

Факултет инжењерских наука
Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Индустијски инжењеринг

Предмет: Електротехника са електроником

Број индекса: 189/2016

Стефан П. Димитријевић

Систем фотонапонских материјала интегрисаних у зграде

завршни рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Проф. др Јасна Радуловић-ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог дипломског рада кандидат треба да проучи препоручену, као и ширу литературу која се односи на технологије израде соларних ћелија односно њихову ефикасност, те да на бази стеченог знања, опише различите типове соларних ћелија које су данас у употреби. Такође, овај рад треба да истакне напредак претходних истраживања о системима фотонапонских материјала интегрисаних у зграде, као и да укаже на енергетске и еколошке предности ових система.

Препоручена литература

- [1] Bojic, M., D., Bigot, F., Miranville., A. Parvedy-Patou., J., Radulovic.: “Optimizing performances of photovoltaics in Reunion Island-tilt angle, Progress in Photovoltaics: Research and Applications, DOI: 10.1002/pip.1159, (2011) Online ISSN: 1099-159X.

- [2] Tyagi V., Nurul A., Rahim A., Jeyraj A., Selvaraj, L.: “Progrss in solar PV technology: Research and achievement”

- [3] Razykov, M., Ferekides, S., Morel, D., Stefanakos, E., Ullal, S., Upadhyaya M.: “Solar photovoltaic electricity: current status and future prospects”, Solar Energy.

Крагујевац, 30.05.2019. год.

Ментор:

Проф. др Јасна Радуловић

Резиме

Разматра се технички напредак у протеклих неколико година на пољу монокристалних и поликристалних *PV* технологија, технологија танког филма и нано *PV* технологија. Такође се описују различити типови соларних ћелија које су у употреби, као и процеси њихове производње.

У даљем раду се разматрају различити типови *BIPV* производа као и од којих се материјала могу производити, посматра се њихов економски раст, а поред тога и њихов бољи напредак у будућности.

Кључне речи:

PV технологија, танки филм, *BIPV* производи

Abstract

Technical progress made in the past several years in the area of mono-and polycrystalline, thin film *PV* technologies based, as well as *nano-PV* is being reviewed. Different types of solar cells and manufacturing processes are also being reviewed.

The following section discusses the different types of *BIPV* products as well as what materials can be manufactured from, their economic growth is observed, and their better progress in the future.

Key words:

PV technologies, thin film, *BIPV* products

Садржај

1. УВОД	1
2. НАЧИН ИЗРАДЕ И ТИПОВИ ФОТОНАПОНСКИХ ЋЕЛИЈА	3
2.1 Силицијум	4
2.2 Монокристални силицијум	4
2.3 Поликристални силицијум	5
2.4 Поликристални вафер Si соларне ћелије	6
2.5 pc-Si и c-Si соларне ћелије танког филма	6
2.6 Аморфни силицијум	7
3. ПОДЕЛА СОЛАРНИХ ЋЕЛИЈА	9
3.1 Монокристалне ћелије	9
3.2 Поликристалне ћелије	9
3.3 Соларне ћелије израђене технологијом танког филма	10
3.4 Галијум арсен	10
3.5 Органске и полимерне ћелије	11
3.6 Нове технологије PV ћелије	12
4. ЕФИКАСНОСТ СОЛАРНИХ ЋЕЛИЈА	13
5. ФОТОНАПОНСКИ МАТЕРИЈАЛИ ИНТЕГРИСАНИ У ЗГРАДЕ (BIPV)	18
5.1 Изградња интегрисаних стандарда	19
5.2 Производи од фолије	20
5.3 Производи од плочица (BIPV)	20
5.4 BIPV производи	21
5.5 Интегрисани фотонапонски модули за прозоре	22
5.6 Економски раст	23
5.7 Време повраћаја енергије	24
6. БУДУЋЕ МОГУЋНОСТИ ИСТРАЖИВАЊА	26
6.1 Нова решења	29
6.2 Визије за будућност	31
7. ЗАКЉУЧАК	33
8. ЛИТЕРАТУРА	34

1. Увод

У последњих неколико деценија, а посебно данас, обновљиви извори енергије имају све већу улогу у светској производњи енергије. Природа нас свакодневно “снабдева”, и то потпуно бесплатно, великим количинама сунца и ветра. Са друге стране, на нашој планети је све мање нафте, угља и осталих експлоатационих добара, чија је цена упоредно са том чињеницом све већа и већа. Уз то, последњих година човеку је све јасније како је превеликим икоришћавањем фосилних горива значајно и највероватније непоправљиво оштетио животну средину, не само себе, већ и све врсте на Земљи. Намеће се закључак да коришћењем сунца и ветра штедим материјална средства за постизање истог циља који би смо постигли употребом традиционалних средстава уз много веће трошкове. Како би се та препрека што пре премостила интензивно се истражују нове технологије, начини управљања и други елементи који би допринели мањој цени произведене енергије. У овом раду тежи се истраживању нових технологија и начина управљања везаних за енергију сунца [1].

Године 1839 *Edmond Becquerel* (1820-1891) открива фотонапонски ефекат. Он је то описао као производњу електричне струје када се две плоче платине или злата уроне у кисели, неутрални или алкални раствор те изложе на одговарајући начин сунчевом зрачењу. Било му је 19 година када је то учинио у лабораторији свог оца *Antoine-Cesara*, угледног научника који је радио на подручју електрохемије, физиологије, метеорологије и пољопривреде. *Edmond Becquerel* је 1868. године објавио важан рад под насловом “Светлост, њено порекло и њени ефекти”. Његово откриће у то време није пробудило превелики интерес, али није било заборављено све до данашњих дана, када је на 150 годишњицу Европска унија установила награду која носи његово име и додељује се једном годишње за најистакнутији допринос развоју фотонапонске конверзије сунчеве енергије. *Edmondov* син *Henry*, нуклеарни физичар, први је француски нобеловац и њему у част названа је SI-изведена јединица активности радиоактивне материје *Becquerel (Bq)*. Након *Becquerelovog* открића прошло је више од 40 година да би тек 1883. године *Charles Fritts* начинио прву праву соларну ћелију депонирајући на полупроводнички селен танки слој злата. Тако је остварио потенцијалну баријеру на контакту метал-полупроводник [1].

Некада се соларна фотонапонска технологија користила углавном у свемирским програмима или на удаљеним локацијама које нису повезане на дистрибутивну електричну мрежу. Од 1990. године PV индустрија показује константни годишњи раст са преко 20% а од 1997. године са преко 33%. У 2000. Години укупни инсталирани светски капацитети премашују 1000 MW, а у развијеним земљама број домаћинстава који користе електричну енергију добијену фотонапонском конверзијом премашује цифру од милион корисника. Фотонапонска технологија је технологија са највећим годишњим растом, преко 40%, у поређењу са свим до сада развијеним технологијама. Расте број компанија и организација које узимају активно учешће у промоцији, развоју и производњи PV уређаја и система. Компаније које производе и дистрибуирају електричну енергију у сарадњи са произвођачима фотонапонске технике, градским

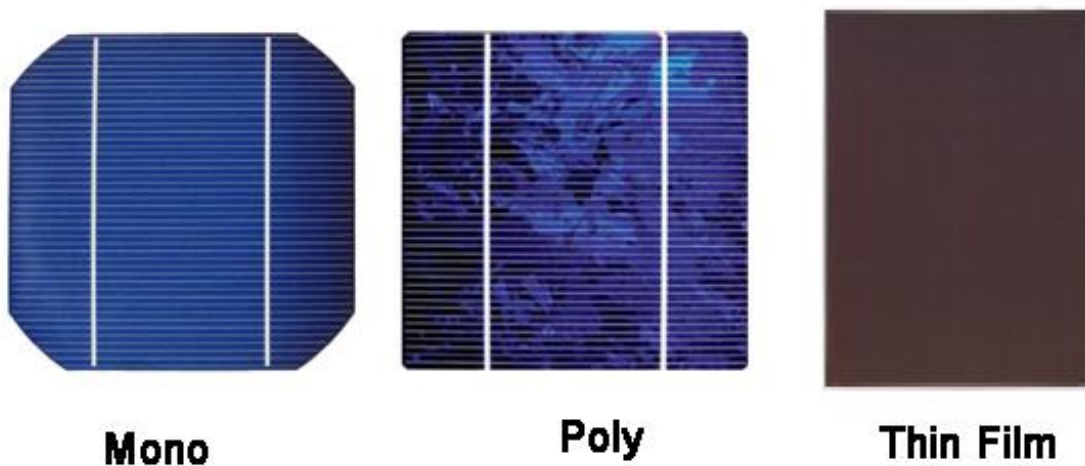
властима и фондацијама, планирају и реализују главне пројекте кроз стицање неопходног искуства, скретањем пажње јавног мњења и смањивањем цене електричне енергије. Најрепрезентативније компаније у области фотоволтаик индустрије су и водеће нафтне и технолошке компаније као што су: *BP Amoco, Shell, Kyocera, Mitshubishi, Sanyo и Sharp*. Развој соларне фотонапонске технологије последњих година је убрзан захваљујући технолошким иновацијама, смањењу трошкова материјала и субвенцијама за производњу електричне енергије из обновљивих извора од стране влада разних држава. Ефикасност соларних ћелија је један од важних параметара који има за циљ да одржи ову технологију на тржишту. Тренутно, обиман истраживачки рад се спроводи са циљем побољшања карактеристика соларних ћелија за комерцијалну употребу [1].

Ефикасност монокристалних силицијумских соларних ћелија показује значајан напредак из године у годину. Ефикасност је са 15% у 1950. години повећана на 17% у 1970. години и до данас континуирано повећавала вредност до 28%. У овом раду ће примарно бити разматран напредак фотонапонске технологије у области технологија производње, а разматраће се тренутни статус и карактеристике водећих типова соларних ћелија као што су *c-Si, pc-Si, a-Si*, материјали за соларне ћелије, ефикасност, фактори који утичу на карактеристике фотонапонских модула, анализа повраћаја уложене енергије за израду соларних панела, анализа трошкова [6].

2. Начин израде и типови фотонапонских ћелија

Фотонапонске ћелије могу бити израђене од различитих типова полупроводничких материјала, који могу бити сложени у различите структуре са циљем постизања што боље ефикасности конверзије. Технологије производње фотонапонских ћелија и модула могу се, на основу типа силицијумског материјала, класификовати као монокристалне, поликристалне и аморфне. На *Слици 1* су приказани типови соларних панела [4].

- **Силицијум (Si)** – укључујући монокристални силицијум (*c-Si*), поликристални силицијум (*p-Si*) и аморфни силицијум (*a-Si*).
- **Поликристални танкослојни материјали** – (поликристални танки филм) – укључујући CIS спој полупроводничких материјала (*Bakar-Indijum-Diselenid*), *CdTe* (*Kadmijum-Telurid*) и танкослојни силицијум (већином аморфни силицијум).
- **Монокристални танкослојни материјали** – (монокристални танки филм) већином изведени од галијум-арсенида (*Ga-As*).
- **Multijunction (вишеслојна) структура материјала** – комбинације разних полупроводничких материјала [4].



Слика 1. Типови соларних панела [1]

2.1 Силицијум

Силицијум (Si) је после кисеоника најзаступљенији елемент у земљиној кори (27.6%). Највише га има у виду оксида SiO₂ који се јавља као кварц, аметист, калцедон, ахат, опал итд. Природни силицијум се састоји од три стабилна изотопа ²⁸Si (92.28%), ²⁹Si (4.67%) и ³⁰Si (3.05%). Силицијум припада IV-ој групи периодног система елемената и има електронску конфигурацију 3s²3p². Силицијум се лако добија и прерађује, није токсичан и не гради једињења која су штетна по околину. Са кисеоником силицијум гради SiO и SiO₂, који спадају у диелектричне материјале. У погледу структуре силицијум може бити аморфан, поликристалан и монокристалан. У савременој електронској индустрији силицијум представља главни полупроводнички елемент. Електронске компоненте од силицијума су стабилне на температурама до 200°C [4].

