

Introducere

Lucrarea de doctorat abordează domeniul modern de actualitate al optoelectronicii celulelor solare nanostructurate și al sistemelor fotovoltaice performante.

Conform viziunii energetice globale 2100, elaborată în 2003 de WBGU (Consiliul Consultativ German pentru Schimbările Climatice) [1], ilustrată în Fig. 1.1, se așteaptă ca electricitatea solară inclusiv cea fotovoltaică (PV) să devină o sursă importantă de energie cu o contribuție din consumul global de energie, de aproximativ 20% în 2050 și de aproximativ 70% în 2100, aceasta având potențialul cel mai mare dintre sursele regenerabile de energie și totodată putând să joace un rol important în rezolvarea problemelor globale de mediu.

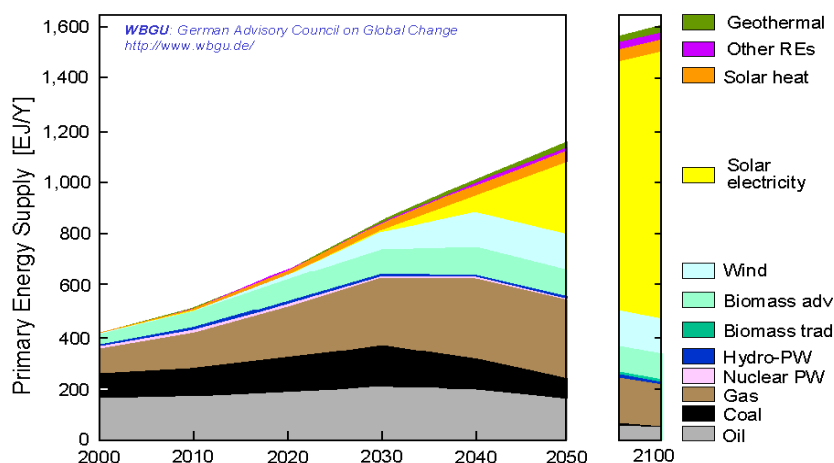


Fig. 1: Evoluția mixului global de energie: Model 2000 - 2050/2100

Pentru a realiza viziunea ilustrată de Fig. 1.1 și pentru a evita problemele în alimentarea cu energie curată datorate crizelor centralelor nucleare, sunt importante atât instalarea în continuare a sistemelor de generare a energiei electrice, bazate pe PV, cât și dezvoltarea strategiei și îmbunătățirea tehnologiei PV. Aceasta înseamnă că sunt necesare atât instalarea pe scară largă a sistemelor PV, cât și îmbunătățiri ale randamentului de conversie și a fiabilității, dublată de scăderea prețurilor celulelor solare.

A. Prezentarea generală a celulelor solare

Celulele fotovoltaice sunt dispozitive semiconductoare proiectate pentru a transforma eficient lumina solară în electricitate. Randamentul de conversie (~25%) a celulelor solare actuale bazate pe materiale cristaline, este apropiat de limita teoretică și îmbunătățiri minore a caracteristicilor implica o creștere enormă a costurilor tehnologice. Asemenea valori ale randamentului se obțin la așa numitele celule fotovoltaice de laborator, bazate pe design-uri sofisticate și nepotrivite pentru producția industrială. Pentru a menține un preț scăzut/competitiv, celulele comerciale sunt realizate cu un randament de conversie mult mai mic (~10-15%). În tehnologia actuală a semiconductoarelor cristaline, trecerea de la celule de laborator de dimensiuni mici și scumpe, la celule de arie largă și, mai departe, la module fotovoltaice comerciale ieftine se realizează printr-un compromis între performanțe și cost.

Percepția generală în cercetarea fotovoltaică este că „prima generație” de *celule bazate pe plachete din siliciu cristalin* este pe cale de a fi înlocuită cu o „a doua generație” de *celule bazate pe tehnologia* mai ieftină a *straturilor subțiri*. Într-o ierarhie istorică CdS, a-Si, CuInSe₂, CdTe și recent, Si-microcristalin sunt principalele materiale candidate pentru dezvoltarea tehnologiei straturilor subțiri. Dar evoluția tehnologiei fotovoltaice la maturitate industrială s-a produs numai după dezvoltarea unei „generații a treia” de dispozitive, *cea a straturilor subțiri cu eficiență ridicată* (dublă sau triplă față de 15-20%, a celulelor din a doua generație). Structurile tandem seriale, geometriile paralele echivalente unei serii cu o infinitate de celule, efectul fotovoltaic pe impurități sau generarea Auger sunt căi cercetate pentru tranziția spre a treia generație. În marile laboratoare din lume este căutată o cale de

schimbare a tehnologiei fotovoltaice prin comutarea pe fizica nanometrică și utilizarea de materiale noi ca polimeri organici sau medii poroase și sunt intens studiate mai multe tipuri de celule fotovoltaice ca posibile alternative la actuala tehnologie:

1. Celule solare cu gropi cuantice (quantum-well). Celula solară cu gropi cuantice este o structură *p-i-n* având gropile cuantice încorporate în regiunea intrinsecă. Regiunile dopate de pe fiecare parte vor produce un câmp electric perpendicular pe straturile cu gropi cuantice. Este de asemenea posibil să existe și câmpuri electrice induse, datorită efectelor piezoelectrice. Aceste câmpuri sunt induse de tensiunile din straturile semiconductorului, datorită neconcordanței constantelor rețelei. În cazul celulelor solare cu gropi cuantice, a fost introdusă ipoteza unui câmp electrostatic generat de regiunile încărcate. Din acest motiv, este așteptată o schimbare non-fluctuantă în indicele de refracție. Pe baza rezultatelor obținute de către Keith Barnham, trebuie menționat că gropile cuantice din cadrul celulelor solare de acest tip au rolul de a utiliza regiunea spectrului, care nu este de obicei adecvată pentru producerea unei perechi de purtători de fotoni în benzile de conducție și de valență, dar este posibilă generarea de particule în gropile cuantice respective.

2. Celule solare pe bază de polimeri. Plasticul este un material ușor, ieftin de produs și excelent izolator. În 1977 MacDiarmid, Shirikawa și Heeger (Premiul Nobel) au arătat ca unii polimeri dopați corespunzător, pot deveni conductori de electricitate. Celule fotovoltaice din plastic sunt bazate pe polimeri semiconductori, în principal molecule organice ca PPV (polyphenylene vinylene), care prezintă o structură de benzi energetice asemănătoare siliciului. Dar descrierea proprietăților fotovoltaice este mult mai complexă datorită absenței rețelei tridimensionale, interacțiunilor dintre molecule, dezordinii locale și amestecului dintre regiuni cristaline și regiuni amorfe. În polimerii semiconductori, fizica fenomenelor optoelectronice nu este încă în întregime înțeleasă și nu există nici un model teoretic comprehensiv care să explice aceste proprietăți.

Structura tipică a celulelor fotovoltaice din plastic este: electrod folie de aluminiu, polimer semiconductor, ITO, sticlă, fiind diferențiate de arhitectura stratului polimeric. O structură aparte este structura hibridă polimer/nanoparticule compozit care conduce la celule fotovoltaice flexibile, intens studiate întrucât pot fi fabricate industrial în flux continuu în tehnologia roll-to-roll. Utilizarea straturile ultrafine de polimer semiconductor determină obținerea unor celule fotovoltaice ieftine, dar ele sunt caracterizate de o eficiență scăzută (<6% în laborator). Performanțele acestor celule depind de capacitatea polimerului de a absorbi cât mai multă lumină, de conversia fotonilor în electroni liberi, de colectarea electronilor și de minimizarea rezistenței. În toate aceste trei etape se pot aduce îmbunătățiri majore: polimerii semiconductori actuali absorb doar fotonii de energii mari cu lungimi de undă <400μm și prezintă o mobilitate scăzută a purtătorilor. Cheia rezolvării acestei probleme ar putea fi înserarea unor structuri nanometrice cristaline în structura care să inducă benzi energetice cu funcție dublă: micșorarea lărgimii benzii interzise și creșterea conductivității.

3. Celule cu coloranți organici (DSSC – Dye Sensitive Solar Cells) sau (Gratzel). Configurația actuală a celulei conține doi electrozi conductori transparenți aplicați pe sticlă, anodul constând dintr-un strat poros nanocristalin de TiO₂ la care sunt atașate molecule organice de colorant senzitiv, iar catodul fiind acoperit cu un catalizator de platină. Între cei doi electrozi se află un electrolit care conține un cuplu redox. Absorbția luminii în *DSSC* are loc prin intermediul moleculelor de colorant, iar procesul de separare a sarcinii, prin injecția de electroni din stratul monomolecular de colorant în semiconductor. Folosirea unui electrod nanocristalin poros, mărește de mii de ori suprafața internă a anodului permițând la cât mai multe celule de colorant să fie simultan în contact cu electrodul și electrolitul. Într-o asemenea construcție un electrod de TiO₂ caracteristic are o grosime de 10 μm, dimensiunea medie a particulelor de colorant și a porilor este de 20 μm și are o suprafață internă de mii de ori mai mare decât suprafața geometrică. Procesul de conversie se desfășoară similar cu procesul natural de fotosinteză. Materialele pentru aceste celule sunt ieftine, dar și randamentul lor este scăzut (cca. 10% în laborator). Cercetările pentru viitoare îmbunătățiri ale randamentului

sunt orientate spre optimizarea arhitecturii electrodului nanostructurat, trecerea de la structura sandwich la structura monolitică, utilizarea suporturilor de plastic flexibile, dar mai ales înlocuirea electrolitului lichid cu un electrolit solid de tip polimer-gel – ceea ce va determina o mai mare stabilitate în timp. Modelarea unor astfel de celule are caracter interdisciplinar implicând experți din diferite arii: electrochimie, chimie cuantică, știința coloizilor, fizica cuantică, fizica semiconductoarelor, modelarea computerizată.

B. Prezentarea generală a sistemelor fotovoltaice

Celula fotovoltaică este unitatea de bază a unui sistem PV. O celulă fotovoltaică individuală produce de obicei între 1W și 3W. Această putere poate fi crescută prin conectarea mai multor celule în unități mai mari numite *module*.

Modulele fotovoltaice sunt realizate din *celule* legate între ele în serie și/sau paralel. Modulele fotovoltaice pot fi exploatate cel puțin 20 de ani. Ele se pot integra perfect în peisajul arhitectonic și nu creează noxe. Modulele fotovoltaice au puteri de la 2Wp la 300Wp (Wp = puterea de vârf a unui modul PV măsurată în condiții standard de testare -radiația solară: 1000W/m², temperatura: 25°C, cer senin, spectru de masă aer AM1,5). Cele mai utilizate module sunt cele de la 120Wp la 200Wp. Modulele pot, la rândul lor, să fie conectate pentru a crea unități mai mari formând *panouri*, cu puteri și mai mari. Dacă este nevoie de tensiuni sau curenți mai mari decât cele obținute de la un singur modul, modulele trebuie interconectate într-o arie PV. La legarea în serie rezultă tensiuni mai mari, în timp ce la conectarea în paralel rezultă curenți mai mari. Când modulele sunt conectate în serie, este de dorit ca la fiecare modul să avem o anumită valoare a puterii maxime corespunzătoare aceluiasi curent. Când modulele sunt conectate în paralel, este de dorit ca la fiecare modul să avem o valoare a puterii maxime corespunzătoare aceleiași tensiuni.

Astfel, se poate construi un *sistem fotovoltaic* care să satisfacă orice cerere de energie, indiferent de mărime. Energia solară nu poate fi disponibilă permanent. Pentru a suplini perioadele de pauză, fără soare, energia electrică poate fi furnizată de bateriile de stocare sau de generatoarele Diesel *la sistemele autonome (stand alone)* sau de la rețeaua electrică *în sistemele conectate la rețea*.

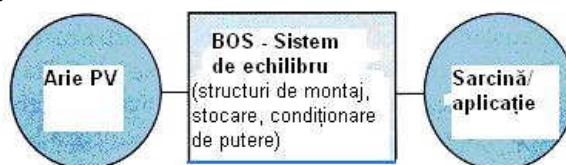


Fig. 2: Un sistem fotovoltaic complet

Un sistem fotovoltaic complet include trei componente: pe o parte, *dispozitivele PV* (module, panouri) care transformă lumina solară în electricitate *cc*, pe de altă parte, *sarcina/aplicația* pentru care este proiectat sistemul PV și între acestea un al *treilea subsistem*, format din echipamente care permit ca energia electrică provenită de la sistemul fotovoltaic să poată fi folosită de consumator -**sistem de echilibru-BOS -Balance of System**.(Fig. I.2)

C. Structura tezei

Teza este structurată pe următoarele capitole descrise mai jos. Sunt de asemenea sintetizate rezultatele proprii de bază, obținute în cadrul elaborării tezei.

Capitolul 1. -„*Celulele solare avansate – cercetări și viziuni pe plan mondial*”: Sunt prezentate perspectivele și strategia de dezvoltare a celulelor solare nanostructurate avansate precum noile tendințe în domeniul celulelor solare de eficiență ridicată.

Capitolul 2. -„*Probleme generale ale optoelectronicii celulelor solare*”: Sunt descriși parametrii optici principali ai unei celule solare: *Absorbanța, Gapul, Straturi antireflectatoare & grosimea optimă și Reflectanța*

Capitolul 3. -„*Optoelectronica celulelor solare cu gropi cuantice (Quantum Wells)*”: Cuprinde două activități importante pentru celulele cu gropi cuantice și anume Modelarea electrică împreună cu simulările numerice și Modelarea optică cu simulările numerice. Sunt prezentate contribuțiile aduse de autor.

În **Capitolul 4.** – „*Optoelectronica celulelor solare cu polimeri organici*” sunt discutate pe scurt principiul de funcționare și tipurile de celule solare cu polimeri, modelarea electrică și cea optică precum și simulările numerice ale celulelor solare cu polimeri organici, fiind prezentate contribuțiile obținute de autor.

Capitolul 5. – „*Optoelectronica celulelor solare dye-sensitive și hibride*”: Prezintă Principiul fizic de funcționare al DSSC și modelarea DSSC în analogie cu fotosinteza. Totodată sunt înfățișate modelele optice și electrice împreună cu simulările numerice pentru celulele dye-sensitive și hibride. Sunt prezentate contribuțiile obținute de autor.

Capitolul 6 – „*Caracterizarea și testarea celulelor solare, modulelor și panourilor PV*”: În acest capitol sunt prezentate Dispozitivele fotovoltaice (module, panouri, sisteme), sunt descrise caracteristicile lor și posibilitățile de instalare. În continuare sunt prezentate (caracterizare & tehnologie) Componentele BOS (Regulatoare, Sisteme de stocare a energiei, Convertoare de putere). Sunt discutate testarea dispozitivelor PV și măsurarea fiabilității modulelor PV, fiind prezentate contribuțiile autorului tezei.

Capitolul 7 – „*Sisteme fotovoltaice. Monitorizarea și îmbunătățirea calității celulelor, modulelor și sistemelor fotovoltaice*”: În acest capitol sunt descrise în paragrafe distincte: Sistemele fotovoltaice autonome, Sistemele fotovoltaice conectate la rețea, Monitorizarea sistemelor fotovoltaice, precum și Îmbunătățirea performanțelor sistemelor fotovoltaice. Totodată sunt analizate sistemele fotovoltaice care au fost realizate de către autor în baza proiectelor de cercetare naționale și internaționale la care a participat activ: Sistem fotovoltaic integrat în clădire/BIPV legat la rețea (la Universitatea Politehnică București–Laboratorul de celule solare și sisteme PV, Facultatea de Științe Aplicate); Sisteme fotovoltaice autonome (Universitatea Galați, Stația de meteorologie Fundata, Cabana Clăbucet-Predeal). Sunt prezentate rezultatele experimentale statistice procesate pe o perioadă semnificativă. Monitorizarea acestor sisteme PV este bazată pe o arhitectură software modulată, specifică fiecărei instalații. Au fost studiate influența parametrilor fizici și tehnici, în raport cu randamentul conversiei, precum și performanțele optimizării acestor sisteme fotovoltaice. Sunt prezentate contribuțiile autorului.

Capitolul 1

Celulele solare avansate –cercetări și viziuni pe plan mondial

Celulele solare din generația a treia propusă de M. Green [2] sunt celule care au potențialul de a depăși limita randamentului de conversie Shockley-Queisser. Acestea reprezintă alternativa la "celulele solare de primă generație" (realizate prin joncțiuni semiconductoare $p-n$) și la "celulele solare din generația a doua" (bazate pe reducerea costului celulelor prin utilizarea tehnologiei straturilor subțiri). Sistemele uzuale din a treia generație includ celulele solare multi-strat multi-joncțiune (tandem) fabricate din straturi subțiri de Si sau compuși III-V, în timp ce propunerile teoretice includ și benzi energetice intermediare.

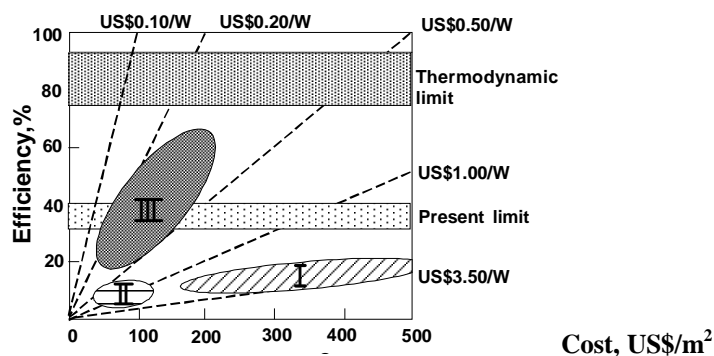


Fig. 1.1: Regimurile eficiență/cost pentru cele trei generații de fotovoltaice [7]

În Fig. 1.1 sunt ilustrate regimurile randamentului în raport cu costul per unitatea de suprafață pentru cele trei generații tehnologice ale celulelor solare. Deoarece studiile de cost ale oricărei tehnologii din generația a treia (cu straturi subțiri) de până acum, au arătat că se pot obține costuri sub 100 US\$/m² (instalații mari), aceasta pare a fi o previziune rezonabilă.

Dacă se poate dubla randamentul pentru modulele mature de straturi subțiri cu o singură joncțiune cu randament de conversie de circa 15%, aceasta va conduce la costuri foarte scăzute: **0.33 US\$/Wp**. Purtătorii de sarcină cu energie cinetică ridicată (*hot carrier*) sunt considerați a fi una dintre cele mai elegante abordări pentru producerea de celule cu performanțe ridicate. În esență, lumina este absorbită într-o regiune de absorbție cu purtători de sarcină fotogenerați, extrași înainte de a avea șansa de a se termaliza cu rețeaua cristalină. Acest lucru previne pierderile cu termalizarea din celulele normale, dar totodată înseamnă că zona de energie interzisă semiconductoare nu mai trebuie să joace un rol în relaxarea purtătorilor de sarcină.

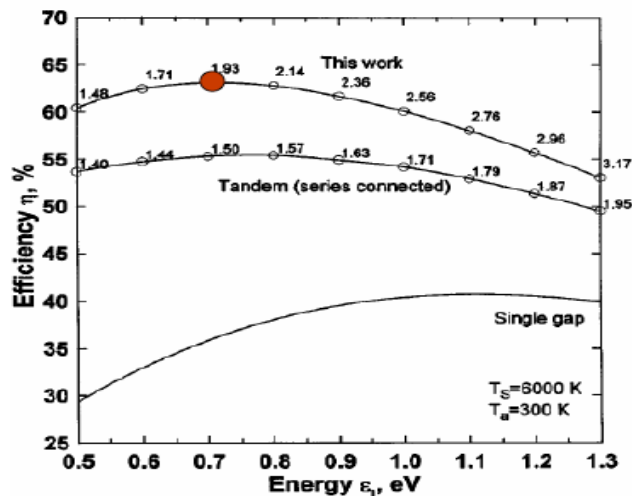


Fig. 1.2: Randamentul maxim al celulei solare cu *IB* –banda interzisă intermediară, în raport cu cele mai mici bande interzise, cu ilustrarea bandei interzise optime.

Fig. 1.2 prezintă randamentul maxim al celulelor solare cu bandă interzisă intermediară (*IB*) în raport cu cele mai mici *bande interzise*, cu ilustrarea bandei interzise optime [8]. Pentru comparație sunt ilustrate și randamentul limită al celulelor solare cu o singură bandă interzisă și a tandemului de două celule solare conectate în serie. În cazul configurației cu 3 bande interzise, celulele solare *IB* cu $E_c - E_v = 1.9\text{eV}$, $E_c - IB = 1.2\text{eV}$ și $IB - E_v = 0.7\text{eV}$ (E_c – minimul zonei de conducție, E_v – maximul zonei de valență) sunt prevăzute să atingă randamentul de 63%. Deși structurile de mici dimensiuni, cum ar fi granulele cuantice pot avea abilitatea să le facă pe amândouă, este necesară dezvoltarea în continuare a tehnologiei conceptului de celulă solară *IB*.

Sunt analizate și celulele solare cu mai multe gropi cuantice (*MQW*) [9], care au atras atenția prin randamentul lor ridicat, dar având totuși rezultate experimentale mai slabe decât valorile calculate. Pentru a realiza randamente mai mari de colectare a purtătorilor de sarcină din gropile cuantice, reducând astfel pierderile datorate recombinărilor, s-a propus o structura *MQW* modulată potențial (*PM*) în 2 pași. În gropile cuantice *PM* (*PM-QW*), ne așteptăm ca vitezele de recombinare radiativă să fie reduse datorită separării spațiale a purtătorilor de sarcină. În plus, se pot obține viteze mai mari de fugă a purtătorilor de sarcină din *QW*. Fig. 1.8 reprezintă structura schematică și curba *I-U* pentru celula solară *PM-QW* fabricată prin *MBE* – epitaxie (creștere monocristalină a straturilor semiconductoare) cu fascicul molecular – asistată de H atomic. Celula solară *PM-MQW* cu 3 pași InGaAs/GaAs a ilustrat un randament previzionat la 18.27% care este mai mare decât cel de 16,56% a celulelor solare cu gropi cuantice convenționale.

