

## 8 ФОТОНАПОНСКИ СИСТЕМИ КОРИШЋЕЊА ЕНЕРГИЈЕ СУНЦА

Један од начина коришћења сунчеве енергије је примена фотонапонских система. Осветљавањем малог чврстотелног електронског склопа, може се светлосна енергија Сунца директно трансформисати у електричну енергију. Ови електронски склопови, познати као фотонапонске ћелије (the photovoltaic cells), чине основни део многих савремених производа од малих калкулатора до великих система за снабдевање електричном енергијом. При томе, фотонапонске ћелије при трансформисању сунчеве у електричну енергију не испуштају никакве штетне материје, што има огромну предност у односу на класичне фосилне изворе енергије.

Последњих година, у светским размерама, постоји уочљиво повећање улагања у истраживање и развој фотонапонске конверзије, како би се што јефтиније и ефикасније произодиле фотонапонске компоненте и тиме битно повећала њихова примена.

Појединачни фотонапонски (ФН) елементи, обично познати као соларне ћелије, представљају сложену структуру чији је главни део (активни слој) направљен од полупроводничких материјала. ФН ћелије су различитих величина и облика, од мањих од поштанске марке, до десетак сантиметра у пречнику. ФН елементи се могу реализовати на много различитих начина (ћелије на бази кристалног силицијума, ћелије на бази танких слојева), о чему сведочи велики број различитих технолошких и производних процеса, од којих су неки специјално развијани за ову област.

*Фотонапонска ћелија* (photovoltaic cell) је полупроводничка структура која конвертује светлост директно у електрицитет помоћу ФН ефекта. ФН системи генерално се састоје од неколико или много ФН ћелија, (обично груписаних и упакованих у скупове ћелија названих модули), формирајући »јединицу снаге« која даје као резултат снагу у жељеном облику за разне примене. ФН системи могу обухватати, ако је потребно, и опрему за складиштење енергије и понекад интегралну носећу структуру.

Ово поглавље описује стање ФН технологија у светским размерама, најновија истраживања, развој и производњу ФН система, и неке од многих примена у којима се ова релативно нова технологија користи. Размотрени су и енергетски, економски и еколошки аспекти производње ФН модула њихове примене.

### **Фотонапонски ефекат**

Термин фотонапон (photovoltaic) је први пут коришћен око 1890. године, да би се означио истоимени ефекат. Реч има два дела: photo-настао из грчке речи за светлост, и дела volt - везаног за пионира у области електрицитета, Алесандра Волту. Фотонапон се може дословце превести и као "светлосни електрицитет", а то је управо оно што ФН материјали и уређаји и раде, тј. они претварају светлосну енергију у електричну. Ову појаву је открио француски физичар Edmond Becquerel 1839 године.

Мада се фотонапонски ефекат заснива на једноставним принципима, његово потпун физичко објашњење заснива се на сложенем теоријском разматрању у оквиру квантне физике. Применом квантне физике, где се светлост не посматра само као таласна појава, већ и као честица (фотон), преко објашњења фотоелектричног ефекта, долази се до објашњења како светлост побуђује електроне. Како овај побуђени електрон који се креће може да произведе користан рад? Одговор се налази у примени једноставних полупроводничких структура, познатих као р-п спој (p-n junction).

р-п спој састоји се од два различита селективно допирана полупроводника: р-тип и п-тип. Код полупроводничких материјала, за разлику од изолатора, потребна је релативно мала енергија да би се електрон из валентне зоне пребацио у проводну зону.

Да би се добио селективно допирана полупроводник, односно полупроводник са бољим проводним карактеристикама, може се поступити на два начина. Један начин је да се дода више шупљина (the holes) у валентној зони, а други начин је да се дода више електрона у проводној зони. Ово се остварује процесом селективног допирања, када се на сваких  $10^7$  атома основног материјала један атом замени атомом неког другог материјала.

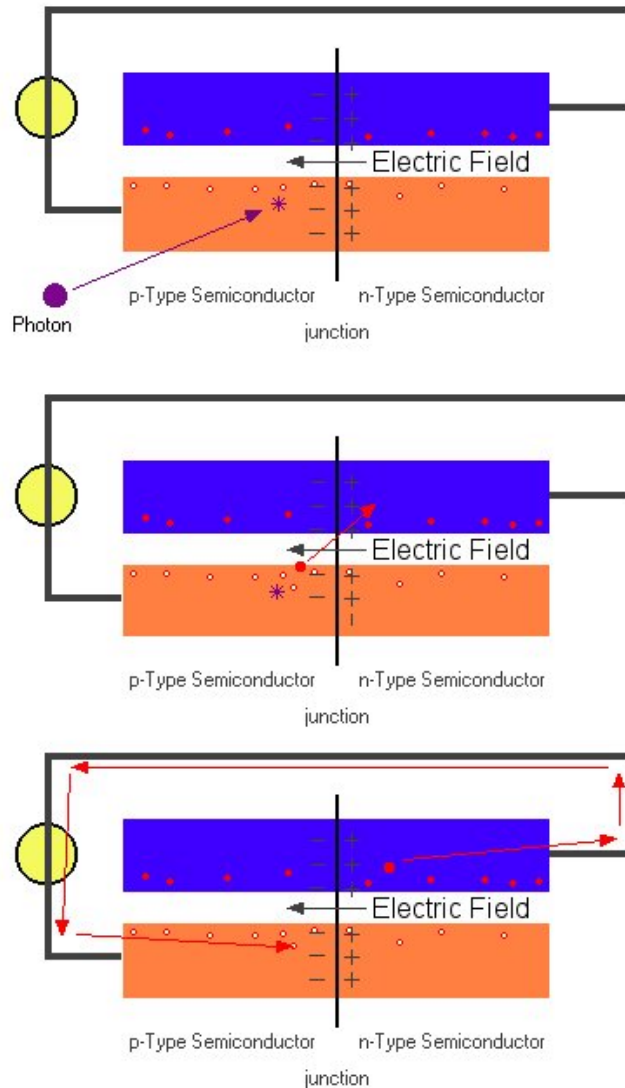
Размотримо конкретан пример полупроводничког силицијума (Si). Ако се један атом силицијума замени са једним атомом петовалентног фосфора, као резултат имаћемо вишак једног електрона који ће лако прећи у проводну зону, где ће се у оквиру силицијумског узорка понашати као квазислободна негативно наелектрисана честица. Овако добијени полупроводник назива се n-тип.

Са друге стране, ако се силицијумски атом замени атомом тровалентног бора, који има један електрон мање, резултат је једна шупљина вишак која се понаша као позитивна честица у валентној зони. Отуда се овај тип полупроводника означава као p-тип. Важно је схватити да у n-типу полупроводника број електрона (већински носиоци наелектрисања) надмашује број шупљина (мањински носиоци). Слично у p-типу полупроводника шупљине су већински а електрони мањински носиоци.

Ако се један узорак p-типа споји са узорком n-типа полупроводника добија се такозвани p-n спој. p-n спој има посебне карактеристике, које омогућавају да преко фотоелектричног ефекта се оствари фотонапонска ћелија. Слободни електрони из n-типа материјала, где је њихова канцентрација много већа, теже да прођу кроз спој у p-тип полупроводника где могу бити рекомбиновани са шупљинама (атомима којима недостаје електрон).

Слично томе, и шупљине из p-типа теже да пређу у n-тип полупроводника. На тај начин формира се слој позитивног наелектрисања близу споја на n-страни полупроводника и слој негативног наелектрисања на p-страни споја. Ова нагомилана наелектрисања стварају електрично поље које спречава даљу дифузију носилаца. Ствара се динамичка равнотежа која одржава електричну неутралност целокупне структуре.

Размотримо сада како овај p-n спој може бити искоришћен за формирање фотонапонске ћелије. Претпоставимо да су на крајевина n- и p-типа полупроводника формирани одговарајући електрични (неусмерачки) контакти и да је преко њих p-n спој повезан у одговарајуће електрично коло, као што је приказано на Слици 8.1.



Слика 8.1. Фотоелектронски ефекат и р-п спој.

Када се светлошћу (фотонима) осветли р-страна полупроводника, електрони се из валентне зоне побуђују у проводну зону близу споја. Услед сопствене кинетичке енергије и дејства електричног поља на споју, електрони се крећу, пролазе кроз спој и доспевају у n-типа полупроводника, остављајући шупљине у р-делу полупроводника. Електрони се затим крећу кроз електрично коло што је обезбеђено деловањем електричног поља, односно ствара се потенцијална разлика и у затвореном електричном колу и електрична струја која обезбеђује неки користан рад на оптерећењу (потрошачу) у колу.

Слично електронима постоји и ток шупљина у супротном смеру (физички то је такође кретање електрона). Одговарајуће физичко објашњење фотонапонског ефекта је нешто компликованије, али се у основи ради о фотоелектричном ефекту примењеном на р-п спој.

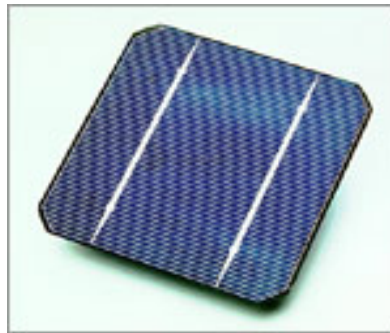
Према томе, фотоелектрични ефекат је физички процесу преко кога се у ФН ћелији, а посредством р-п споја, конвертује светлосна енергија у електрицитет.