2.2 Монокристални силицијум

Сунчеве ћелије израђене од монокристалног силицијума имају тзв. једнослојну структуру, што значи да се састоје од истог материјала који је модификован, тако да је на једној страни ћелије *p*-слој, а на другој *n*-слој Si полупроводника. Унутар ћелије, *p-n* спој лоциран је тако да се максимум сунчевог зрачења апсорбује близу споја. Површина таквих ћелија зависи од пресека монокристала од којег се производе, износи 5-10 cm, дебљина им је 200-300 mm. Напон таквих ћелија је од 0.55 до 0.70 V. Теоријска ефикасност им је око 22%, док је стварна ефикасност око 15%. Једина мана ћелија израђених од монокристалног силицијума је висока производна цена, због компликованог процеса производње. Потом се на површински део растопљеног силицијума који се налази у цилиндричном калупу додаје зрнце монокристалног силицијума. Док се зрно полагамо уздиже из калупа, атоми растопљеног силицијума згушњавају се у структури додатног зрнца, односно монокристалну структуру [5].

Float-zone процес производи чистију кристалну структуру него *Czochralski* процес будући да не садржи посуду за топљење. У *Float-zone* процесу полуга сачињена од силицијума високе чистоће поставља се изнад монокристалног зрна те се пропушта кроз електромагнетну завојницу. Магнетно поље завојнице индукује електрично поље унутар полуге, последица чега је загревање и топљење поовршинског споја између полуге и зрна. Пошто се завојница полагамо уздиже унутар споја полуге и зрна формира се монокристални силицијум у облику калупа или подлоге, које је потребно разрезати у танке плочице при чему се 20% скупог материјала губи (пиљевина). Као алтернатива наведеним технологијама појавила се *Ribbon growth* технологија [4].

Ribbon growth процес започиње са два монокристална Si зрнца који расту те заузимају површину танког оквира док се полагамо извлаче из посуде са течним

силицијумом. Када је оквир извучен из поосуде из њега се вади готова танка плочица. Оваква технологија нема великих губитака материјала, али зато квалитет монокристалног силицијума није на висини *Cz* или *FZ* процеса. Да би произвели монокристалним фотонапонску ћелију, танке плочице добијене било којим од наведених процеса се прво допирају како би добили *p*-тип, односно *n*-тип полупроводника. Потом се пресвлаче антирефлексијским средством те им се додају електрични контакти [4].

2.3 Поликристални силицијум

Поликристални силицијум се добија од кварцног песка SiO_2 , редукцијом угљеника на високој температури (1500-1750°C), чиме се добија *Si* чистоте 99% [4].



За добијање једног килограма индустријског силицијума потребна су три килограма SiO_2 и 14 kWh електричне енергије.. Користи се у индустријске сврхе. Како је чистота индустријског *Si* недовољна за примену електроници, *Si* се додатно хемијски пречишћава, чиме се постиже чистота од једног примесног атома на милијарду атома *Si* (односно 9N), то пречишћавање се врши *Сиенсовим* поступком на 300°C [4].



Полупроводнички силицијум високе чистоте у виду гранула или штапова (*игнота*) пречника 20-200 mm и дужине 0.5-1 m, добија се вишеструком фракционом дестилацијом и термичким разлагањем Si HCl_3 на 1200°C *Слика 2.2* [4].

Супротно монокристалном силицијуму, поликристални силицијум је сачињен од више малих кристала, због чега долази до појаве граница. Границе спречавају ток електронима те их подстичу на рекомбинирање са шупљинама што резултира смањењем излазне снаге таквих ћелија. Поликристални силицијум могуће је произвести на више начина, најшире методе састоје се од изливања течног силицијума у калуп, који се оставља да се згусне у четвртасти облик попут цигле. Крајња количина кристала и нечистоћа унутар четвртастог облика зависи од брзине хлађења. Исецањем четвртастог облика (цигле) добију се танке плочице. Поступак добијања поликристалне *Si* сунчеве ћелије идентичан је поступку код *c-Si* ћелија. Једина разлика је у облику *p-Si* ћелија, које су четвртасте (због калупа) стога се могу боље сложити у (*PV*) модуле.

Процес производње ћелија од поликристалног силицијума је знатно јефтинији од процеса производње монокристалних ћелија, али p -Si фотонапонске ћелије имају мању ефикасност од c -Si ћелија. Теоријска ефикасност им је око 18%, стварна ефикасност им је између 10 и 13% [4].

2.4 Поликристални вафер Si соларне ћелије

Поликристали вафери могу се произвести на великим површинама. Плазма процесирани јефтини pc -Si се користи у облику високопроводне површине како би се повећала апсорбција светла. Процес познат као процес гравуре реактивних јона (*reactive-ion etching*) омогућава око 40% релативног повећања апсорбције. Произведена је pc -Si ћелија са текстуром ефикасности 19.8%. Главна хидрогенизација и пасивизација нитрида површине ћелија дале су добре резултате. Упркос бројним предностима pc -Si, не постоји значајна разлика између цена c -Si и pc -Si соларних ћелија. Комерцијалне pc -Si ћелије имају ефикасност од 12-15% [5].

2.5 pc -Si и c -Si соларне ћелије танког филма

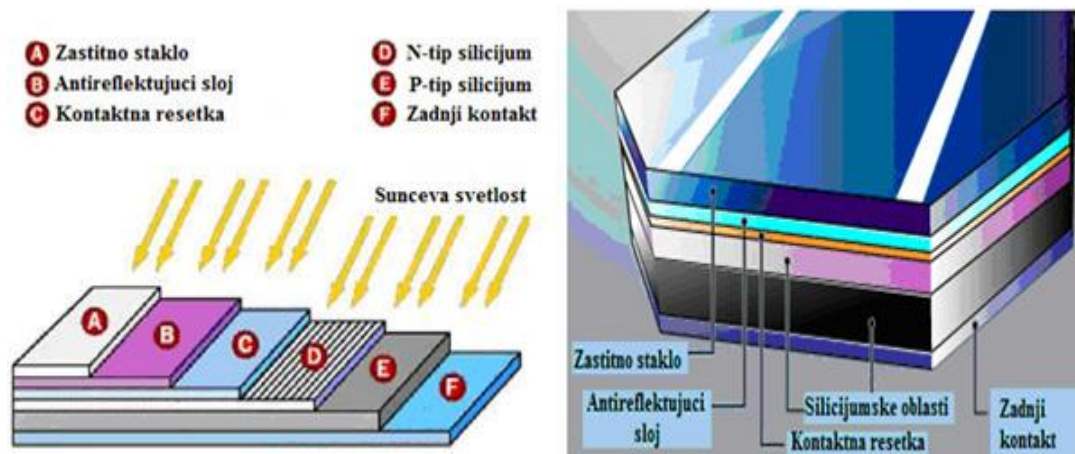
Соларна ћелија танког филма од Si има бројне предности у поређењу са кристалним ћелијама: дебљина Si може се драстично смањити на 50 μm , танки филм може се депоновати на јефтине супстрате (подлоге), танки филм се може произвести на супстратима величине модула и у интегрално повезаним структурама. Према неким прорачунима дебљина Si филма може се смањити на 1 μm . Иако су Si филмови развијени у микроелектроници пре много година, било је неопходно око 30 година да се произведе pc -Si ћелија танког филма са разумном ефикасношћу. Технологија која је развијена 2004. године укључује директну депозицију силицијума на стакло, кристализацију у чврсту фазу приступом који се назива “*cryslatine silicon on glass*” (CSG) и производњу мини модула ефикасности 8%. Најефикасније Si базиране ћелије дате су у Табели 2.1 [5].

Уређај	Ефикасност [%]	Референца
c-Si (вафер)	24.7	6
pc-Si (вафер)	19.8	6
c-Si (танки филм)	8.2	6
Pc-Si (танки филм)	13.7	6

Табела 2.1 Ефикасности соларних ћелија базираних на Si [5]

2.6 Аморфни силицијум

Прву соларну ћелију од аморфног силицијума формирао је 1974. године D.E. Carlsony RCA лабораторији у САД. Прва комерцијална *a-Si* соларна ћелија појавила се 1980. године и имала је ефикасност од 3%. Атоми унутар аморфних материјала нису сложени у никакву посебну структуру, односно не формирају кристалну структуру. Такође, аморфни материјали садрже велики број структурних дефеката те лошу повезаност атома, што значи да атоми немају суседа са којим би се могли повезати. Због наведеног разлога електрони ће рекомбинирати са шупљинама уместо да “уђу” у струјни круг. Будући да дефекти лимитирају ток електричне струје, овакве врсте материјала су иначе неприхватљиве у електронским направама. Дефекти се могу делимично уклонити ако се у аморфни силицијум угради мала количина водоника. Последица таквог третирања аморфног силицијума је комбиновање атома водоника са атомима аморфног силицијума који немају суседа (нису везани) тако да електрони могу несметано путовати кроз материјал. Још 1974. године истраживачи открили да је аморфни (*a-Si*) силицијум употребљив у *PV* технологији уколико се контролишу услови полагања материјала и пажљиво модификује његов састав. Данас се аморфни силицијум користи у направама које користе сунчеву енергију као извор напајања те имају мале енергетске захтеве (калкулатори, ручни сатови и сл.). Аморфни силицијум упија сунчево зрачење 40 пута ефикасније наспрам монокристалног силицијума, тако да слој дебљине 1 μm може упити око 90% енергије сунчевог зрачења, наравно када је обасјан. Управо то својство аморфног силицијума би могло да снизи цену (*PV*) технологије као саставни део објекта. На Слици 2.3 приказани су начини интегрисања *a-Si* ћелије израђене су тако да имају ултра танак (0.008 μm) горњи *p*-слој, дебљи (0.5 - 1 μm) недопирани *i*-слој те изразито танак (0.02 μm) доњи *n*-слој. Таква структура сунчеве ћелије назива се *p-i-n* структура. Будући да је горњи *p*-слој ултра танак те релативно транспарентан већина светлости проћи ће директно кроз њега на *i*-слој где ће генерисати слободне електроне, *p*-слој и *n*-слој произведени допирањем аморфног силицијума (*a-Si*) створиће електрично поље кроз целу интринстичну површину те ће индуковати кретање електрона кроз *i*-слој [4].



Слика 2.3 Структура аморфне *a*-Si ћелије [1]

Експериментална испитавања су показала да ефикасност *a*-Si соларних ћелија не зависи од подлоге, већ од услова и начина формирања *n-i-p* слојева. Комерцијалне *a*-Si соларне ћелије на стаклу, пластичној основи и челичном лиму имају ефикасност 5 – 7%. Лабораторијске *a*-Si соларне ћелије имају ефикасност мало изнад 10%.

	Монокристалне	Аморфне
Енергетски процеп	1.12 eV	1.6 – 1.8 eV
Фактор апсорпције	мали	велики
Фактор апсорпције	велики	мали
Покретљивост електрона	Око 1000V/1cm2s ⁻¹	Око 1V/1 cm2s ⁻¹
Дебљина слоја	Око 200 mm	Око 1mm
Напон празног хода	0.65 V	0.85V
Густина струје кратког споја	30 mAcm ⁻²	15 mAcm ⁻²
Филинг фактор	Око 0.75	Око 0.65
Ефикасност	0.10-0.18%	0.05 – 0.1%

Табела 2.2 Упоредне карактеристике соларних ћелија од монокристалног и аморфног Si[5]

Недостаци аморфног силицијума су ти што се мењају карактеристике ћелије током употребе и што резултира малом ефикасношћу аморфних ћелија. Примећено је да током првих месеци излагања сунчевој светлости снага опадне за 15% до 30% од вредности почетне снаге да би се касније ћелије стабилизовале. Највеће погоршање својстава ћелије је у првим сатима употребе. Струја кратког споја смањује се за око 5%, толико и напон празног хода, филдинг фактор се смањи на око 15%, ефикасност и снага од 15% до 30%, серијски отпор се смањи а паралелни повећа за око 50%. Усавршавањем производње ти недостаци су се смањили на 10-15% што се стабилизује већ након стотинак сати рада ћелија. Ваља напоменути да *a-Si* ћелије по подели спадају у тзв. *танкослојне* материјале. Теоријска ефикасност *a-Si* ћелија је око 11.5% док је стварна ефикасност око 7% (и мање). У Табели 2.2 су дате карактеристике соларних ћелија од монокристалног и аморфног силицијума [4].