Tabelul 1.1 prezintă randamentul celulelor solare din Si cristalin, cu straturi subțiri de Si, CIGS, CdTe, compuși III-V și concentrare, coloranți și polimeri organici [10]. Deși celulele

solare din Si cristalin sunt în principal utilizate în aplicațiile actuale, celulele *MJ* din grupele *III-V* și concentrare, au demonstrat randamente mai mari în comparație cu alte celule solare. S-a raportat un randament de **41.6%** la *364-suns* pentru celulele concentrare cu 3 joncțiuni InGaP/GaAs/Ge, produse de *Spectrolab* [11]. De asemenea s-a raportat un randament de **35.8%** la *1-sun* AM1.5G pentru celulele solare cu 3 joncțiuni InGaP/GaAs/InGaAs *inversate crescute epitaxial*, fabricate de *Sharp* [12].

Tabelul 1.1: Randamentele celulelor solare din Si cristalin, straturi subtiri de Si, CIGS, CdTe, compusi III-V și concentrare, coloranți și polimeri organici, raportate în “Progress in Photovoltaics”.

Clasificare	Randament (%)	Suprafața (cm ²)	Voc (V)	Jsc(mA/cm ²)	FF (%)	Centrul de testare (date)	Descriere
Si monocristalin	25.0±0.5	4.00(da)	0.706	42.7	82.8	Sandia(3/99)	UNSW
Si policristalin	20.4±0.5	1.002(ap)	0.664	38.0	80.9	NREL(5/04)	FhG-ISE
a-Si	9.6±0.3	1.070(ap)	0.859	17.6	63.0	NREL(4/03)	U.Neuchatel
a-Si/nc-Si/nc-Si (tandem)	12.5±0.7	0.27(da)	2.011	9.11	68.4	NREL(3/09)	United Solar stabilizat
a-Si/mc-Si (tandem)	11.9±0.8	1.227	1.346	12.92	68.5	NREL(8/10)	Oerlikon
a-Si/mc-Si (tandem)	11.7±0.4	14.23(ap)	5.462	2.99	71.3	AIST(9/04)	Kaneka
CIGS	20.3±0.6	0.5015(ap)	0.740	35.4	77.5	FhG-ISE(6/10)	ZSW
CdTe	16.7±0.5	1.032(ap)	0.845	26.1	75.5	NREL(9/01)	NREL
GaAs	27.6±0.8	0.9989(ap)	1.107	29.6	84.1	NREL(11/10)	Alta Devices
InP	22.1±0.7	4.02(t)	0.878	29.5	85.4	NREL(4/90)	Spire
GaInP/GaInAs/Ge 3-J (concentrare)	41.6±2.5 (364-suns)	0.3174(da)	3.192	1.696A	88.74	NREL(8/09)	Spectrolab
InGaP/GaAs/InGaAs 3-J (1-sun)	35.8±1.5 (1-sun)	0.880(ap)	3.012	13.9	86.3	AIST(9/09)	Sharp
Colorant organic	11.2±0.3	0.219(ap)	0.736	21	72.2	AIST(3/06)	Sharp
Polimer organic	8.3±0.3	1.031(ap)	0.816	14.46	70.2	NREL(11/10)	Konarka

(da) = suprafața desemnată pentru iluminare, (ap) = suprafața deschidere, (t) = suprafața totală; FF = factorul de umplere.

Creșterea randamentelor de conversie ale celulelor solare are un mare impact în întregul lanț al costurilor și înseamnă mai puțină sticlă și mai puține alte materiale pentru module, precum și costuri mai mici pentru instalare. Astfel au fost efectuate multe activități de R&D pentru diferitele tipuri de celule solare și s-au obținut anumite îmbunătățiri ale randamentelor de conversie.

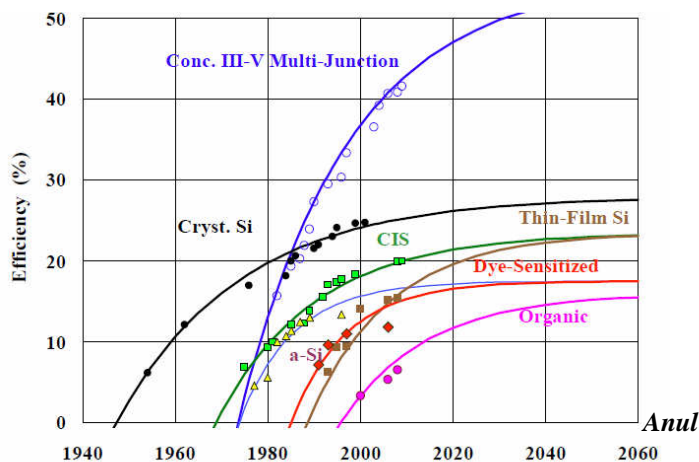


Fig. 1.3: Predicțiile de viitor pentru randamentul pentru diferite tipuri de celule.

Fig. 1.3 prezintă previziunile de viitor pentru randamentele diferitelor tipuri de celule solare (idee originală a Profesorului A. Goetzberger [2], modificată de M. Yamaguchi [13]).

Analize randament/cost pentru diferite tipuri de celule solare

Fig. 1.4 reprezintă regimurile randament/cost per unitatea de suprafață pentru celulele solare curente (Si monocristalin, straturi subțiri) cu țintele pe termen scurt și mediu și cele pe termen lung. Deoarece studiile de cost pentru oricare strat subțire de până acum au arătat că se pot obține costuri *sub 100USD/m²* pentru instalații PV mari, aceste propuneri de ținte par a fi rezonabile.

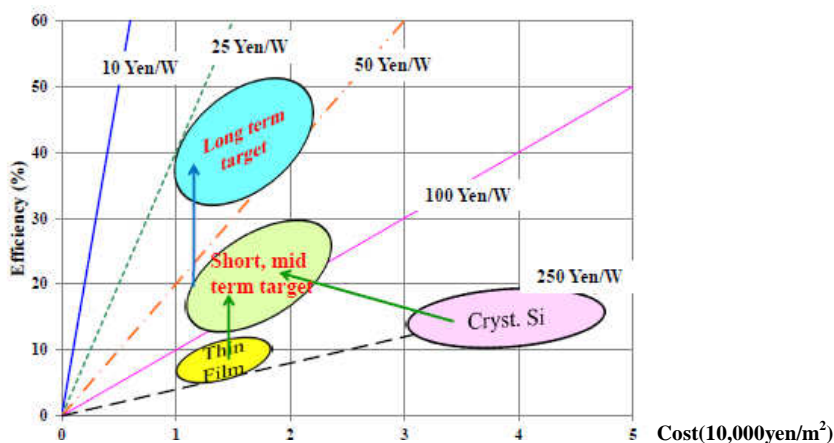


Fig. 1.4: Regimurile randament/cost per unitatea de suprafață, pentru celulele solare curente (Si monocristalin, straturi subțiri), ținte pe termen scurt, mediu și lung.

Capitolul 2

Probleme generale ale optoelectronicii celulelor solare

Parametri optici importanți, analizați mai jos, ai unei celule solare sunt:

- **Absorbanța**

Absorbanța cuantică reprezintă fracția din radiația solară incidentă la o energie fonică dată E , care este absorbită de material pentru a produce o pereche de electron-gol [21]. Ea poate fi măsurată și calculată, fie în funcție de energia fotonului $a(E)$, fie în funcție de lungimea de undă a acestuia $a(\lambda)$. Dacă absorbanța este multiplicată cu fluxul de fotoni incident, se pot calcula numărul de perechi electron-gol care poate fi obținut. Acest rezultat poate fi multiplicat cu sarcina electronului q ; prin integrare pe întregul spectru solar se obține curentul maxim care poate fi extras dintr-un dispozitiv fotovoltaic în condițiile unui anumit material de absorbție solară.

Absorbanța cuantică poate fi corelată de doi parametri optici ai unui material, respectiv indicele de refracție n și coeficientul de extincție k .

$$n_c = n - i \cdot k \quad (2.1)$$

În relația 2.1 n_c reprezintă indicele de refracție complex. Uzual, n_c , n și k pot fi determinați cu ajutorul unei instalații de elipsometrie. Aceasta metodă se bazează pe faptul că lumina liniar polarizată este eliptic polarizată, atunci când este reflectată de un material semiconductor utilizat la celulele solare.

- **Gapul celulei solare**

Lărgimea de bandă optică (gap-ul) al materialului absorbant, al celulei solare. Aceasta este reprezentată de energia minimă necesară pentru a ridica un electron într-o stare excitată sau pe un nivel de energie superior, astfel încât acesta să poată să fie condus prin celula solară la rezistența de sarcină [23, 24]. În cazul Si, lărgimea de bandă energetică este de 1,1eV, astfel încât lungimea de undă corespunzătoare este de 1100 nm. Gap-ul poate stabili limitele superioare ale randamentului de conversie solară în cazul unei celule solare. Dacă gap-ul este prea mare, materialul va absorbi numai lungimile de undă scurte, iar dispozitivul

va permite, în acest caz, producerea numai a unui fotocurent mic. Dacă gap-ul este prea mic, celula poate produce un fotocurent mare rezultând o tensiune mică și un randament scăzut. Gap-ul optim pentru un spectru solar AM1,5 este de 1,35eV.

Coeficientul de absorbție poate fi utilizat la stabilirea *lărgimii de banda* E_g .

În cazul *materialelor celulelor solare de lărgime de banda directă*, cum sunt GaAs și CdTe, tranziția optică nu necesită asistență de la energia vibrațiilor de rețea, denumite **fotoni**. Relația între coeficientul de absorbție și lărgimea de banda este [25]:

$$\alpha(e) = C_d (e - E_g)^{1/2} \quad (2.2)$$

În relația (2.2), C_d este o *constantă specifică materialului* de lărgime de bandă directă cu valoarea $C_d = 2 \cdot 10^4$, dacă α este dat în cm^{-1} . În cazul *materialelor cu lărgime de bandă indirectă*, cum sunt Si sau Ge este necesară asistența fotonului. În acest caz, coeficientul de absorbție are forma [26]:

$$\alpha(e) = \frac{C_i (E - E_g + E_p)^2}{\exp(E_p / kT) - 1} + \frac{C_i (E - E_g - E_p)^2}{1 - \exp(-E_p / kT)} \quad (2.3)$$

În relația (2.3) C_i este o *constantă specifică materialului* de lărgime de bandă indirectă.

• Straturi antireflectoare (SAR) și grosimea optimă

Una dintre problemele esențiale ale modelării optice a celulelor solare constă în optimizarea absorbției prin metode care includ straturi antireflectoare, precum și tehnici care forțează lumina să călătorească pe drumuri lungi în interiorul dispozitivelor fotovoltaice.

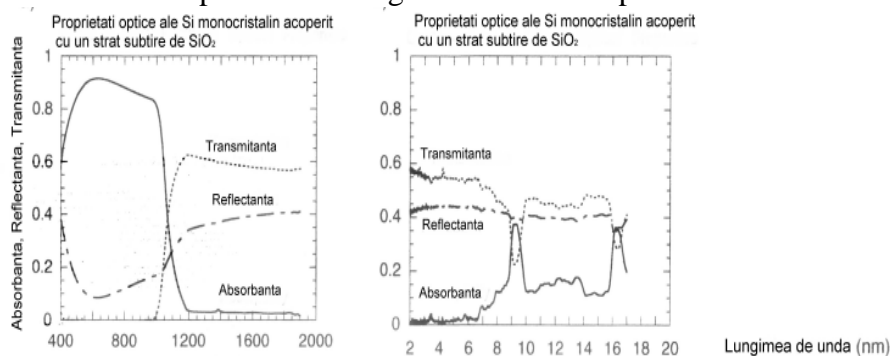


Fig. 2.1: Caracteristicile optice ale unei plăcuțe de Si acoperite cu un strat de SiO_2 în: (a) domeniile vizibil și IR apropiat; (b) IR îndepărtat

În figurile 2.1(a) și 2.1(b) sunt reprezentate *transmitanța, reflectanța și absorbția spectrală* obținute pentru o plăcuță de Si cu o grosime de $260\mu\text{m}$, acoperite cu un strat subțire de SiO_2 ; măsurătorile au fost efectuate prin *metoda FTIR* (Transformata Fourier a Radiației Infraroșii), pentru domeniile vizibil și IR apropiat -Fig. 2.2(a), respectiv IR îndepărtat -Fig. 2.2(b). În Fig. 2.2(b) se prezintă comportarea caracteristicilor optice ale materialului în IR îndepărtat. Se constată prezența unei absorbții datorate unui defect, a unui dopant sau a unei impurități pentru $\lambda \approx 9\mu\text{m}$ și a absorbției purtătorilor liberi pentru $\lambda \approx 10...14\mu\text{m}$. O astfel de tehnică implică texturarea suprafeței frontale sau posterioare a celulei solare [21,25].

Reducerea pierderilor prin reflexie poate fi realizată prin două metode [28]:

- depunerea unui strat anti-reflectator format dintr-un strat sau mai multe de material dielectric transparent, având diferiți indici de refracție;
- formarea pe cale artificială a unei suprafețe rugoase care permite incidența multiplă a razelor și astfel, o transmisie îmbunătățită în material.

Cele două procedee combinate pot să reducă reflectanța aproape de zero.

• Reflectanța

În Fig. 2.2 sunt prezentate valorile reflectanței mai multor suprafețe măsurate la Institutul de Energie Solară al Universității Politehnice din Madrid [28]. În particular, suprafețele cu TiO_x ($\text{TiO}_2:\text{SiO}_2:\text{SiO}$) și Ta_2O_5 arată o valoare minimă aproape de zero pentru lungimi de undă de 750nm și respectiv, de 600nm.

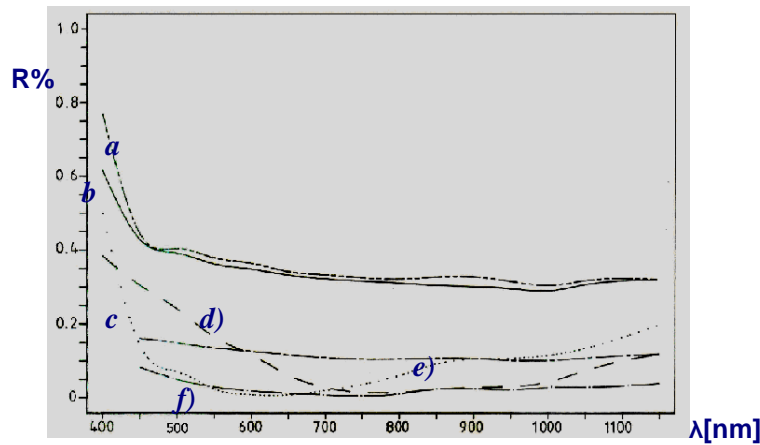


Fig. 2.2: Reflectanța în funcție de lungimea de undă pentru diferite tratări ale suprafeței în cazul celulelor solare pe bază de siliciu (A. Moussi)

a) Si așa cum este tăiat; b) Si lustruit; c) Ta_2O_5 ; d) Si texturat; e) TiO_x ; f) Si textured+ TiO_x .

Deoarece *indicele de refracție* pentru Si este funcție de λ , o *grosime optimă SAR* poate fi selecționată pentru o anumită lungime de undă. Stratele anti-reflectoare (*SAR*) sunt realizate de obicei pentru un maxim în spectrul solar reprezentat de $\lambda = 600nm$. Astfel, o grosime optimă a stratului de TiO_2 , de 70nm pe o plăcuță de siliciu corespunde unui minim al reflectanței de 1-2% pentru $\lambda = 600nm$ (pentru domeniul 350-1100nm reflectanța este de 10%). Tehnica *SAR* poate fi utilizată pentru obținerea de plăcuțe de siliciu cu diferite culori (proprietăți optice) în funcție de aplicațiile solicitate și în condițiile în care acest aspect este mai important decât maximizarea randamentului de conversie.

Capitolul 3

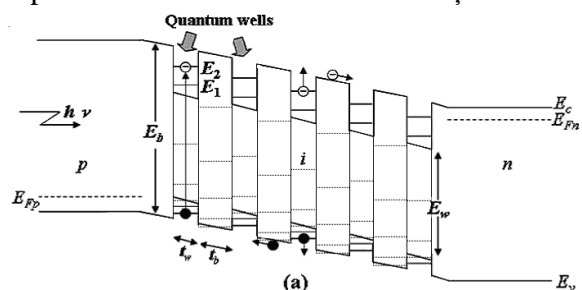
Optoelectronica celulelor solare cu gropi cuantice (Quantum Wells)

3.1 Modelarea electrică și simulări numerice

Printre acestea, primele celule utilizate din a treia generație de celule solare, au fost celulele solare cu gropi cuantice. S-a început studiul sistematic al celulelor multistrat cu dimensiuni realmente cuantice – sub 10nm (celule *MLPV* cu *gropi cuantice-Quantum Wells*) celule *MQW* [31,32]. Într-adevăr, analiza efectelor cuantice a dovedit că dimensiunile cuantice sunt de ordinul a 5nm sau mai puțin, când structura de benzi este înlocuită cu o structură de nivele de energie (*cuasi-benzi*), iar legea conservării impulsului nu se mai aplică riguros.

Celulele solare cu gropi cuantice se bazează pe avantajele sistemelor cu dimensionalitate redusă. Există două contribuții importante. *Prima* este puternicul efect de confinare cuantică (*quantum confinement – QC*). S-a demonstrat că, la dimensiuni cuantice, natura materialului joacă un rol secundar în comparație cu confinarea cuantică. *A doua* contribuție este dată de rolul crescut al suprafețelor/interfețelor. Într-adevăr, raportul dintre numărul atomilor situați la suprafața unui sistem cu dimensionalitate redusă (0D, 1D, 2D sau fractal) și numărul total de atomi este $N_s/N = 2(3 - \delta)a/d$, unde δ este dimensionalitatea sistemului, a distanța interatomică (determinând grosimea stratului de suprafață și depinzând de orientarea acestuia față de axele cristaline), iar d dimensiunea (minimă) a sistemului (Fig. 3.1).

Fig. 3.1: Schema energetică a unei celule fotovoltaice cuantice de tip p-i-n: structură multistrat



În cazul celulelor din a patra generație (celule cu granule cuantice), rolul granulelor cuantice (granule cu diametre suficient de mici) este în primul rând să mărească spectrul de absorbție (în mod analog celulelor **MQW**). Pentru aceasta, este de preferat ca granulele să fie realizate dintr-un semiconductor cu bandă interzisă mai îngustă decât cea a matricei în care sunt imersate granulele (pentru a utiliza nivelele rezonante, cu o absorbție mult mai eficientă decât cele de confinare din banda interzisă [35]). În al doilea rând granulele cuantice măresc timpul de viață al purtătorilor. Într-adevăr, dacă unul din purtătorii generați într-o granulă „scapă” afară, cei doi purtători nu mai pot recombina. În general, calculul eficienței cuantice interne a celulelor cu granule cuantice se face pornind de la evaluarea elementelor de matrice ale hamiltonianului de interacție, utilizând funcțiile de undă ale electronului în modelul **IRQW** cu simetrie sferică (produse de funcții sferice și funcții Bessel sferice) și valorile nivelelor de energie corespunzătoare.

- Simularea numerică pentru eficiența cuantică a tranzițiilor între nivelele rezonante pentru GaAs și pentru eficiența cuantică a tranzițiilor între nivelele de confinare pentru $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ [36,37,38]

Pe baza modelului matematic pentru eficiența cuantică a tranzițiilor între nivelele rezonante pentru GaAs și pentru randamentul cuantic a tranzițiilor între nivelele de confinare pentru $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ sunt prezentate simulări pentru celule având dimensiunea de 2,5cm; grosimea t (grosimea gropii) se consideră de 10nm. Pentru tranziții între nivelele de confinare a fost analizat cazul $n = 2$, deoarece eficiența cuantică scade rapid o dată cu creșterea lui n . Raportul între $n = 2$ și $n = 3$ este de 13,174, iar între $n = 2$ și $n = 4$ este de 77,792.

Materiale analizate sunt GaAs și $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, sunt materiale des utilizate pentru obținerea celulelor solare. Pentru permitivitatea relativă, ϵ_r , s-a folosit atât pentru GaAs cât și pentru $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ relația [39]:

$$\epsilon_r = a_0 \left\{ f(\chi) + \frac{f(\chi_0)}{2} \left(\frac{e_0}{\delta_0} \right)^{\frac{3}{2}} \right\} + b_0 \quad (3.1)$$

unde:

$$a_0 = 6,3 + 19 \cdot x; \quad b_0 = 9,4 - 10,2 \cdot x; \quad e_0 = 1,425 + 1,155 \cdot x + 0,37 \cdot x^2;$$

$$f(\chi) = \frac{2 - \sqrt{1 + \chi} - \sqrt{1 - \chi}}{\chi^2}; \quad \chi = \frac{hc}{e_0}; \quad \chi_0 = \frac{hc}{\delta_0}; \quad \delta_0 = 1,765 + 1,115 \cdot x + 0,37 \cdot x^2.$$

Relația (3.1) este valabilă pentru $x \in [0,1]$.