### Фотонапонски елементи и системи

Мада је принцип рада исти за сваки фотонапонски систем, ефикасност и погодност сваког система јако зависи од начина на који је овај принцип примењен. Постоји тренутно више начина на који могу бити направљене фотонапонске ћелије, сваки са различитом ценом и ефикасношћу. Сваки ФН систем састоји се од различитих елемената. Поред ФН ћелија (модула, панела) које представљају основни елемент сваког система, могу бити присутне и друге помоћне компоненте (регулатори, батерије, инвертери, носеће структуре, итд).

#### Фотонапонске ћелије

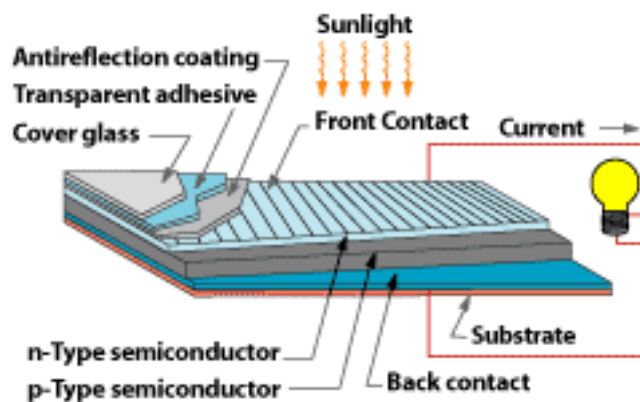
ФН или сунчева ћелија је основни део ФН система у коме се непосредно трансформише сунчева у електричну енергију (Слика 8.2).



Слика 8.2 Фотонапонска ћелија, основни градивни елемент било каквог ФН система.

Типична ФН ћелија састоји се из више различитих делова (Слика 8.3):

- Заштитног провидног слоја (плстична или стаклена прекривка
  - или други вид енкапсулације);
- Провидног адхезивног слоја;
- Антирефлексионог слоја;
- Мреже електричних контаката са предње стране ФН ћелије;
- Активног полупроводничког слоја (p-n спој);
- Електричног проводног слоја (електрични контакт са задње стране ФН ћелије);
- Подлоге (носећи слој).



Слика 8.3. Типична структура једне ФН ћелије.

**Антирефлексионни слој** има важну улогу обзиром да активни силицијумски слој се помаша као огледало које рефлектује преко 30% упадне побудне светлости. Да би се повећао коефицијент конверзије ФН ћелије, мора се смањити проценат рефлектоване светлости и тиме повећати удео апсорбоване светлости која ће генерисати слободне електроне у полупроводничком активном слоју.

Постоје два општа технике како се може редуковати рефлексија. Прва техника се састоји у наношењу танког слоја силицијум-моноксида (silicon monoxide, SiO) или силицијум-нитрида (silicon nitride, SiN). Један такав слој силицијум-моноксида смањује рефлексију на 10%, док два таква слоја је смањују на само 4%. Силицијум-нитридни анти-рефлексион слој повећава ефикасност ФН ћелије преко 15%.

Друга техника се састоји у обради горње површине активног слоја (повећање храпавости површине). Један такав поступак је хемијско нагризање, којим се добија текстурна површина (конуси и пирамиде) која прелама упадне зраке ка унутрашњости ћелије и тиме повећава удео апсорбоване светлости. Поред анти-рефлексионог слоја са предње стране ФН ћелије, значајног утицаја на укупну апсорбовану светлост у активном слоју може имати и проводни слој (задња електрода). То је обично алуминијумски слој који јако рефлектује светлост која није апсорбована у активном слоју тако да доприноси додатно повећању ефикасности ћелије.

**Електрични контакти** су од суштинске важности за ФН ћелије зато што они обезбеђују везу између активног полупроводничког слоја и спољашњег електриног кола (потрошача). Задњи контакт се релативно лако технолошки остварује, обично је то метални слој од алуминијума или молибдена. Међутим, контакт са предње стране представља много озбиљнији проблем. Ова електрода мора да покрива што већи део предње површине, како би се колектовало што више фотогенерисаних електрона, али се тиме битно и повећава рефлексија упадне светлости са овог металног слоја.

Овде имамо опречне захтеве који морају бити пажљиво анализирани и одговарајућим методама оптимизовани. Уобичајено је да се предња електрода реализује у облику мреже танких проводних трака. Ширина, дебљина и распоред ових проводних трака се мора оптимизовати, тако да се максимално могуће изврши колекција електрона и минимално спречи апсорпција светлости у активном слоју. На пример, дебљина ових трака је важан фактор, обзиром да од дебљине зависи њихова електрична проводност која мора бити што већа, а са друге стране пожељно је да оне буду што тање и тиме буду делимично транспарентне за упадну светлост. Израда ове "решеткасте електроде" (поступак вакумског напаравања преко фотолитографских маски) битно поскупљује цео процес производње ФН ћелија. Алтернативно се ова електрода може нанети поступком ситостампе, али он не обезбеђује максималну ефикасност ФН ћелија.

Постоји и алтернативна техника израде предње електроде преко наношења транспарентног проводног оксидног слоја од калај-оксида (tin oxide - SnO<sub>2</sub>). Предност оваквог слоја је што је практично потпуно транспарентан за упадну светлост, а добар је електрични контакт са активним слојем. Проводни оксидни слој се лако наноси у процесу производње, а при изради неких танкослојних ФН ћелија (the thin-film PV cells), као што су аморфне силицијумске и кадмијум-телуридне ФН ћелије, обично се наноси на сам провидни заштитни слој (стакло). Код ових ћелија провидни заштитни слој је уједно и подлога на коју је нанет и танки слој активног полупроводног материјала ("upside down" контрукција ћелије где нема задње подлоге, супстрата).

У разматрању да ли је за израду електроде са предње стране боље применити технику "решеткасте електроде" или технику транспарентног проводног оксидног слоја, мора се узети у обзир и слојна отпорност (the sheet resistance) полупроводника. Обзиром да је метал од ког је направљена "решеткаста електрода" бољи проводник од транспарентног проводног оксидног слоја, то могу укупни губици услед губитка светлости и услед електричне отпорности бити мањи од губитака у ФН ћелији са транспарентним проводним оксидним слојем.

**Фотонапонски активни слој** или ФН коло (the photovoltaic device), могу бити израђени од различитих типова полупроводничких материјала, нанетих или сложених у различите структуре, да би произведена ФН ћелија имала сто боље перформансе. Према томе у каквој форми је материјал од ког је израђено могу се разликовати три типа ФН кола:

- *Монолитна силицијумска*, где силицијум може имати различите форме (монокристални, микрокристални и аморфни силицијум);
- *Поликристални танки филм* (polycrystalline thin films), где се најчешће користе бакар-индијум-диселенид (copper indium diselenide - CIS), кадмијум-телурид (CdTe) и танки филм силицијума (thin-film silicon);
- *Монокристални танки филм* (single-crystalline thin film), где је важан галијум-арсенид (GaAs).

Структурни дизајн ФН кола зависи од ограничења материјала који се користи у изради ФН ћелија. Према томе како су ови материјали сложени да би се направило ФН коло, могу се разликовати четири структуре ФН кола;

- *Хомогени спој* (homojunction);
- *Хетероспој* (heterojunction);
- *p-i-n и n-i-p кола*;
- *вишеспојно коло* (multijunction devices).

Хомогени спој, се првенствено реализује од монокристалног силицијума. p-n спој је смештен тако да се максимим светлости апсорбује близу њега. Слободни електрони и шупљине генерисани светлошћу у дубини силицијума, крећу се ка p-n споју где се одвајају да би произвели електричну струју. Код хомогеног споја важно је неколико аспеката да би ФН ћелија имала већи коефицијент ефикасности:

- дубина p-n споја испод површине ФН ћелије;
- концентрација и распоред атома допаната са обе стране p-n споја;
- кристаличност и чистоћа силицијума.

Код неких ћелија са хомогеним спојем и позитивни и негативни електрични контакти су реализовани са задње стране. Ово елиминше проблеме формирања “решеткасте електроде”. Међутим, овако реализоване ФН ћелије имају мању ефикасност, обзиром да се највећи број носилаца наелектрисања генерише близу горње површине и морају да прођу кроз целокупан активни слој до одговарајуће електроде. Ово захтев савршен кристал силицијума са што мање дефеката како не би дошло до рекомбинације ових носилаца.

Хетероспој, се формира спајањем два различита полупроводничка материјала. Пример оваквог споја је структура CdS - CuInSe<sub>2</sub>. Ова структура се често користи да се произведу ћелије технологијом танких слојева, који боље апсорбују светлост од силицијума. Горњи и доњи слојеви код оваквих хетроспојних кола имају различиту улогу. Горњи слој, мора бити направљен од материјала са великим енергетским процепом да би био транспарентан за светлост. Доњи слој се прави од материјала са малим енергетским процепом да би сва упадна светлост била апсорбована. На овај начин носиоци се генеришу непосредно уз p-n спој што омогућује да се ефикасно раздвоје пре него што стигну да се рекомбинују. Хетроспојна кола имају и ту предност што, за разлику од хомогених спојева, не захтевају да се на истом материјалу мора да формира и p- и n-тип полупроводника.

Многи материјали могу да формирају само један тип полупроводника. Пошто хетроспојна кола немају то ограничење, различити материјали могу да се користе за производњу ефикасних ФН ћелија са оптималним карактеристикама. Такође, горњи слој од полупроводника са великим енергетским процепом битно смањује редну отпорност ћелије. Овај слој се може направити да буде јако електрично проводан и велике дебљине а да се не умањи његова оптичка прозрачност. Као резултат тога, електрони генерисани светлошћу могу се лако кретати латерално дуж овог слоја и доспевати на електричне контакте.