3. Подела соларних ћелија

3.1 Монокристалне ћелије

Ова врста материјала има широку употребу у производњи соларних панела услед своје високе ефикасности у поређењу са поликристалним ћелијама. У процесу производње, полупроводнички силицијум високе чистоће се топи у реторти направљеној од кварца, затим му се додају супстанце (допанти) у малим количинама како би изменила његова својства. Ово утиче на електрична својства силицијума. Прецизно орјентисано „семе кристала” причвршћено на шипку се умаче у истопљени силицијум. Шипка се полако ротира и извлачи на горе. Прецизном контролом градијента температуре, брзине ротације и извлачења шипке могуће је извући један велики ингот из растопа. Овај процес се обично изводи у инертној атмосфери аргона. У односу на остале типове соларних ћелија, монокристалне соларне ћелије имају највиши степен искоришћења који износи преко 20% али због комерцијализације, произвођач гарантује вредност од 15 до 17% [5].

3.2 Поликристалне ћелије

Поликристалне ћелије су погодне за смањење трошкова *PV* модула, међутим ефикасност је нижа у односу на монокристалне ћелије и друге материјале. Поликристал се производи топљењем силицијума па очвршћавањем при коме се фиксно усмеравају кристали силицијума и добија се облик ингота које се касније секу на танке вафере. Поликристалне ћелије имају мана у погледу контаминације металом и кристалне структуре у односу на монокристалне ћелије. Степен искоришћења поликристалних ћелија је од 11 до 15% [5].

3.3 Соларне ћелије израђене технологијом танког филма

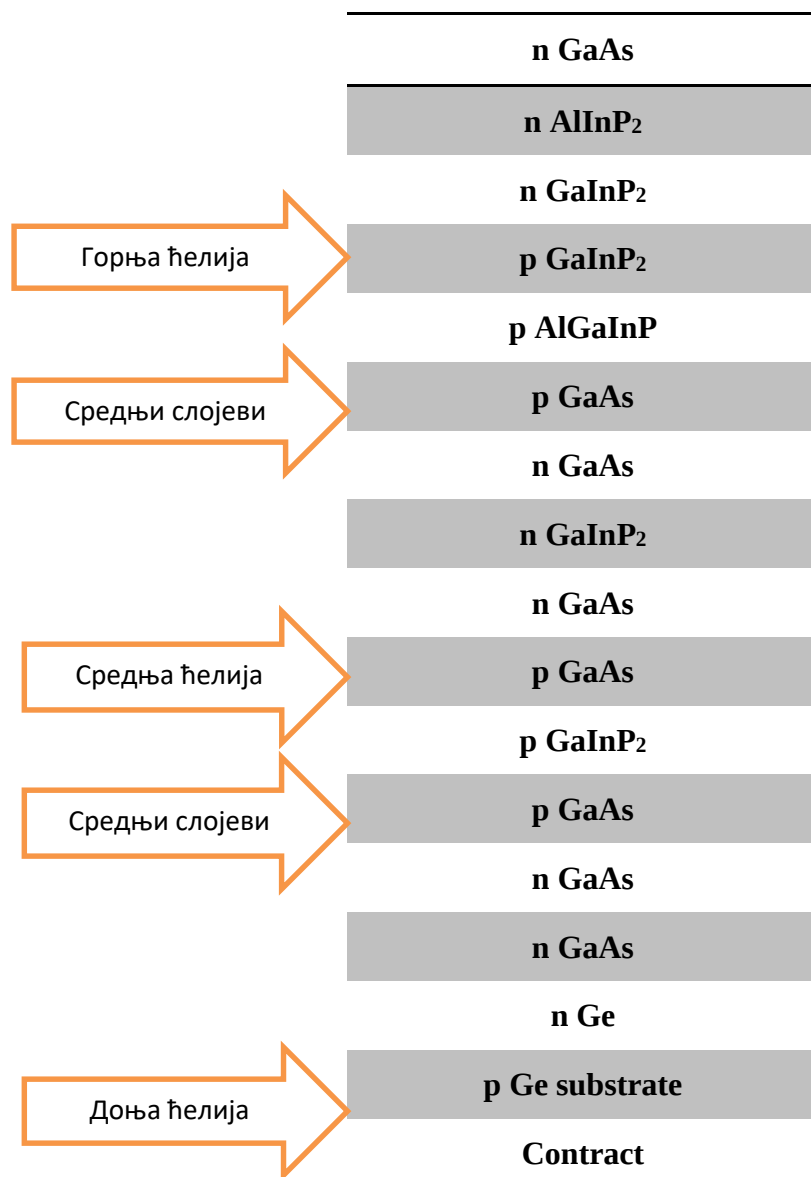
У поређењу ћелија базираних на кристалном силицијуму, технологија танког филма је јефтинија услед мање количине коришћених материјала и производних процеса. Коришћење мање количине материјала резултује мањом масом и дебљином ћелије која износи 25 – 260 nm. Соларне ћелије израђене у технологији танког филма имају степен искоришћења 5 – 12%. На *Слици 3* је приказан један тип технологије танког филма.



Слика 3. Фотонапонска соларна ћелија направљена технологијом танког филма[1]

3.4 Галијум арсен

Галијум арсен ($GaAs$) је полупроводничко једињење формирано од галијума (Ga) и арсена (As), и има сличну структуру као силицијум. Ефикасност $GaAs$ соларне ћелије се може повећати легирањем одређених елемената као што су Al , In , Pb и Sb . У поређењу са ћелијама базираним на силицијуму, $GaAs$ има виши степен искоришћења и мању дебљину слоја. Услед своје отпорности на високе температуре $GaAs$ има примену код концентраторских PV модула и у свемирској техници. У односу на поли и монокристални силицијум, $GaAs$ има мању масу. Међутим, цена материјала и производње је висока. На *Слици 3.1* су дати слојеви $GaAs$ [3].



Слика 3.1 Слојеви GaAs соларне ћелије[5]

3.5 Органске и полимерне ћелије

Технологија органских соларних ћелија је нова технологија у фази развоја као и *CIS/CIGS* технологија. Иако има веома малу ефикасност око 4-5%, веома је интересантна због својих својства као што су механичка флексибилност, лаке могућности одлагања без ризика по околину и релативно ниске цене. Већина органских материјала има ниске напоне отвореног кола. Поједини полимери имају потенцијал да у будућности замене силицијумске *PV* модуле, узевши у обзир масу и цену производње [7].

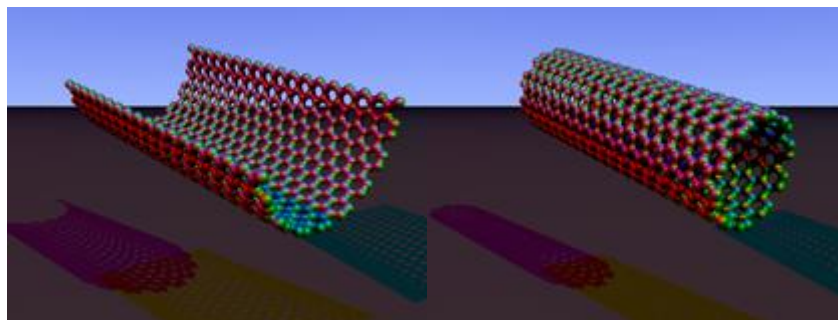
3.6 Нове технологије PV ћелија

Поред потраге за новим материјалима за производњу, установљене су и нове технологије за производњу соларних ћелија. Нанотехнологија позната као “PV технологија треће генерације”, усавршава се ради побољшања ефикасности соларних ћелија, јер енергетски процеп може бити контролисан на компонентама на нано нивоу. *Carbon nanotubes* (Нанотубе), *quantum dots* (квантне тачке) и *hot carrier* (топлотни носачи) су три технике коришћене за производњу PV ћелија. Предности ове технологије су побољшање механичке карактеристике материјала, ниска цена, добре електричне карактеристике.

***Carbon nanotubes* (Угљеникове нано тубе) (CNT):** су формиране као шестоугаоне решетке атома угљеника. Један од истраживачких тимова је пронашао фотодиодну соларну ћелију од угљеникових нанотуба и побољшао јој ефикасност и висину излазног напона. Иако има малу ефикасност 3-4%, спровешће се многа истраживања како би се ова технологија унапредила. На *Слици 3.2* је дат изглед једне од њих [6].

***Quantum dots* (Квантне тачке) (QDs):** Ова технологија се може описати као поступак у коме се материјалу додаје специјални полупроводнички систем који има способност контроле енергетског процепа, али са друге стране смањење енергетског процепа такође повећава поменућу вредност. Као решење, QDs се користи јер има могућност варирања апсорпције светлости и емисионог спектра светлости [7].

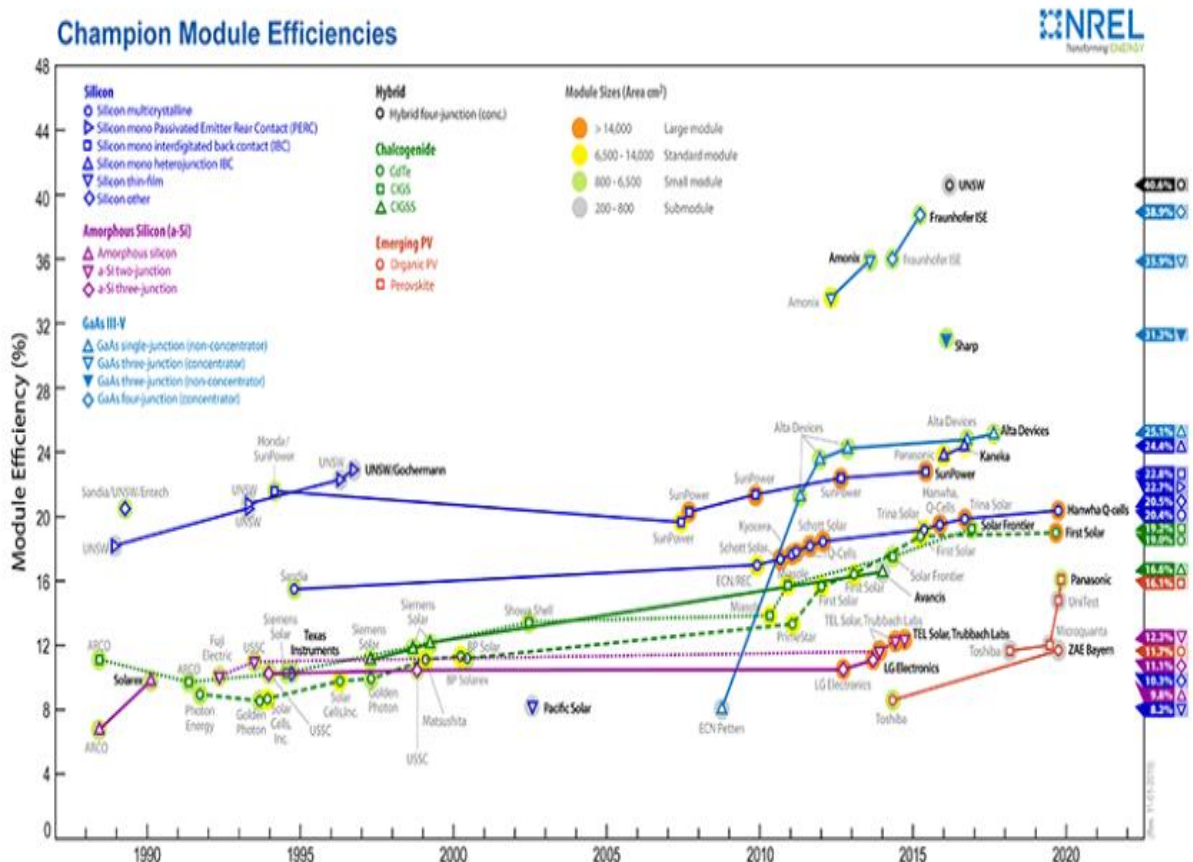
***Hot carrier solar cells* (Соларне ћелије топлотни носачи):** *HC* метод је изазовнији у односу на *CNT* и *QD* услед потребе за селективним енергетским контактом током процеса претварања светлости у електричну енергију без генерисања топлоте. Ефикасност достиже вредност од 66%, што је три пута виша вредност у односу на постојеће силицијумске ћелије. Услед непостојања материјала који има малу вредност степена хлађења, *HC* никада није комерцијализована већ остаје само експериментална технологија [7].