1) Constantele de material utilizate pentru GaAs sunt: gap: $E_g = 1,424 \text{ eV}$; pentru ϵ_r s-a folosit relația (3.1); masa efectivă a electronului: $m_e^* = 0,067 \cdot m_e$; masa efectivă a golului: $m_g^* = 0,62 \cdot m_e$;

2) Constantele de material utilizate pentru $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ sunt: masa efectivă a electronului este de forma: $m_e^* = (0,067 + 0,083 \cdot x) \cdot m_e$; pentru ϵ_r s-a folosit relația (3.1).

Rezultate pentru simularea eficienței cuantice a tranzițiilor între nivelele rezonante H_{fi} , pentru GaAs, sunt prezentate în figurile 3.2a și 3.2b, iar a eficienței cuantice a tranzițiilor între nivelele de confinare $\eta_Q^{(i)}(\lambda)$, pentru $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, sunt prezentate în figurile 3.3 și 3.4.

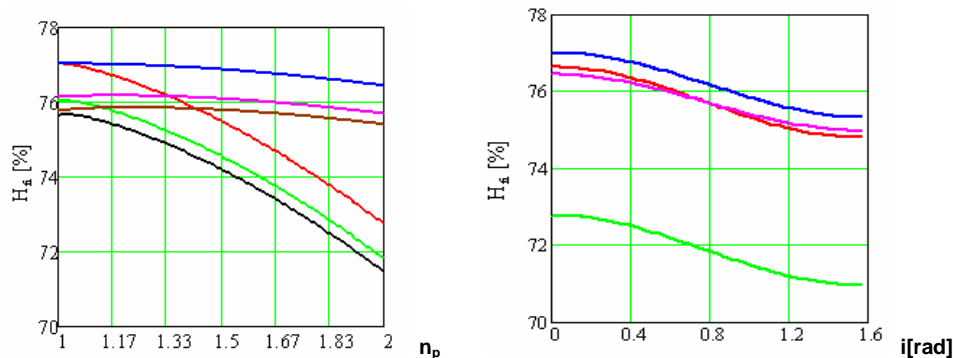
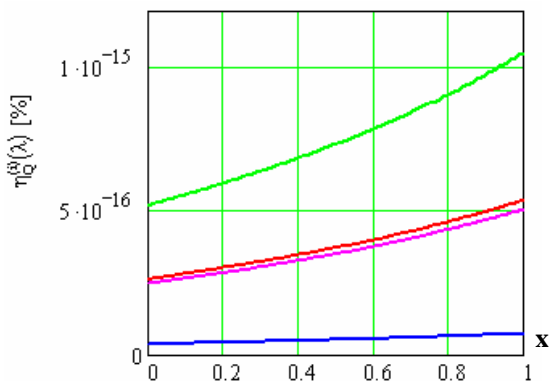


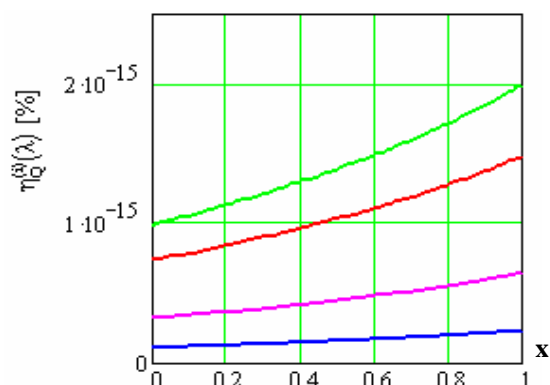
Fig. 3.2: Eficiența cuantică a tranzițiilor între nivelele rezonante pentru GaAs **a)** în funcție de indicele de refracție al prisme; **b)** în funcție de unghiul de incidență a razei ce cade pe prismă

Pentru Fig. 3.2a: unghiul prisme este $\alpha = \pi/6$ și $i = 0rad; 0,8rad; 1rad$ pentru curbele cu roșu, verde negru, $\alpha = 2\pi/3$ și $i = 0rad; 0,8rad; 1rad$ pentru curbele cu albastru, mov și maro. Pentru Fig. 3.2b unghiul prisme este $\alpha = \pi/6$ și indicele de refracție $n_p = 1,2; 2$ pentru curbele cu roșu și verde, și respectiv $\alpha = 2\pi/3$ și indicele de refracție $n_p = 1,2; 2$ pentru curbele cu albastru și mov.



Pentru Fig. 3.3 unghiul prisme este $\alpha = \pi/6$, unghiul de incidență al razei ce cade pe prismă este $i = 0,2rad; 1,2rad$ pentru curbele cu roșu și verde, și respectiv $\alpha = 2\pi/3$, și $i = 0,2rad; 1,2rad$ pentru curbele cu albastru și mov.

Fig. 3.3: Eficiența cuantică a tranzițiilor între nivelele de confinare pentru $Al_xGa_{1-x}As$ în funcție de cantitatea de aluminiu; indicele de refracție al prisme este $n_p = 1,5$



Pentru Fig. 3.4. unghiul prisme este $\alpha = \pi/6$, unghiul de incidență al razei ce cade pe prismă este $i = 0,2rad; 1,2rad$ pentru curbele cu roșu și verde, și respectiv $\alpha = 2\pi/3$ și $i = 0,2rad; 1,2rad$ pentru curbele cu albastru și mov.

Fig. 3.4: Eficiența cuantică a tranzițiilor între nivelele de confinare pentru $Al_xGa_{1-x}As$ în funcție de cantitatea de aluminiu; indicele de refracție al prisme este $n_p = 2$

Din analiza datelor obținute rezultă:

Eficiența cuantică a tranzițiilor între nivelele rezonante pentru GaAs indică valori foarte mari de **cca.70%**;

- este mai mare pentru unghiul prisme α ;
- scade lent odată cu creșterea unghiului de incidență;

Eficiența cuantică a tranzițiilor între nivelele de confinare pentru $Al_xGa_{1-x}As$ are următoarele caracteristici;

- are valori foarte mici în comparație cu cea între nivelele rezonante;
- este mai mică pentru unghiul prisme α mai mare;
- crește lent odată cu creșterea unghiului de incidență;
- crește odată cu creșterea cantității de Al;
- crește odată cu creșterea indicelui de refracție al prisme, și scade cu creșterea unghiului de incidență al razei incidente.

3.2. Modelarea optică și simulări numerice

Modelarea diferiților parametri optici ai celulelor solare cu gropi cuantice multiple

- Efectele câmpului electric asupra indicelui de refracție al gropilor cuantice multiple [36,38,45]

În cazul celulelor solare cu gropi cuantice, a fost introdusă ipoteza unui câmp electrostatic generat de regiunile încărcate. Din acest motiv, este așteptată o schimbare non-fluctuantă în indicele de refracție. Pe baza rezultatelor obținute de către Barnham [46], trebuie menționat că gropile cuantice din cadrul celulelor solare de acest tip au rolul de a utiliza regiunea spectrului, care nu este de obicei adecvată pentru producerea unei perechi de purtători de fotoni în benzile de conducție și de valență, dar este posibilă generarea de particule în gropile cuantice respective.

S-a utilizat, pentru *indicele de refracție* al celulei solare cu gropi cuantice, următoarea expresie:

$$n_2 = n = \sqrt{1 + \frac{E_d}{E_o} + \frac{E_d}{E_o^3} E^2 + \frac{\eta}{\pi} E^4 \ln\left(\frac{2E_o^2 - E_g^2 - E^2}{E_r^2 - E^2}\right)} \quad (3.2)$$

În această relație, parametrii E_g , E_v , E_o și E_d sunt următorii: $E_g = 1,6729$; $E_v = 1,4235$; $E_o = 2,6 + 0,75 E_v$; $E_d = F / E_o$. Parametrul η are expresia:

$$\eta = \frac{\pi E_d}{2E_o^3(E_o^2 - E_r^2)} \quad (3.3)$$

Rezultatele simulării indicelui de refracție în funcție de energia fotonului sunt reprezentate în Fig. 3.5.

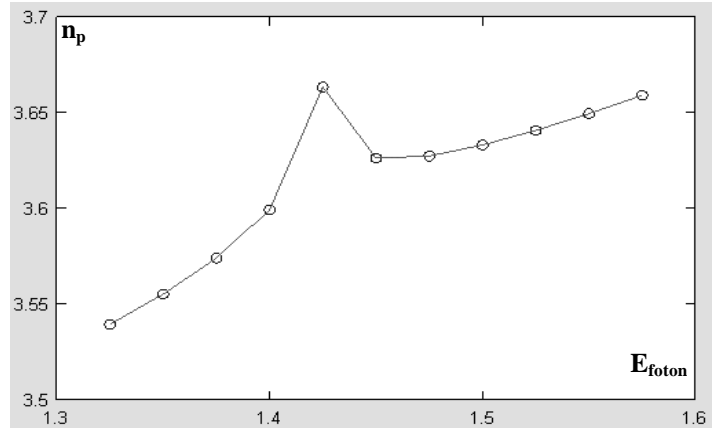


Fig. 3.5: Indicele de refracție al celulelor cu gropi cuantice în funcție de energia fotonului (modelul simplificat)

- Modelarea și simularea E_{foton} reflectanței celulelor solare cu gropi cuantice [36,37,38]

Se poate utiliza modelul indicelui de refracție pentru explorarea relației dintre indicele de refracție și reflectanță. Pentru a realiza acest lucru, modelul indicelui de refracție trebuie combinat cu relațiile Fresnel, permițând astfel determinarea pierderilor prin reflexie ale structurii cu gropi cuantice

În Fig. 3.6 este prezentată rezultatul simulării optice a celulelor solare cu gropi cuantice (pe baza modelului analizat pentru indicele de refracție prin relațiile (3.2)) sub forma dependenței reflectanței R , în funcție de lungimea de undă pentru diferite grosimi d de strat anti-reflectator; s-a considerat cazul de strat anti-reflectator ($n_1 = 1.4 - SiO$).

Rezultatele generate de model sunt în concordanță cu rezultatele experimentale obținute.

Modelul reflectanței poate fi utilizat pentru a determina efectele variației numărului de gropi cuantice asupra indicelui de refracție.

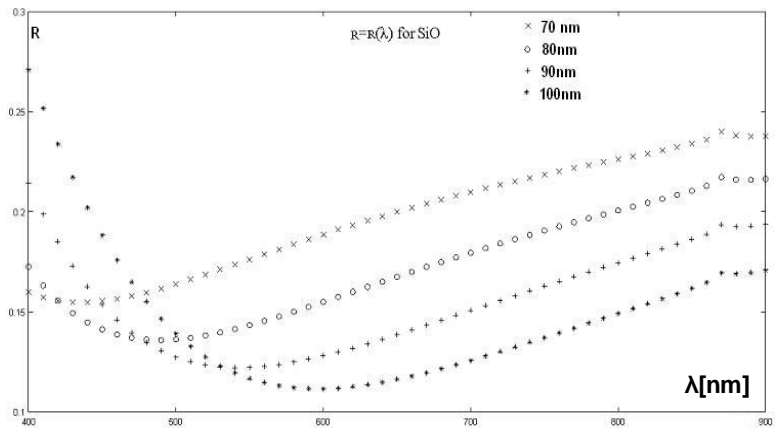


Fig. 3.6: Modelul reflectanței pentru o celulă solară QW, pentru un strat anti-reflectator de SiO

3.3 Modelarea eletro-optică și simularea numerică a eficienței cuantice a celulelor solare MQW tip $GaAs/Al_xGa_{1-x}As$

Celulele solare cu gropi cuantice discutate sunt de tipul $Al_xGa_{1-x}As$, unde x reprezintă concentrația de aluminiu [49,50]. Pentru obținerea curbelor de *absorbție spectrală*, $\alpha = \alpha(\lambda)$ pentru diferite concentrații, prin simulare numerică pe baza modelului propus de Hutchby J. și Fudurich R, [51].

Modelul se bazează pe rezultatele stabilite de Connolly J. [52] precum și alte rezultate obținute de grupul de cercetare a lui Barnham.

Am discutat cazul **lungimii de difuziune mare**. În acest caz, lungimea de difuzie, fiind mare în raport cu lungimea z a stratului, expresia eficienței cuantice devine:

$$QE \cong \frac{\alpha k(\alpha - S)}{(k^2 - \alpha^2)(S \sinh(kz) - k \cosh(kz))} \cong \frac{\alpha - S}{\alpha^2(S_z - 1)} \quad (3.4)$$

Aceasta expresie este acceptabilă cu o precizie de aproximativ 5% din valoarea lui QE. Eficiența cuantică în acest caz este determinată, în mare măsură, de parametrul de recombinare superficială. Pierderile de recombinare în celulă devin neglijabile, comparativ cu pierderile la suprafață, iar QE atinge un maxim care este limitat de recombinarea superficială.

Curbele absorbantei spectrale obținute sunt reprezentate în Fig. 3.7, pentru diferite valori ale concentrației de aluminiu [53,54].

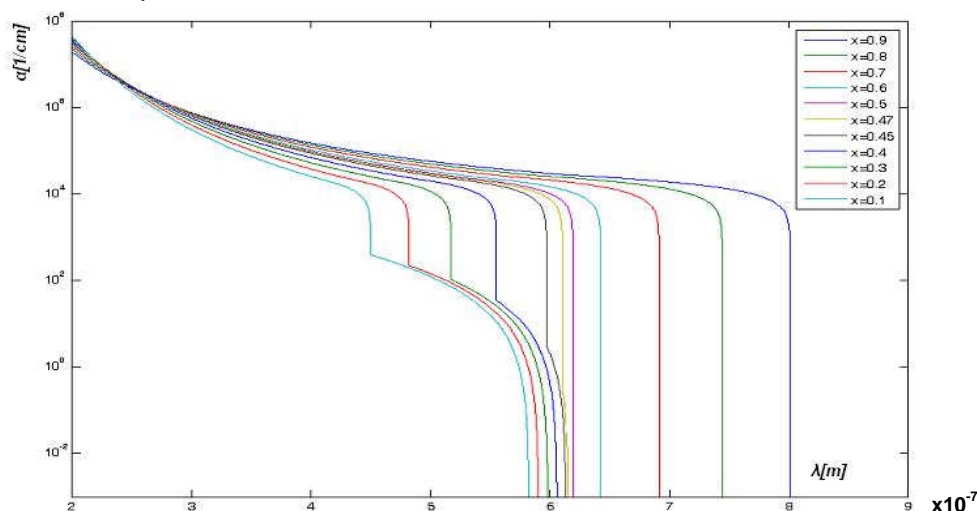


Fig. 3.7: Curbele absorbantei spectrale pentru $\alpha = \alpha(\lambda)$ pentru diferite concentrații de Al ale celulelor $\text{GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$

Prin analiza datelor obținute rezultă:

- eficiența cuantică crește o dată cu creșterea lui λ având valori semnificative, de maximum 90%, în cazul lungimii de difuzie mare.
- eficiența cuantică crește o dată cu creșterea grosimii stratului z și respectiv a câmpului efectiv ϵ_f .

Capitolul 4

Optoelectronica celulelor solare cu polimeri organici

4.1. Principiul de funcționare și tipurile de celule solare cu polimeri

Dispozitivele fotovoltaice bazate pe materiale polimerice au fost introduse datorită obținerii relativ ușoare și a costului scăzut. Semiconductorii organici au câteva avantaje importante: (a) obținerea la un preț scăzut, și (b) fabricarea ușoară din peliculă subțire a dispozitivelor prin evaporare/sublimare în vid, prin turnare sau prin tehnologii de printare. Semiconductorii organici în strat subțire au coeficienți de absorbție de până la 10^5cm^{-1} , ceea ce îi face buni cromofori pentru aplicații optoelectronice. Banda interzisă a acestora poate fi ajustată prin sinteză chimică (de exemplu, pentru modificarea culorii emise de o diodă luminescentă (LED – light emitting diode)). Valoarea mobilității purtătorilor de până la $10 \text{cm}^2/\text{Vs}$ a permis ca aceste materiale să fie competitive cu siliciul amorf [55].

Materialele având un electron π delocalizat pot absorbi lumina solară, producând purtători de sarcină și transportul acestor sarcini. Substanțe ca ftalocianina și perilena sunt folosite pentru obținerea de celule solare în straturi subțiri.

Ftalocianina este de tip p, acționând ca un donator de electroni, în timp ce perilena și derivatele acesteia sunt de tip n, fiind un material electron-acceptor.

Semiconductorii organici pot fi considerați ca "*semiconductori intrinseci de bandă largă*" (banda interzisă ~1,4eV) până la nivelul "dielectric" (banda interzisă ~3eV) cu o densitate de purtători de sarcină neglijabilă, la temperatura camerei, în întuneric.

Dopajul chimic, fotochimic sau electrochimic este folosit pentru a introduce purtători de sarcină extrinseci în semiconductorii organici. Transferul electronului fotoindus de la donor la acceptor eliberează purtători de sarcină (sarcini pozitive pe nivelul donor, adică de tip-*p*, și sarcini negative pe nivelul acceptor, adică de tip-*n*). Dispozitivele dublu strat de tipul donor-acceptor pot lucra astfel ca o joncțiunea clasică *p-n*.

C₆₀ - fulerena este un acceptor, care poate fi electrochimic redusă până la 6 electroni. Pentru reacțiile de transfer a electronilor fotoinduși a fost introdusă în matrici cu proprietăți acceptoare de goluri. Solubilitatea fulerenei este limitată. A fost sintetizată o derivată solubilă a C₆₀, *PCBM*, care este folosită la celule solare polimer/fulerenă [56].

Principiul de funcționare: Procesul de conversie a energiei solare în energie electrică folosind celule solare organice poate fi schematic descris astfel: **1)** absorbția unui foton ce conduce la formarea unei stări excitate, crearea perechii "electron-gol" (excitonul); **2)** difuzia excitonului la o regiune unde are loc disocierea, adică, separarea, și **3)** transportul înăuntrul semiconductorului organic la electrozii corespunzători. Foto-tensiunea care apare este rezultatul direct al abaterii de la starea de echilibru termodinamic în urma deplasării purtătorilor de sarcină, generați de radiația solară, sub acțiunea câmpurilor locale, care în cazul semiconductorilor organici se datorează modificării compoziției chimice [57].

Prin absorbția luminii, în donor ia naștere o stare excitată din care electronul poate fi transferat la orbitalul neocupat *LUMO* al acceptorului. În urma transferului, golul ce apare rămâne în materialul donor. Măsurătorile au aratat că transferul sarcinii fotoinduse într-un astfel de compus are loc în **45fs**, deci într-un timp mult mai mic decât alte procese asemănătoare (de exemplu: tranziția fotoluminiscentă durează în jur de *Ins*). În plus, sarcinile separate în astfel de compuși sunt metastabile la temperaturi joase.

Sarcinile apărute trebuie să fie transportate către electrozii corespunzători în decursul timpului de viață. Transportul sarcinilor este afectat de recombinarea în timpul drumului către electrozi, în special dacă electronii și golurile sunt transportate prin același material [58].

Purtătorii de sarcină sunt extrași din dispozitiv prin două contacte selective. Un contact din oxid de indium și staniu (*ITO*) cu un nivel Fermi de aproximativ **4,8eV** se potrivește cu nivelele *HOMO*-ului din majoritatea polimerilor conjugați (contact pentru goluri), iar un contact din aluminiu cu un nivel Fermi de aproximativ **4,3eV** se potrivește cu *LUMO* a acceptorului *PCBM* (contact pentru electroni).

Prima structură a fost o structură de tip diodă Schottky, care avea o eficiență de conversie de sub 0,1%. În 1986, Tang a introdus heterojoncțiunea planară donor-acceptor, care avea o eficiență de conversie mai mare de 1%. În 1991 Hiramoto au dezvoltat ideea lui Tang, introducând conceptul de heterojoncțiune în volum (*Bulk heterojunction - BH*). În 2004 Forest au introdus conceptul de heterojoncțiune hibridă în volum (*HH*), cu o eficiență mai mare de 5%. Într-o heterojoncțiune dublu-strat, semiconductorii de tip *p* și *n* sunt dispuși consecutiv unul peste celălalt. Astfel de dispozitive -*celule solare dublu-strat*- dublu-strat folosind semiconductorii organici au fost realizate pentru diferite combinații de materiale [59].

4.2. Modelarea electrică și simulări numerice

S-au folosit două metode de modelare, clasică PC-1D și cuantică - matrici de transfer.

Simularea modelului clasic PC-1D al celulelor fotovoltaice organice[54,57]

În absența iluminării curentul printr-o celulă pe baza de polimeri, cum ar fi sticlă/oxid de titan(*ITO*)/*PEDOT*/*MEH-PPV*:*PCBM* (1:4)/*LiF*/*Al* este de forma

$$J = J_s \left\{ \exp \left[\frac{e(U - R_s J)}{\gamma k_B T} \right] - 1 \right\} + \frac{U - R_s J}{R_p} \quad (4.1)$$

unde: *J* = densitatea de curent prin celula solară, *J_s* = densitatea curentului de saturație, *e* = sarcina electronului, *U* = tensiunea la bornele diodei, *γ* = factorul de idealitate al diodei, *k_B*

= constanta lui Boltzman, T = temperatura celulei solare, R_s = rezistența serie și R_p = rezistența paralel.

În prezența iluminării curentul este de forma

$$J = J_s \left\{ \exp \left[\frac{e(U - R_s I)}{\gamma k_B T} \right] - 1 \right\} + \frac{U - R_s I}{R_p} - J_L \quad (4.2)$$

unde J_L este densitatea curentului de iluminare, care este de forma :

$$J_L = e G \mu \tau \left(\frac{U_b - U}{L} \right) \cdot \left[1 - \exp \left(- \frac{L^2}{\mu \tau (U_b - U)} \right) \right] \quad (4.3)$$

unde: G = rata de generare de purtători în celulă; U_b = tensiunea de barieră, L = grosimea stratului activ al celulei solare; iar $\mu * \tau$ este de forma: $\mu * \tau = \mu_p * \tau_p + \mu_n * \tau_n$

cu: μ_p = mobilitatea golurilor, τ_p = timpul de viața a golurilor, μ_n = mobilitatea electronilor, τ_n = timpul de viața a electronilor. În Fig. 4.1 este prezentat circuitul echivalent corespunzător unei celule solare: a) în absența și b) în prezența iluminării.