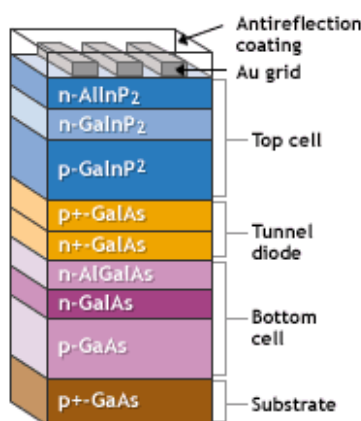
***p-i-n* и *n-i-p* кола.** Типично *p-i-n* структуре се користе код ћелија на бази аморфних танких слојева, док се код CdTe ћелија користе *n-i-p* структуре. Обично се формира сендвич од три слоја: средњи слој од недопираног (intrinsic) *i*-типа полупроводника смештеног између једног *n*-тип и једног *p*-тип слоја. Ова конфигурација обезбеђује формирање електричног поља између *p*- и *n*-тип области дуж средње недопиране високоомске *i*-тип области.

Светлост генерише електроне и шупљине у недопираној области, које се раздвајају електричним пољем. Код *p-i-n* аморфних силицијумских (*a-Si*) ћелија, горњи слој је *p*-тип *a-Si*, средњи слој је од недопираног силицијума а доњи слој је *n*-тип *a-Si*. Аморфни силицијум има високу концентрацију електронских дефеката, тако да постоји врло мала дифузиона електрична струја. Међутим, код *p-i-n* структуре струја електрони и шупљине се генеришу више услед дејства електричног поља.

Код CdTe ћелија, структура је слична као и кад *a-Si* ћелија, где је горњи сој од *p*-типа кадмијум-сулфида (CdS), средњи слој је недопирани кадмијум-телурид (CdTe) и доњи слој је од *n*-тип цинк-телурида (ZnTe).

***Вишеспојна кола*** (multijunction devices), представљају структуре са више *p-n* спојева (више ћелија) каскадно или тандем поређаних, које обезбеђују већу укупну конверзиону ефикасност тако што апсорбују шири део сунчевог спектра. Код типичне вишеспојне ћелије, *p-n* спојеви су направљени од материјала са различитим енергетским процепом и поређани један испод другог тако да је са горње стране *p-n* спој са највећим енергетским процепом. Фотони који нису апсорбовани у првом *p-n* споју, пролазе и доспевају до другог споја који апсорбије део фотона са нижом енергијом. Овај селективни апсорпциони процес се наставља све до крајњег *p-n* споја са најмањим енергетским процепом.

Вишеспојна ћелија може бити направљена на два различита начина. Један је начин да се механички (и електрично) споје две ћелије са различитим енергетским спојем. Други начин је производња монолитне вишеспојне структуре, тако што ће преко првог *p-n* споја директно бити формирана наредни спој итд. Данас се много ради на развоју овог типа ћелија, посебно на бази галијум-арсенида (GaAs). Овакве ћелије имају коефицијент ефикасности већи од 35%, што је јако велика вредност за ФН ћелије. На Сlici 8.4 дат је пример вишеспојне ћелије где је горњи спој направљен од галијум-индијум-фосфида (GaInP<sub>2</sub>), затим је формиран тзв. "тунелски спој" који омогућава добар ток електрона између спојева, на крају спој на бази галијум-арсенида.

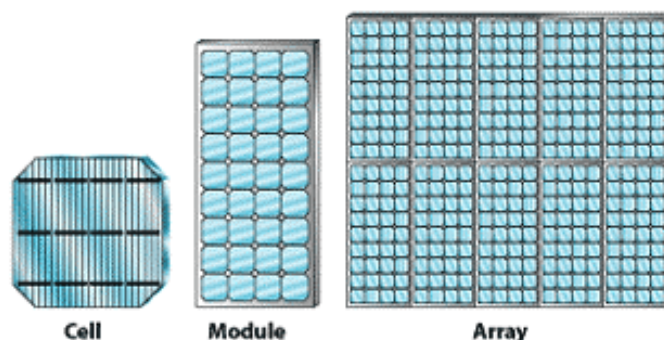


Слика 8.4. Монолитна вишеспојна ћелија на бази галијум-индијум-фосфида и галијум-арсенида.

Други материјали за вишеспојне ћелије који се проучавају су аморфни силицијум и бакар-индијум-диселенид ( $\text{CuInSe}_2$ ).

#### ФН модули и низови

Појединачна ФН ћелија је обично мала и она производи око 1-2W енергије. Да би добила већа излазна снага ФН ћелије се повезују у веће јединице које се зову модули. ФН модули могу бити неколико десетина сантиметара дугачки и широки и они могу бити спојени у још веће јединице, тј. у панеле (низови, плоче). ФН панели се даље међусобно повезују да би се обезбедило више електричне енергије и са другим компонентама граде ФН систем, који чини једну заокружену целину (Слика 8.5).



Слика 8.5 ФН систем се састоји од ФН ћелија спојених у модуле, који се даље повезују у ФН панеле (низове), што са другим неопходним компонентама чине ФН систем.

Величина ФН панела, односно његова површина, зависи од неколико фактора, као што је количина сунчеве светлости која је расположива на посматраној локацији, као и од потреба потрошача. ФН модули односно панела чине главни део ФН система, који може укључивати и уређаје за електрично повезивање, опрему за монтирање, опрему за аутоматско управљање и батерије које чувају електричну енергију за коришћење у периоду када Сунце не сија.

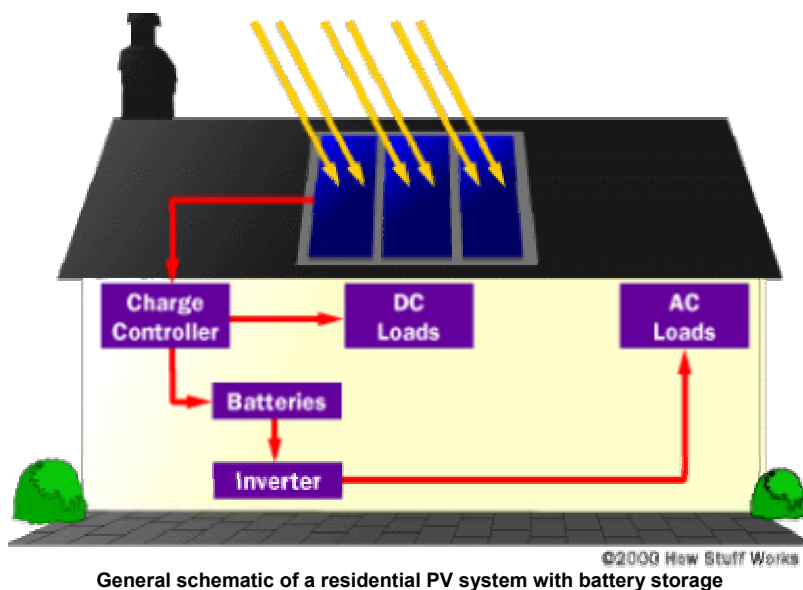
Једноставан ФН систем обезбеђује снагу за многе мале потрошаче, као што су дигитрони и ручни сатови. Компликованији системи снабдевају енергијом сателите, пумпе за воду, служе као урђаји за осветљење, снабдевају енергијом уређаје и машине у кућама и канцеларијама. ФН технологија сада снабдева енергијом саобраћајну сигнализацију на путевима и осветљење дуж аутопутева. У многим случајевима, ФН енергија је најјефтинији облик електричне енергије. Пример једног једноставног система је ФН модуларни систем фирме PHOTOWATT, чији се један модул састоји од 36 микрокристалних ћелија спојених електрично на ред. Овакав модул даје на излазу струју директно пропорционалну интензитету сунчевог зрачења и стандардних 12V.

#### ФН компоненте

Сами модули и ФН панели не представљају цео ФН систем. Потребни су и уређаји за усмерење ка сунцу, као и компоненте које, на пример, једносмерну струју произведену модулима, претварају у наизменичну струју. Осим тога, да би створену електричну енергију сачували за каснију употребу, потребне су и батерије. Сви ови елементи представљају компоненте *балансираног ФН система* (the "balance of system" (BOS) components). Комбиновањем модула са помоћним компонентама ствара се комплетан ФН систем. Овакав систем је обично довољан за задовољавање захтева за електричном енергијом за водене пумпе, за снабдевање електричном енергијом уређаја у кући, итд.

Ако је потребно да ФН систем ради и у току ноћи, енергија која је добијена у току дана може бити ускладиштена тако да се користи може да користи и ноћу. Да би се оваква функција остварила потребно је да систем буде опремљен *регулатором* (charge controller), који управља процесом складиштења енергије, као и *батеријама* (storage unit) које непосредно складиште енергију. Регулатор је веома важан за процес пуњења и пражњења батерија и спречавања преоптерећења, чиме штити њихов дуги радни век.

Наредни проблем је што електрична енергија која се добија из батерија једног ФН система је у облику једносмерне струје (DC), док су уређаји који се најешће користе (на пример у кући) предвиђени за рад са наизменичном струјом (AC). Отуда ФН систем често мора да има и конвертер (inverter, DC to AC converter), којим се једносмеран напон и струја трансформишу у наизменичан. На Слици 8.6 приказан је типичан ФН систем намењен за снабдевање електричном енергијом једне куће.



Слика 8.6. Компоненте једног ФН система.