Слика 3.2 Карбонске наноцеве за производњу „нанокомпозита”[2]

4. Ефикасност соларних ћелија

Ефикасност генерално описује у којој мери су ресурси, нпр. време, напон или трошак, добро искоришћени за намењени задатак или сврху. Често се користи како би указао на способност одређене радње (активности) да произведе одређени исход ефикасно, са минималном количином отпада и најмањим трошком. Ефикасност се може приказати процентуално у односу на идеалан случај у којем је ефикасност 100%. Силицијумска технологија је водећа у производњи соларних ћелија услед своје велике ефикасности. На *Слици 4.* дат је преглед ефикасности фотонапонских модула реномираних светских произвођача, уз напомену да ефикасност модула пада (1-2)% годишње. Просечан гарантовани животног век који произвођачи дају износи до 20 година у случају одржања 90% иницијалне номиналне снаге или 25 година у случају одржања 80% иницијалне номиналне (максималне) снаге. У даљем тексту на *Слици 4.1* је приказана конверзија соларне ћелије на ниским температурама.

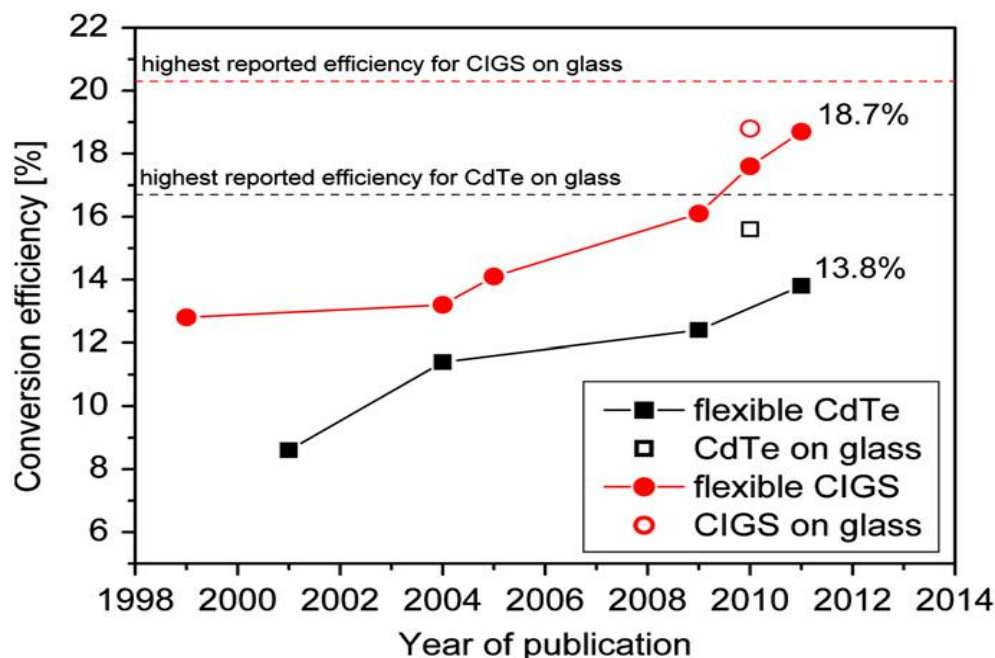


Слика 4. Преглед ефикасности (PV) модула реномираних произвођача[3]

Услед високих трошкова, многи истраживачи покушавају да пронађу нове технологије како би снизили трошкове производње соларних ћелија, и до данас је пронађена једина адекватна замена а то је технологија танког филма. Разлог због кога је технологија танких филмова економски исплативија је тај што користи много мању количину материјала у односу на моно и поликристалне соларне ћелије, што резултује смањењем производних трошкова. Међутим ефикасност произведених ћелија овом технологијом је још увек ниска. Три материјала на које је обраћена посебна пажња у оквиру технологије кратког филма су *аморфни силицијум*, *кадмијум сулфид*, *кадмијум телурид* ($CdS/CdTe$) и *бакар индијум-селен* (CIS), за које истраживачи улажу велики напор да повећају њихову ефикасност, иако ова врста материјала има негативан утицај на животну средину.

Једно од решења које нуди технологија танког филма је коришћење полимера или органских материјала. Полимерни материјали имају вишеструке предности, као што су ниска цена, релативно мала маса и не загађују животну средину. Проблем се јавља са малим степеном искоришћења у односу на друге технологије, који износи 4 – 5%. Соларне ћелије произведене од кристалног силицијума имају виши степен искоришћења од соларних ћелија произведених од било ког другог материјала. Поред тога, силицијум као материјал за производњу јако је доступан, налази се на другом месту лако доступних сировина.

Највећи степен конверзије силицијумске соларне ћелије величине 4100 cm^2 је остварила *Tsunomura*. Развијен је процес чишћења који даје чисту површину кристалног силицијума, унапређену текстуру, структуру, нижи степен оштећења, нижи светлосно апсорбујући *TCO*, финију мрежу електрода са смањеном површином.



Слика 4.1 Ефикасност конверзије соларне ћелије на ниским температурама[6]

Mishima [7] је за *Sanyo Electric* описао статус развоја високо ефикасних *HIT* соларних ћелија. Током једногодишњег теста *HIT* двоструких соларних ћелија и једностраних *HIT* модула, закључено је да излазна снага код *HIT* двоструке соларне ћелије је већа од снаге *HIT* једностраног модула. Двоструки *HIT* производи 10.9% већу излазну снагу у поређењу са *HIT* модулом. Остварили су напон отвореног кола од 743 mV и висок степен конверзије од 22.8% користећи само субстрат дебљине 98mm. Резултат студије је показао да *HIT* соларна ћелија има потенцијал за даље усавршавање перформанси.

Chenad Zhu [8] је симулирао *a-Si/c-Si* хетероспојну соларну ћелију високе ефикасности конверзије уз помоћ компјутерске симулације. Дизајнирали су *a-Si:H/N⁺c-Si* соларну ћелију високих перформанси са ефикасношћу конверзије од 21.8%, високим фактором пуњења од 0.86 и високим напоном од 0.86 V ћелија високе ефикасности конверзије и ниских цена.

Friedman [9] је симулирао следећу генерацију високоефективних мулти спојних соларних ћелија са ефикасношћу изнад 40% које ће превазићи перформансе било које конвенционалне једноспојне ћелије. У Табели 4.2 приказана је ефикасност високоефикасних ћелија у поређењу са једнослојним ћелијама.

Уређај	Број спојева	Ефикасност (%)	Број Сунаца
<i>Si</i>	1	25.0±0.5	1
<i>GaAs</i>	1	26.4±0.8	1
<i>CIGS</i>	1	19.4±0.6	1
<i>CdTe</i>	1	16.7±0.5	1
<i>GaInP/GaAs/GaInAs</i>	3	35.8±1.5	1
<i>Si</i>	1	27.6±1.0	92
<i>GaAs</i>	1	29.1±1.3	117
<i>GaInP/GaInAs/Ge</i>	3	41.6±2.5	364

Табела 4.2 Високо ефикасне ћелије у поређењу са конвенционалним једнослојним ћелијама[10]

Закључили су да нове генерације високоефикасних мултиспојних ћелија са ефикасношћу изнад 40%, су најефикасније икада направљене. Приступ који је коришћен ради остваривања ове ефикасности је пут континуираног развоја у побољшању перформанси соларних ћелија. Очигледно је да ће ефикасност од 45% бити достигнута у наредних пар година, док на дужи стазе, са огромним напорима уложеним у развој, ефикасност од 50% је реалан циљ.

Yamaguch [10] је развио високо ефикасну мултиспојну и концентраторску *InGaP/InGaAs/Ge* трослојну соларну ћелију са ефикасношћу од 36.5%. Успешно су тестирали и *InGaP/InGaAs/Ge* концентраторску трослојну ћелију која држи светски запис у ефикасности од 37.5% са 200 сунчаних дана у 2004. години током овог

истраживачког рада израђена је Табела 4.3 главних проблематичних питања које треба решити а које се тичу вишеспојне соларне ћелије.

Главни проблем	Прошлост	Садашњост	Будућност
“Тор cell” материјал	<i>AlGaAs</i>	<i>InGaP</i>	<i>AlInGaP</i>
Материјал трећег слоја	/	<i>Ge</i>	<i>GaInNAs</i>
Субстрат	<i>GaAs</i>	<i>Ge</i>	<i>Si</i>
Тунел спојница	<i>DH</i> -структура <i>GaAs</i> тунел J	<i>DH</i> -структура <i>InGaP</i> тунел J	<i>DH</i> -структура <i>InGaP</i> или <i>GaAs</i>
Упаривање решетке	<i>GaAs</i> средња ћелија	<i>InGaAs</i> средња ћелија	<i>(In)GaAs</i> средња ћелија
Ограничење носача	<i>InGaP-BSF</i>	<i>AlInP-BSF</i>	<i>Widegap-BSF</i>
Ограничење фотона	/		“Bragg reflector”

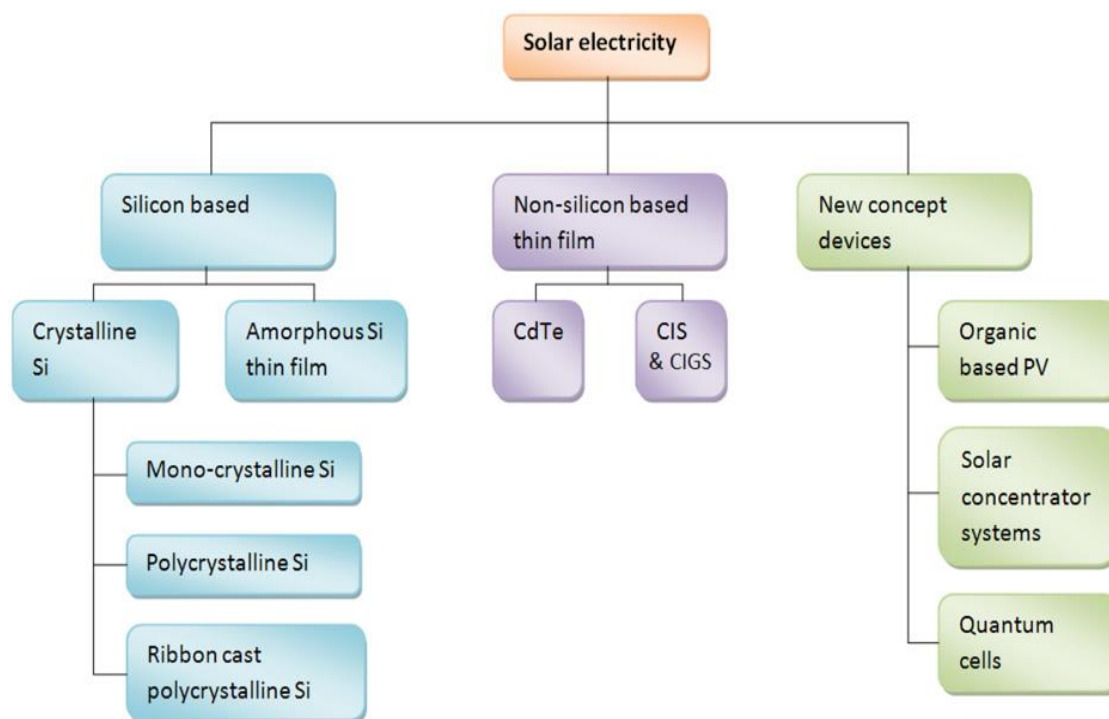
Табела 4.3 Главна проблематична питања вишеспојне соларне ћелије [12]

Рад *Fraunhofer ISE* у области високоефективних силицијумских соларних ћелија је углавном заснован на стварању индустријске производње високо ефикасних силицијумских соларних ћелија. Ради се на производњи ласерских испљених (LFC) соларних ћелија на веома танким подлогама. У циљу поређења ове технологије са стандардним високо ефикасним процесним шемама *LFC* и *PERC* ћелије су произведене од монокристалног силицијума *p*-типа у опсегу отпорности између 0.5 Ω/cm и 10 Ω/cm , и на силицијуму *n*-типа са отпорношћу од 1 Ω/cm у истој серији.