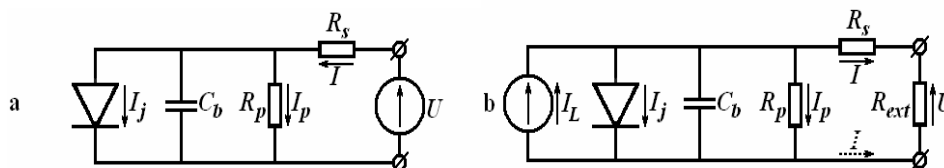


Fig. 4.1: Circuitul echivalent al unei celule solare:

a) în absența iluminării;

b) în prezența iluminării

În Fig. 4.2 este prezentat curentului unei celule la întuneric pentru diferite valori ale R_p . Creșterea valorii lui R_p conduce la scăderea curentului, scădere ce se accentuează brusc dacă aceasta crește de 5 ori (curba albastră).

Fig. 4.2: Variația curentului unei celule la întuneric cu U pentru diferite rezistențe R_p ($0.01 \Omega \text{ cm}^2$ = roșu, $0.05 \Omega \text{ cm}^2$ = mov, $0.1 \Omega \text{ cm}^2$ = verde, $5 \Omega \text{ cm}^2$ = albastru)

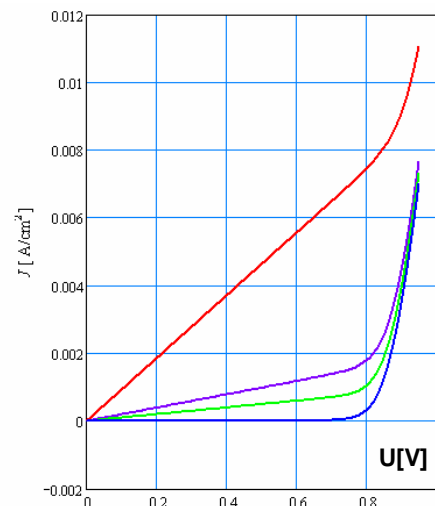
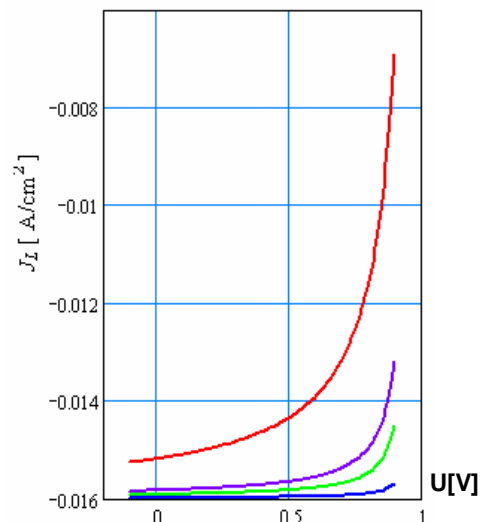
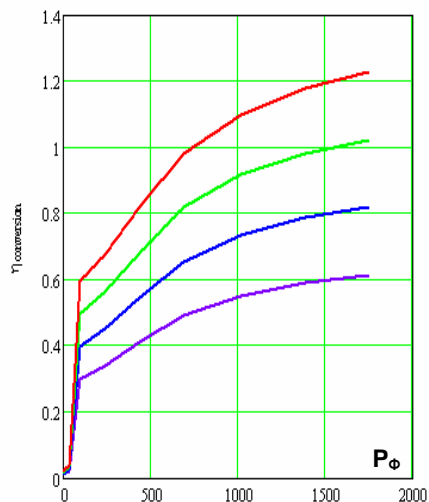


Fig. 4.3: Variația curentului J_L cu tensiunea pentru diferite produse $\mu \tau$ ($1 \cdot 10^{-9} \text{ cm}^2/\text{V}$ = roșu, $5 \cdot 10^{-9} \text{ cm}^2/\text{V}$ = mov, $1 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{V}$ = verde, $5 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{V}$ = albastru)





În Fig. 4.4 este prezentată variația randamentului de conversie cu puterea fluxului luminos pentru diferiți factori de formă.

Fig. 4.4: Variația randamentului de conversie cu puterea de intrare pentru diferiți factori de formă (0,3= mov, 0,4= albastru, 0,5= verde, 0,6 = roșu)

Rezultatele obținute în cadrul simulării modelului clasic PC-1D au permis evidențierea următoarelor concluzii:

- S-au analizat influența unor factori cum ar fi γ și R_p factori ce pot fi modificați constructiv;
- Influența lui G arată necesitatea măririi acesteia, ceea ce se poate realiza crescând fluxul de particule; aceasta se poate obține prin folosirea unor metode de concentrare a fluxului luminos [55]: concentratoare, prisme, lentile etc.
- Se observă variația puternică a curentului J_L cu produsul $\mu\tau$ ceea ce arată influența atât a naturii materialului din care este obținută celula, cât și a grosimii celulei;
- Randamentul de conversie crește cu factorul de formă, factor ce depinde de modul de obținere a celulei;
- Randamentul de conversie crește lent cu puterea fluxului luminos, este destul de mic, dar este compensat de faptul că astfel de celule au un preț de cost scăzut.

4.3. Modelarea și simularea caracteristicilor $J-V$ a celulelor solare cu polimeri, bazată pe modelul diodei

Datorită mobilității purtătorilor/*carrier mobility* care au valori de până la $10 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, celulele solare cu polimeri au devenit competitive față de cele bazate pe siliciu amorf. Rezultatele obținute pentru astfel de celule au arătat că până acum se poate atinge o eficiență de conversie de 10% [61]. Am folosit un circuit de tip diodă pentru a echivala o celulă solară bazată pe polimeri. Pe baza analizei statistice a datelor experimentale [59] se obține o dependență exponențială atât pentru viteza de generare a purtătorilor cât și pentru rezistența paralelă, în raport cu densitatea de energie a fluxului incident. Utilizând relațiile stabilite prin analiza statistică, s-a găsit o nouă formulă pentru curentul total. Simulând curbele caracteristice $J-V$ s-a putut analiza influența a diferiți parametri asupra comportamentului celulelor solare. Valorile numerice obținute sunt comparabile cu acelea stabilite experimental de diferiți autori [62,63]. densitatea totală de curent în timpul iluminării, J , generată de o celulă solară are următoarea expresie:

$$J = J_s \left\{ \exp \left[\frac{e(V - R_s J)}{\gamma k_B T} \right] - 1 \right\} + \frac{V - R_s J}{R_p} - J_L \quad (4.4)$$

unde J_s este densitatea curentului de saturație; $e > 0$ este sarcina elementară, V este tensiunea aplicată din exterior, R_s este rezistența serie, γ este factorul de idealitate, k_B este constanta Boltzmann, T este temperatura celulei solare, R_p este rezistența paralelă, iar J_L este densitatea curentului generat de lumină.

Analiza simulărilor pentru diferiți parametri ai celulelor solare cu polimeri, folosind modelul diodă [64,65]

Toate programele utilizate au fost scrise în mediul *Mathcad*. Folosind anumiți parametri și utilizând datele experimentale obținute de Aernouts [59] pentru celulele solare standard pe bază de polimeri sticlă, am obținut următoarele dependențe:

$$G = k_1 P_L^{k_2} \quad \text{și} \quad R_p = k_3 P_L^{k_4} \quad (4.5)$$

în care P_L este *densitatea de energie a fluxului luminos incident*, iar k_1 , k_2 , k_3 și k_4 sunt *constante* care au următoarele valori:

$$k_1 = 2.353 \cdot 10^{23} \frac{1}{m^3 \cdot s} \left[\frac{m^2}{W} \right]^{k_2}, \quad k_2 = 1.254, \quad k_3 = 217,088 \Omega \cdot m^2 \left[\frac{m^2}{W} \right]^{k_4}, \quad k_4 = -1.107$$

Coeficientul de corelare a fost mai mare de 0,99 pentru ambele curbe. Aceasta indică o conexiune funcțională între aceste mărimi.

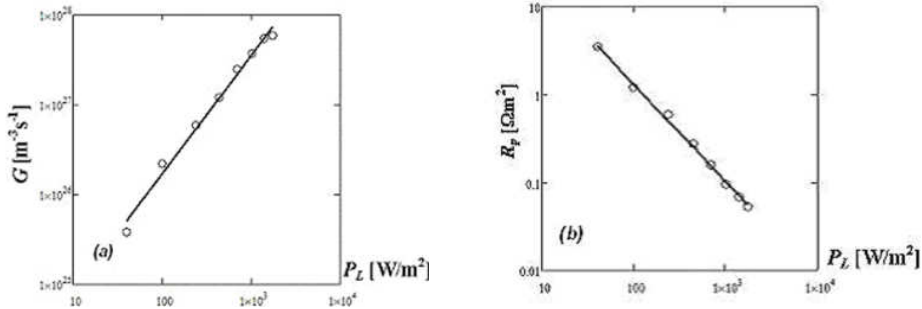


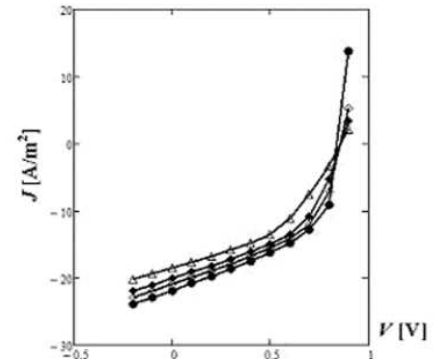
Fig. 4.5: Dependenta vitezei de generare a purtatorilor de (a) densitatea de energie a fluxului luminos incident și de (b) rezistența parala: \circ – puncte obținute din datele experimentale; linia continuă – obținută din ecuația (4.4)

Avem *densitatea totală de curent a unei celule solare pe bază de polimer în prezența iluminării*:

$$J = J_s \left\{ \exp \left[\frac{e(V - R_s J)}{\gamma k_B T} \right] - 1 \right\} + \frac{V - R_s J}{k_3 P_L^{k_4}} - e k_1 P_L^{k_2} \mu \tau \left(\frac{V_{bi} - V}{L} \right) \cdot \left[1 - \exp \left(\frac{L^2}{\mu \tau (V_{bi} - V)} \right) \right] \quad (4.5)$$

Influența diferiților factori asupra densității totale de curent J a fost analizată utilizând ecuația (4.5). Variația lui J în raport cu tensiunea celulei, pentru diferite valori ale lui R_s , este ilustrată în Fig. 4.6. Se poate remarca o ușoară creștere (în valoare absolută) a *densității curentului de scurt-circuit* J_{sc} (J pentru $V = 0$), odată cu creșterea lui R_s . Rezistența R_s apare datorită regiunii neutre și datorită rezistenței contactelor.

Fig. 4.6: Dependenta densității totale de curent în raport cu tensiunea pentru diferite valori ale rezistenței serie (\bullet : $1 \cdot 10^{-4} \Omega \cdot m^2$, \diamond : $50 \cdot 10^{-4} \Omega \cdot m^2$, \blacklozenge : $100 \cdot 10^{-4} \Omega \cdot m^2$, Δ : $200 \cdot 10^{-4} \Omega \cdot m^2$)



Utilizând ecuația (4.5), au fost trasate caracteristicile J - V pentru diferite densități de energie ale fluxului luminos incident; astfel, s-au obținut parametrii caracteristici ai celulei solare: J_{sc} , V_{oc} și J_{max} , U_{max} (*densitatea maximă de curent și tensiunea maximă corespunzătoare energiei maxime generate de celula solară*). Utilizând acești parametri avem *factorul de formă*:

$$FF = \frac{J_{max} V_{max}}{J_{sc} V_{oc}}, \quad \text{iar randamentul de conversie a energiei este:}$$

$$\eta = \frac{J_{max} V_{max}}{P_L} \cdot 100 \% . \quad \text{Fig. 4.7 s-a reprezentat variația randamentului}$$

de conversie a celulei η în raport cu energia fluxului luminos incident. Din acest grafic se poate observa, după cum era de așteptat, că η crește odată cu creșterea intensității energiei fluxului luminos incident.

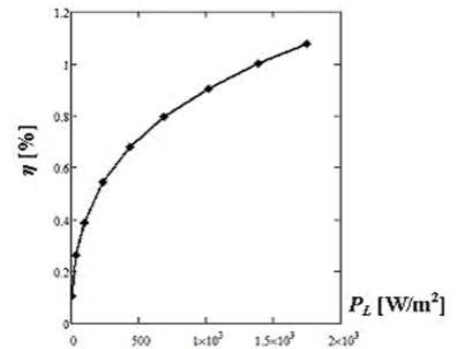


Fig.4.7: Dependenta randamentului de conversie în raport cu densitatea de energie a fluxului luminos incident

Am studiat comportamentul unei celule solare pe bază de polimeri prin aplicarea metodelor de analiză numerică asupra datelor experimentale din literatura. S-au obținut următoarele considerații principale:

- Analiza numerică permite determinarea ponderii relative a diferiților parametri[63].
- Parametrii constructivi (γ , R_p , R_s , $\mu\tau$) influențează puternic comportamentul celulei. Acești parametri descriu atât natura fizică a stratului activ cât și caracteristicile tehnologice ale celulei.
- Randamentul de conversie crește puțin cu puterea fluxului de lumină și este destul de redus, dar acest lucru este compensat de prețul redus al celulelor solare cu polimeri.
- Au fost stabilite relații exponențiale între viteza de generare a purtătorilor G și densitatea de energie a fluxului luminos incident P_L , și respectiv între rezistența paralelă R_p și densitatea P_L , care au permis utilizarea unei noi formule pentru densitatea totală de curent J .
- Creșterea curentului de iluminare, determinată de creșterea vitezei de generare a purtătorilor G , arată necesitatea acestei abordări; creșterea iluminării poate fi obținută prin concentrarea fluxului luminos utilizând prisme, lentile, etc.
- S-a observat variația puternică a densității totale de curent J , atât cu grosimea stratului activ al celulei solare, cât și cu produsul $\mu\tau$. Aceasta arată influența atât a grosimii cât și a naturii stratului activ. Se observă și o creștere ușoară a densității totale de curent J odată cu creșterea rezistenței serie R_s , fapt ce ilustrează influența procesului de fabricație al celulelor fotovoltaice.
- Dependența teoretică obținută între randamentul de conversie a energiei η și energia fluxului luminos incident este în concordanță cu datele experimentale [60].
- Rezultatele privind influența diferiților parametri poate fi utilizată pentru optimizarea procesului de proiectare a celulelor solare bazate pe polimeri.

Capitolul 5

Optoelectronica celulelor solare dye-sensitive și hibride

5.1. Concepte de bază privind celulele solare Dye-Sensitive (DSSC)

Folosirea colorantului senzitiv în aplicații fotovoltaice nu a dat rezultate până la începutul anilor 1990, când a avut loc o descoperire importantă. Prin combinarea cu succes a electrozilor nanostructurați și a unui electrolit eficient, echipa profesorului Grätzel de la *Laboratory of Photonics and Interfaces, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne*, a realizat o celulă fotovoltaică eficientă (cu un randament de 7% în 1991 și 10% în 1993). Aceasta poartă numele de celulă solară cu colorant senzitiv (DSSC - Dye Sensitive Solar Cell) sau celulă Grätzel [66,67]. Ca principiu de funcționare DSSC este mai apropiată de fotosinteza naturală decât oricare altă celulă.

DSSC - Principiul fizic de funcționare

Ciclul de funcționare al DSSC este schițat în Fig. 5.1. Fotonul incident este absorbit de molecula de colorant fixată pe suprafața particulelor de TiO_2 , iar rezultatul constă în trecerea unui electron de pe nivelul fundamental S^0 pe un nivel excitat S^* (procesul 1 în Fig. 5.1). Mai departe, electronul excitat este injectat în banda de conducție a semiconductorului, lăsând molecula de colorant într-o stare oxidată, S^+ (2). Electronul injectat este transferat din mediul poros în stratul conductor de oxid transparent, depus pe suportul de sticlă (anod, electrod negativ) și, în final, printr-o sarcină externă, la electrodul pozitiv - catod (3). La catod are loc transferul electronului în electrolit (4) (acceptat de un ion de iod), prin intermediul catalizatorului de Pt, și, în final, ciclul se încheie prin reducerea colorantului oxidat de către iodul din electrolit (5).

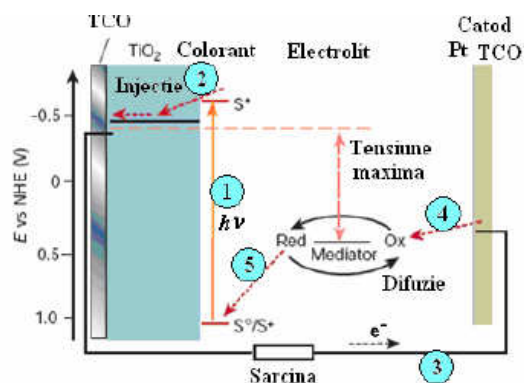


Fig.5.1: Explicarea funcționării DSSC.

De la inventarea DSSC nanostructurate, o mulțime de lucrări teoretice și experimentale au fost elaborate pentru a explica randamentul surprinzător a acestor celule solare [68].

Separarea sarcinii în celula DSSC se bazează pe transferul unui electron din starea excitată a moleculei de colorant în banda de conducție a TiO_2 și un proces de transport al golului, de la molecula de colorant oxidată, la electrolit. Procesul de transfer al electronului este dependent de structura electronică a moleculei de colorant adsorbită și potrivirea nivelelor energetice din starea excitată a moleculei de colorant cu cele din banda de conducție a moleculei TiO_2 . În mecanismul de separare a sarcinii, poziționarea nivelelor energetice este un factor decisiv: nivelul excitat al colorantului corespunde aproximativ marginii benzii de conducție a TiO_2 , iar nivelul fundamental este mai mic decât potențialul chimic al perechii redox a ionilor de iod din electrolit. În plus, la creșterea randamentului procesului de separare a sarcinilor, contribuie și factori entropici. Densitatea mare a nivelelor libere în electrod comparată cu numărul mic de molecule de colorant din suprafață, determină ca injecția electronului în banda de conducție a semiconductorului să fie asociată cu o creștere a entropiei, prezentând o diferență de potențial de 0,1eV pentru separarea sarcinii.

În DSSC transportul electronului are loc în nanostructura poroasă a electrodului de TiO_2 , iar transportul golului în electrolit ca I_3^- . Astfel, rețeaua de nanoparticule a semiconductorului nu reprezintă doar un substrat de arie mare pentru moleculele de colorant, ci și un mediu de transport pentru electronii injectați din moleculele de colorant. Datorită structurii poroase a electrodului și efectului de ecranare a electrolitului, electrodul poate fi privit ca o rețea de particule individuale, prin care electronii sunt transferați de la o particulă la alta. Dimensiunea mică a particulelor previne formarea stratului de sarcină spațială.

La interfața semiconductor - electrolit procesele de recombinare sunt inhibitate. Astfel, electronii fotogenerați din banda de conducție a particulelor de TiO_2 determină un gradient de concentrație în electrod și electronii sunt transferați la stratul TCO, cel mai probabil prin difuzie. Coeficientul de difuzie al electronilor depinde de cvasi-nivelele Fermi în starea de neechilibru indusă de iluminare. Randamentul relativ ridicat al celulei solare cu colorant senzitiv rezultă sinergic dintr-un efect colectiv al numeroaselor proprietăți fizico-chimice la scară nanometrică. Totuși, elementul cheie în conversie îl reprezintă semiconductorul cu bandă interzisă largă acoperit cu colorant senzitiv.

5.2. Studiul unor noi materiale pentru celulele solare hibride Dye-Sensitive

Prezentare și pregătire experiment

Este discutată sinteza și caracterizarea noilor cromofori bazați pe ftalocianine și a noului electrolit pentru fabricarea celulelor solare cu coloranți organici (DSSC) și a celulelor solare hibride, cu coloranți organici. Noii cromofori bazați pe ftalocianin conțin cantități diferite de grupuri pendinte de carboxil. Electrolitul clasic a fost înlocuit de polimeri conținând săruri cuaternare de amoniu sau de polimeri modificați cu nanoparticule PbS și CdS. Acest tip de celule fotovoltaice este nou în literatura de specialitate. Realizarea celulei implică depunerea

galvanică a TiO_2 urmată de absorbția colorantului și formarea stratului de polimer în cazul celulelor hibride [69].

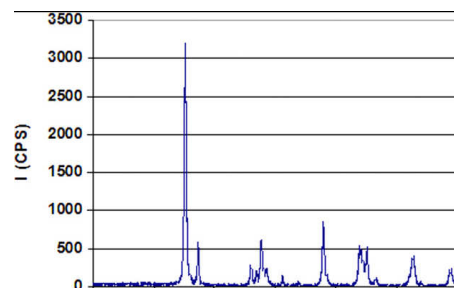


Fig. 5.2: Diagrama XRD pentru TiO_2 – anataza (bioxid de titan).

Interpretarea rezultatelor [70]

Analiza XRD a stratului de TiO_2 depus galvanic pe sticla conductoare (Fig. 5.2) confirmă forma de cristalizare a anatazei (bioxidului de Titan) pentru TiO_2 . Analiza SEM a stratului de TiO_2 de pe sticla conductoare indică existența a unor nanoparticule cu mărimea de 25nm și a unor aglomerate. Prezența acestor aglomerate este ilustrată și de analiza AFM. Rugozitatea este importantă, deoarece influențează concentrația colorantului absorbit pe stratul conductiv. Conform literaturii de specialitate [71], grosimea stratului de TiO_2 are o puternică influență asupra randamentului celulei.