### Материјали за ФН ћелије

Стандардне ФН ћелије су обично направљене од полупроводничког материјала, почев од силицијума у различитим формама (монокристални, микрокристални, аморфни) до различитих двојних или тројних једињења и легура (CdTe, GaAs, CuInSe<sub>2</sub>, итд). Да би неки материјал био искоришћен за израду ФН ћелија мора да задовољи неке опште критеријуме, као што су кристаличност, апсорпција сунчевог зрачења са чиме је у вези и ширина енергетског процепа, као и погодност добијања и једноставност производње у различитим формама (на пример, у облику танких слојева).

Кристаличност материјала показује степен уређености атома у кристалној структури. Код свих материјала према величини кристалних зрна могу се условно разликовати више форми: монокристални материјали, мултикристални, поликристални, микрокристални (нанокристални) и аморфни код којих је кристална структура битно нарушена.

Апсорпција је битан фактор примењљивости једног полупроводничког материјала, било да се од њега захтева велика апсорпција у широком спектралном опсегу сунчевог зрачења, преко захтева за селективном апсорпцијом (код вишеспојних ФН ћелија), до потпуне прозирности (код различитих хетроспојних ФН ћелија). Коефицијент апсорпције зависи од

два фактора: таласне дужине односно енергије зрачења које се апсорбује и врсте и форме полупроводничког материјала, односно његовог енергетског процепа.

Енергетски процеп,  $E_g$ , је карактеристика полупроводничких материјала која дефинише минимум потребне енергије да се један везани електрон у атому преведе у слободни електрон. Под слободним стањем подразумева се оно када се електрон може да креће унутар материјала и доприноси провођењу наелектрисања.

Материјали од којих се се данас израђују ФН ћелије могу бити у форми масивних (запреминских) комада, преко различитих танких кристала (који се могу производити сечењем од масивних узорака, ливењем или извлачењем у облику трака), до доношења танких слојева – филмова на одговарајућу подлогу (хемијска депозиција, напаривање у вакууму, катодно распршивање, итд).

#### *Танки кристални материјали*

**Кристални силицијум**, као основни и најшире примењивани материјал за израду ФН ћелија, може се производити на различите начине и добити у различитим формама (Табела 8.1):

(а) *монокристални силицијум* ( $c - Si$ ), где нема поремећаја у строгој уређености атома унутар кристалне решетке. Монокристални силицијум је током дугог периода времена био практично једини материјал за ФН ћелије. Све од средине 80-тих монокристални силицијум је био јако скуп (због производне технике) и обезбеђивао је само око 16% ефикасност ФН ћелија.

Међутим, истраживања у овој области обезбедила су драматично смањење цене и повећање ефикасности. Монокристални силицијум, добијен растом из растопа, сече се на танке плочице (дебљине веће од  $200\mu m$ ) на којима се различитим микроелектронским поступцима формирају р-п спојеви и електрични контакти, односно формирају се ФН ћелије. Лабораторијски узорци ових ћелија обезбеђују ефикасност од 24%, док комерцијално произведени модули дају ефикасност од око 15%.

Смањивањем контактне површине на ћелијама (контакти где електрони улазе или излазе из ћелије) и додавањем неких делова који омогућују боље хватање упадног снопа светлости, повећана је ефикасност ових комерцијалних модула на 25%. Последњих година, ради смањења трошкова производње монокристалног силицијума, чиме се битно смањује и укупна цена ФН ћелија, развијена је производња више различитих форми: *мултикристални силицијум*, *силицијумске кристалне траке*, *дендритни силицијум*, итд.

*Мултикристални силицијум* (multicrystalline silicon) - плочице сечене из силицијумских комада добијених ливењем. Овакав силицијум је знатно јефтинији за производњу и обезбеђује прављење лабораторијских ћелија са ефикасношћу од 18% и комерцијалних модула од 14%.

*Силицијумске кристалне траке* (Edge-defined film-fed growth ribbons - EFG Ribbons) – блиско монокристалне силицијумске траке добијене растом из растопа.

*Дендритни силицијум* (Dendritic web) – монокристални филм силицијума добијен из растопа.

(б) *поликристални силицијум* ( $c - Si$ ), где су физичке карактеристике одређене малим кристалима (кристалитима) унутар макроструктуре. ФН ћелије од поликристалног силицијума имају мању ефикасност, али су јефтиније због једноставнијег поступка добијања поликристалног материјала. Поред тога, поликристалне ћелије могу бити гушће паковане, што им даље побољшава примењљивост. Ове ћелије имају ефикасност већу од 17%;

(в) *микростристални силицијум* ( $m - Si$ ), је новоразвијена форма силицијума (the U.S. Department of Energy's National Renewable Energy Laboratory, USA), односно нова класа материјала – микростристалне силицијумске легуре (microcrystalline silicon alloys), које могу

имати значајну примену не само за ФН ћелије већ и за широку класу микроелектронских кола. До сада је направљено и карактерисано преко 50 различитих микрокристалних силицијумских филмова.

Табела 8.1 Различите форме кристалног силицијума (pvpower.com)

Тип силицијума	Ознака	Величина кристала	Метод добијања
Монокристални силицијум	s-Si	>1cm	Метода Czochralski, зонално пречишћавање
Поликристални силицијум	p-Si	1 $\mu$ m-1mm	Хемијска депозиција
Микрокристални силицијум	m-Si	<1 $\mu$ m	Плазма депозиција

**Галијум-арсенид** (Gallium Arsenide - GaAs), је III-V полупроводнички материјал који обезбеђује израду ФН ћелија високе ефикасности од 25%, а који се често користи код система са концентраторима (28%). Користи се и за израду вишеспорних ћелија (ћелије на бази GaAs и одговарајућих III-V легура) које имају ефикасност већу од 30%.

#### Танки слојеви (филмови)

Израда ФН ћелија на бази кристалних материјала, захева скуп процес извлачења и сечења кристала у танке плочице. Отуда идеја да се различитим поступцима директно наноси полупроводничко материјал на одговарајући подлогу (супстрат). На овај начин се штеди и на материјалу, процес се може аутоматизовати и производити ћелије (модули) на већим површинама, подлоге могу бити од различитих материјала (провидне, савитљиве, итд). Танки слојеви могу бити монокристални, али су најчешће поликристални или аморфни.

**Аморфни силицијум (a – Si)**, представља слабо уређену структуру, која по својим физичким карактеристикама је блиска структури стакла, тако да је побуђивање електрона из валаентне у проводну зону теже него код кристалног силицијума (због постојања раскинутих веза које се могу неутралисати додавањем водоника).

Аморфни силицијум има моге специфичне карактеристике. На пример, аморфни силицијум око 40 пута више апсорбује светлост у односу на кристални силицијум, што има посебан значај за примену код израде ФН ћелија. Ефикасност аморфних силицијумских ФН ћелија је већа од 12% и очекује се даље повећање њихове ефикасности. Међутим, производња ових ћелија је знатно јефтинија не само због јефтинијег поступка добијања аморфног силицијума, већ и зато што се овде могу употребити много јефтиније подлоге што даље појефтиније овај тип ћелија. Последњих година ФН модули на бази аморфног силицијума чинили су преко 15% укупне продукције ФН модула, (ефикасност комерцијалних модула је у осегу од 5-7%) и представљају погодна решење за интегрисане системе за зграде.

**Кадмијум-телурид** (Cadmium Telluride, CdTe) – материјал у облику поликристалног филма који се добија наношењем (електродепозиција, распршивањем, напаривањем) који обезбеђује јефтину производњу ФН ћелија. Лабораторијски узорци дају ефикасност од 16%, док комерцијални модули обезбеђују ефикасност од 7-8%.

**Бакар-индијум-диселенид** (Copper Indium Diselenide, CuInSe<sub>2</sub>, CIS) – поликристални филм који даје ФН ћелије са ефикасношћу од преко 17% и модуле са ефикасношћу од преко 10%.

### **Истраживања и развој у области ФН система**

Развој фотонапонских ћелија и система траје преко педесет година. Кратак историјски осврт са назнаком кључних момената би могао бити:

- 1950: развој прве ФН ћелије у Беловим лабораторијама (Bell Labs). Ћелије су биле са ефикасношћу мањом од 1%;
- 1958: први развојни програм подржан од владе САД. Примарни циљ је био развој ФН ћелија за свемирску примену;
- 1973: први светски "нафтни шок" који је довео до успостављања исраживачко-развојних програма за земаљску примену ФН система, као обновљивог извора енергије;
- 1980: градња првог кућног ФН система (residential photovoltaic систем - 'Carlisle House,');
- 1981: производња првих ФН ћелија технологијом танког филма са ефикасношћу од 10% (Boeing and Kodak);
- 1984: Цена ФН ћелија је пала испод 10\$/W, што даје могућност да се ова технологија разматра као прихватљива алтернатива другим изворима енергије;
- 1991: Пуштање првог ФН енергетског постројења инсталиране снаге од 6MW (Калифорнија, САД);
- 1992: Развој ФН ћелија на бази танког филма са ефикасношћу од 16%, које су по цени упоредљиве са ћелијама на бази монокристалног силицијума;
- 1992: Изградња првог дистрибуираног ФН система снаге 500kW (grid connected system), који обезбеђује мање износе енергије, али која се непосредно генерише код потрошача;
- 1993: Развој монокристалних ФН ћелија са ефикасношћу већом од 30%;
- 1995: Примена првих систем на бази ФН ћелија произведених технологијом танког филма (Amoco and Enron);
- 2001: Произведене ћелије са ефикасношћу од 19.2% на бази танког филма од бакар-индијум-диселенида (The National Renewable Energy Laboratory's National Center for Photovoltaics, USA);
- 2002: Развој троспојних ФН ћелија (triple-junction cell) са ефикасношћу од 35.2% (фирма Spectrolab);
- 2004: Развој нове органске ФН ћелије чија производна цена би могла бити између 10 и 20 % цене соларне ћелије произведене на конвекционални начин;

Истраживања и развој у области ФН материјала, компонената и система се могу разматрати у три области:

- основна истраживања;
- истраживања нових материјала
- истраживања ФН кола (структура)

Многе активности у основним истраживањима и истраживањима нових материјала и структура, теже да унапреде ФН модуле тако да смање трошкове њихове производње. Активности у технолошком развоју углавном се састоје од инжињеринга и поузданости система, као и од развоја пратећих компоненти (BOS components).