Gu [11] је открио квазијединични кристални силицијум (*QSC*) као потенцијални материјал који може остварити високу ефикасност соларних ћелија, по ниској цени. У поређењу са мултикристалним силицијумом (*MC*), *QSC* силицијум има мањи животни век носача и уједначенију дистрибуцију животног циклуса. Сугестовано је да је код соларне ћелије индустријске величине, *QSC* соларна ћелија супериорнија у односу на *MC* и да може остварити већу ефикасност кроз алкално текстурисање. Резултати ове студије показују велики потенцијал примене *QSC* у *PV* индустрији као супстрата следеће генерације.

Fleisher [12] експериментално проучава повећање ефикасности соларне ћелије танког филма користећи транспарентни проводљиви оксид (*TCO*) са апсорбером и стаклом. Користи три различита слоја материјала и упоређује им ефикасности. Резултат истраживања показује да $AlZnO_x$ и SnO_2 : S, F у комбинацији са *a-Si:H* соларном ћелијом танког филма има добит ефикасности 6.3 % што резултује укупном ефикасношћу од 9.6%. Међутим, резултати симулације показују да се може добити ефикасност од 10.4%. Као додатак повећања ефикасности јавља се смањење трошкова по јединичном вату ћелије. У овој студији, спроведено је неколико корака оптимизације, посебно оптимизација контакта задње стране структуре и изолационог процеса. Са (*MWT*) остварена је ефикасност од 16% и ефикасност модула од 15% у поређењу са референтним ћелијама (модулима) истог *MC Si* блока.

Morikawa et al. [13] је развио поликристалну соларну ћелију танког филма велике површине (10 cm x 10 cm). Открили су да комбинација фосфорног третмана и ниско носеће концентрације (*BSF*) је довољно ефикасна да силицијумске ћелије танког филма остваре ефикасност конверзије од 16%. Технике производње TiO_2 танког филма за обојено осетљиве соларне ћелије са ефикасношћу од 10% у конверзији су прављене од стране *Ito et al* [13]. Користили су антирефлекциони филм (*ARF*) ради повећања *IPCE* или “екстерне квантне ефикасности” уређаја да би достигао апсорпцију 94%. На Сlici 4.2 је дата PV технологија на принципи Раугија и Френклина.



Слика 4.2 PV технологија на принципу Раугија и Френклина[6]

5. Фотонапонски материјали интегрисани у зграде (BIPV)

Процена различитих BIPV производа се може вршити на основу анализе следећих параметара:

- Ефикасност соларне ћелије EA
- Максимална тачка напајања P_{max}
- Улазна светлост зрачења E (W/m^2)
- Површина соларне ћелије A (m^2)
- Потенцијал или напон отвореног круга, U_{oc}
- Електрична струја кратког споја, I_{sc}
- Максимална тачка снаге, $P_{max}=(UI)_{max}$
- Фактор испуњености $FF=P_{max}/(U_{oc}I_{oc})=(UI)_{max}/(U_{oc}I_{oc})$
- Распон појаса, Eg
- Квантни принос, ϕ

На доњим сликама (5.1 и 5.2) су дати само неки од примера где су BIPV модули заступљени.



Слика 5.1 Соларне плочице са закривљеном глином [6]



Слика 5.2 Стаклени плафон са прозирним BIPV модулима [6]

5.1 Изградња интегрисаних стандарда

Европски стандард *EN 61646* “Танки филмски земаљски фотонапонски модули (PV) квалификација дизајна и одобрење типа” даје детаљне поступке испитивања о PV модулима. То је једнако Међународном стандарду *IEC 61646*. Поступци се састоје од:

1. Визуелног прегледа
2. Одређивање максималне снаге
3. Испитивање изолације
4. Мерење температурних коефицијената
5. Мерење *NOCT*
6. Перформансе на *STC* и *NOCT*
7. Перформансе при ниском зрачењу
8. Излагање на отвореном
9. Тест издржљивости вруће тачке
10. *UV* предуслов тест
11. Термички бициклистички тест
12. Тест без смрзавања влаге
13. Влажни топлотни тест
14. Робусност прекидачки тест
15. Мокро цурење тренутни тест

16. Испитивање механичким оптерећењем
17. Испитивање туче
18. Пролазно диодни термички тест
19. Натапање светлом

5.2 Производи од фолије (BIPV)

Производи од BIPV фолије су веома флексибилни, што омогућава једноставну уградњу за већину кровова. Фотонапонске ћелије се често праве од ћелија танког филма да би одржавали флексибилност и ефикасност фолије. У Табели 5.1 дати су подаци једног од производа, који показује потенцијал отвореног круга / напон U_{oc} , максимална снага P_{max} и фактор испуњености FF .

Manufacturer	Product ^a	η (%)	U_{oc} (V)	I_{sc} (A)	P_{max} (W)	FF	Area (mm × mm)	$P_{max}/area$ (W/m ²)	Material
Solar-dachstein	STEP-design	23.15	2.40	1.36/cell	0.76	8 units 100 × 100	136		Poly-crystalline silicon cells
SRS Energy	Sole Powertile	6.3	4.6	15.75/module	0.54	868 × 457.2	39.7		Amorphous silicon cells from Uni-Solar
Lumeta	Solar Flat Tile	7.4	5.2	28/module	0.73	432 × 905	71.6		Mono-crystalline silicon cells
Solar Century	C21e Tile	20/cell	12.0	5.55	52/module	0.78	1220 × 420	101.5	Mono-crystalline cells

Табела 5.1 Подаци за један од производа BIPV фолије[6]

5.3 Производи од плочица (BIPV)

Производи од BIPV плочица могу да покрију цео кров или само делове крова. Обично су распоређени у модулима тако да имају изглед и својства стандардне кровне плочице. Ово је добра опција за накнадну уградњу кровова. Тип ћелије и плочице се разликује. Неки плочици производи подсећају на закривљене керамичке плочице и неће изгледати ефикасно због закривљене површине, али могу бити естетски пријатни. Табела 5.2 даје примере четири фотонапонске врсте производа за плочице који су данас на тржишту. STEP дизајн, соларна плочица и C21e плочица имају високу ефикасност на основу фактора ефикасности. Модул има интегрисану плочу од поли или монокристалне ћелије. То значи да делови модула нису потпуно прекривени фотонапонским ћелијама

Manufacturer	Product*	η (%)	U_{oc} (V)	I_{sc} (A)	P_{max} (W)	FF	Area (mm $\times$ mm)	$P_{max}/area$ (W/m ²)	Material
Solar-dachstein	STEP-design		23.15	2.40	1.36/cell	0.76	8 units 100 $\times$ 100	136	Poly-crystalline silicon cells
SRS Energy	Solé Powertile		6.3	4.6	15.75/module	0.54	868 $\times$ 457.2	39.7	Amorphous silicon cells from Uni-Solar
Lumeta	Solar Flat Tile		7.4	5.2	28/module	0.73	432 $\times$ 905	71.6	Mono-crystalline silicon cells
Solar Century	C21e Tile	20/cell	12.0	5.55	52/module	0.78	1220 $\times$ 420	101.5	Mono-crystalline cells

Табела 5.2 Табела за неке од производа BIPV плочица[6]

5.4 BIPV производи

У Табели 5.3 дати су примери конвенционалних BIPV производа произведених од стране познатих светских произвођача (*Creaton AG*, *Rheinzink*, *Suntech*, *Abakus Solar*, *DuPont*, и *Schott Solar*)

Manufacturer	Product*	η (%)	U_{oc} (V)	I_{sc} (A)	P_{max} (W)	FF	Area (mm $\times$ mm)	$P_{max}/area$ (W/m ²)	Material
Creaton AG	Creaton Solesia		13.86	8.46	90/module	0.77	1778 $\times$ 355	142.6	Mono-crystalline silicon cells
Rheinzink	PV Quickstep		17.10	5.12	68/module	0.78	2000 $\times$ 365	93.2	Crystalline silicon cells
Abakus Solar AG	Peak On P220-60	13.2	36.77	8.22	220	0.73	1667 $\times$ 1000	132.0	Poly-crystalline silicon cells
	Peak On P235-60	14.6	37.21	8.48	235	0.74	1630 $\times$ 1000	144.2	Poly-crystalline silicon cells
	ANT P6-60-230	14.07	36.77	8.42	230	0.74	1658 $\times$ 986	140.7	Poly-crystalline silicon cells
DuPont	Gevity	17.7	24.20–24.43	8.77–8.87	160–165	0.75–0.76	1332.5 $\times$ 929	129.36–133.4	Mono-crystalline silicon cells
Suntech	MSZ-190J-D		45.2	5.62	190/module	0.75	1641 $\times$ 834.5	139	Mono-crystalline silicon cells
	MSZ-90J-CH		22.4	5.29	90/module	0.76	879 $\times$ 843.5	125	Mono-crystalline silicon cells
Schott Solar	InDax 214	12.5	36.3	8.04			1769 $\times$ 999		Poly-crystalline silicon cells
	InDax 225	13.1	33.5	6.60			1769 $\times$ 999		Poly-crystalline silicon cells
Solar Century	C21e Slate	20/cell	12.0	5.55	52	0.78	1174 $\times$ 318	139.3	Mono-crystalline silicon cells

Табела 5.3 Подаци за неке од производа BIPV модулима[6]

Abakus Solar, *DuPont*, и *Schott Solar* не дају вредност за максималну снагу, али су три од неколико произвођача који дају вредност за ефикасност модула. Ефикасност за *Abakus Solar* је између 12,7% и 14,6%, *DuPont* пружа ефикасност од 17,7%, док модел *Schott Solar* има уштеду 12,5 до 13,1%.

5.5 Интегрисани фотонапонски модули за прозоре

Интегрисани фотонапонски модули са соларним ћелијама нуде велику могућност за прозоре или кровове. Различите боје и прозирне фолије могу учинити много различитих естетски угодних могућих резултата. Модули преносе дневну светлост и служе као заштита од воде и сунца. „Технологија укључује прскање наночестица силицијума на прозор, које делују као соларне ћелије. Удаљеност између ћелија зависи од нивоа транспарентности и критеријума за производњу електричне енергије, али обично је удаљеност између 3 и 50 mm. Простор између ћелија преноси дифузну дневну светлост. Отуда се и једно и друго засенчење и природно осветљење обезбеђује током производње електричне енергије. Произвођачи интегрисаних фотонапонских модула за прозоре обично нуде прилагођене производе за одређени пројекат, где Табела 5.4 представља неке унапред дефинисане модуле. Произвођачи нуде и прилагођене модуле у погледу облика, ћелијски материјал, боје и прозирност, тј. удаљеност између ћелија. Вредности за ефикасност нису дате за ове производе, али за *Voltarlux* је фактор испуњености 0,55 дат са транспарентношћу нивоа од 10%.