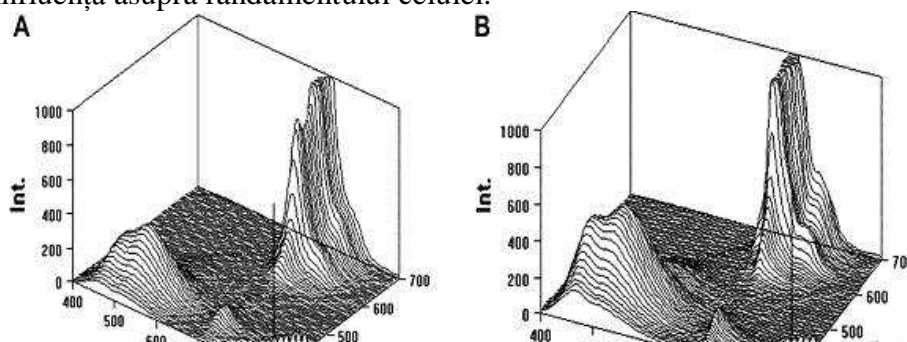


Fig. 5.3: Spectrele de fluorescență 3D pentru: (A) tetra-carboxi zinc ftalocianina și (B) octa-carboxi zinc ftalocianina.

Este cunoscut faptul [72] că fluorescența coloranților activează suprafața de TiO_2 și mărește numărul electronilor injectați din colorant în electrod. Spectrele de fluorescență 3D pentru tetra-carboxi zinc ftalocianină (A) și octa-carboxi zinc ftalocianină (B) (Fig. 5.3A și B) ilustrează fluorescența coloranților noștri la lungimile de undă de excitație 500 și 600nm.

Influența stratului de colorant asupra suprafeței TiO_2 a fost de asemenea evaluată prin analiza SEM. Este binecunoscut faptul ca modul în care colorantul este utilizat, este crucial pentru obținerea unui randament bun pentru celula solară. Acest lucru poate fi explicat prin existența anumitor zone caracterizate prin diferite suprafețe specifice de-a lungul stratului de TiO_2 (zone luminoase și întunecate).

5.3. Simularea numerică a fotocurentului tranzitoriu la o celulă solară DSSC pentru influențarea eficienței cuantice

Celula solară cu colorant organic DSSC este remarcabilă datorită analogiei cu fotosinteza naturală, privind următoarele două aspecte [32]:

- utilizarea unui colorant organic care absoarbe lumină și produce un flux de electroni;
- utilizarea unor straturi multiple pentru îmbunătățirea absorbției și a randamentului de colectare a energiei solare.

Eficiența cuantică externă (EQE) a unei celule solare cu coloranți organici poate fi calculată [25] cu ajutorul relației:

$$EQE = A(\lambda) \cdot \Phi_{inj} \cdot \eta_c \quad (5.1)$$

unde $A(\lambda)$ reprezintă absorbanta cuantică, Φ_{inj} este eficiența de injecție, iar η_c este eficiența de colectare a curentului.

Valorile eficienței cuantice externe pentru o celulă solară cu colorant organic pe bază de Ru sunt de 80-90% în domeniul spectral 400-750 nm (Fig. 5.4).

La o iluminare AM 1.5, un dispozitiv de acest gen produce o densitate de curent de scurtcircuit $j_{sc}=14 \text{ mA/cm}^2$, tensiunea de în circuitul deschis fiind $U_{cd}=0.8V$, iar factorul de formă este $FF=0.7$.

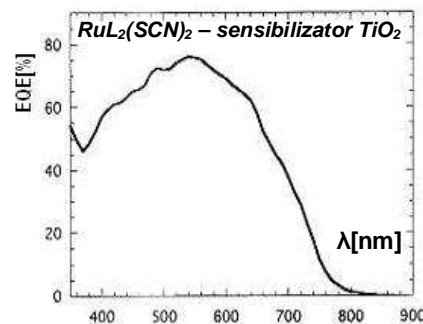


Fig. 5.4: Eficiența cuantică externă pentru o celulă solară tipică cu colorant sensibilizat

Simularea numerică a densității fotocurentului tranzitoriu dintr-o celulă DSSC

Pentru a fi simulat fotocurentul tranzitoriu, s-a simulat transportul electronilor într-un film mezoporos de TiO_2 , model în care electronii execută drumuri aleatoare printr-un lanț de celule sferice cu capcane localizate la suprafața lor. S-a folosit o metodă de tip Monte Carlo. Simularea poate arăta cum fotocurentul tranzitoriu, ca răspuns al unui scurt puls de iluminare, poate fi folosit pentru a studia efectele pe care le are morfologia celulei asupra transportului de electroni.

Simularea la scară fină va înregistra în care celule se va deplasa fiecare electron, ținând cont de celula de unde pornește. De asemenea, simularea la scară fină va înregistra și probabilitatea ca un electron să fie capturat de o capcană. Simularea la scară brută folosește rezultatele simulării fine, pentru a studia parcursul electronilor (presupunând 128 electroni pe celulă) înregistrând numărul de electroni care parăsesc lanțul de celule.

Pentru a evita eventualele fluctuații cauzate de implementarea modelului Monte-Carlo s-a realizat medierea densității de curent pe un interval de $2 \cdot 10^{-5} \text{ s}$. Cererea de resurse necesare simulării Monte Carlo a fost satisfăcută utilizând o combinație între simularea fină și simularea brută, luând în considerare 100 de celule în lanț și o capcană pe celulă.

S-a realizat o simulare în două etape. În prima etapă, cea la scara fină se va studia deplasarea unui electron între celule, înregistrând și probabilitatea de a reacționa cu capcanele. În etapa a doua, cea la scara brută, s-au folosit rezultatele din prima etapă și s-au reținut pozițiile electronilor, doar pentru celula în care aceștia se află.

Programele simulării au fost scrise în ANSI C și în Matlab. O rulare completă pentru ambele simulări, atât cea la scara fină cât și cea la scara brută, în ANSI C, a durat cca. 8 ore.

Modelul dezvoltat simulează drumul aleator al electronilor, care difuzează printr-un film poros de nanoparticule interconectate, și acoperă o scară largă de intervale de timp prin combinarea unei simulări cu scală redusă a timpului, cu o simulare cu scală pe timp îndelungat. Simularea a fost folosită pentru calcularea densității curentului tranzitoriu într-o celulă solară cu colorant DSSC după oprirea iluminării. Simularea poate fi dezvoltată mărind numărul de celule din lanț, respectiv numărul de capcane pe celulă; acest fapt implică utilizarea unor resurse computaționale mărite.

Rezultatele obținute privind fotocurentul tranzitoriu sunt prezentate în Fig. 5.5.

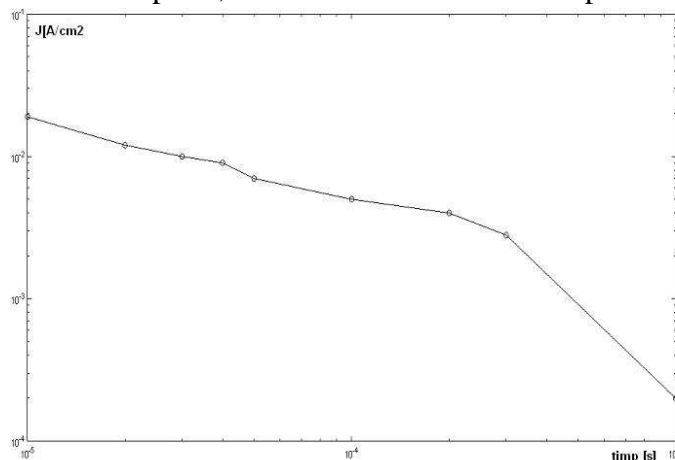


Fig. 5.5: Densitatea fotocurentului tranzitoriu /timp.

Capitolul 6

Caracterizarea și testarea celulelor solare, modulelor, panourilor și sistemelor fotovoltaice

6.1. Concepte de bază și caracterizarea modulelor și panourilor fotovoltaice dispozitive PV (module, panouri, sisteme).

Celula fotovoltaică este unitatea de bază a unui sistem PV; conectarea mai multor celule în unități mai mari formează un *modul*; modulele pot, la rândul lor, să fie conectate pentru a crea unități și mai mari formând *panouri*, cu puteri mari și foarte mari. Astfel, se poate construi un sistem fotovoltaic care să satisfacă orice cerere de energie, indiferent de mărime. Modulele sau panourile, în sine, nu constituie un sistem fotovoltaic. Trebuie să mai existe și structuri pe care să fie instalate și care să le orienteze spre soare cât și componente care să preia energia în cc produsă de module / panouri și care să prelucreze energia electrică pentru a putea fi folosită de consumator. Aceste structuri și componente alcătuiesc **BOS**.

- Parametrii principali ai celulelor și modulelor PV

Când ne referim la performanțele celulelor sau modulelor PV, cel mai important parametru este desigur, *puterea maximă* P_{max} , care este uzual determinată prin varierea tensiunii de polarizare directe la bornele dispozitivului testat în timpul radiației; P_{max} este considerată de obicei, cea mai mare putere măsurată [38].

Randamentul de conversie a puterii η , definit ca raportul puterea de ieșire pe puterea de intrare, este proporțional cu P_{max} și cu *radiația incidentă totală* - G și *aria dispozitivului* - A :

$$\eta = \frac{P_{max}}{G A} \quad (6.1)$$

Factorul de formă FF indică cât de ideale sunt proprietățile diodei:

$$FF = \frac{P_{max}}{U_{oc} I_{sc}} \quad (6.2)$$

Tensiunea de circuit deschis U_{oc} poate fi determinată printr-o ajustare lineară a caracteristicii $I-U$ în jurul punctului de curent zero, sau prin măsurarea tensiunii cu sarcina deconectată.

Valoarea lui I_{sc} este de obicei determinată prin interpolarea lineară a două puncte, cele mai apropiate de tensiunea zero. Realizarea unei ajustări lineare a curbei prin folosirea a mai mult de două puncte poate reduce nesiguranța cu privire la I_{sc} . Problemele în compararea măsurătorilor, minimizarea lor și a surselor de erori, au condus la apariția conceptului de *condiții standard de raportare (CSR)* sau *condiții standard de testare (CST)*, care conțin temperatura dispozitivului, radiația totală și cea spectrală, la care se face măsurarea performanțelor modulelor PV sau la care acestea sunt corectate [88].

- Minimizarea luminii reflectate pe modulele fotovoltaice

Randamentul maxim al modulelor fotovoltaice necesită ca radiația directă să nu fie reflectată în drumul său spre stratul absorbant, și ca lumina ce ajunge la acest strat să nu fie apoi reflectată înapoi, sau transmisă prin celulă. Straturile de deasupra ale modulului PV sunt transparente. Stratul exterior, sticla de acoperire, protejează restul structurii la intemperii. Adesea un cadru din aluminiu sau din material compozit, oferă modulului stabilitatea mecanică necesară pentru montarea acestuia în diferite moduri. Tehnologiile anti-reflectatoare pot fi împărțite în două categorii [91]:

a) Straturile anti-reflectatoare (SAR) ce reduc reflexia la interfețele de deasupra stratului ce absoarbe lumina;

b) Suprafețele texturate care servesc atât la creșterea transmisiei de lumină cât și la captarea luminii în stratul absorbant. Strategiile cele mai eficiente utilizează de obicei o combinație a acestor tehnici. Alegerea tehnologiei anti-reflectatoare adecvate este un proces de optimizare a factorilor ce includ performanța, fiabilitatea, productivitatea, și în final costul.

O interfață cu o discrepanță mare a indicelui de refracție va conduce la reflexie Fresnel puternică. Toate materialele de absorbție utilizate în mod curent (siliciu, telurură de cadmiu și diseleniură de cupru, indiu, galiu) prezintă indice de refracție relativ mare.

6.2. Caracterizarea componentelor BOS (reglatoare, baterii de stocare, invertoare). elemente tehnologice

A. Reglatoare de încărcare

Se pot distinge câteva tipuri de reglatoare de încărcare pentru sistemele PV. Cele mai uzuale sunt *Reglatoarele seriale*. Prin utilizarea unui astfel de regulator, conexiunea dintre un generator solar și o unitate de stocare a energiei este întreruptă atunci când limita de încărcare este atinsă. Se pot folosi pentru deconectare atât relee cât și tranzistoare bipolare sau MOSFET. Principiul de reglare serială provine din tehnologia clasică de încărcare și este utilizată și în dispozitivele de încărcare conectate la rețea. Atunci când tensiunea scade sub pragul pentru descărcare severă, sarcina este deconectată de la baterie pentru ca aceasta să fie protejată în astfel de moduri de funcționare periculoase.

B. Sisteme de stocare a energiei

- Stocarea electrochimică- Acumulatori cu stocare internă

Acumulatorii electrochimici sunt convertizoare reversibile de energie. Acestea convertesc electricitatea în energie chimică și invers. Energia este stocată sub forma de ingrediente chimice, care se pot afla în interiorul convertizorului sau într-un recipient extern. Acumulatorii cum ar fi cele cu plumb-acid, nichel-cadmium, nichel-hidruură metalică, litiu-ion și litiu-ion-polimer aparțin de grupul acumulatorilor cu stocare internă. Conversia și stocarea energiei nu pot fi separate fizic în acest tip de baterii. O barieră între materialul activ și electrolit este echivalentul unui convertor. O baterie constă în mai mulți elemente legați în serie. Elementele sunt compuși din doi electrozi conținând materialul activ, care sunt cufundați în electrolit. Procesul de încărcare este o acumulare de material activ în jurul electrozilor. Energia este recuperată în timpul procesului de descărcare.

- Supercondensatoare

Pentru stocarea electricității folosind componente electrice, cele mai cunoscute dispozitive sunt *supercondensatoarele*. Principiul lor de stocare a energiei este asemănător cu cel al condensatoarelor tradiționale, dar cu capacitate și curent de descărcare mult mai mari. Ele pot înlocui bateriile chimice în numeroase aplicații, dacă nu sunt necesare perioade lungi de stocare. Supercondensatoarele pot fi încărcate / descărcate de un număr nelimitat de ori, într-un timp de ordinul milisecundelor și pot produce curenți enormi. De aceea, sunt foarte utile în cazul aplicațiilor în care este necesară limitarea sarcinii și acolo unde este necesară o amplificare bruscă a puterii într-o fracțiune de secundă. Ele au o durată de viață foarte lungă, ceea ce reduce costurile de întreținere, iar performanțele lor nu se degradează în timp.

C. Convertoare de putere

Pentru a putea utiliza componente de stocare în *c.c.* în combinație cu rețele în *c.a.* și cu sarcini de *c.a.* este nevoie de capabilități pentru conversia energiei în sistemele fotovoltaice.

- Redresoare

Redresoarele transformă energia *c.a.* în energie *c.c.*, ele fiind dispozitive care utilizează diode, ce sunt de tehnologie jonctiune *p-n*.

Sunt folosite pentru a bloca într-o direcție și a conduce în cealaltă, cu diferite opțiuni de procesare pentru optimizarea cerințelor parametrice ale diferitelor aplicații. Cele mai importante valori nominale sunt valoarea medie a *curentului direct* I_o și *tensiunea inversă de blocare* U_{RWM} . Aceasta este denumită și *tensiune inversă maximă* U_{PK} . *Tensiunea de străpungere* a redresorului $U_{(BR)}$ este de regulă cu cca. 20% mai mare decât valoarea nominală U_{RWM} . Alți parametri pot fi valoarea nominală a *curentului direct de supratensiune* I_{FSM} sau *tensiunea directă* U_F la diferiți curenți.

- Invertoare

Invertorul este componenta cea mai importantă a unui sistem PV conectat la rețea, după generator. Invertoarele sunt dispozitive care transformă energia *c.c.*, produsă de sistemul fotovoltaic sau provenită de la bateriile de stocare, în energie *c.a.*, care poate alimenta sarcina unora sau a tuturor consumatorilor. Majoritatea invertoarelor acceptă la intrare 12; 24; 32 sau 48V*c.c.*, produc la ieșire 220V/50Hz *c.a.* și au puteri între 50W și 5.000 W. Calitatea curentului alternativ (forma de undă, frecvența și tensiunea) pe care îl produce inverterul, determină tipul de aparate și echipamente pe care le poate alimenta.

Invertoarele performante din gama de putere kW au o eficiență de 96%-98%. Un inverter dezvoltat recent care folosește topologia **HERIC** (*Concept de Inverter Foarte Fiabil și Eficient*) ajunge la eficiență de aproximativ 98% [92].

Anumite invertoare consumă energie, la mersul în gol sau în stand-by, care poate fi o jumătate de watt, dar se poate ajunge până la 10% din puterea nominală.

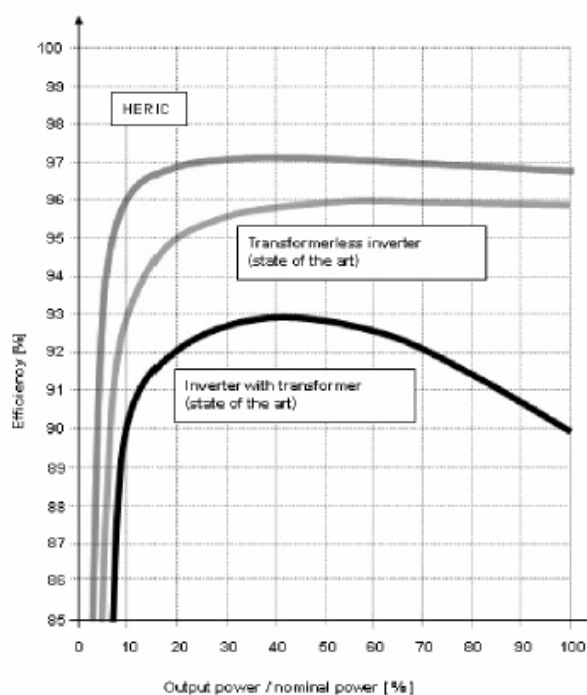


Fig. 6.1: Curbele de eficiență a trei invertoare de tipologii diferite

6.3 Testarea și caracterizarea celulelor și modulelor PV

A. Simulatoare solare

Simulatoarele solare sunt utilizate pentru a simula lumina naturală pentru o testare de interior, repetabilă și precisă, a caracteristicilor *I-U* ale celulelor sau modulelor PV [90]. Simulatorul solar ideal trebuie să aibă sub $\pm 1\%$ variație a nivelului de lumină în timpul măsurătorilor *I-U*, tot sub $\pm 1\%$ variație spațială a radiației în și la câțiva cm. deasupra planului de testare, și să aibă sub 1% eroare de nepotrivire spectrală, între celula test și celula referință. Aceste constrângeri sunt esențiale pentru a asigura precizia randamentului $> \pm 2\%$. Simulatoarele solare sunt clasificate în raport cu neuniformitatea spațială a radiației totale, instabilitatea temporală a radiației, radiația totală într-un anumit câmp vizual și potrivirea spectrală cu spectrul de referință [91].

B. Testarea dispozitivelor PV

Conexiunea cu patru fire (sau Kelvin) la dispozitivul supus testării permite măsurarea tensiunii de pe dispozitiv, prin evitarea căderilor de tensiune de-alungul buclei de măsurare a curentului. Dispozitivul testat este iluminat, sarcina este variabilă, iar punctul de operare al dispozitivului testat se schimbă, permițând capturarea punctelor de curent și tensiune de-alungul curbei *I-U* [92].

C. Stand experimental de testare

Pentru a fi siguri că celulele solare care vor face parte din modulele solare au aceleași performanțe în exploatare, se face o examinare electrică și vizuală calitativă preliminară, cu ajutorul unor montaje simple, bazate pe diagrame pentru metode digitale și analogice de testare, cu posibilitatea de procesare a datelor de către un operator/computer [38,96].

O nouă metodă a opoziției este obținută, cu o sursă de c.a. adecvată obținem punctele caracteristicii; frecvența tensiunii alternative poate fi chiar și frecvența din rețeaua electrică.

Pentru a testa celulele, cu procesarea analogică a rezultatelor de către operator, putem folosi o diagramă specifică completată cu voltmetre electronice, care vor furniza I_{SC} și U_G . Testarea celulelor cu procesare digitală asistată de computer a rezultatelor, efectuarea rapidă a calculului impuse de clasificarea și asocierea celulelor în module, poate fi realizată cu ajutorul diagramei de testare a loturilor de celule, propusă în Fig. 6.2.

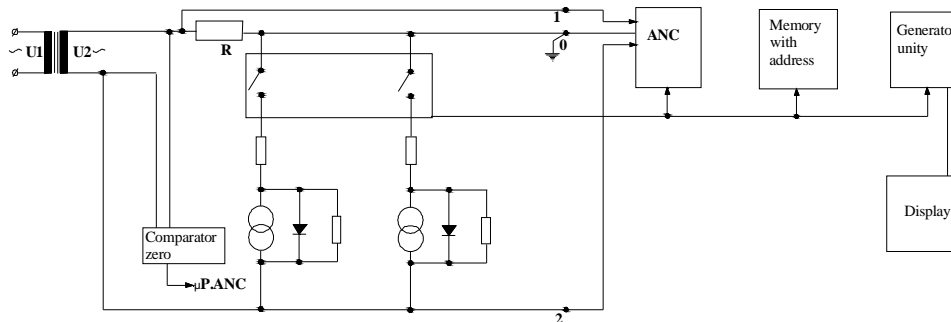


Fig. 6.2: Testarea celulelor solare cu procesarea digitală a rezultatelor, asistată de calculator

Acest lucru este posibil dacă diagrama de bază pentru metoda c) este completată cu un sistem de achiziție și procesare a datelor pe computer. La sfârșitul calculului, sunt furnizate valori ale parametrilor celulei (I_{SC} , U_G , P_{max} , R_{sh} , R_s) și derivate ale acestora, comparate cu celula standard, fluxul de lumină și temperatura de testare T .