Универзитети, националне лабораторије и приватне компаније спроводе истраживања и развој у домену ФН јединица, компонената и система у оквиру три наведене области. Уговори са приватним компанијама су на бази поделе трошкова, са повећањем удела индустрије, како се остварује напредак у истраживањима. Индустрија и универзитети су подстицани за сарадњу са истраживачима националних лабораторија, за коришћење њихових мерења и података.

Основна истраживања укључују основне студије универзитетских центара, националних лабораторија и индустријских партнера. Рад је фокусиран на:

- електронске материјале и компоненте, тј. специјална проучавања њихових структура и дефеката у њима;
- истраживање нових и усавршавање постојећих процеса за производњу материјала и компонената (material and device processing science);
- развијање нове класе уређаја за обраду и карактеризацију са циљем интеграције процеса и дијагностике на флексибилан начин, као и обезбеђивање проучавања која је раније тешко или немогуће било вршити.

Основна истраживања у ФН укључују и области *мерења и карактеризације*. Ове активности које се спроведе кроз све типове пројеката и то од основног истраживања и развоја, до одређивања перформанси произведених модула, као и до процене сунчаних ресурса и њихове карактеризације.

### **Најновији напредак у истраживању ФН ћелија**

Важан део неког пројектног задатака у овој области истраживања захтева и процену садашњег стања и најновијег напретка. Нека од најважнијих достигнућа последњих година су:

#### **Вишеслојне ФН ћелије**

Напредна истраживања и развој компонената високих перформанси остварених коришћењем вишеслојних соларних ћелија (тандем или вишеслојних ФН ћелија). Такве структуре показују високу укупну ефикасност коришћењем широког дела сунчаног спектра, као и већу ефикасност у конвертовању индивидуалних фотона. Садашњи напори су усмерени ка избору и побољшању материјала и процеса који могу допринети максимизирању перформанси и снижењу трошкова производње.

#### **Органске ФН ћелије**

Сунчеве ћелије које користе органске материјале су засноване на процесу фотосинтезе у биљкама. У биљкама, апсорпција сунчане светлости у хлорофилу (зелени пигмент) доводи до фотохемијских процеса којим се конвертује  $\text{CO}_2$ , вода и минералне соли у органска једињења и кисоник. Органска ФН ћелија такође користи фото-осетљиве пигмент који је нанет на полупроводнички материјал. Када сунчева светлост обасја органску ФН ћелију, генерише се слободан електрон из молекула пигмента, који крећући се кроз полупроводнички материјал ствара електричну струју.

Органске ФН ћелије су у производњи јефтиније за 60% од традиционалних ћелија. Управо је најављена производња нове органске ФН ћелије за крајем 2004. Процењује се да ће крајње производне цене бити између 10 и 20% цене соларне ћелије произведене на конвенционални начин. (Dai-Ichi Kogyo Seiyaku и Mitsui, Јапан).

#### **Нове легуре**

Истраживачи (Lawrence Berkeley National Laboratory, USA) су најавили да њихово откриће једног система легура, на бази индијума, галијума и азота, може теоријски да обезбеди конверзију сунчаеве светлости, од блиске инфрацрвене до далеке ултраљубичасте области спектра, у електричну струју. Ако би соларне ћелије биле направљене од ове легуре, истраживачи сматрају да ће то бити револуционаран напредак, јер би се производиле релативно јефтине ФН ћелије са ефикасношћу већом него што је икада постигнута. Традиционе силицијумске солане ћелије претварају само мали део од око 25% слорног спектра у електрицитет и расипају остатак енергије на загревање саме ћелије, што умањује њену ефикасност. ФН ћелије изграђене од овог новог материјала, би конвертовале између 50-70% спектра у електрицитет.

### **Нано-ФН ћелије**

Хемичари (the University of California at Berkeley) су развили нову врсту нано-ФН ћелија са повећаном ефикасношћу. Нано-ФН ћелије су направљене уградњом танких штапичастих елемента у полу-проводни полимерни слој, који се налази између две електроде. Штапичасти елементи су дебљине око 200 нанометра, или око хиљаду пута су тањи од длаке. Ови нано-елементи се понашају као проводне жице, које апсорбујући светлост стварају електричну струју. Истраживачи предвиђају да ће, у наредне три године, бити произведена нано-ФН ћелија која ће стварати електричну енергију са истом ефикасношћу као и силицијумски засновани системи. Мада нанотехнологија обезбеђује јефтину производњу нано-ФН ћелија, њихова тренутна ефикасност је само око 10% од традиционалних ФН ћелија.

### **Термојонске ФН ћелије**

Фотоелектрични и термојонски ефекти су комбиновани у експерименту у коме је демонстрирано како сунчева светлост и топлота могу бити истовремено конвертоване у електричну енергију. Мада ефикасност конверзије и снага су мале у овом примеру (апроксим.  $10^{-3}$ ) експеримент показује како две форме сунчеве енергије могу бити симултано коришћене за производњу електрицитета. Овде се такође врши промоција термодинамичког приступа у вредновању сунчевих колектора (Smestad, G. P).

### **Стање развоја фотонапонских технологија**

Када се говори о ФН технологијама првенствено се мисли на различите процесе производње полупроводничког активног слоја у ФН ћелији. Ово је и разумљиво обзиром да овај слој представља најважнији део сваке ФН ћелије. Комплексност и цена производног процеса зависи од материјала и структуре саме ФН ћелије као и од броја и сложености технолошких поступака.

Рана истраживања и развој ФН елемената и технологија су почела 1950 и 1960-тих година и била су усмерена, пре свега, ка развоју ресурса за космичке примене. Међутим, током последњих 35 година (тј, од енергетске кризе средином 1970-тих) истраживања и развој ФН елемената и технологија је било усмерен и према широј земаљској примени. У овом периоду, земаљске примене су постале важне, значајно се развија тржиште за ФН системе, тако да и цене енергије произведене овим системима знатно опадају. Напредак се огледа и кроз коришћење нових материјала, побољшање процеса производње, ефикаснију конверзију сунчане светлости и обезбеђење дугорочне поузданости.

Према врсти и форми материјала од ког су начињене ФН ћелије могу се и разматрати ФН технологије:

- Технологија кристалног силицијума
- Технологија танких слојева.

**Технологије кристалног силицијума** за производњу ФН ћелија заснивају се на јако развијеним микроелектронским технологијама. Ове технологије намењене су за масовну производњу електронских кола. ФН ћелије на бази кристалног силицијума производе се од масивних комада силицијума, а производња подразумева низ технолошких поступака: извлачење савршеног кристала што већих димензија (ingot technique, sheet-growth techniques), сечење на танке плочице (wafers), обликовање и полирање. Следи низ различитих микроелектронских технолошких поступака (фотолитографија, вакумска депозиција, дифузија допаната, нагризање, итд) да би се формирали p-n спојеви и одговарајуће електроде. Затим следе поступци наношења осталих слојева (антирефлексионни слој, заштитни слојеви) као и низ других поступака да би се формирала једна ФН ћелија.

Постоји бећи број различитих технолошких поступака добијања силицијума, односно производње силицијумских ћелија и модула. Табела 8.2 приказује ефикасност конверзије ћелије и модула (процент сунчане светлости конвертовене у електрицитет под стандардним условима) за технологије кристалног силицијума.

Табела 8.2 Фактор конверзије (%) ФН елемената на бази силицијума

Материјал	Ћелија	Модул
Зонално пречишћавање (Float-zone)	24-25	21-23
Извлачење (Czochralski)	22-24	15-18
Ливење (Cast Polysilicon)	18-20	14-15
Кристалне траке (EFG Ribbon, String Ribbon)	14-15	11-13
Дендритни силицијум (Dendritic Web)	15-17	14
Танки кристал (Thick Silicon Substrate)	16-17	10

Мада постоје специфичности за побољшања у свакој подтехнологији кристалног силицијума, генералне области истраживања за кристални силицијум укључују:

- а) побољшања приноса производног процеса (смањење шкарта),
- б) смањење нечистоћа и дефеката и процеса пасивизације у кристалном силицијуму,
- в) развој процеса ниске цене и високе ефикасности,
- г) развој процеса мање штетних за животну средину и редуцију отпада,
- д) аутоматизација производње и паковања модула трајности и преко 30 година,
- ђ) развој производње ФН ћелија и модула на што тањем силицијуму,
- е) развој процеса рециклирања и
- ф) нови процеси за производњу силицијума са неуниформним карактеристикама (solar-grade silicon).

**Технологије танких слојева** (слојеви дебљина мањих од 100 микрометра) од различитих материјала, нанетих коришћењем различитих техника (хемијска депозиција, вакуумско напаривање, електродепозиција, итд). Садашњи приступ са танким слојевима генерално не даје високе факторе конверзије, као оне технологије са ФН ћелијама од кристалног силицијума. Али танак филм захтева 1/10 до 1/100 утрошка полупроводничког материјала од оног потребног за кристални силицијум и то за једнаке активне површине сакупљања сунчане светлости. Материјали који се примарно разматрају у технологијама танких слојева су: аморфни силицијум (a-Si), бакар-индијум-диселенид (CuInSe<sub>2</sub>) и кадмијум-теллурид (CdTe).