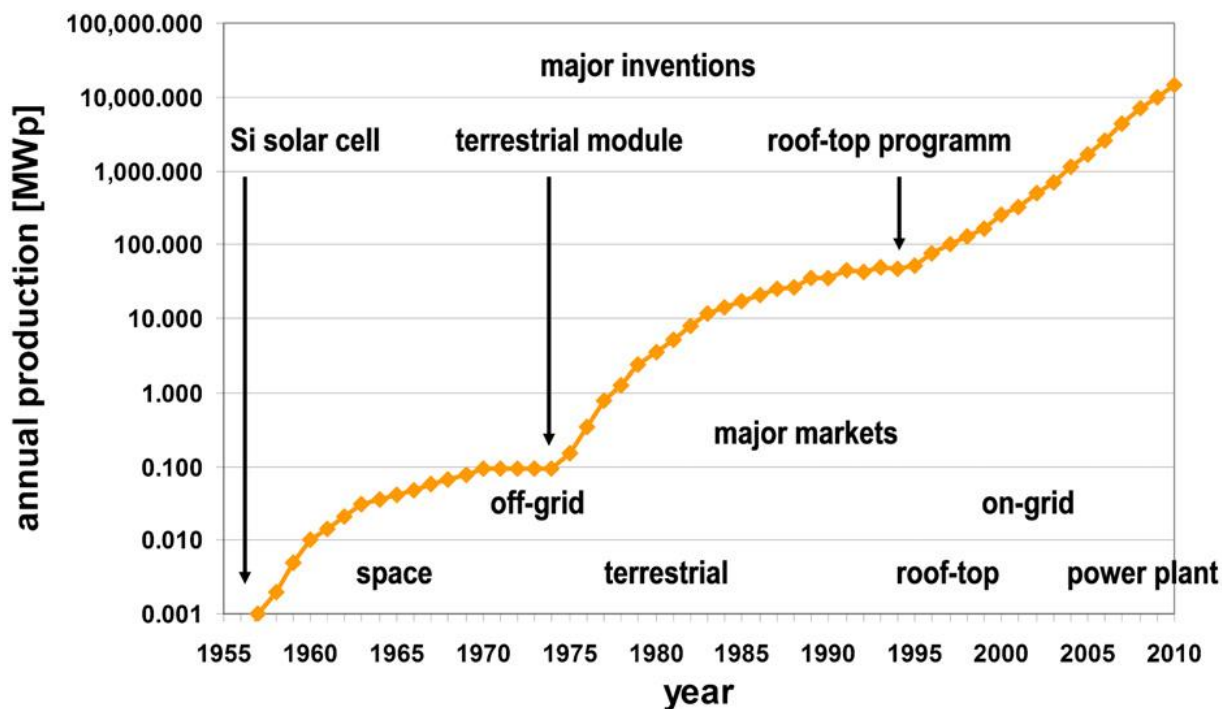
Manufacturer	Product*	η (%)	U_{oc} (V)	I_{sc} (A)	P_{max} (W)	FF	Area (mm × mm)	$P_{max}/area$ (W/m ²)	Material
Abakus Solar AG	Peak In P210-60		36.50	7.70			2000 × 1066		Poly-crystalline silicon cells
Vidursolar	FV VS16 C36 P120		21.6	7.63			1600 × 720		Poly-crystalline silicon cells
Glaswerke Amold GmbH & Co KG	Voltarlux-ASI-T-Mono 4-fach	93		1.97	100/module	0.55	2358 × 1027	41.3	Amorphous silicon cells from Schott Solar
Schott Solar	ASI THRU-1-L	6	111	0.55	48	0.79	1122 × 690	62.0	Amorphous silicon cells
	ASI THRU-4-IO	6	111	2.22	190	0.77	1122 × 2619	64.7	Amorphous silicon cells
Sapa Building System	Amorphous silicon thin film	5/cell			32/cell		576 × 976/cell	50	Amorphous silicon thin film
	Poly-crystalline	16/cell			1.46–3.85/cell		156 × 156/cell	120	Poly-crystalline
	Mono-crystalline high efficient	22/cell			2.90–3.11/cell		125 × 125/cell	155	Mono-crystalline high efficient

Табела 5.4 Подаци за неке производе за застакљивање соларних ћелија[6]

5.6 Економски раст

Глобално тржиште за *BIPV* је за $1,8\$ \times 10^9$ у 2009. години до 2016. године порасло за $8,7\$ \times 10^9$, према консултацијама фирме “*Nanomarkets*“ у Њујорку [7]. Дугорочни тренд трошкова за *PV* трошкове модула приказани су на *Слици 5.3*. Истражен је раст фотонапонске индустрије анализом раста патената које је извршио Лиу. Оцена животног циклуса (*LCA*) је временски прилагођена сума свих прилагођених времена трошкова одређеног система током одређеног периода, и мора бити упоређен са алтернативним системом *LCA* да би се направио информисан избор између њих. У основи *BIPV* систем захтева и велике капиталне трошкове изградње, али без оперативног трошка горива. Како *PV* панели заузимају велико подручје за уградњу, најбоље би се могло одговорити уштедом простора технологијама попут *BIPV*-ова. У корпорацији *PV* материјала у производњи као што су кровни материјали, прозори, тенде и застакљене фасаде пружају могућност смањења трошкова за замену уобичајених грађевинских материјала *PV* материјалима по граничним трошковима. У поређењу са стаклом, челиком или другим конвенционалним материјалима за облагање, уградњом *BIPV*-ова се додају добро гранични додатни трошкови (2-5%) у односу на све трошкове изградње за комерцијалне зграде. *BIPV* технологија је и даље прилично скупа. Данас у Европи, максимално време повраћаја за *PV* модуле од 10 година је углавном очекивано, што није могуће постићи без субвенција. Земље развијене за *PV* мреже повезане на мрежу, дају већу цену у мрежи него што делују из мреже.

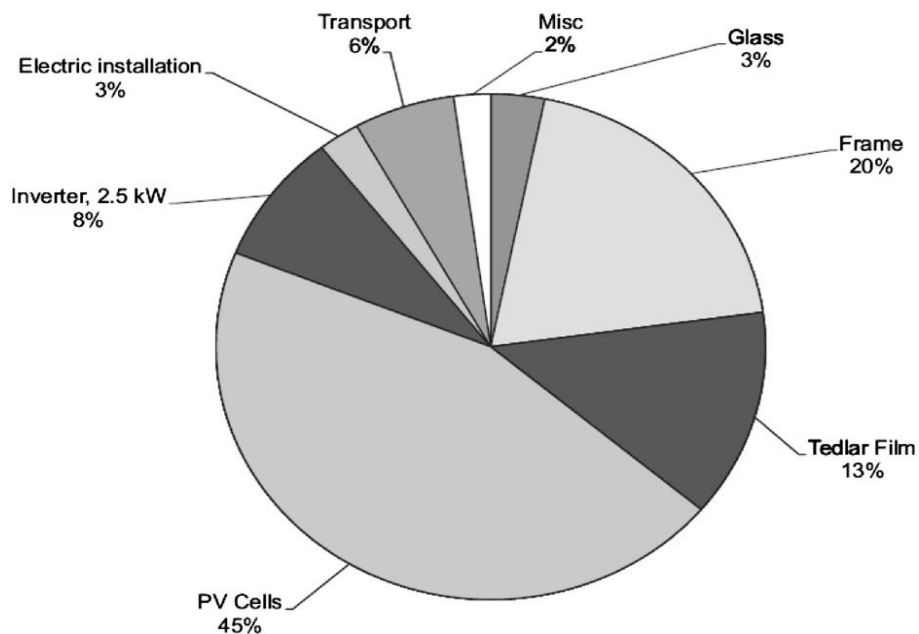
У многим земљама не постоје системи за откуп електричне енергије коју производе *PV* системи иако техничка решења за редистрибуцију струја постоји. Ако је систем попут оног горе поменутог, установљено је да ће *PV* индустрија можда имати светлију будућност. Међутим, боље решење би било дистрибуирати електричну енергију локално, а затим куповати или продавати на мрежи кад год је то потребно, иако је ово потребно може резултирати тежим техничким решењем за електричну енергију компаније. За власника зграде цена инсталације и рада система *BIPV* се може надокнадити продајом вишка електричне енергије аукцијском предузећу.



Слика 5.3 Историјски раст светског тржишта PV производа[6]

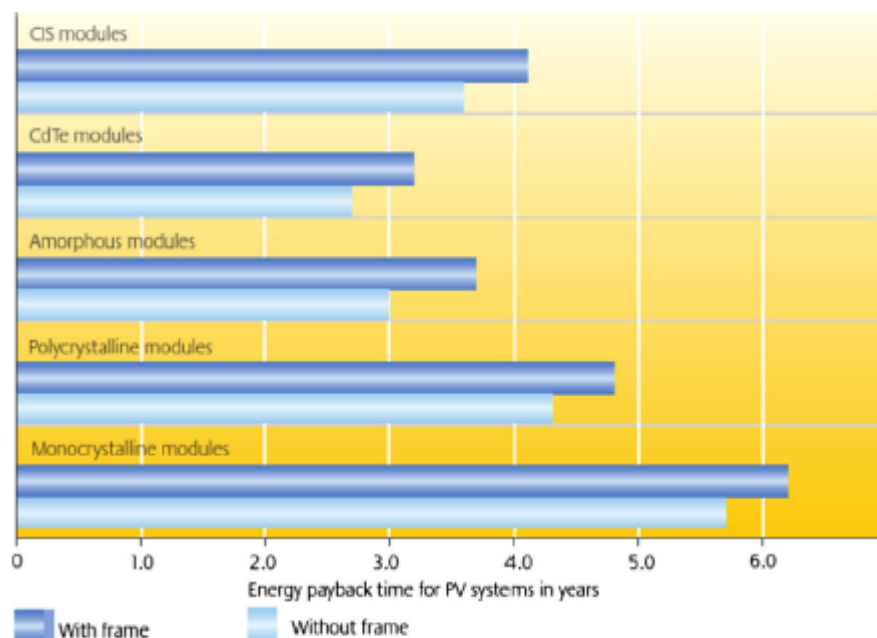
5.7 Време повраћаја енергије

Када с обзиром на различите системе обновљивих извора енергије, време повраћаја енергије је од суштинске важности. Соларном модулу је потребно да створи онолико енергије колико је потрошено да створи себе. Да би се утврдило време повраћаја енергије установљена енергија система се мора проценити. Установљена енергија у материјалима потребним за производњу за 2,1 kWp је приказана на Слици 5.4.



Слика 5.4 Установљена енергија PV мреже за 2,1 kWp[6]

Студија спроведена у Швајцарској о анализи животног циклуса (*LCA*), дванаест малих PV електрана, свака капацитета 3 kWp, дала је време повраћаја енергије од 4 до 6 година за монокристалне ћелије и 3,5 до 4,5 година за поликристалне ћелије. На вредности утичу избором референтног система и показатеља. Ови бројеви су мање или више подржани временима повраћаја енергије у Немачкој, 5 – 6 година за монокристалне PV системе и приближно 4 - 5 године за поликристалне PV системе као што је приказано на Слици 5.5. Студија спроведена на PV модулима инсталираним у Швајцарској процењује 2 – 3 године за повраћај енергије за будуће монокристалне модуле и 2 – 3 године за будуће поликристалне модуле, док студија за Европу уопште у наставку предвиђа годину дана повраћаја енергије за монокристалне и поликристалне модуле. Обе студије претпостављају већу ефикасност PV ћелија, стога краће време отплате. Још једна *LCA* студија представљена на 21-ој Европској Фотонапонској Производној Конференцији о Соларној Енергији у Немачкој 2006. резултирала је енергијом време отплате од 2 године у Јужној Европи и 3 – 3,5 у Средњој Европи са малим разликама између монокристалних и поликристалних ћелија. Разматрано зрачење 1700 kWh (m² годишње) за Јужну Европу и 1000 kWh (m² годишње) за Средњу Европу. Резултати повратка енергије за аморфни силицијум су 1 – 1,5 у Јужној Европи. Када је у питању радни век, избегавање превисоких температура је суштинско. „Топлота” је кључ *BIPV* дизајна. Ако је температура од фотонапонских модула превисока, то ће утицати на ефикасност соларне ћелије, перформансе структуре компонената и радни век. Енергетска анализа студије случаја спроведена у Уједињеном Краљевству открила је да је инсталирано 2,1 kWp *BIPV* систем, иако захтева велике количине уграђене енергије за производњу, имао је кратак период повраћаја енергије од свега 4 – 5 година за разлику од очекиваног животног века система од 25 година.