În vederea testării cantitative a celulei solare/modulelor solare, avem un echipament experimental, care este compus din două părți:

- Simulatorul solar care emite radiația solară și care poate fi utilizată, cu sau fără sisteme de concentrare;
- Instalația electrică de testare bazată pe metoda opoziției cu o sursă de c.a., care are avantajul de a efectua măsurătorile în alternativ și care este capabilă să afișeze atât valorile parametrilor principali (I_{SC} , U_G , I_{optim} , U_{optim}) pe patru aparate de măsură digitale, cât și să ridice caracteristica $I-U$ reală a celulei pe un frecvențmetru cu vibrație catodică (XY) calibrat în prealabil cu ajutorul unei celule solare standard.

D. Caracterizarea modulelor și a sistemelor fotovoltaice

PVSYST este un pachet de software utilizat pentru dimensionarea, simularea și analiza statistică a sistemelor PV complete. El poate fi folosit pentru proiectarea și compararea diferitelor tipuri de sisteme, folosind diferite nivele ale programului. Acest software a fost dezvoltat de către *Institute of Environmental Sciences (ISE)* de la *University of Geneva*. Programul oferă posibilitatea modelării sistemelor PV conectate la rețea, sau a sistemelor PV autonome. Parametrii definitorii pentru construirea modelului sunt:

- Datele de referință ale sistemului PV (informații despre poziționarea în spațiu a viitoarei instalații, coeficientul de reflexie, alți parametri dependenți de poziționare);
- Orientarea modulelor PV (înclinare și azimut);
- Datele specifice sistemului (numărul și tipul de module PV, tipul invertorului, etc.);
- Poziționarea modulelor (modul de așezare a modulelor).

Proiectarea modelului în PVSYST

Aplicația reprezintă dimensionarea sistemului BIPV implementat la Universitatea Politehnică București. Proiectul discutat este un model de sistem BIPV conectat la rețea. Pentru parametri geografici și meteorologici au fost folosite datele oferite de *Bucharest Synthetic Hourly - Meteororm '97 Site*, disponibile în biblioteca programului.

Unghiul de înclinare este setat la 90° (fereastra PV este în poziție verticală), iar azimutul este ales pentru orientarea panoului către est. Programul generează un grafic de optimizare.

Sistemul PV este definit astfel: modulele PV și invertorul sunt alese, precum și numărul de module și conexiunile electrice. Alegerea se face în conformitate cu condițiile de dimensionare: suprafața disponibilă (4 m^2) și puterea planificată (600 W_p).

Programul oferă un raport de simulare care conține toți parametrii folosiți precum și preformanțele modelului simulat.

Rezultatele simulării

Rezultatele simulării ne arată că modelul construit va produce 351 kWk/an la o rată de performanță (**PR**), de 73.5 % . Programul oferă de asemenea informații privitoare la energia pierdută. o diagramă a pierderilor pentru un an. Sunt prezentate toate pierderile, de la pierderile datorate eficienței de conversie, la pierderile datorate nivelului de radiație (pierderi de temperatură, pierderi – calitate modul, pierderi –discrepanță suprafață modul, pierderi ohmice), la pierderile din timpul operării (pierderile inverter pentru: –putere nominală, -putere prag, -curent nominal, -curent prag).

Capitolul 7

Sisteme fotovoltaice. monitorizarea și îmbunătățirea calității modulelor și sistemelor fotovoltaice

7.1. Sisteme fotovoltaice autonome

Un sistem fotovoltaic (PV) autonom este constituit din următoarele componente principale: modulele fotovoltaice, inverterul, regulatorul de sarcină, bateriile de stocare și consumatorii electrici. Există sisteme în care curentul continuu este utilizat direct, fără baterii; tensiunile sistemului (tensiunea la baterie) sau tensiunea sarcinii în cazul sistemului PV fără baterie este: 12V c.c., 24V c.c. sau 48V c.c.

Principalele criterii avute în vedere în proiectarea sistemelor fotovoltaice au în vedere următoarele aspecte [104]: prețul cel mai redus de întreținere a sistemului, toleranța la sarcină și la variațiile radiației solare, caracterul modular și flexibilitatea, ușurința de întreținere și reparații, calitatea energiei electrice furnizate, fiabilitatea și factorii sociali.

Dimensionarea unui sistem fotovoltaic autonom poate fi înțeleasă în funcție de ponderea energetică zilnică dintre sarcina zilnică și energia livrată de modulele fotovoltaice. *Componenta de alimentare* (producția așteptată de energie electrică obținută de la modulele PV este determinată de radiația solară și poate fi discutată cu ajutorul conceptului de **PSH** /*Peak Solar Hours*) [26]. Valoarea adecvată a lui **PSH** trebuie să corespundă perioadei critice de funcționare a sistemului PV (luna cu radiația solară cea mai scăzută sau luna cu consumul de energie cel mai ridicat).

Al doilea parametru fundamental este *necesarul de consum zilnic tipic*. *Cantitatea totală de energie* consumată într-o zi se notează cu **L**. Valorile lui **PSH** și **L** determină *ponderea zilnică medie* **P₀** între puterea furnizată și puterea nominală estimată a modulelor fotovoltaice.

$$P_0 = \frac{L}{PSH} \quad (7.1)$$

Cunoscând puterea generată de un modul PV în condiții standard, se poate determina numărul total de module PV.

$$N = \frac{P_0}{P_{\text{mod}}} \quad (7.2)$$

Dacă tensiunea de operare în c.c. a fost specificată, acest procedeu de dimensionare permite stabilirea configurației rețelei de module PV, în funcție de numărul lor [107,108].

Factorul de securitate (dimensionare) ia în considerație atât pierderile adiționale (de exemplu murdărirea modulelor PV), cât și creșterea performanței sistemului. O problemă importantă o constituie și dimensionarea bateriei. Parametrul critic este reprezentat de *numărul de zile de autonomie* (**C_s**) în care sistemul funcționează fără generare de energie. **C_s** este corelat cu *capacitatea bateriei* **C_N** (măsurată în unități energetice) :

$$C_n = C_s \frac{L}{DOD_{\text{max}}} \quad (7.3)$$

În relația (7.3) DOD_{max} reprezintă *nivelul de descărcare maximă* admisă a bateriei. În metoda de dimensionare a ponderii energetice, numărul de zile de autonomie C_s este empiric.

7.2. Sisteme fotovoltaice conectate la rețea

Structura unui sistem fotovoltaic (PV) conectat la rețea este cea obișnuită, dar fără baterii. Este de remarcat apariția în sistemul fotovoltaic conectat la rețea, a două componente esențiale: *invertorul conectat la rețea* și *contorul pentru măsurarea energiei electrice* furnizate la rețea obținută de la sistemul fotovoltaic și pentru măsurarea energiei electrice preluate de la rețea.

Arhitectura modulelor sistemelor PV conectate la rețea trebuie considerate concomitent cu caracteristicile de *c.c* ale invertorului, incluzând curentul de intrare maxim, tensiunea nominală și tensiunea de intrare minimă precum și puterea maximă [110,111]. Procedura de dimensionare a sistemelor PV conectate la rețea, are în vedere ca energia E_{ca} produsă de sistemul fotovoltaic într-o zi poate fi estimată folosind o relație similară cu (7.1):

$$E_{ca} = \eta_I \cdot P_0 \cdot PSH \quad (7.4)$$

unde P_0 este *puterea nominală* a modulelor fotovoltaice la *SRC* (*condiții standard de raportare*), PSH reprezintă *valoarea medie a numărului de ore solare maxime* într-o locație data, iar η_I reprezintă *randamentul invertorului* care depinde de *puterea de ieșire*, P_{ies} . Randamentul invertorului poate fi exprimată în funcție de autoconsumul invertorului și de pierderile dependente de sarcină.

$$\eta_I = \frac{P_{ies}}{P_{ies} + k_0 + k_1 P_{ies} + k_2 P_{ies}^2} \quad (7.5)$$

unde P_{ies} reprezintă *puterea de ieșire c.a.* raportată la puterea nominală de ieșire a invertorului. Parametrul k_0 reprezintă *factorul de autoconsum*, iar termenii care conțin coeficienții k_1 și k_2 desemnează *pierderile* (liniare în cazul căderilor de tensiune și pătratice în cazul pierderilor ohmice).

Utilizarea sistemelor BIPV

Sistemele fotovoltaice integrate în clădiri (*BIPV*) se constituie ca o aplicație a tehnologiei PV, care are consum zero de teren. În UE, unde există o puternică infrastructură a rețelelor electrice, se constată o evoluție dinamică a pieței sistemelor fotovoltaice. O analiză a celor trei segmente semnificative de piață (BIPV, montate pe acoperiș și montate la sol) arată un dezechilibru real în dezvoltarea pieței. Sistemele PV montate pe acoperiș joacă un rol major (70%), sistemele PV montate la sol au o contribuție relativ importantă (29%), în timp ce sistemele BIPV au o contribuție foarte mică (numai 1%).

Tehnologia BIPV inovatoare permite atât proiectanților, cât și arhitecților să adopte o serie de decizii cheie încă din faza de proiectare obținând astfel rezultate optime la realizarea construcțiilor cu sisteme BIPV. Evident că combinarea acestor tehnici de integrare, fațadă și acoperiș, crează o clădire unitară din punctul de vedere al expresiei arhitecturale a anvelopei.

7.3. Monitorizarea sistemelor fotovoltaice

Există multe motive pentru a monitoriza un sistem relativ scump și utilizare îndelungată ca o instalație PV. Trebuie acordată atenție sporită scopului monitorizării înainte de elaborarea unei specificații, urmărindu-se măsurarea doar parametrilor cu adevărat necesari și determinarea frecvenței minime de eșantionare, necesară pentru a da rezultate semnificative pentru o perioadă de timp, după care se vor produce noi informații. Aceste necesități de monitorizare se împart în trei grupuri principale:

a) Feedback către utilizator: Acesta poate trece de la un simplu *led* de pe capacul invertorului sau un afișaj pe hol pentru consumator, până la un ecran interactiv uriaș din foaierea unei clădiri a unei corporații.

b). Verificarea performanțelor: Anumite sisteme au fost finanțate pe baza energiei produse, și astfel utilizatorul dorește măsurarea puterii de ieșire și să o compare cu pretențiile

pentru acel sistem. În alte cazuri este nevoie de măsurarea energiei electrice produse, pentru a fi vândute sau pentru a obține certificatele verzi.

c). **Evaluarea sistemului:** Pentru un sistem ieșit din tipare, pentru un sistem demo merită să urmărești funcționarea detaliată a sistemului pentru a înțelege funcționarea componentelor acestuia în detaliu.

Parametrii mășurați în timp real ai instalației de monitorizare [115].

- **Parametri meteorologici:** *Radiația incidentă totală, în planul ariei, $G_I [W/m^2]$; temperatura ambientală a aerului în planul modului, $T_{am} [^{\circ}C]$; viteza vântului, $S_W [m/s]$.*

- **Arie fotovoltaică:** *Tensiunea de la ieșire, $V_A [V]$; Curentul de la ieșire, $I_A [A]$; Puterea de la ieșire, $P_A [kW]$; Temperatura modulelor, $T_m [^{\circ}C]$; Unghiul de înclinare al Tracker-ului, $f_T [grade]$; Unghiul de azimut al Tracker-ului, $f_A [grade]$; Energia stocată; Tensiunea de operare, $V_S [V]$; Curentul de stocare, $I_{TS} [A]$; Curentul de la stocare, $I_{FS} [A]$; Puterea de stocare, $P_{TS} [kW]$; Puterea de la stocare, $P_{FS} [kW]$*

- **Sarcina:** *Tensiunea sarcinii, $V_L [V]$; Curentul sarcinii, $I_L [A]$; Puterea sarcinii, $P_L [kW]$*

Sistemul trebuie configurat și calibrat, de preferință *in situ*. Trebuie avută în vedere și recalibrarea atunci când se stabilește durata și precizia monitorizării.

7.4. Rezultate experimentale

A. Sistem PV demonstrativ *stand alone*, pentru consumatori mici de energie [100,122,120,123,124].

În cadrul acestui paragraf se va face analiza unui sistem fotovoltaic demonstrativ și a instalației de monitorizare montat pe acoperișul Universității „Dunarea de Jos” Galați. Sistemul fotovoltaic experimental este destinat asigurării unui consum mic de energie. În faza experimentărilor s-a avut în vedere ca puterea însumată a consumatorilor conectați la sistemul PV să fie mai mică sau cel mult egală cu puterea disponibilă a sistemului (510 Wp).

Sistemul PV este conceput din două panouri de module PV: panoul semi-fix **2PV1** ce are în componență 2 module PV cu siliciu policristalin; panoul orientabil automat după axa E-V, **2PV2**, ce are în componența 2 module PV cu siliciu monocristalin.

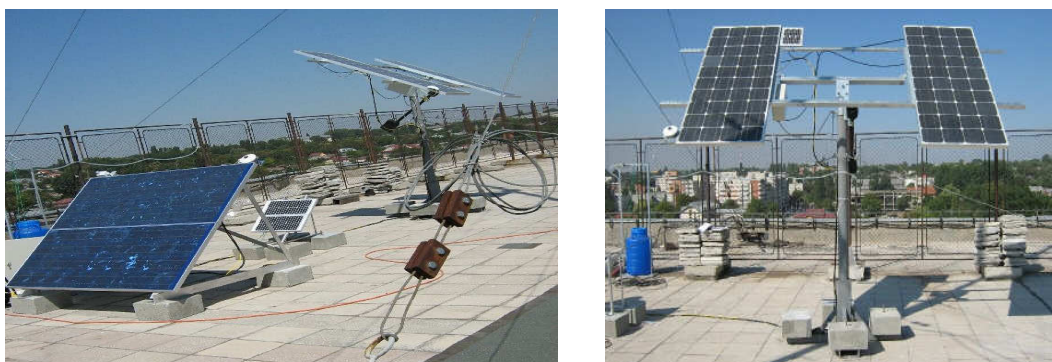


Fig. 7.1: Ansamblu PV fix și ansamblu PV autoorientabil

Evaluările performanțelor sistemului PV, adică studierea comparativă a celor două grupuri de module PV, s-a făcut pe baza analizării și interpretării datelor ce fac obiectul activităților de monitorizare. Monitorizarea a inclus baze de date privind parametrii mășurați cât și softul specific pentru parametrii calculați. Din analiza graficelor realizate, se pot face câteva **evaluări** sintetice și anume:

- pe parcursul întregii perioade considerate, *intensitatea radiației solare* a avut valori cuprinse între $30W/m^2$ și $780W/m^2$, cu aproximativ 20% mai puțin față de condițiile standard de testare a modulelor (AM 1,5);
- *intensitatea curentului măsurat pe module* a avut aceeași evoluție ca și *radiația solară*;
- atât pentru *parametrii mășurați* cât și pentru *parametrii calculați* se poate urmări în paralel evoluția acestora;

- *intensitatea curentului* de pe module, puterea modulelor și implicit energia furnizată de acestea au urmarit *direct proporțional* variația radiației solare;
- *parametrii mășurați și cei calculați* pe cele două panouri PV au fost aproximativ aceași, cu toate că din literatura de specialitate se știe că randamentul modulelor cu celule de Si monocristalin este mai ridicat (18%) față de cel al modulelor cu Si policristalin. Aceasta diferență a fost compensată de sistemul automat de urmărire al soarelui pe care sunt montate modulele cu Si policristalin.

B. Sistem BIPV demonstrativ legat la rețea (UPB) [38, 112,125,126,127]

La Universitatea *Politehnica* din București a fost realizat primul sistem fotovoltaic demonstrativ integrat în clădire (BIPV) legat la rețea împreună cu o instalație de monitorizare. Sistemul BIPV a fost realizat cu module PV integrate tip **KORAX** și cu echipamente **Sunny Boy** (invertor + instalație de monitorizare și de stocare a datelor). Modulele PV au fost montate pe structura existentă a ferestrei laboratorului de celule solare de la Facultatea de Științe Aplicate a UPB. În Fig. 7.2 este prezentată schema electrică a instalației BIPV, iar în tabelul 7.4 sunt date caracteristicile modulelor fotovoltaice utilizate.



Fig. 7.2: Instalația fotovoltaică (PV) văzută din (a) exterior, (b) interior

Au fost folosite trei module PV de tipul 1 și trei module PV de tipul 2 (Fig. 7.2).

Randamentul modulelor fotovoltaice este relativ redus datorită locului în care sunt amplasate. După cum se observa în Fig. 7.2 (a), o parte din module sunt umbrite în anumite perioade ale zilei.

Soft-ul folosit este **SMA Data Control** și se utilizează un port serial al calculatorului pentru a se conecta la Sunny Boy Control Plus. Acesta permite administrarea echipamentului de monitorizare Sunny Boy Control Plus. Un server **web Apache** este de asemenea integrat în soft, permițând astfel accesul protejat de pe orice calculator la datele culese de Sunny Boy Control Plus și integrarea lor în site-ul proiectului. Datele colectate de *SMA Data Control* pot fi exportate în Excel pentru o prelucrare mai amănunțită. **Protocolul de comunicație** folosit de *Sunny Boy Control Plus (SBCP)* este **SMA-NET** și poate fi implementat pe oricare altă aplicație care dorește să preia direct date de la *SBCP*.

C. Sistemului de monitorizare IPA pentru două aplicații PV autonome din zona montană a României [124,128,129,130,131].

a. Achiziția automată a datelor cuprinde următoarele operații:

- Stabilirea legăturii de comunicație pe linia serială;
- Achiziționarea datelor de la PLC, după realizarea conexiunii;
- Calcularea altor parametri pe baza datelor achiziționate;
- Arhivarea organizată a noilor date achiziționate/calulate, în vederea stocării lor.

b. Achiziția manuală a datelor a fost folosită în cazul sistemului PV de la Predeal. Datele sunt luate periodic pe un card de memorie, transportate și înserate în stația de lucru (PC- IPA).

c. Interfața grafică oferă:

- Posibilitatea de a programa comunicația, fără a utiliza comenzi foarte complicate, de la linia de comandă, cu ajutorul tastaturii, și de a modifica on-line graficele;

- Trecerea de la un ecran la altul prin intermediul unor butoane. În plus, sistemul furnizează corespondențe pe tastatură pentru cele mai importante comenzi de pe ecran.

Este nevoie de un mecanism de sincronizare între cele trei componente, pentru utilizarea simultană a datelor (cele două operațiuni de achiziție pentru scriere, cu interfața grafică de citire) și notificarea faptului că noi date sunt disponibile.

Pachetul de programe reprezintă un sistem de control în timp real, dedicat supravegherii activităților posturilor. Acesta trebuie să poată executa funcțiile de citire a intrărilor la momentele de timp programate. Structurarea parametrilor configurabili ce caracterizează fiecare intrare, permite utilizarea unei game largi de traductoare.

Aplicația ilustrată de Fig. 7.3, pentru monitorizarea a două instalații PV de la postul central instalat la IPA, a permis verificarea bunei lor funcționari timp de doi ani [132].

Datele sunt în general stocate *in situ*, folosind RAM-ul pentru un data-logger, sau un hard disc pentru un calculator. Data logger-ul include adesea, ca formă de stocare-redare, card-uri RAM, sau alte medii magnetice detașabile. PC-urile pot utiliza ca metodă de stocare de rezervă, mai multe hard-discuri sau download-ul zilnic al datelor.

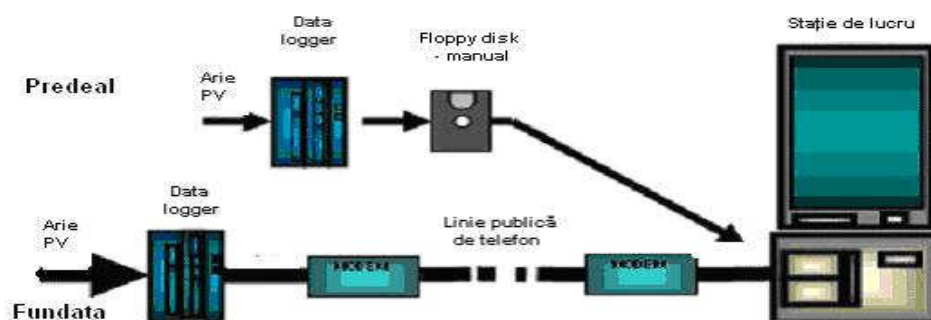


Fig. 7.3: Două sisteme tipice de monitorizare a parametrilor legate la un punct dispecer de la Predeal (manual) și Fundata (prin telefon)

Datele stocate, pot fi transmise către cei care fac monitorizarea prin mai multe mijloace. Data logger-ul poate fi adus în laborator și poate fi conectat printr-un port serial la un PC sau introdus într-un dispozitiv special de citire. Mediile de stocare detașabile permit schimbarea mediului de stocare on-site, permițând ca monitorizarea să fie continuă.

Sistemul pentru afișarea informațiilor specifice pentru instalațiile PV permite analiza globală și detaliată a informației, care poate fi tabelată sau prezentată prin diagrame bloc - un jurnal de operare cu:

- Evoluția în timp a parametrilor instalației și a celor meteorologici;
- Descrierea evenimentelor nedorite ce au apărut în timpul operării (situațiile de alarmare și pre-alarmare, deteriorarea posturilor locale sau a traductoarelor, etc.).