Табела 8.3 приказује ефикасност конверзије за ћелије и модуле на бази танких слојева. Као и код кристалног силицијума, код танког филма примарно су разматрани повећање производње, добитак и побољшана ефикасност конверзије, са посебном пажњом на редуковање разлике између лабораторијске ефикасности ћелије и ефикасности произведеног модула.

Табела 8.3. Фактори конверзије (%) за ФН елементе на бази танких слојева.

Материјал	Ћелија	Модул
Аморфни силицијум ( <i>a-Si</i> )	12-13	7-8
CdTe	15-16	8-9
CuInSe <sub>2</sub> (CIS)	18-19	10-12

Посебно се истраживања везана за аморфни силицијум усмерена су на следеће области:

- нове технике раст аморфних слојева ради смањења трошкова производње,
- разумевање процеса ради повећања стабилности материјала и његових перформанси.

Текуће истраживање кадмијум-теллурида (CdTe) усмерено је на:

- побољшање наношења филма,
- боље технике прављења контаката ради одвођења електричне снаге са ћелије,
- паковање модула дугорочне стабилности са ниским трошковима.

Текућа истраживања за бакар-индијум-диселенид (CuInSe<sub>2</sub>) су:

- стабилност процеса производње,
- нове технике наношења које пружају могућност рада на нижим температурама и без вакуума,
- побољшање разумевања физике на активним полупроводничким спојевима.

ФН технологије могу бити класификоване и према начину на који се сунчева светлост доводи на полупроводнички активни слој. Разликују се две основне области:

- Технологије равних-плоча (flat-plate technologies);
- Технологије концентратора (concentrator technologies).

**Технологије равних-плоча** Код технологија равних-плоча полупроводнички материјал се користи тако да покрије што је могуће већу површину носеће равне плоче, у циљу стварања тржишно прихватљивог односа утрошка и цене материјала и ефикасности конверзије светлости у електричну снагу.

**Технологије концентратора** ФН ћелије (модули) са концентраторима на својој површини имају још један слој, најчешће од јефтиног пластичног материјала, који представља систем сочива или рефлектора који сунчеву светлост преламају, рефлектују и фокусирају да би што већу количину светлости на мале уске области где се налазе ћелије. Сочива, са односом концентрације од 10x до 500x, су типично Френелова сочива са линеарним или тачкастим фокусом (Fresnel linear-focus or point-focus lenses). Рефлектори такође помажу повећању интензитета светлости који ће бити апсорбован у ћелији.

Код технологија концентратора се остварује додатна тржишна повољност, помоћу које се део скупог полупроводничког материјала у систему замењује са системом сочива или рефлектора који могу бити од јефтинијег материјала. Међутим, ово може представљати недостатак у целокупној ефикасности система и зато је потребно разматрати сваки систем као целину у вредновању његове корисности.

Генерално се могу разликовати две групе концентратора:

- ниске концентрације (обично 10 до 20X), које користе линијски или једно-димензиони фокус,
- високе концентрације (обично 100 до 1000X), које користе тачкасти или дводимензиони-фокус.

Табела 8.4 приказује конверзиону ефикасност ФН ћелија од различитих материјала који пружају могућност рада на нешто вишим температурама, често присутним у системима са концентраторима. Назначимо да су ефикасности исказане као посебне пропорције концентрације у односу на ефикасност (која је функција измерених услова, укључујући и интензитет светлости). Ефикасности модула су у опсегу од 15% до 17% за системе засноване на силицијуму, са прототиповима који имају факторе ефикасности веће од 20%. Модули који користе GaAs –ФН ћелије имају ефикасност веће од 24%.

Табела 7.4. Фактори конверзије (%) за ФН системе са концентраторима.

Материјал	Фактор концентрације	Ефикасност
Si	<400	27
GaAs	<1000	28
GaInP <sub>2</sub> /GaAs	1	30.3
GaInP <sub>2</sub> /GaAs	180	30.2
GaInP <sub>2</sub> /GaAs/Ge	50	32.3

За системе са концентраторима од суштинске важности да користе само директно зрачење, због чега је област њихове примене на местиома интензивног сунчаног зрачења. Генерално разматрање, за ФН системе са концентраторима, укључује и структуралне карактеристике система које им пружају ширу примену. Друго, области истраживања и развоја које су важне за концентраторе укључују, као и за ФН модуле типа равних-плоча, побољшања приноса у процесу производње, повећању конверзионог фактора и у редуковању крајње цене енергије.

Концентратори могу бити унапређени побољшањем материјала ћелије и структуре. Високе ефикасности се очекују од вишеслојних структура, такве као што су дво- или тро-слојне структуре, или од четворо-слојних структура које су у у развоју. У развоју су и нове технике концентрације које могу такође бити инкорпориране у ФН системе са концентраторима.

Стање развоја ФН технологија може се илустровати и преко укупне количине ФН ћелија/модула инсталираних током 1999. године у САД. Током те године, било је инсталирано око 200 MW. Овај број, који приказује могућност за генерисање снаге, заснован је на услову да приближно један KW енергије припада квадратном метру површине модула, плус неколико специфичних услова околине, такви као што је температура. Произвођачи тада специфицирају степен производње снаге заснован на излазним могућностима система под специфицираним условима.

Ако усвојимо да је 10 % средња вредност фактора конверзије за ове модуле, можемо проценити за целу површину области модула продуктиваних у 1999 да је мања од 1.5 квадратних километра. Апроксимативно 83% земаљских ФН ћелија/модула у 1999 је направљено на бази неке форме кристалног силицијума. Замало једна половина производа на бази танког филма је испоручена за коришћење у аутономним уређајима (сатови и калкулатори). ФН системи са концентраторима су у 1999 чинили мање од 1% укупно произведених ћелија/модула.

Развој технологије ФН система укључују следеће области:

**Моделирање система и анализа** - Активност моделирања и анализе система ригорозно оцењује перформансе, поузданост, трошкове инсталације и нивелисане енергетске трошкове (LEC - **levelized energy costs**) за широк спектар ФН система, као и њихових примена. Кључни циљ је описивање релативних утицаја различитих опција ФН модула и помоћних компонената (BOS components) на трошкове инсталирања (долар по пику снаге) целокупног система и нивелисаних трошкова енергије током целог животног века система. Такве активности обезбеђују повратни утицај у напорима за развој модула и BOS технологија, које побољшавају системске перформансе, поузданост, цене и нивелисаних трошкова енергије.

Ови резултати помажу у разумевању оптималних конфигурација система за различите примене ФН система у различитим климатским условима. Кључни елементи или *улази* у модел система су перформансе неке компоненте и њена поузданост, трошкови инсталирања компоненте и други трошкови финансијске природе. Моделирање система и анализа укључују и следеће циљеве:

- изналажење потребног степена унапређења утицаја ФН технологија на тржишту кроз техничка истраживања, маркетиншку анализу;
- вредновање поузданости система и пратећа анализа трошкова;
- разумевање везе између свих ових активности и њихове улоге у целокупном системском приступу;
- процена постојећи ресурса, такви као што су постојећи компјутерски модели, као и развој нових за олакшавање ових анализа.

**Систем инжињеринг** - Активност систем инжињеринга укључује четири кључне теме:

- тестирање и оцењивање свих нивоа система;
- развојне активности у мерењу и карактеризацији перформанси система и развоју одговарајућих стандарда;
- развоју помоћних компоненти и пратеће индустрије;
- развоју домаћег и интернационалног тржишта за подршку овој индустрији.

Неколико студија су указала на неке кључне факторе у целокупној цени ФН система и пратећих компонената у зависности од инсталационих трошкова, операционих перформанси и трошкова функционисања и одржавања. Ова истраживања укључују следеће циљеве:

- Боље разумевање трошкова помоћних компонената и њиховог ефекта на цену укупног ФН система у различитим секторима тржишта;
- Указивање на техничке баријере, коришћење системског приступа за редуковање трошкова инсталирања помоћних компоненти и повећање поузданости да би се редуковали трошкови функционисања и одржавања, као и укупни нивелисани трошкова енергије;
- Развој нових технологија, побољшање поузданости;
- Побољшање ефикасности система и редуковањем трошкова његовог животног циклуса са побољшање коришћења уређаја за смештај енергије, и развојем одређених електронских компоненти које нису «компоненте снаге».

### **Најновија побољшања у процесу производње**

Сва значајнија истраживања и развој у унапређењу ФН система су потицала од везе влада / индустрија. На пример, нека последња истраживања и развој у унапређењу процеса производње ФН система у САД су проистекла из њиховог програма познатог као *Пројекат ФН производних технологија (Photovoltaic Manufacturing Technology Project)*. Овај пројекат је вођен од стране Министарства за енергетику и његове федералне лабораторије, Националне лабораторије за обновљиве изворе енергије, која је формирана 1991. године од стране Конгреса САД. Трошкове овог пројекта је покривало Министарства за енергетику и низ индивидуалних учесника у овим активностима.

Постоји велики број програма истраживања и развоја у производњи ФН система који су усмерени ка побољшању и рационализацији процеса. Циљеви су редуковање трошкова, обезбеђење технолошких основа која подржавају значајно повећање производње и позиционирање ове индустрије у оквиру опшег развоја. Појединачни произвођачи, изграђују свој сопствени приступ, вршећи истраживања и развој.

Пројекти су фокусирани на побољшања у следећем:

- у истраживању процеса производње модула са повећаном поузданошћу;
- у паковању система и системских компонената, системској интеграцији;
- у флексибилној производњи;
- у развоју помоћних компоненти система, укључујући и контролу квалитета.