Слика 5.5 Време повратка енергије за PV системе у Немачкој на основу просечних вредности из различитих студија[6]

6. Будуће могућности истраживања

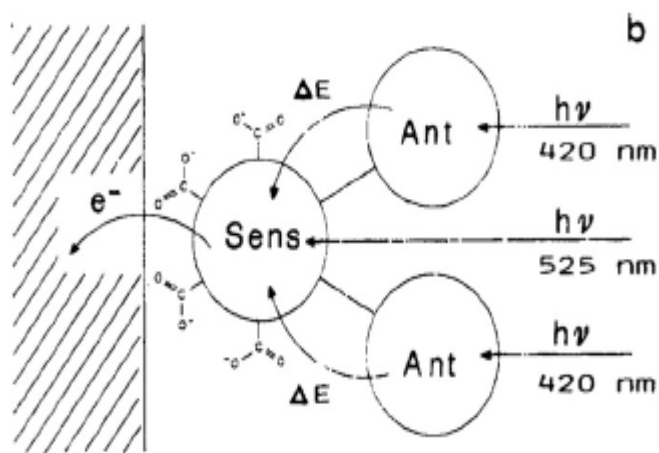
Будуће могућности истраживања темеље се на постојећим производима. Многи производи могу постићи већу ефикасност са бољим материјалима и бољим решењима. Наравно, напредак у развој PV материјала ће довести до напретка за *BIPV* системе. Изазов је постизање ове одрживе цене.

Нове PV технологије које могу покренути и унапредити нове иновације и могу се наћи у разним пољима, нпр:

- a) Ултра – ниски трошкови, модули на бази органске ефикасности, ниске и средње ефикасности
- b) Ултра – високи модули за ефикасност
- c) Соларни концентратор
- d) Флексибилне неорганске соларне ћелије танког филма или друге

Органски полуводичи су јефтинији од неорганских полуводича попут силицијума (Si). Врхунске карактеристике материјала полимера у комбинацији са јефтиним техникама обраде направиле су полимерне материјале да буду присутни у скоро сваком делу модерног друштва.

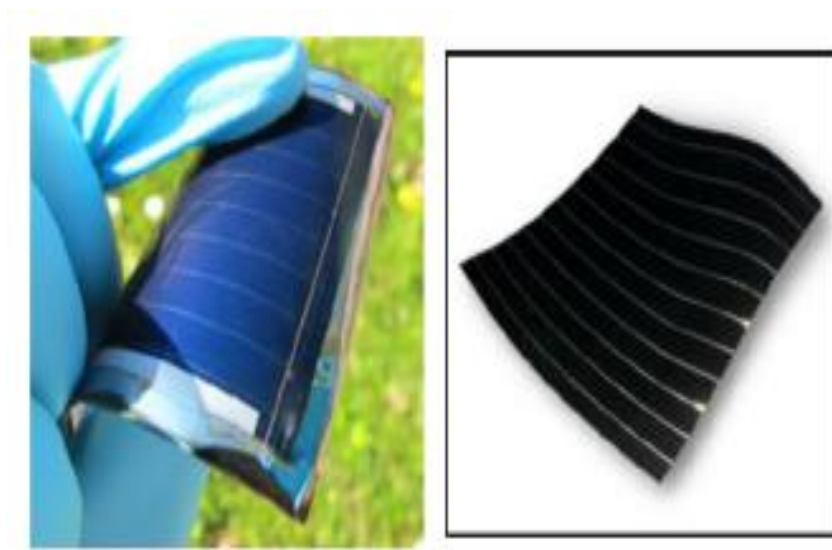
Највећа пријављена ефикасност органске соларне ћелије (са изузетком *DSSC*) износи 6,5%, што их чини конкурентним са CO_2 производњом технологија [8]. Полимерне соларне ћелије су међутим осетљивије када је у питању деградација. Кисеоник из атмосфере ће оксидисати органски слој. Стабилнији уређаји су већ направљени и напредак је у овом пољу важан да полимерне соларне ћелије имају будућност као комерцијални уређаји и да се користе у разним *BIPV* – овима. Модули ултра – високе ефикасности базирани су на квантним ћелијама и нано – структурираним уређајима. Соларни системи концентрата описани су низовима *PV* модула који су монтирани на велике покретне конструкције, које су усмерене ка сунцу. Велики део ове нове технологије је већ добро познат. *DSSC* – ови обично имају супстрат титанијум-диоксида (TiO_2). Ћелије апсорбују крст видљивог спектра и стога доводе до повећане ефикасности у распону од 7% директно испод сунчевог зрачења и до 11% при дифузној дневној светлости. TiO_2 је нов материјал и нетоксичан бели минерал. Једноставан процес производње доприноси смањењу трошкова. Обојене боје за употребу у *DSSC*-у засноване на TiO_2 су ћелије које је развио Истраживачки центар за нано материјале са Универзитета *Massey* и предвиђају трошкове 1/10 ћелија на бази силицијума. Смањени трошкови производње и смањена заштита животне средине резултирају краћим енергетским и економичним временом повраћаја, и зато технологију чини врло обећавајућом. Тржиште за ову технологију је још увек врло мало, али очекује се да ће да постигне велики успон у будућности. Опција за ефикасније сакупљање соларне енергије, такозване „антене” (Слика 6.1), које могу скупити неколико таласних дужина тј. има много шири спектар сунчевог зрачења. Ово се може упоредити са више „традиционалних” сендвич соларних ћелија. Употреба молекуларних уређаја за антенски сензибилизатор могу да чине и одрживе стратегије за превазилажење проблема ефикасности жетве у спектралној сензибилизацији полупроводника широког опсега.



Слика 6.1 Блок дијаграм који приказује функцију тринуклеарног комплекса као антенски сензитизациони молекуларни уређај[6]

Истраживачке лабораторије већ дуги низ година производе високо-ћелијске перформансе са ефикасношћу и до 25-40%. Један приступ је употреба материјала веће чистоће и уклањање нечистоће заједно са поступком. Такође задња површина може бити пасивизирана са силиконским оксидом и аморфним силицијумом да би се свели на минимум рекомбинациони губици на површинама и контактима. Укупна производња је веома скупа и данас се мора користити само у лабораторијама. Други начин повећања ефикасности може бити концентрована фотонапонска ћелија (*CPV*). Достицање ефикасности 43,5% је постигнуто за *CPV* ћелије спремне за комерцијалну употребу [8]. Ове ћелије се обично примењују на бази модула концентратора о концепту рефлекционих концентрата малог отвора. *Слика 6.2* приказује фотографије флексибилног *CIGS* и *CdTe* соларног модула. Флексибилни и лагани *CIGS* и *CdTe* соларни уређаји у експерименту *Buecheler* дају активну површинску ефикасност од 14,7% (*CIGS*) и (*CdTe*). Ови уређаји омогућују изградњу интеграције у структуре које не могу да преузму додатно оптерећење тешких и чврстих стаклених соларних модула. Флексибилни соларни модули се могу ламинирати на грађевинске елементе као што су мембране са равним кровом, плочице или метални поклопци без додатне тежине и на тај начин се трошкови инсталације могу значајно смањити.

Интегрисани фотонапонски модули за прозоре који су данас доступни имају потенцијал за оптимизацију, нпр. соларно зрачење коришћено у соларној ћелији се не може искористити као дневна светлост у зградама. Такође се предвиђа да се у потпуно нове производе за фенестрацију уграде соларне ћелије или фотонапони са електрохромним материјалима, где ће фотонапонски и електрохромни материјали покрити цео простор за застакљивање.



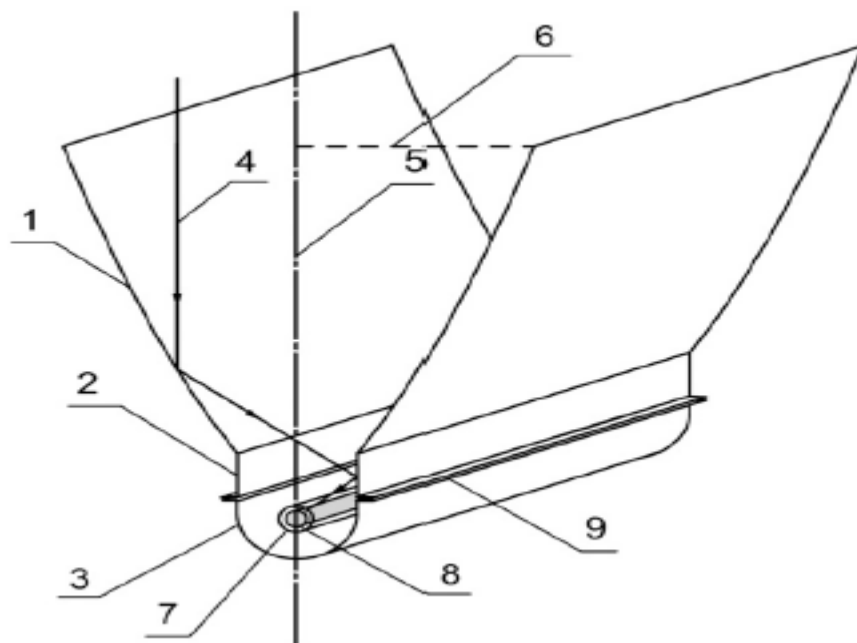
Слика 6.2 Флексибилни и лагани *CIGS* (лево) и *CdTe* (десно) соларни модули[6]

Напредније технологије материјала укључују кристални силицијум на стаклу (CSG), бакар-индијум-галијум диселенид (CIGS), микроаморфне силицијумске ћелије концентрационе системе и хибридне соларне ћелије (HIT). *Dow Chemical* је представио линију соларних шиндра на бази CIGS која се нашла у продаји 2011. године. Очекује се да ће ово бити велики допринос доносећи потрошачима обновљиву енергију. Развој нових PV материјала и технологија ће убудуће да доприносе новим и побољшаним BIPV производима, нпр. са вишом соларном ефикасношћу.

6.1 Нова решења

Нова решења у PV индустрији су многобројна. Обично има простора за напредак у сваком конкретном систему, нпр. у погледу брзине вентилације, позиционирања, уклањање снега итд. За добре резултате интеграције BIPV систем мора бити рано укључен у процесу планирања. Комуникација између планера и произвођача BIPV производа је од велике важности за развој нових BIPV решења. Ако се користе монокристалне или поликристалне PV ћелије важно је постићи довољну брзину вентилације, као што ефикасност соларне ћелије нормално опада са порастом температуре. Ако су температуре за достизање високих нивоа, можда ће се морати инсталирати компензациона решења попут вентилатора итд., мада то обично није оптимално одржавање и енергетска ефикасност.

Очекује се да ће се системи побољшати у блиској будућности како у погледу ефикасности производа тако и у фази производње што доводи до смањеног времена враћања енергије. Ово је међутим, зависно од стања на тржишту или субвенција. Могла би се замислити разна PV површинска решења за повећање ефикасности или профитабилности соларних ћелија. На пример, могу бити уграђени различити механизми за хватање сунчевог зрачења на површини. У принципу, последњи се може посматрати као посебан уграђени систем концентрата интегрисан у PV површине тако да захтева мање материјала соларних ћелија. На *Слици 6.3* приказан је макроскопски концентратор соларних ћелија. Она има предности побољшања радног учинка и окружење високо температурног соларног апсорбера и побољшавајући интензитет конфигурације рефлектујуће површине.

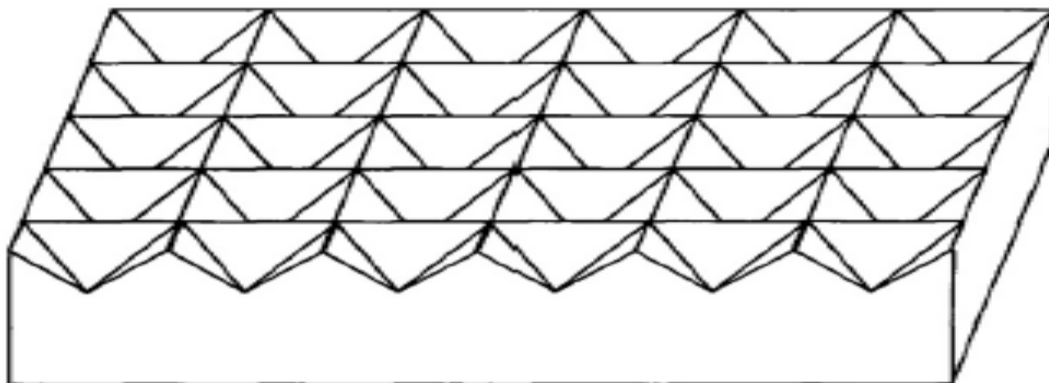


Слика 6.3 Шематски дијаграм кроз соларни концентратор[6]

1. Нови концентровани параболични концентратор
2. Огледало секундарне равне рефлексије
3. Нижи параболични концентартор
4. Паралелно светло
5. Оса симетрије
6. Половина отвора бленде увозне светлости
7. Прозирна стаклена вакуумска цев
8. Високо температурни соларни пријемник

Друга опција за ефикасније сакупљање соларне енергије је обрнута пирамидална текстура соларне ћелије (Слика 6.4). Сјајна својства хватања светлости обрнуте геометрије пирамиде је последица следећа три ефекта:

1. Смањена предња површина одраза пружањем могућности за део дела долазећих сунчевих зрака да се подвргну троструком одскоку
2. Повећава се дужина пута сунчевог зрака кроз ћелију, чиме се апсорбује већи део сунчевих зрака који су раније ушли у ћелију
3. Повећање количине рефлексије сунчевих зрака са задње стране, потпуним унутрашњим одразом на предњој страни тако што је угао пада већи од критичног угла.

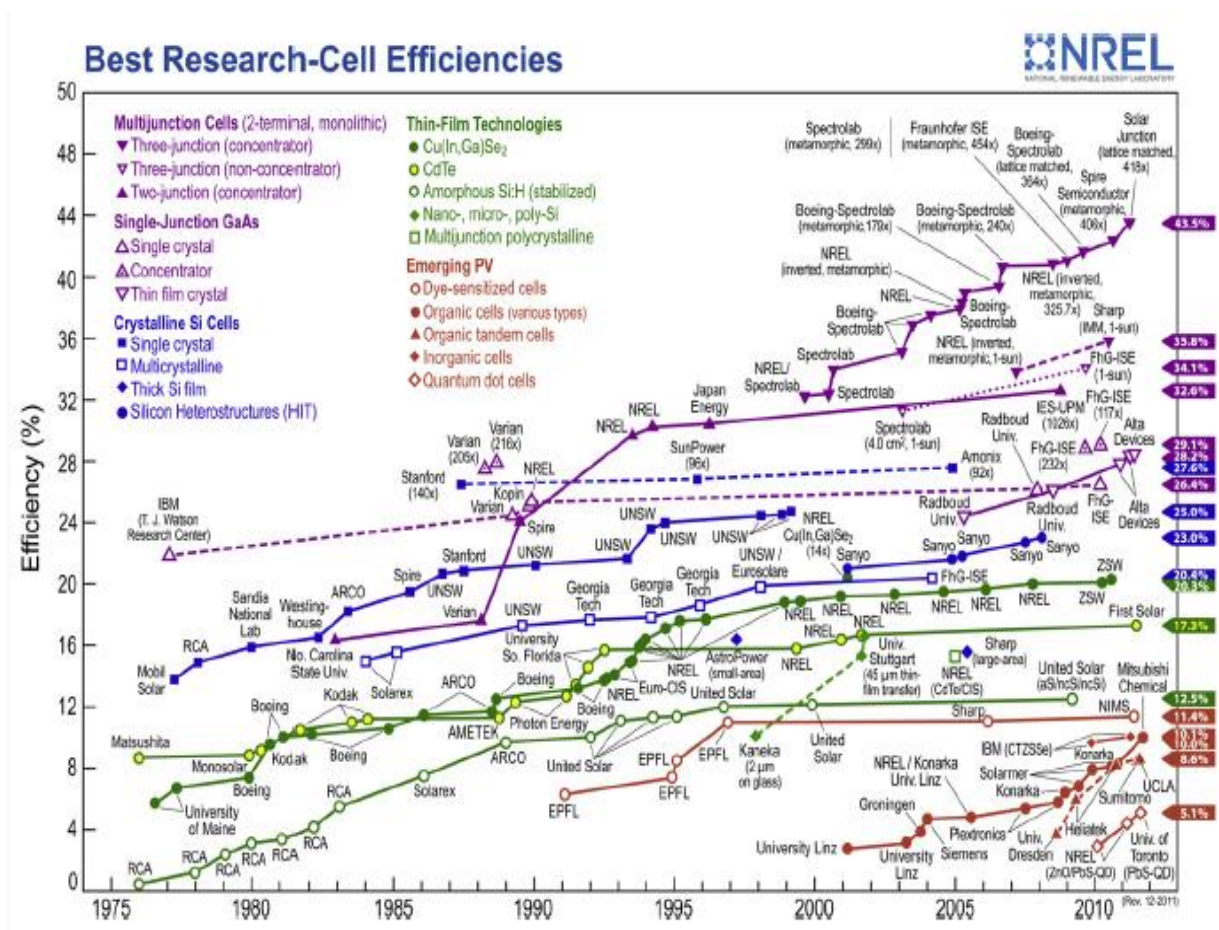


Слика 6.4 Обрнута геометрија пирамиде која се користи за хватање светлости на силиконској соларној енергији ћелији[6]

6.2 Визије за будућност

Много нових путева постоји изван тренутних *BIPV*-ова. Неки од могућих путева су већ споменути у претходном поглављу. Нове развијене технологије могу дати огромну разноликост решења. Ниски трошкови производње, ниски утицаји на животну средину и висока ефикасност су кључни фактори будућег развоја. Истраживање и развој решења у вези са *BIPV*-овима за тржиште за модернизацију је од великог значаја као и количина постојеће зграде су много пута веће од запремине зграде које ће се градити у догледној будућности. *Слика 6.5* приказује све проверене записе за различите *PV* конверзије технологије укључујући кристалну линију *Si*, танкослојни, једносмерни *GaAs* и нове технологије, прикупљене од соларне компаније, универзитета и националне лабораторије. Тржиште за накнадну уградњу кровова је већ у фази израде и расте, нпр. у Хонг Конгу, где могу бити слични *BIPV* концепти примењени на фасадним системима. Једноставна примена *PV* ћелија у постојећим материјалима су од суштинског значаја. Будући материјали за соларне ћелије могу бити предвиђени за могућност унутрашњег складиштења енергије, нпр. аналогно фотоелектрохемијској соларној ћелији (*PEC*) са унутрашњим складиштењем. Постоје разне технологије батерија, нпр. метални хибриди. Нано технологије би могле бити један од многих могућих начина повећања густине складиштења енергије. У разним земљама постоји велика потреба за владиним субвенцијама за покретање индустрије онако како је спроведена са успехом у јужној Европи. Упоредо са тим, успостављен је и систем за напајање мреже са *PV* електричном енергијом који је неопходан. Производи за стакло од соларне ћелије омогућавају скоро неограничен асортиман могућности. *BIPV*-ови као производи за застакљивање соларних ћелија, који пружају и једно и друго можда ће се у будућности још више користити.

У даљем развоју, предстојећа теоријска и експериментална истраживања могу пружити PV и BIPV индустрији неколико нових и иновативни материјали и решења. Развој ка већој ефикасности и бољој топлотној изолацији својства повећавају енергетску ефикасност и скраћују време повратка, нпр. у северном делу Европе.



Слика 6.5 Временска линија за извештавање о најбољој ефикасности истраживачких ћелија, која приказује све проверене записе за различите PV технологије претварања[6]

7. Закључак

Поред традиционалног начина добијања енергије, данас је све актуелније претварање сунчевог зрачења у електричну енергију, преко тзв. фотонапонских система. Развој је усмерен ка побољшању постојећих модула и компоненти система, као и развијању нових типова ћелија танкослојних фотонапонских система и нових материјала за соларне ћелије. Број инсталираних система у свету који користе обновљиве изворе енергије сваким даном је све већи. Пројектовање и анализа фотонапонских система захтева широк спектар знања из разних области науке и технике (астрономија, оптика, технологија материјала, електротехника и сл.). У поређењу са другим обновљивим изворима енергије, фотонапонска конверзија се из горе наведених разлога може сматрати дугорочним решењем. Њен значај полази пре свега од велике флексибилности и огромних техничких потенцијала ове технологије, што је чини можда и најчистијим обновљивим извором енергије, после пасивног соларног колектора.

Интегрисани фотонапонски материјали (BIPV) су фотонапонски материјали који замењују конвенционалне грађевинске материјале за зграде, попут кровова или фасада. BIPV се сматрају функционалним делом грађевинске конструкције, или су они архитектонски интегрисани у дизајн зграде. BIPV производи имају бројне предности у односу на неинтегрисане системе. Електрична енергија коју производе PV модули може смањити укупне трошкове грађевинског материјала и постићи значајне уштеде у погледу трошкова монтаже, посебно јер BIPV-ови не захтевају додатне компоненте као што су носачи и шине. Све ове предности су проузроковале све веће интересовање за BIPV производе у свету. Иако је још увек примена BIPV релативно мала, могућности за њихову масовнију примену у будућности су велике. Растући интерес потрошача за сунчевом енергијом, заједно са смањењем цене модула, уз политичку подршку за промоцију дистрибуираних система за коришћење обновљивих извора енергије, имају потенцијал да побољшају и ојачају тржиште BIPV.

8. Литература

- [1] Radulovic, J., Bojic, M., Skerlic, J., Nikolic, D., Taranovic, D.: “Possibility of electricity generation using PV solar plants in Serbia”, Energy generation and CO2 emissions of PV systems, 6th International Quality Conferene, Faculty of Engineering, University of Kragujevac (2012) 802-808
- [2] Лукић, Н., Бабић, М.: Соларна енергија, Монографија, Машински факултет у Крагујевцу, (2008).
- [3] Bojic, M., D., Bigot, F., Miranville., A. Parvedy-Patou., J., Radulovic.: “Optimizing performances of photovoltaics in Reunion Island-tilt angle, Progress in Photovoltaics: Research and Applications, DOI: 10.1002/pip.1159, (2011) Online ISSN: 1099-159X.
- [4] Tyagi V., Nurul A., Rahim A., Jeyraj A., Selvaraj, L.: “Progrss in solar PV technology: Research and achievement”
- [5] Razykov, M., Ferekides, S., Morel, D., Stefanakos, E., Ullal, S., Upadhyaya M.: “Solar photovoltaic electricity: current status and future prospects”, Solar Energy.
- [6] Bjørn Petter Jelle, Christer Breivik, Hilde Drolsum Røkenes: “Building integrated photovoltaic products: A state-of-the-art review and future research opportunities”, Solar Energy Materials & Solar Cells 100 (2012) 69–96
- [7] Manna, K., Mahajan, M.: “Nano technology in the development of photo-voltaic cells”, IEEE, (2007) 379-86.
- [8] Chen, A., Zhu, K.: “ Computer simulation of a-Si/c-Si heterojunction solar cell with high conversion efficiency”, Solar Energy, (2012) 393-7.
- [9] Friedman, J.: “Progress and challenges for next-generation high-efficiency multijunction solar cells”, Current Opinion in Solid State and Materials Science, (2010) 131-8.
- [10] Yamaguchi, M., Takamoto, T., Araki, K.: “Super high-efficiency multi-junction and concentrator solar cells”, Solar Energy Materials and Solar Cells, (2006) 3068-77.

[11] Gu, X., Yu, X., Guo, K., Chen, L., Wang, D., Yang, D.: “Seed-assisted cast quasi-single crystalline silicon for photovoltaic application”, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, (2012) 95-101.

[12] Fleischer, K., Arca, E., Shvets, IV.: “Improving solar cell efficiency with optically optimized TCO layers”, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, (2012) 262-9.

[13] Morikawa, H., Nishimoto, Y., Naomoto, H., Kawama, Y., Takami, A., Arimoto, S.: “Solar Energy Materials and Solar Cells”, 16.0% efficiency large area (10 cm x 10 cm) thin film polycrystalline silicon solar cell, (1998) 23-8.