Analiza jurnalului de operare permite realizarea de rapoarte statistice asupra instalațiilor PV pe perioade lungi de timp (luni/ani), iar rezultatele obținute conduc la optimizarea funcționării acestora prin eliminarea inconvenientelor apărute.

Contribuții și Concluzii

C1. Concluzii generale

1. Autorul tezei a studiat diferite tipuri de celule solare avansate, precum și de sisteme fotovoltaice, ținându-se seama de tendințele actuale pe plan mondial în domeniul celulelor solare din generația a treia și a patra, noile concepte de astfel de celule și problemele fundamentale impuse de creșterea performanțelor celulelor solare. S-au introdus câțiva parametri de bază ai optoelectronicii celulelor solare, cum sunt: absorbanța, gap-ul, grosimea stratului antireflector și reflectanța și s-au analizat posibilitățile de optimizare a acestora.
2. Principalele cercetări teoretice și experimentale ale lucrării se referă la modularea electrică și optică și la simularea a diferite tipuri de celule solare avansate, precum și la caracterizarea, testarea, realizarea și monitorizarea în funcțiune, a modulelor și sistemelor fotovoltaice performante.
3. Din punct de vedere teoretic au fost studiate probleme de actualitate a optoelectronicii celulelor solare cu gropi cuantice (**a**), a celulelor solare cu polimeri organici (**b**) și a celulelor solare dye-sensitive (**c**), folosind atât modelarea electrică, cât și modelarea optică. Totodată pe baza unor simulări numerice s-au obținut o serie de contribuții, certificate prin publicarea acestora în: (**a**)[36,37,38,45], (**b**)[57,64,65], (**c**)[57,71], care pot fi utilizate la optimizarea performanțelor acestor celule solare.
4. O atenție deosebită s-a acordat la caracterizarea celulelor solare privind unele proprietăți ca: absorbanța, gap-ul, grosimea stratului antireflector și reflectanța și s-au analizat posibilitățile de optimizare a acestora
5. Din punct de vedere experimental s-au analizat probleme de bază privind caracterizarea și testarea celulelor solare, modulelor și panourilor PV, precum și a componentelor BOS. S-au evidențiat contribuțiile publicate în monografiile de specialitate precum și în Proceeding-urile unor conferințe internaționale și naționale [38,57,96,123,124,129].
6. S-au analizat problemele de bază ale sistemelor PV autonome, respectiv conectate la rețea, discutându-se soluțiile originale propuse de autor pentru monitorizarea diferitelor tipuri de sisteme fotovoltaice specifice [99,38,100,120,115,123,122,126,127,128,130,131].

C2. Contribuții

Principalele rezultate elaborate în teză au fost obținute pe baza unor cercetări proprii și cu suportul datorat unor proiecte de cercetare naționale (PN II-„Promovarea de solutii arhitectonice pentru sisteme fotovoltaice integrate în clădiri” PASOR, 2010; CEEEX „Echipamente și tehnologii ecologice pentru conversia eficientă a energiilor regenerabile” ENCONVEC, 2008; CEEEX „Cercetări privind creșterea randamentului celulelor fotovoltaice nanostructurate” NANO-PV, 2009) și internaționale (LdV, “Development of a Distance Learning Training Structure on the Design and Operation of Hybrid Power Systems” EL/03/B/F/PP-148227; PECO, “Concerted Actions on PV Systems Technology - Pilot PV/Thermal Power Plant for a Peasant Farm in Romania” J02-CT92-0120/ERB; INCO-COPERNICUS “PV ENVIRONMENT-Low-Power Standard PV Units for Environment Protection in Isolated Mountain Areas, ICOP-DEMO-2149-96).

În cadrul acestor proiecte am fost fie director de proiect, fie șef al echipei de cercetare din IPA București, responsabil pe proiectul respectiv.

Principalele rezultate și contribuții obținute de autor privesc următoarele:

1. Analiza prin simulare numerică a diferiților parametri ai celulelor solare cu gropi cuantice. [36,37,38]:

Au fost studiați următorii parametri:

- eficiența cuantică QE a celulelor MQW tip GaAs/ $Al_xGa_{1-x}As$,

- absorbanța α a celulelor MQW tip GaAs/Al_xGa_{1-x}As,
- eficiența cuantică a celulelor MQW a tranzițiilor între nivelele rezonante pentru GaAs
- eficiența cuantică a celulelor MQW a tranzițiilor între nivelele de confinare pentru Al_xGa_{1-x}As
- indicele de refracție al celulelor MQW
- reflectanța celulelor MQW.

Programele de simulare au fost realizate în următoarele medii de programare: Python v2.5 (cu modul Numpy), Dev-C++ (pentru ANSI C), Octave v 3.02.

Programele elaborate au fost utilizate pentru:

- Modelarea electrică a celulelor solare cu gropi cuantice: programul QW1 (coeficientului de absorbție α), programul QW2 (eficienței cuantice QE), programul QW3 (nivele de confinare n) și programul QW4 (nivele rezonante).
 - Modelarea optică a celulelor solare cu gropi cuantice: programul MO- n (indice de refracție) și MO- r (reflectanță).
- Am calculat *absorbanța α* și *eficiența cuantică QE* folosind o simulare numerică pe baza modelului semicuantic propus de Hutchby. și Fudurich [133]. S-a calculat variația absorbanței spectrale pentru diferite concentrații de aluminiu a celulelor tip GaAs / Al_xGa_{1-x}As, și variația eficienței cuantice: cu lungimea de undă pentru diferite fracții de Al, cu lungimea de undă pentru diferite grosimi de celulă solară, precum și cu lungimea de undă pentru diferite câmpuri efective.

Eficiența cuantică în acest caz este determinată, în mare măsură, de parametrul de recombinare superficială. Pierderile de recombinare în celulă devin neglijabile, comparativ cu pierderile la suprafață, iar QE atinge un maxim care este limitat de recombinarea superficială.

Variația *câmpului efectiv \mathcal{E}_f* s-a realizat tehnologic prin doparea graduală (controlată) a materialului. Prin analiza datelor obținute s-a constatat că:

- *eficiența cuantică* crește o dată cu creșterea *lungimii de undă λ* , având valori semnificative, de maximum 90%, în cazul lungimii de difuzie mare.
 - *eficiența cuantică* crește o dată cu creșterea *grosimii stratului z* și a lui \mathcal{E}_f .
- Pe baza modelului matematic pentru eficiența cuantică a tranzițiilor între nivelele rezonante pentru GaAs și pentru randamentul cuantic al tranzițiilor între nivelele de confinare pentru Al_xGa_{1-x}As sunt realizate simulări pentru celule MQW. Am calculat *eficiența cuantică a tranzițiilor între nivelele rezonante* pentru GaAs, care indică valori foarte mari, de *aproximativ 70%*; s-a constatat că aceasta variază în funcție de unghiul prisme și de unghiul de incidență

Eficiența cuantică a tranzițiilor între nivelele de confinare pentru Al_xGa_{1-x}As are valori foarte mici în comparație cu cea între nivelele rezonante, având variații la creșterea unghiului prisme, la creșterea unghiului de incidență, la creșterea cantității de Aluminiu și la creșterea indicelui de refracție al prisme

- Este posibil să existe și câmpuri electrice induse de tensiunile din straturile semiconductorului (prin efecte piezoelectrice), datorită neconcordanței constantelor rețelei. Din acest motiv, se dorește investigarea efectelor câmpului electric asupra indicelui de refracție al celulelor solare cu gropi cuantice multiple, care se poate realiza prin calcularea coeficientului de absorbție al materialului.

La modelul Rault al indicelui de refracție, prin considerarea efectelor de excitație, se constată fluctuații relativ ridicate, pentru câmpul electric nul. Pe măsură ce câmpul electric crește, energia de excitație este redusă semnificativ, ajungând la zero pentru un câmp electric de 100kV/cm. Prezența efectelor de excitație este atribuită coeficientului de absorbție al gropilor cuantice, valoarea acestuia reducându-se odată cu creșterea câmpului electric.

- Se poate utiliza modelul indicelui de refracție pentru explorarea relației dintre indicii de refracție și reflectanță. Modelul reflectanței poate fi utilizat pentru a determina efectele variației numărului de gropi cuantice asupra indicelui de refracție. S-a arătat că *grosimea*

d_1 a stratului anti-reflex are valoarea aproximativă de 600-650nm, în cazul reflexiei minime. Se poate evalua efectul numărului de gropi cuantice asupra indicelui de refracție, precum și asupra pierderilor prin reflexie, putându-se determina numărul optim de gropi cuantice din cadrul structurii. Am analizat modelul reflectanței pentru o celulă solară cu structură QWSC, pentru un strat anti-reflector de SiO. Rezultatele generate de model sunt în concordanță cu rezultatele experimentale obținute [47].

Dacă considerăm schimbarea procentuală a reflectanței pentru fiecare structură de gropi cuantice, comparativ cu celula de control, este evident faptul că, pentru o anumită lungime de undă, schimbarea reflectanței indusă de schimbarea indicelui de refracție, prin variația numărului de gropi cuantice, este unică pentru acea lungime de undă și poate fi semnificativă (variază de la 90% până la 400%).

2. Simularea modelului clasic PC-1D al celulelor fotovoltaice organice [57,64].

Am calculat variația curentului unei celule la întuneric în funcție de *factorul de idealitate al diodei* γ . Creșterea acestui factor conduce la scăderea curentului, iar pentru $\gamma = 1,5$ acesta devine aproape egal cu zero. Am calculat și curentul unei celule la întuneric pentru diferite valori ale rezistenței paralele R_p . Creșterea valorii lui R_p conduce la scăderea curentului, scădere ce se accentuează brusc dacă acesta crește de 5 ori. S-a obținut variația densității de curent de lucru J_L cu tensiunea, la diferite rate de generare de purtători G în celulă. Se observă scăderea lui J_L , pe măsură ce scade G (cece era de așteptat). Totodată am mai calculat și variația lui J_L cu produsul $\mu\tau$ (μ - mobilitatea, τ - timpul de viață al purtătorilor de sarcină), variația curentului total cu tensiunea, variația randamentului de conversie cu puterea fluxului luminos, pentru diferiți factori de formă.

Rezultatele obținute în cadrul simulării modelului clasic PC-1D au permis evidențierea următoarelor concluzii:

- S-a analizat influența unor factori, cum ar fi γ și R_p (rezistența paralelă), factori ce pot fi modificați constructiv;
- Influența lui G arată necesitatea măririi acesteia, ceea ce se poate realiza crescând fluxul de particule; aceasta se poate obține prin folosirea unor metode de concentrare a fluxului luminos: concentratoare, prisme, lentile, etc.;
- Se observă variația puternică a curentului J_L cu produsul $\mu\tau$ ceea ce arată influența atât a naturii materialului din care este obținută celula, cât și a grosimii celulei;
- Randamentul de conversie crește cu factorul de formă, factor ce depinde de modul de obținere a celulei;
- Randamentul de conversie crește lent cu puterea fluxului luminos, este destul de mic, dar este compensat de faptul că astfel de celule au un cost scăzut.

3. Utilizarea modelului diodei pentru simularea numerică a caracteristicilor celulelor solare pe bază de polimeri [64,65].

În urma acestui studiu sunt constatate următoarele:

- variația densității de curent J în raport cu tensiunea celulei, pentru diferite valori ale grosimii stratului activ. Se poate observa o creștere (în valoare absolută) atât a densității de curent în circuit deschis (de gol) J_{sc} , cât și a tensiunii V_{oc} , odată cu creșterea grosimii stratului.

- variația lui J în raport cu produsul $\mu\tau$. Se poate observa creșterea (în valoare absolută) a densității de curent de scurt-circuit J_{sc} odată cu scăderea produsului $\mu\tau$. Valoarea produsului $\mu\tau$ este determinată de recombinarea și transportul purtătorilor și depinde de natura substanței folosite la fabricarea celulei solare;

- Obținerea unei dependențe teoretice dintre randamentul de conversie η și puterea fluxului luminos incident este în concordanță cu rezultatele experimentale din literatură [62,63];

- Rezultatele referitoare la influența diferiților parametri ar putea fi utilizate la optimizarea construcției celulei solare cu polimeri.

Am studiat comportamentul unei celule solare pe bază de polimeri prin aplicarea metodelor de analiză numerică. S-au obținut următoarele concluzii principale:

- Analiza numerică permite determinarea ponderii relative a diferiților parametri.

- Parametrii constructivi (γ , R_p , R_s , $\mu\tau$) influențează puternic comportamentul celulei. Acești parametri descriu atât natura fizică a stratului activ, cât și caracteristicile tehnologice ale celulei;
- Densitatea curentului generat de lumină crește (în valoare absolută) odată cu produsul $\mu\tau$, indicând rolul stratului activ, adică nevoia de mai puține procese de recombinare (creșterea duratei de viață a purtătorilor) și de o conductivitate mai bună (creșterea mobilității purtătorilor);
- Influența lui G (*rata de generare de purtători în celulă*) sugerează că, creșterea sa poate fi obținută prin creșterea fluxului de particule, iar acest lucru se poate realiza prin utilizarea metodelor de concentrare a fluxului de lumină solară: prisme, lentile, etc;
- Randamentul de conversie crește încet cu puterea fluxului luminos și este destul de redusă, dar acest lucru este compensat de costul redus al celulelor solare bazate pe polimeri.

4. Simularea numerică a densității fotocurentului tranzitoriu dintr-o celulă DSSC [54,70]

Am folosit o metodă de tip Monte Carlo pentru a simula fotocurentul tranzitoriu și astfel s-a simulat transportul electronilor într-un film mezoporos de TiO_2 , într-un model în care electronii execută drumuri aleatoare printr-un lanț de celule sferice, cu capcane localizate la suprafața lor. Simularea arată cum fotocurentul tranzitoriu, ca răspuns al unui scurt puls de iluminare, poate fi folosit pentru a studia efectele pe care le are morfologia celulei asupra transportului de electroni.

În cadrul simulării, traiectoriile ansamblului de electroni sunt determinate prin intermediul unor numere aleatoare. Electronii se deplasează în linie dreaptă până în momentul în care sunt împrăștiați, moment în care alegem o altă direcție aleatoare. Timpul mediu dintre împrăștieri t_{step} permite electronilor să se deplaseze o distanță medie egală cu $d_{step} = 0,1nm$. Pentru a realiza simularea ar fi necesari aproximativ 10^{12} pași de simulare. Cererea de resurse necesare simulării Monte Carlo a fost satisfăcută utilizând o combinație între simularea fină și simularea brută, luând în considerare 100 de celule în lanț și o capcană pe celulă. Pentru a realiza o reducere a cerințelor computaționale s-a realizat o simulare în două etape. În prima etapă, cea la scara fină s-a studiat deplasarea unui electron între celule, înregistrând și probabilitatea de a reacționa cu capcanele. În etapa a doua, cea la scară brută, s-au folosit rezultatele din prima etapă și s-au reținut pozițiile electronilor, doar pentru celula în care aceștia se află. Programele simulării au fost scrise în *ANSI C* și în *Matlab*. Simularea la scară fină, a înregistrat în care celule se va deplasa fiecare electron, ținând cont de celula de unde pornește și, de asemenea, probabilitatea ca un electron să fie capturat de o capcană. Simularea la scară brută folosește rezultatele simulării fine pentru a studia parcursul electronilor.

Modelul dezvoltat simulează drumul aleator al electronilor care difuzează printr-un film poros de nanoparticule interconectate, și acoperă o scară largă de intervale de timp prin combinarea unei simulări cu scală redusă a timpului, cu o simulare cu scală pe timp îndelungat. Simularea a fost folosită pentru calcularea densității curentului tranzitoriu într-o celulă solară cu colorant DSSC după oprirea iluminării. Simularea poate fi dezvoltată mărind numărul de celule din lanț, respectiv numărul de capcane pe celulă; acest fapt implică utilizarea unor resurse computaționale mărite.

5. Sinteza și caracterizarea a noi materiale bazate pe ftalocianine pentru fabricarea celulelor solare DSSC [70]

Am participat la realizarea sintezei și caracterizării noilor cromofori bazați pe ftalocianine și a unui nou electrolit pentru fabricarea celulelor solare cu coloranți organici (DSSC) și a celulelor solare hibride, cu coloranți organici.

Influența stratului de colorant asupra suprafeței TiO_2 a fost de asemenea evaluată prin analiza *SEM*. Este binecunoscut faptul ca modul în care colorantul este legat, este important pentru obținerea unui randament bun pentru celula solară. Acest lucru poate fi explicat prin existența anumitor zone caracterizate prin diferite suprafețe specifice de-a lungul stratului de TiO_2 (zone luminoase și întunecate). Pornind de la modelul standard al celulei Graetzel în

care electrolitul era bazat pe sistemul redox KI/I_2 , s-a încercat să se înlocuiască electrolitul clasic cu un polimer cu mobilitate ridicată (cu un T_g mic) conținând săruri cuaternare de amoniu (*PDEAEMA-q*) în lanțul *pending*.

6. Dezvoltarea unei scheme originale de testare a celulelor solare și a modulelor PV [38,96].

În vederea testării cantitative a celulelor solare, cât și a modulelor PV, am realizat *Schema electrică a echipamentului experimental de testare a celulelor și modulelor PV*. Echipamentul experimental este compus din două părți separate:

- a. Simulatorul solar care emite radiația solară (care poate fi utilizat cu sau fără sisteme de concentrare);
- b. Instalația electrică de testare bazată pe metoda opoziției cu o sursă de *c.a.*, care are avantajul de a efectua măsurătorile în *c.a.* și care este capabilă să și afișeze valorile parametrilor principali (I_{SC} -curentul la scurtcircuit, U_G -tensiunea în gol, I_{optim} -curentul optim, U_{optim} -tensiunea optimă) pe patru aparate de măsură digitale, cât și să ridice caracteristica $I-U$ reală a celulei pe un frecvențmetru cu vibrație catodică (XY), calibrat în prealabil cu ajutorul unei celule solare standard.

Am realizat eșantionarea și afișarea valorilor optime ale curentului și tensiunii celulelor și modulelor PV testate, cu ajutorul echipamentelor propuse și folosind metoda opoziției.

Pentru a afișa valorile optime ale curentului și tensiunii, care sunt funcționale pentru celula/modulul solar/ă, se folosesc un multiplicator și un amplificator de instrumentație, care furnizează la ieșire o tensiune u_h proporțională cu puterea disipată pe celulă, cu ajutorul unui circuit detector al valorii de vârf, al unui comparator și al unui flip/flop bistabil, producând încă un semnal de eșantionare care memorează semnalele u_a (tensiunea furnizată de un amplificator diferential) și u_b (tensiunea celulei amplificată cu K_2), proporționale în moment cu I_{optim} și U_{optim} . Pentru o afișare a mărimilor menționate, este nevoie de patru multimetre digitale. Rezultatele experimentale obținute prin această metodă au fost comparabile cu metode similare stabilite în literatura de specialitate [26,134].

7. Stabilirea de noi metodologii de caracterizare și proiectare a aplicațiilor fotovoltaice [54,99,102,124,127]

Am participat la dezvoltarea unei metodologii proprii de proiectare și dimensionare a diferitelor tipuri de aplicații fotovoltaice, specifice mediului urban, precum și pentru zone izolate, fără rețea electrică.

S-a folosit modelul *PVSYST* (*PVSYST* poate fi folosit pentru proiectarea și compararea diferitelor tipuri de sisteme, folosind diferite nivele ale programului). *PVSYST* este un pachet de software utilizat pentru dimensionarea, simularea și analiza statistică a sistemelor PV complete, pentru obținerea unor rezultate cât mai apropiate de cele reale. Pentru exemplificare este realizată dimensionarea sistemului BIPV implementat la Universitatea Politehnica București (proiectul PASOR).

Proiectul discutat este un model de sistem BIPV conectat la rețea. După simulare, programul a oferit un raport amănunțit asupra modelului realizat, precum și asupra opțiunilor de îmbunătățire a randamentului acestuia (sugerarea alegerii unor alte componente BOS, etc.). Sistemul a fost simulat în conformitate cu parametrii și condițiile introduse conform datelor reale. Rezultatele simulării ne arată că modelul construit va produce 351 kWk/an la o rată de performanță de 73.5%. Programul oferă de asemenea informații privitoare la energia pierdută. Sunt luate în calcul toate pierderile pentru un an, de la pierderile datorate eficienței de conversie, la pierderile datorate nivelului de radiație și la pierderile din timpul exploatării

Totodată, având în vedere că gama de valori pentru *puterea instantanee generată de modulele PV* pe parcursul unei zile este foarte variată, din cauza fenomenelor meteorologice imprevizibile și a poziției defavorizate datorate amplasamentului clădirii, este analizată evoluția radiației globale pe parcursul unei zile și impactul său asupra performanțelor sistemului BIPV (cu ajutorul programului *PV GIS*).

8. Proiectarea, realizarea și monitorizarea de modele PV experimentale [122,123,102,124]

Am participat la realizarea și monitorizarea unor platforme de cercetare fotovoltaice performante, cu caracteristici comparabile celor din literatura de specialitate.

Au fost realizate două sisteme performante fotovoltaice:

- a. Model experimental pentru un sistem fotovoltaic de pompare a apei;
- b. Model experimental al unui sistem fotovoltaic pentru asigurarea consumului minim casnic la o casă independentă energetic.

Pentru ambele modele experimentale au fost monitorizați atât parametrii mășurați (radiația solară și temperatura de pe suprafața modulelor, tensiunea și curentul modulelor PV), cât și parametrii calculați (energia solară calculată pe suprafața modulelor, puterea reală disponibilă de la PV, factorul de utilizare al puterii, energia emergentă din sistemul, factorul de utilizare a energiei, etc)

Datele referitoare la parametrii mășurați au fost achiziționați pe o placă de achiziții date, tip PCI 1711L, cu 16 intrări analogice și 2 ieșiri analogice. Aceste date introduse pe placă au fost prelucrate computațional printr-un software realizat în mediul de programare Borland C++, ce identifică parametrii mășurați corespunzători fiecărui model experimental și pe baza acestora calculează alți parametri (cum ar fi puterea și energia). Mediile orare, cele zilnice și cele lunare ale acestor parametri sunt stocate în baze de date diferite, ce pot fi utilizate pentru a afișa reprezentări grafice, analize și interpretări ale datelor pentru fiecare model în parte.

Una din aceste platforme a fost realizată pe acoperișul Universității din Galați, și aici s-au putut efectua măsurări de parametri și urmări funcționarea sistemelor PV în timp real. Bazându-ne pe modele matematice din literatură și pe elaborarea de soluții de control automat a unui sistem hibrid, am putut urmări dezvoltarea a diferite aplicații software pentru simularea numerică cu *Simulink environment* (pachetul software ControlDesk® dezvoltat de firma dSPACE®).

9. Proiectarea, realizarea și monitorizarea de sisteme BIPV

Am participat la proiectarea, instalarea și monitorizarea unor instalații solare integrate în clădiri contribuind la obținerea unor rezultate promițătoare la promovarea eficienței energetice legată de arhitectura solară.

Unul din sistemele originale BIPV a constat dintr-un panou format din 6 module PV (o fereastră fotovoltaică semitransparentă) montată în Laboratorul de Celule Solare Nanostructurate de la UPB, Facultatea de Științe Aplicate; instalația a fost realizată în cadrul proiectului PASOR (finanțat de către CNMP/UEFISCD), rezultatele fiind promovate prin lucrări publicate sau prezentate la conferințe internaționale /naționale. [36,38,126,115,124,127]

Echipamentul de monitorizare, **Sunny Boy Control Plus**, oferă facilități pentru stocarea și prelucrarea datelor de la inverter. Sunny Boy Control Plus poate afișa energia totală debitată pe zi în rețea, energia totală globală debitată în rețea, și energia instantanee de la modulele PV. De asemenea poate afișa parametrii de operare ai inverterului în timp real, acei parametri care sunt înregistrați: tensiunea generată de module (V_{PV}), puterea generată de module (P_{AC}) și energia totală generată (E_{total}). Soft-ul dedicat monitorizării este SMA Data Control. Un server web Apache este de asemenea integrat în program, permițând astfel accesul protejat de pe orice calculator la datele culese de Sunny Boy Control Plus și integrarea lor în site-ul proiectului. Protocolul de comunicație folosit de Sunny Boy Control Plus este SMA-NET.

În paralel, a fost realizată și dezvoltată o bază de date cu măsurători ale radiației solare pe suprafețe înclinate, în diferite puncte de pe teritoriul României, dar și alți parametrii meteo, cu implicarea Institutului Național pentru Meteorologie și Hidrologie; au fost realizate două stații de măsurare a parametrilor meteorologici la București și la Timișoara

10. Proiectarea, instalarea și monitorizarea de sisteme PV autonome sau legate la rețeaua electrică [128,130,131,132]:

Am coordonat echipa de cercetare IPA care a participat la realizarea și monitorizarea de la distanță a două sisteme PV demo, pentru locații autonome din zona montană pe baza unui proiect Copernicus, realizat în colaborare cu WIP Munchen (Germania).

- *Achiziția automată a datelor* → achiziționarea datelor de la PLC, după realizarea conexiunii; calcularea altor parametri pe baza datelor achiziționate, utilizând mai multe funcții matematice definite; arhivarea organizată tuturor noilor date disponibile (cele achiziționate și cele calculate), în vederea stocării datelor;
- *Achiziția manuală a datelor* (datele sunt luate periodic pe un card de memorie, transportate și înserate în stația de lucru).

Pachetul de programe reprezintă un sistem de control în timp real, dedicat supravegherii activităților posturilor locale. Dispecerul trebuie să poată executa funcțiile de citire a intrărilor la momentele de timp programate.

Sistemul pentru afișarea informațiilor specifice pentru instalațiile PV permite analiza globală și detaliată a informației privind evoluția în timp a parametrilor instalației și a celor meteorologici; descrierea evenimentelor nedorite ce au apărut în timpul operării. Analiza jurnalului de operare permite realizarea de rapoarte statistice asupra instalațiilor PV pe perioade lungi de timp (luni/ani), iar rezultatele obținute conduc la optimizarea funcționării acestora prin eliminarea inconvenientelor apărute.

11. Elaborarea de lucrări publicate [conf. bibliografiei]:

Articolele originale publicate pentru promovarea cercetărilor proprii în perioada de pregătire a doctoratului și contribuțiile originale realizate în cadrul proiectelor la care am participat au fost reflectate prin articole din publicații cu indexare ISI sau în articole din publicații prezente în baze de date internaționale (inclusiv Proceedings la conferințe internaționale de prestigiu).

Cercetările pot fi dezvoltate în următoarele direcții:

- îmbunătățirea randamentului de conversie al celulelor solare vor putea fi studiate și analizate noi tipuri de materiale, care ar putea permite realizarea unor celule solare hibride/granule cuantice, care să optimizeze raportul cost-performanță. Pe această bază pot fi concepute dispozitive fotovoltaice, ce pot fi utilizate atât pentru mici aplicații fotovoltaice, precum și pentru sisteme fotovoltaice integrate (BIPV) sau aplicații fotovoltaice rezidențiale (autonome și conectate la rețea).
- dezvoltarea unor instrumente de simulare pentru noile tipuri de celule solare hibride incluzând celulele solare cu nanotuburi, precum și pentru noile tipuri de celule solare cu granule cuantice;
- participarea la proiectarea și testarea unor celule solare hibride și a unor celule solare cu granule cuantice, cu performanțe superioare: integrarea celulelor solare hibride/celulelor solare cu granule cuantice, în module, prin stabilirea tehnologiei de fabricare și testare a noilor module PV ce vor fi realizate.

Bibliografie selectivă

- [1] WBGU/German Advisory Council on Global Change, “World in Transition – Towards Sustainable Energy Systems”, London: Earthsan, 2003.
- [2] A. Goetzberger, J. Luther & G. Willeke, Technical Digest of the 12th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (Taejon: KIER) p.5, 2001.
- [7] M.A. Green Third Generation Photovoltaics: Ultra – High Efficiency at Low Cost, Springer, 2003.
- [8] A. Luque and A. Martí, Phys. Rev. Lett. 78, 5014. Verlag 1997
- [9] K.W.J. Barnham and G. Duggan, J. Appl. Phys. 67, 3490, 1990.
- [10] M.A. Green, E.Emery, S.Hishikawa & J.Warta, “Progress in Photovoltaics”, 2011.

- [11] R.R. King, A. Boca, W. Hong et al., Proceedings of the 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, (WIP: Munich) pp. 55, 2009.
- [12] T. Takamoto, T. Agui, A. Yoshida et al., Proceedings of the 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (New York: IEEE) p. 412, 2010.
- [13] M. Yamaguchi, Proceedings of the 19th European PV Solar Energy Conference Munich: WIP, 2004.
- [21] H. J. Möller, Semiconductors for Solar Cells, Artech House, Boston, 1993.
- [22] J. Pankove, Optical Processes in Semiconductors, Dover, New York, 1971.
- [23] A. Goetzberger, J. Knobloch, B. Voss, Crystalline Silicon Solar Cells, John Wiley & Sons, New York, 1992.
- [24] A. Goetzberger, V. U. Hoffmann, Photovoltaic Solar Energy Generation, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005.
- [25] G.P. Smestad, Optoelectronics of Solar Cells, SPIE Press, Bellingham, Washington USA, 2002.
- [26] T. Markvart (Ed.) and L. Castañer (Ed.), Practical Handbook of Photovoltaics, Elsevier, Kidlington, 2003.
- [28] A. Luque, G.L. Araújo, A. Cuevas, E. Lorenzo, C.J. Miñano, J.M. Ruiz, G. Sala, Solar Cells and Optics for Photovoltaic Concentration, Adam Hilger, Bristol & Philadelphia, 1989.
- [31] S. Y. Myong, Recent Patents Nanotechnol., 1, 67, 2007.
- [32] L. Fara, M.R. Mitroi, V. Iancu, G. Milescu, G. Noaje, Modelarea și simularea numerică a celulelor solare nanostructurate, Ed. Punct, București, 2008.
- [35] A. J. Nozik, NCPV and Solar Program Review Meeting NREL/CD-520-33586, 422, 2003.
- [36] Paul Sterian, [Silvian Fara](#), Laurentiu Fara, Mihai Iancu. „A Study of the Optical Properties of quantum well solar cells aimed at optimizing their configuration”; revista UPB Scientific Bulletin, Series A: Applied Mathematics and Physics, Volume 72, Issue 1, 2010, pg.9-19 (ISI)
- [37] [Silvian Fara](#); Paul Sterian; Laurențiu Fara; Mihai Iancu, „Influence of the optical parameters of the Quantum Well Solar Cells upon solar cells conversion efficiency” JOAM, Vol.:12, Issue: 1, Pg: 129-134, 2010 (ISI).
- [38] Laurentiu Fara (editor), Razvan Mitroi, Corneliu Cincu, Vladimir Iancu, Catalin Zaharia, [Silvian Fara](#) (capitolele 4, 6 si 7), Dumitru Finta, Mihai Iancu, Dragos Comaneci. Monografie: Fizica și tehnologia celulelor solare si sistemelor fotovoltaice; Ed. Acad. Oamenilor de Știința din România, 2009, București.
- [39] S. Adachi, "GaAs and Related Materials", World Scientific Publishing Co, 1994.
- [45] Marius Paulescu, [Silvian Fara](#), Mihai Iancu, „Computation of the Electronic States in Quantum Well Heterostructures” Proceedings of CEEEX Conference, Brasov, pg. 157-161 September 2008
- [46] K.W.J. Barnham, I. Ballard, J.P. Connolly, N.J. Ekins-Daukes, B.G. Kluftringer, J. Nelson C. Rohr, Physica E, 14, 27, 2002.
- [47] F.K. Rault, Mathematical modelling of the refractive index and reflectivity of the quantum well solar cell în Nanostructured materials for solar energy conversion (editor T.Soga), Elsevier, Amsterdam, 2006.
- [49] J.P. Connolly, I. M. Ballard, K. W. J. Barnham, D. B. Bushnell, T. N. D. Tibbits, J. S. Roberts, Proc. 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 355-358, 2004.
- [50] D.C. Johnson, I. M. Ballard, K.W.J. Barnham, J.P. Connolly, M. Mazzer, A. Bessiere, C. Calder, G.Hill, J.S. Roberts, Appl. Phys. Lett., 90, 213505-213507, 2007.
- [51] J.A.Hutchby, J. Appl. Phys. 47 (7), R 3140, 1976).
- [52] J.P.Connolly, Teza de doctorat, University of London, Imperial College of Science Technology and Medicine, Department of Physics, 1997.
- [53] S. Adachi: "GaAs and Related Materials", World Scientific Publishing Co., 1994.
- [54] Raport RST final NANOPV, 2009
- [55] C.D. Dimitrakopoulos, P.R.L. Malenfant, Adv. Mater., 14, 99, 2002.
- [56] F. Wudl, Acc. Chem. Res., 25, 157161, 1992.
- [57] Marius Paulescu (Editor), Dorina A. Vangheli, Eugenia Tulcan–Paulescu, Adrian Neculae, Paul Gravila, Nicolina Pop, Titus Vlase, [Silvian Fara](#), Dumitru Finta; Celule fotovoltaice nanostructurate; Ed. Univ. de Vest, Timisoara, 2007.
- [58] A. Mozer, S.C. Sariciftci, R. Chimie, 9, 568, 2006.
- [59] T. Aernouts, “Organic Bulk Heterojunction Solar Cells”, Katholieke Universiteit Leuven, Departement Natuurkunde, Celestijnenlaan 200 D, B 3001 Leuven, België, 2006.
- [60] J. Marlein, M. Burgelman, Proceedings of NUMOS Gent 28-30 March, 2007.

- [61] E.A. Katz, D. Faiman, S.M.Tuladhar, *Journal of Appl. Phys.* 90, 5343, 2001.
- [62] M. R. Mitroi, V.Iancu, L.Fara, and M.L. Ciurea, *Prog. Photovolt: Research Appl.* 19, 301, 2011.
- [63] M. Scharber, D. Mühlbacher, M. Koppe, P. Denk, C. Waldauf, A.J. Heeger, C. Brabec, *Adv. Mater.* 18, 789, 2006.
- [64] Mihai Razvan Mitroi, Laurentiu Fara, [Silvian Fara](#), „Analysis of Polymer Solar Cell Parameters Based on the Diode Model” *Romanian Journal of Optoelectronics*, Volume 16, Issue 1/ISSN 1453-0600, pg. 61- 68, 2011.
- [65] Mihai Razvan Mitroi, Laurentiu Fara, [Silvian Fara](#), „Modelling and Simulation of J-V Characteristics for Polymer Solar Cells Based on Carrier Generation Rate”, in curs de publicare la JOAM (*Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*)
- [66] B. O'Regan, M. Gratzel A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO₂ films, *Nature* **353**: 737, 1991.
- [67] M. Grätzel” Photoelectrochemical cells” *Nature* 414: 338, 2001.
- [68] J. N. Hart, D. Menzies, Y.B. Cheng, G.P. Simon, L. Spiccia, A comparison of microwave and conventional heat treatments of nanocrystalline TiO₂ Solar Energy Materials & Solar Cells **91**: 6, 2007
- [69] G. Boschloo, T. Edvinsson, A. Hagfeldt, „Dye-sensitized nanostructured ZnO electrodes for solar cell applications”, S. Tetsuo (Ed.), *Nanostructured Materials for Solar Energy Conversion*, Elsevier, Amsterdam, pp. 227–254, 2006.
- [70] Aurel Diacon, Edina Rusen, Laurentiu Fara, Cristian Boscornea, Andreea Pandele, Catalin Zaharia, [Silvian Fara](#), Paul Sterian, Corneliu Cincu, „New phthalocyanine-fullerene dyads sensitizers for dye-sensitized solar cells”, Poster și lucrare publicată în *Proceedins of European Energy Conference*, Barcelona, 04.2010.
- [71] C.J. Barbe, F. Arendse, P. Comte, M. Jirousek, F.Lenzmann, V.Shklover, M.Graetzel, *J. Am. Ceram. Soc.* 80, 3157–3171, 1997.
- [72] Z. Ning, Q. Zhang, W. Wu, H. Tian, *J. Organomet*, Chem. 694, 2705–2711, 2009.
- [88] L. Castaner, “Photovoltaic systems engineering”, in: Markvart, T. Ed., *Solar Electricity* (2nd edition), John Wiley & Sons, Chichester, Chapter 4, 2000.
- [90] Wiles, J.C. and King, D.L. “Blocking diodes and fuses in low-voltage PV systems”, *Proc. 26th IEEE Photovoltaic Specialist Conf*, Anaheim, 1997.
- [91] Dan M.J. Doble, John W. Graff, Fraunhofer Center for Sustainable Energy Systems, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA USA
- [92] Stand-Alone Photovoltaic Systems: A Handbook of Recommended Design Practices, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, 1995.
- [96] Maria Popa, Laurentiu Fara, [Silvian Fara](#), Ion Niculescu, *Experimental Equipment for the Testing -Standard Design of PV Cells and Modules*; Buletin UPB, 1990, pp145-148
- [99] [Silvian Fara](#), Dumitru Finta, Mihai Iancu, Laurentiu Fara, Dragos Comaneci, Ana-Maria Dabija, -Eugenia Tulcan- Paulescu, Marius Paulescu, Traian Jurca. „Integration of PV Modules in Existing Romanian Buildings”. *IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics - AQTR 2010 - THETA 17th edition*, 2010, Cluj, Romania. *Proceedings (ISI)*
- [100] [Silvian Fara](#), Dumitru Finta, Mihai Iancu, „Promoting and Learning the RES Technologies in Romania” - 11th International Conference on Solar Energy at High Latitudes "NorthSun 2007", Riga, Latvia, 2007, Publcat in: *Journal of Applied Research. Official Journal of Lithuanian Applied Sciences Academy*, Nr.5, 2007 Klaipeda. ISSN 1822-0754, 2007.
- [102] International Electrotechnical Standard Commission IEC 61215, *Crystalline Silicon Terrestrial Photovoltaic (PV) Modules – Design Qualification and Type Approval*, Geneva, Switzerland.
- [104] *Qualification Test Procedures for Photovoltaic Modules*, Commission of the European Communities, Joint Research Center, ISPRA Establishment, Specification 502, May 1984.
- [107] E.Lorenzo, *Solar Electricity Engineering of Photovoltaic Systems*, Progensa, Seville, 1994.
- [108] L.L.Bucciarelli, „The effect of day-to-day correlation in solar radiation on the probability of-loss of power in a stand-alone photovoltaic energysystems”, *SolarEnergy*, Vol. 36, p. 11, 1986.
- [110] L.Castafier, S.Silvestre, *Modelling Photovoltaic Systems Using Pspice*, John Wiley and Sons, Chichester, 2002.
- [111] R.Messenger and J.Ventre, *Photovoltaic Systems Engineering*, CRC Press LLC, 2000.
- [112] Laurentiu Fara, [Silvian Fara](#), Ana-Maria Dabija, „Building Integrated Photovoltaics in Romania” *Proceedings of the 25th Conference PLEA 2008*, Dublin, pg. 273- 279, Oct.2008
- [115] Guidelines for measurement, data exchange and analysis. CEI 82-15 Photovoltaic system performance monitoring

- [120] **Silvian Fara**, Dumitru Finta, Mihai Iancu; „Efficient Renewable Energy Systems Exploitation Aiming at Reducing Electricity Generation from Conventional Power Plants”- AQTR 2008, Proceedings of 2008 IEEE International, pg.283-287 (ISI)
- [122] **Silvian Fara**, Dumitru Finta, Mihai Iancu, Victoria Malihin. „Small Power Photovoltaic Systems. Monitoring and Evaluation of Performances”-*Proceedings* ISEEE-2008, Galati pg. 266-270.
- [123] **Silvian Fara**, Dumitru Finta, Mihai Iancu, Emil Ceanga, Victoria Malihin, George Iorga. „Echipamente si Tehnologii Ecologice pentru Conversia Eficientă a Energiilor Regenerabile” Proceedings la sesiunea stiintifica MENER, Sinaia, septembrie 2008.
- [124] Laurentiu Fara, **Silvian Fara**, Charambos Malamatenios, Carlos Talamanca, Duncan Brewer, Klaus Gremeier, „Distance Learning Courses in Design and Operation of Hybrid Power Systems” Journal of Applied Research – Official Journal of Lithuanian Applied Sciences Academy, No 2, pg. 95-100, 2005
- [125] **Silvian Fara**, Dumitru Finta, Mihai Iancu, Laurentiu Fara, Dragos Comaneci, Ana-Maria Dabija, -Eugenia Tulcan- Paulescu, Marius Paulescu, Traian Jurca. „Integration of PV Modules in Existing Romanian Buildings”. IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics - AQTR 2010 - THETA 17th edition, 2010, Cluj, Romania. Proceedings (ISI)
- [126] **Silvian Fara**, Laurentiu Fara, Ana-Maria Dabija, Dumitru Finta, Mihai Iancu, Marius Paulescu. „Building Integrated Photovoltaics (BIPV) in Romania” International Congress, Energy and the Environment 2008, Opatija, Croatia; „Proceedings of Energy and Environment 2008”, Vol.2, Pg: 237-246, oct. 2008. (ISI)
- [127] **Silvian Fara**, Dumitru Finta, Mihai Iancu; Laurentiu Fara; Marius Paulescu. „Solar Architecture – First Steps in Romania” IEEE-TTTC-International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics) Proceedings; tome 1 - pg. 233-237, 2006.
- [128] **Silvian Fara**, Laurentiu Fara, Ioan Luminosu, „Environmental Control in Isolated Mountain Area by Stand-alone PV System”; Workshop Balkan Environmental Association, 05.2009, Alba Iulia
- [129] **Silvian Fara**, Dumitru Finta, Mihai Iancu; Laurentiu Fara; Charalambos Malamatenios; Carlo Talamanca; Duncan Brewer; Klaus Grepmeier; „Products of Hypos–Diletr Project - Distance learning courses in design and operation of HPS” IEEE-TTTC - International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics), Proceedings, tome1 - pg .391-395, 2006.
- [130] Laurentiu Fara, Antonio Valverde Conton, **Silvian Fara**, Dumitru Finta, „General Approach of the Monitoring Systems for Central Receiver Plants (CRP) and PV Plants” Analele Universitatii de Vest din Timisoara, Vol. XLV, Seria Fizica, pg. 24-41, 2004.
- [131] Laurentiu Fara, **Silvian Fara**, „State of the art of photovoltaics in Romania”, International Conference Renewable Resouces and Renewable Energy, Trieste, Italy, June 2004.
- [132] Raport final proiect: ICOP-DEMO-2149-96
- [133] R.R. King, D.C. Law, K.M. Edmondson, C.M. Fetzer, G.S. Kinsey, H. Yoon, R.A. Sherif, N.H. Karam, ”40% efficient metamorphic GaInP/GaInAs/Ge multijunction solar cells” Applied Physics Letters, Vol. 90 Issue:18, On page(s): 183516 - 183516-3, Apr. 2007.
- [134] PV system testing, Fraunhofer Institute for solar energy Systems ISE, Freiburg, Germany, www.ise-anlagenpruefung.de