Неки општи трендови у усавршавању производних процеса могу се описати у следећем:

- побољшање рада ФН ћелија и постизање ефикасности од 15%;
- побољшање процеса интеграције и имплементацији статистичке контроле процеса и система података. Побољшања су усмерена на редуковање губитака у области електричних и механичких перформанси, као и на редуковању хемијског отпада;
- рад на даљем усавршавању технологије ласерског сечења у циљу повећању брзина сечења подлога са потенцијалом смањења трошкова радне снаге сечења за 75% и капиталних трошкова за фактор 2;
- даљи развој технологије силицијумских кристалних трака (Edge-defined film-fed growth ribbons - EFG Ribbons). Изграђени су и тестирани уређаји за производњу блиско монокристалних силицијумских трака добијених растом у цилиндрима из растопа са полупречником од 50cm, који омогућују успешну производњу трака до 1.2m дугачких и испод 100 $\mu$ m танких;
- усавршавање флексибилних система производње за ФН ћелије на бази танких слојева (Silicon-Film<sup>TM</sup> solar cells). Током прошлих година развијен је процес континуалне производње ФН панела са површинама од 900cm<sup>2</sup> (10.8 W), са 12% ефикасности (Astro Power, Inc.);
- развој пилот процеса за производњу ФН елемената на бази силицијума са неуниформним карактеристикама (photovoltaic grade-silicon) из металуршки добијеног неуниформног силицијума (Astro Power, Inc.);
- производња ФН системе код којих су ФН модули (кристални или танак-филм) монтирани на плоче дебеле 3", обложене са сопственом цементном облогом (Styrofoam board). Производња је побољшана секвенцијалном интеграцијом полуаутоматских и аутоматских компонентних станица у постојећој производној линији кровних облога. Овим је смањена цена од \$5.80/W на \$4.80/W за инсталисане ФН системе од 250KW или веће. Додатно, повећани су производни капацитети са 5 на 20MW годишње (PowerLight Corporation);
- развој и интеграција новог оптимизованог процеса производње ФН елемената у производну линију за производњу ћелија са 17% ефикасности, дебљине 125 микрометара. Развијен велики капацитет за производњу соларних ћелија и јефтених модуле са 200мм пречником, 4.5W (Siemens Solar Industries);
- развој пилот процеса за раст кристала за квалитатне шипке из којих се секу 150 микрона дебеле силицијумске подлоге за израду 125-микронских ћелија (коэффициент ефикасности 16%) и развој пилот процеса за производњу 125-микронских ћелија са пољем на задњој површини (back surface field solar cells) (Siemens Solar Industries);
- раст шипке од силицијума од 200 mm у пречнику (Chzochralski silicon) и развој фабричког процеса за производњу ћелија од 200-мм у пречнику (Siemens Solar Industries);
- развој аутоматских флексибилних система за асемблирање ФН модула. Овај развој укључује: 1) интегрисани процесни систем за спајање ФН модула, који обухвата аутоматски систем за обраду ивица модула, њихово лепљење, 2) аутоматски систем за паковање и, 3) модул за тестирање, који обухвата високонапонско тестирање изолације и тестирање перформанси у сучевом симулатору (SPI - SUN SIMULATOR). Систем омогућује да се асемблирају модули изграђени било као кристал-силицијум соларне ћелије било као танак-филм-соларне ћелије (Spire Corporation);

Поред тога требало би посебно истаћи и најновија достигнућа у унапређењу производње:

- SunPower Inc, корпорација је произвела ФН ћелије са ефикасношћу од преко 20% на 300mm монокристалном силицијуму. Модули се испоручује са снагама од 3KW на површинама мањим од 17 квадратних метара. Коришћен је високо-квалитетни изворни силицијум, а повећана ефикасност је постигнута прављењем посебних контаката са задње стране, која максимизира радну област ћелије и чини лако аутоматизацију производње. извршила сертификацију нових челија на 20.4% ефикасности, која је значајна у стварању ефикаснијих решења по критеријуму цена/снага (\$/W) за ФН ћелије уграђене у модуле (CEO of Cypress Semiconductor Corporation).
- Sanyo Electric Co., Ltd. је произвео ФН модул који нуди пробој у ефикасности конверзије енергије кроз нову технологију производње ћелија. ФН модул има ефикасност конверзије челије од 18.5% и ефикасност конверзије модула од 16%. Хетероспојна ћелија је састављена од једног танког кристалног силицијума као подлоге обложеног са ултра танким аморфним силицијумским слојем (Heterojunction with Intrinsic Thin Layer). Расплажући са максималним излазном снагом 190W ово је најефикаснији, комерцијално расположив, ФН модул на тржишту данас.
- Evergreen Solar Company је технологијом силицијумских трака (String Ribbon Technology) произвела знатно јефтиније ФН ћелије. Ова технологија се разликује од конвенционале силицијумске производње где се ФН ћелије праве на чврстим плочицама добијеним сечењем силицијумских шипки, у томе да ова технологија производи равне савитљиве траке силицијума које су подељене у ћелије. Задржавајући све предности монокристалних силицијумских ФН ћелија произведених од много скупљих традиционалних чврстих шипки, а остварујући предност у бољем коришћењу материјала, ова технологија може дати два пута више ФН ћелија по јединици тежине силицијума од конвенционалних метода. Evergreen Solar Company је објавила да најновија њихова технологија омогућава симултани раст две силицијумских трака, уместо једне, из сваке пећи за раст кристала, што омогућава двоструко већи излаз из пећи за раст кристала. Побољшан је процеса производње силицијумских трака редукујући трошкове у материјалу, радној снази, капиталне трошкове додатних пећи и повећавајући аутоматизацију и ефикасност. Резултати тога су 200 % повећања дужине рада, 5% повећања ћелиске ефикасности (релативно) 20%, побољшања добитака у производни 60% и 20% (пројектовано) редукацијом трошкова за нове пећи (Evergreen Solar, Inc.);
- Electric Power Research Institute, истраживачки конзорцијум за енергетску индустрију, објавио је свој развој универзалне јединице за интерконекцију генератора (GridGateway), као што су ФН системи снаге, горивне ћелије, или микротурбине. Овај јединица за интерконекцију ће радити са системима снаге између 1 до 200KW и обезбедиће "заштитни зид" ("protective firewall") за корисничке електричне системе, омогућавајући двосмерни ток снаге у корист корисника и мреже. Уређај ће имати програмиране заштитне релејске функције са комуникационим линковима за надгледање и сетовање, као и интерфејс за тестирање система у фази одржавања, тако да ће компаније за дистрибуцију електричне енергије моћи периодично да тестирају интегритет функције интерконекције. Успешан развој овог уређаја може значајно да редукује трошак интерконекције за мале системе снаге.
- Nanosys Inc. развио је неке кључне технологије за производњу нано-ФН ћелија. Ради се о три основне технологије за
  - 1) дизајнирање и производњу неорганских полупроводничких наноструктура,
  - 2) флексибилно асемблирање наноструктура у кола високих перформанси,
  - 3) прецизан инжењеринг "квантних" перформанси.

Развој ових кључних нанотехнологија даје широке могућности за примену. Омогућена је синтеза три категорије неорганских полупроводничких наноструктура: нанотачака, наносапића и наножица. Поред тога, исти технолошки процеси омогућају и производњу много сложенијих облика, као што су конуси, тетраедри, итд. Користећи рачунарско моделовање, може се веома рационално да дизајнира наноструктура са жељеним сатавом, величином, обликом, кристалном структуром, нивоом допирања, површинским хемијским карактеристикама и онда успешно фабриковати.

Ово омогућује производњу нових класа функционалних неорганских полупроводничких наноматеријала. Овако произведени материјали су савршених карактеристика пошто свака честица има исте механичке, хемијске, оптичке и електричне карактеристике.

Ове нанотехнологије потенцијално дају могућност синтезе наноструктура од свих индустријски важних полупроводничких материјала, укључујући III-V, II-VI и IV групу полупроводника и њихових легура. Поред тога, могу се синтетисати и неки од оксида прелазних метала, што даје неке нове функционалне особине као што су фероелектричне, пиезоелектричне, термоелектричне, итд. Неки од ових наноматеријала дати су у Табели 8.5.

Табела 8.5 Неоргански наноструктурни материјали

IV-IV Group	III-V Group Binary	III-V Group Ternary	II-VI Group Binary	IV-VI Group Binary	Transition Metal Oxides
Si Ge Si <sub>1-x</sub> Ge <sub>x</sub>	GaN GaP GaAs InP InAs	Ga(As <sub>1-x</sub> P <sub>x</sub> ) In(As <sub>1-x</sub> P <sub>x</sub> ) (Ga <sub>1-x</sub> In <sub>x</sub> )P (Ga <sub>1-x</sub> In <sub>x</sub> )As (Ga <sub>1-x</sub> In <sub>x</sub> )(As <sub>1-x</sub> P <sub>x</sub> )	ZnS ZnSe CdS CdSe CdTe Cd(S <sub>1-x</sub> Se <sub>x</sub> )	PbSe PbTe HgSe HgTe	BaTiO <sub>3</sub> PbZrO <sub>3</sub> PbZr <sub>1-x</sub> Ti <sub>x</sub> O <sub>3</sub> Ba <sub>x</sub> Sr <sub>1-x</sub> TiO <sub>3</sub> SrTiO <sub>3</sub> LaMnO <sub>3</sub> CaMnO <sub>3</sub> La <sub>1-x</sub> Ca <sub>x</sub> MnO <sub>3</sub>

Some of the important compositions available for use in rationally designed inorganic semiconductor nanostructures

Могуће је дизајнирати и синтетисати многе различите типове нано-хетероструктура. Све ово је од битног значаја и за производњу не само нових типова ФН ћелија већ и знатно ефикаснијих и јефтинијих.

