajul si controlul sistemului) si de natura economica (daca nu este subventionata, energia electrica provenita din sursele regenerabile nu este competitiva pe piata de energie).

De asemenea, conectarea sistemului fotovoltaic la sistemul electric poate determina aparitia de perturbatii electromagnetice la reteaua electrica, in cazul in care nu se iau masuri adecvate de limitare a acestora. In mod obisnuit pot sa apara perturbatii sub forma de armonice, interarmonice, fluctuatii de tensiune, nesimetrie si supratensiuni.

Se recomanda, ca inainte de conectarea la retea a surselor distribuite, sa se analizeze nivelul perturbatiilor din reteaua electrica pentru a cunoaste atat contributia sistemului fotovoltaic la cresterea nivelului de perturbatii, cat si influenta pe care perturbatiile din retea o pot avea asupra parametrilor de performanta ai sistemului fotovoltaic.

Nivelul perturbatiilor determinate de functionarea sistemului fotovoltaic este dependent de caracteristicile procesului de conversie a energiei primare in energie electrica si de modul deconectare a sistemului fotovoltaic la reteaua electrica.

Conectarea directa a sistemului fotovoltaic la reteaua electrica conduce, de cele mai multe ori, la un nivel ridicat de perturbatii.

In cazul obisnuit al conectarii prin intermediul unui transformator, are loc diminuarea perturbatiilor, in special a armonicilor de rang multiplu de trei daca transformatorul are una dintre infasurari conectata in triunghi. Conectarea sistemului fotovoltaic prin intermediul unui circuit electronic cu convertor performant de frecventa determina cele mai reduse perturbatii.

Cunoasterea perturbatiilor care pot sa apara si conditiile specifice in care acestea apar permit adoptarea celor mai eficiente masuri pentru limitarea perturbatiilor in reteaua electrica publica. Acestea pot fi insotite de daune la consumatorii conectati in aceeasi retea, dar si de penalizari ale furnizorilor de energie electrica pentru nivelul redus al calitatii energiei electrice.

17.2 Avantajele esentiale ale sistemelor fotovoltaice sunt:

- a. produc energie electrica fara efecte poluante asupra mediului (+reciclare completa)
- b. nu au componente in miscare:
 - fiabilitate ridicata, durata de viata lunga
 - exploatare usoara, ieftina
 - tehnologie fara poluare fonica
 - c. producere si consum in acelasi loc, pentru puteri instalate mai mici, consumabile local:
 - pierderi de transport reduse
 - spatii pentru producere si transport reduse
 - nu produce modificari in mediu

d. Modularitate

Un sistem fotovoltaic poate fi proiectat pentru o usoara expandare. Daca cererea de putere ar creste, singurul obstacol care poate interveni in expandarea sistemului fotovoltaic este lipsa spatiului necesar amplasarii modulelor suplimentare; ne referim desigur la lipsa unui spatiu iluminat de soare.

e. Autonomie

Nu necesita un consum suplimentar si cheltuieli de intretinere. Alimentarea cu combustibil conventional si depozitarea lui poate costa mai mult decat combustibilul insusi. Energia solară este oferită gratis. Deoarece tendinta actuală este orientată spre optimizarea din punct de vedere energetic, pentru asigurarea functionalității în condiții de maximă eficiență, s-au dezvoltat aplicatii in care sistemele fotovoltaice sunt dotate cu sisteme inteligente pentru controlul functionării, dotări care asigură personalizarea acestor aplicatii.

f. Durabilitate

Marea majoritate a modulelor fotovoltaice de astăzi sunt bazate pe tehnologii care au dovedit o degradare minima după 20 de ani de functionare, ele fiind garantate 30 de ani. Sistemele fotovoltaice produc energie electrică ziua, dar energia electrică livrată ziua costa mai mult. În România, deja se practică tarifare diferențiată zi-noapte deci, sistemul fotovoltaic produce energie electrică gratis sau aproape gratis în timpul zilei, cand energia electrică este mai scumpă, iar pe timpul noptii cand sistemul fotovoltaic nu produce sau al orelor de varf, necesarul de energie electrică este preluat din reteaua electrică de distributie locală.

Un mare avantaj pe care-l prezintă sistemele fotovoltaice este acela că se pot integra în clădiri, pot înlocui subansamblu, materiale de construcție sau chiar întregi părți componente ale clădirii cum ar fi de exemplu acoperisul.