#### Капацитети за производњу ФН модула и трошкови производње

Индустрија фотонапонских система је веома динамична и показује значајну тенденцију раста последњих година, знатно веће од осталих извор обновљиве енергије. Анализа података из 1999 добијених од 12 учесника у индустрији, од који сваки има активну производну линију, показује да су се производни капацитети за ФН модуле повећали за фактор већи од 7 од 1992. године и то, мерено снагом произведених модула, од 13.6 на 99.3MW. При томе је цена за производњу ФН модула редукована за 36%, од 4.23 на 2.73\$/W. Цене ФН су обично дате у доларима по вату (\$/W), дефинисаном у зависности од снаге модула процењене под одређеним условима.

У 2003 ФН индустрија је направила око 740GWp ФН модула широм света и пословала за око 4 милијарде €. У последњих 5 година европска производња ФН модула је расла са просечном стопом од 30% по години, тако да је у 2003 години достигла 190GWp. Инсталирани ФН капацитети у Европи су дуплирани између 2001. и 2003. године, а 70% од укупно инсталираних је у Немачкој. Капацитети су дуплирани и у Аустрији и Шпанији.

Раст укупних капацитета као и стопе раст за поједине обновљиве изворе дата је у Табели 8.6.

Табела 8.6. Генерисање електричне енергије у земљама ОЕЦД у 1990 и 2001. години по изворима обновљиве енергије, (IEA,2003).

Извор енергије	1990	2001	Стопа раста / години
Ветар	3.8 TWh	34.00 TWh	21.9 %
Сунчева ФН	16 GWh	339 GWh	32 %
Сунчева термална	664 GWh	559 GWh	-
Геотермална	28.7 TWh	32.7 TWh	1.2 %
Чврсте биомасе	59.5 TWh	79.6 TWh	2.7 %
Гас из биомаса	5 TWh	13.61 TWh	-
Таласи	-	644 GWh	0.7 %

Из табеле се види да је у земљама ОЕЦД највећа стопа раста примене сунчевих ФН технологија. За ово су најзаслужније земље чланице Европске уније, које су у овом периоду оствариле стопу раста за ФН системе, захваљујући пре пре свега Немачкој, безмало 58% годишње стопе раста. Међутим, удео свих ових

### **Значај примена ФН технологија**

ФН технологија је значајна из много разлога. Као технологија сунчане енергије она има бројне предности за околину. Осим тога, користећи домаћи електро енергетски извор, она доприноси и националној енергетској сигурности. Као релативно млада и високо-технолошка индустрија, она омогућава стварање нових послова и ојачава економију. Како се трошкови њене производње и коришћења смањују, ова технологија постаје све више доступна и расположива.

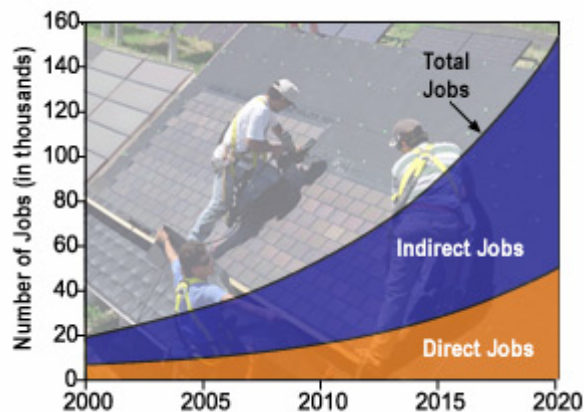
Мало је технологија за генерисање снаге које имају тако мале последице на околину као ФН. Обзиром да генерише електричну енергију из светлости Сунца, она не ствара загађење ваздуха или друге опасне отпатке. Она не захтева транспорт течних или гасовитих горива, као и њихово сагоревање. Како је заснована на сунчаној светлости, она је бесплатна и има је у обилној количини.

**Значај ФН технологије у економији.** Технологија добијања електричне енергије од Сунца је прилагодљива технологија и може бити коришћена за примену од врло малих до врло великих уређаја, од система повезаних у енергетску мрежу до система који су независни, за грејање воде, простора и за различита загревање у индустријским процесима, као и за електране.

Повећање националне електричне мреже, у конкурентном тржишту, ће се у многоме ослонити на дистрибуиране енергетске ресурсе. Модуларна природа ФН технологије омогућава стварање дистрибуираних система за производњу електричне енергије сагласно расту потреба за то, повећању поузданости снабдевања и смањењу трошкова дистрибуције и преноса електричне енергије.

Даље, у регионима у којима су ограничени капацитети преноса, као и повећана локална емисија штетних, системи засновани на ФН технологијама могу бити инсталирани без последица на околину. Обзиром да је сунчана светлост широко расположива, могу се изградити географски дистрибуирани ФН електрични системи, који су мање осетљиви на утицај међународне енергетске политике, нестабилна тржишта фосилних горива и незгоде у преносу. На пример, очекује се да у снабдевању електричном енергијом само у САД, дистрибуиране енергетске технологије, какве су и ФН технологије, повећају удео тржишта електричном енергијом, побољшавањем квалитета и поузданости снабдевања, што износи око 119 милиона \$ по години.

Значај ФН индустрије за економију може се посматрати и преко броја радника упослених директно или индиректно у овој области. На пример, на Слици 8.7. је дат тренд раста запослености у ФН индустрији за САД.



#### Direct and indirect jobs over a period of 20 years

Source: *Solar Electric Power: The U.S. Photovoltaic Industry Roadmap*. January 2003. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. Available [on-line](#).

Слика 8.7 Тренд раста упослености у ФН индустрији за САД.

У будућности, улога сунчане енергије у националној економији ће бити дефинисана економским факторима, као што су цена ове енергије према конвенционалним енергетским изворима. У израчунавању цене добијене енергије од ФН система, као и код конвенционалних енергетских извора, аналитичари користе прорачун “нивелисаних енергетских трошкова (LEC). У овом прорачуну, капитални трошкови, трошкови функционисања и одржавања, као и финансијски трошкови су узети у обзир.

Али енергија добијена ФН системима има друге вредности које се не могу уочити на конвенционалном енергетском тржишту и то:

- Релативну стабилност у односу на променљиво тржиште енергетских горива;
- Редуковање емисије штетних материја у атмосферу;
- Развој локалних економија.

#### Важност коришћења ФН технологија за околину

ФН електрични системи, имају врло мале последице на околину и представљају (као и сви системи конверзије енергије сунчевог зрачења и ветра) чисту технологију за генерисање снаге. Док раде, ФН системи не загађују ваздух, не производе опасан отпад или буку и не захтевају транспорт горива. Због ових предности, ФН системи могу играти значајну улогу у смањењу проблема загађења околине и утицаја на климатске промене.

**Импликације у производњи и експлоатацији** - Различите хемикалије се користе у производњи ФН ћелија. Неки ФН системи користе малу количину токсичних материја таквих као што су кадмијум и селен. Коришћење ових хемикалија чини да ФН фабрике генеришу одређену количину отровних отпадака, која је регулисана локалним и државним законима о заштити околине. У циљу очувања здравља, једноставне заштитне и административне мере ефикасно штите оне који раде на производњи ФН уређаја.

У контексту заштите околине, ФН производња ствара мале количине отпадних материја, а оне су минималне у односу на емисију од конвенционалних енергетских горива.

**Одстрањивање и рециклирање ФН панела** - Како су неке токсичне материје коришћене у стварању ФН панела, њихово одстрањивање након истека њиховог животног века, може имати потенцијалне последице на околину. Сада у САД само мала количина ФН панела се одстањује сваке године, тако да је то сада миноран проблем. Али индустрија већ тражи методе њиховог рециклирања у будућности.

Јасно је да ни једна форма производње енергије није у потпуности без утицаја на околину. Као сваки други производ за потрошњу, сировине за ФН системе морају бити допремљене у фабрике и комплетни производи морају бити транспортовани до потрошача. У многим случајевима компоненете морају бити пренесене између фабрика због склапања. Транспортирање ФН материјала, компонента и финалних производа захтева одређену количину енергије и продукује извесно загађење ваздуха, доприносећи проблемима у саобраћају и стварају буке.

#### **Референце коришћене у поглављу 8**

Smestad, Greg P. (2004), Conversion of heat and light simultaneously using a vacuum photodiode and the thermionic and photoelectric effects. *Solar Energy Materials & Solar Cells*; May 2004, Vol. 82 Issue 1/2, p227

The U.S. Department of Energy's National Renewable Energy Laboratory, USA)  
<http://www.pvpower.com/pvtechs.html>

C.E. Witt, T. Surek, R.L. Mitchell, M. Symko-Davies, and H.P. Thomas (2000), Terrestrial Photovoltaics Technologies - Recent Progress in Manufacturing R&D. *The ASME 2000 34th National Heat Transfer Conference Pittsburgh, Pennsylvania*

Dai-Ichi Kogyo Seiyaku и Mitsui, Japan

Photovoltaic Manufacturing Technology Project, USA

CEO of Cypress Semiconductor Corporation.

Astro Power, Inc

PowerLight Corporation

Siemens Solar Industries

SunPower Inc.

Sanyo Electric Co., Ltd.

Evergreen Solar Company

Electric Power Research Institute

Nanosys Inc. - <http://www.nanosysinc.com/technology.html>

*Solar Electric Power: The U.S. Photovoltaic Industry Roadmap*. January 2003. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory.