

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Енергетика и процесна техника

Предмет: Електротехника са електроником

Број индекса: 173/2009

Бојан М. Димитријевић

Фотонапонски панели - технологије израде
завршни рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Проф. др Јасна Радуловић - ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог завршног рада кандидат треба да проучи препоручену, као и ширу литературу која се односи на технологије израде соларних ћелија и њихову ефикасност, те да на бази стеченог знања, опише различите типове соларних ћелија које су данас у употреби, правце даљег развоја, као и процесе њихове производње. Такође, кандидат треба да сачини анализу утицаја соларне фотонапонске технологије на животну средину, као и анализу трошкова фотонапонских технологија. Коначно, кандидат треба да изнесе перспективе развоја PV технологија у Републици Србији.

Препоручена литература:

- [1] Tyagi V.V., Nurul A.A., Rahim N.A., Jeyraj A., Selvaraj L.; Progress in solar PV technology: Research and achievement
- [2] Razykov T.M., Ferekides C.S., Morel D., Stefanakos E., Ullal H.S., Upadhyaya H.M.; Solar photovoltaic electricity: current status and future prospects. Solar Energy
- [3] Pavlović T., Milosavljević D., Radonjić I., Pantić L., Radivojević A., Pavlović M.; Possibility of electricity generation using PV solar plants in Serbia

Крагујевац, 25.04.2014.год.

ментор:
Проф. др Јасна Радуловић

Садржај

1.	Увод	1
2.	Технологије израде соларних ћелија	3
2.1.	Соларне ћелије од кристалног силицијума	3
2.1.1.	Соларне ћелије од монокристалног силицијума (c-Si)	3
2.1.2.	Поликристалне вафер Si соларне ћелије (pc-Si)	3
2.1.3.	pc-Si и c-Si соларне ћелије танког филма	4
2.1.4.	a-Si и nano-Si соларне ћелије танког филма	4
2.1.5.	a-Si соларне ћелије и њихове конфигурације	5
2.1.5.1.	Вишеспојне или тандем соларне ћелије	7
2.1.5.2.	Хибридне соларне ћелије	8
2.1.5.3.	Монолитни модули	9
2.1.5.4.	Флексибилне a-Si соларне ћелије	9
2.1.6.	Материјали соларних ћелија од кристалног силицијума и њихова својства	10
2.1.7.	Технике депозиције	12
2.2.	Халкогене соларне ћелије	13
2.2.1.	II-VI соларне ћелије	13
2.2.1.1	CdTe соларне ћелије	13
2.2.1.1.1.	TCO (transparent conductive oxide) предњи контакт	15
2.2.1.1.2.	CdS пролазни слој	15
2.2.1.1.3.	CdTe апсорбујући слој	15
2.2.1.1.4.	Ефекти третирања CdCl ₂	16
2.2.1.1.5.	Утицај Cd на животну средину	18
2.2.2.	I-III-VI ₂ соларне ћелије	19
2.2.2.1.	Материјали за I-III-VI ₂ соларне ћелије и њихова својства	20
2.2.2.2.	Конфигурације CIGS соларних ћелија	21
2.2.2.2.1.	Задњи електро контакт	22
2.2.2.2.2.	CIGS апсорбујући слој	22
2.2.2.2.3.	Buffer слој	22
2.2.2.2.4.	Предњи електро контакт	22
2.2.2.2.5.	Инкорпорација натријума у CIGS	23
2.2.2.2.6.	Депозиција и настајање(раст) CIGS апсорбујућег слоја	23
2.2.2.2.6.1.	Процес коевапорације	23
2.2.2.2.6.2.	Алтернативни процеси настанка CIGS апсорбујућег слоја	24
2.2.2.2.7.	Флексибилне CIGS соларне ћелије	25
2.3.	III-V соларне ћелије	28
2.4	<i>Quantum well</i> соларне ћелије	28
2.5.	<i>Quantum dot</i> соларне ћелије	29
2.6.	Соларне ћелије са фотоосетљивим пигментима	29
2.7.	Органске соларне ћелије	30
2.8.	CNT соларне ћелије	31
3.	Ефикасност соларних ћелија	32
3.1.	Фактори који утичу на ефикасност соларних ћелија	37
3.1.1.	Температура	37
3.1.2.	Прашина	39
3.1.3.	Соларно зрачење	42
4.	Утицај соларне фотонапонске технологије на животну средину	44
5.	Анализа трошкова фотонапонских технологија	48

6.	Перспектива фотонапонске конверзије у Републици Србији	52
6.1.	PVGIS и соларна мапа Републике Србије	56
6.2.	Производња електричне енергије различитим типовима соларних PV постројења снаге 1MW у Републици Србији	60
7.	Закључак	64
8.	Референце	65

Резиме

Разматра се технички напредак направљен у протеклих неколико година на пољу моно и поликристалних фотонапонских (PV) технологија, технологија танког филма базираним на Si, III-V, III-VI, I-III-VI₂ полупроводницима, као и нано PV технологија. Такође се описују различити типови соларних ћелија које су у употреби, као и процеси њихове производње. Тренутно PV тржиште има годишњи пораст од 35-40%. Ефикасност Si и GaAs соларних ћелија је веома близу предвиђених теоретских вредности. Моно и поликристалне силицијумске ћелије остају доминантна технологија са производном ценом модула од \$1.50 по W_p. PV танки филм је развијен као средство за смањење производне цене соларних ћелија.

Кључне речи: фотонапонска, процес производње, ефикасност, танки филм

Abstract

Technical progress made in the past several years in the area of mono- and polycrystalline, thin-film photovoltaic (PV) technologies based on Si, III-V, II-VI, and I-III-VI₂ semiconductors, as well as nano-PV is being reviewed. Different types of solar cells and manufacturing processes are also being reviewed. At present, the PV market is growing rapidly at an annual rate of 35-40%, Si and GaAs monocrystalline solar cell efficiencies are very close to the theoretically predicted maximum values. Mono- and polycrystalline wafer Si solar cells remain the predominant PV technology with module production cost around \$1.50 per peak watt. Thin-film PV was developed as a means of substantially reducing the cost of solar cells.

Keywords: photovoltaics, manufacturing process, efficiency, thin film

1. Увод

Данашњи живот се углавном заснива на коришћењу необновљивих извора енергије - угаљ, нафта, природни гас и нуклеарна енергија. Енормна потрошња енергије услед алармантног повећања популације планете доводи до критичног смањивања резерви фосилних горива и доприноси деградацији околине као и зависности и економског сиромашења земаља које не поседују налазишта ових типова енергената. Загађење животне средине је озбиљан проблем који се јавља као последица коришћења фосилних горива. У циљу смањења загађења животне средине употреба обновљивих извора енергије има велики потенцијал за подмиривање глобалних потреба за енергијом. Под обновљивим изворима енергије подразумева се енергија Сунца, ветра, воде, геотермална енергија, биомаса, биогас и слично. Главни циљ истраживања, развоја и коришћења обновљивих извора енергије у свету је очување постојећег еколошког баланса и обнављање истог у подручјима где је нарушен. Ради очувања и развоја људске врсте неопходно је установити еколошки баланс и применити брзу транзицију са необновљивих на обновљиве изворе енергије.

Познато је да међу обновљивим изворима енергије, соларна енергија је најперспективнији и најпоузданији енергетски извор у многим земљама тако да и владе разних држава пружају подстицај за изградњу соларних електрана. Главни разлози су ефикасније коришћење енергије у земљама које имају потенцијал за генерисање термалне и електричне енергије, смањење емисије "гасова стаклене баште", смањење увоза и коришћења фосилних горива, развој локалне индустрије и оварање нових радних места. Претварање соларне енергије у енергију која се може користити врши се на неколико начина. У суштини, топлота, кинетичка енергија, електрична енергија и хемијска енергија могу се обезбедити конверзијом соларне енергије. Фотоволтична (PV) конверзија је директно претварање сунчевог зрачења у електрицитет. Фотонапонски ефекат је први запазио француски физичар *Edmund Becquerel*, 1839. године, када је установио појаву напона при осветљавању две идентичне електроде од слабо проводљивих материјала. Прва практична фотонапонска ћелија је направљена од кристалног силицијума 1954. године у *Bell* лабораторији у САД-у, што представља зачетак развоја фотонапонске технологије. PV системи се састоје од ћелија које конвертују сунчево зрачење у електрицитет. Унутар сваке ћелије постоје слојеви полупроводничког материјала. Светлост која падне на површину ћелије ствара електрично поље између слојева и изазива проток електрицитета. Интензитет светла одређује количину електрицитета који генерише ћелија. Истраживање соларних ћелија базираних на полупроводницима (III-V и II-VI) је почело 1960. године а касније су установљене нове технологије ћелија базираних на поликристалном силицијуму (pc-Si) и танком филму, са циљем смањења материјалних трошкова и повећања производних капацитета.

Некада се соларна фотонапонска технологија користила углавном у свемирским програмима или на удаљеним локацијама које нису повезане на дистрибутивну ел. 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 које користе ел. 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 ПВ 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 ел. енергије. Најрепрезентативније компаније у области фотоволтичне индустрије су и водеће нафтне и технолошке компаније као што су: BP Amoco, Shell, Kyocera, Mitsubishi, 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. Ефикасност монокристалних силицијумских соларних ћелија показује значајан напредак из године у годину. Ефикасност је са 15% у 1950. повећана на 17% у 1970. и до данас континуирано повећавала вредност до 28%. У овом раду ће примарно бити разматран напредак соларне 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, и полупроводници III-V, II-VI, I-III-VI₂ групе и њихове легуре, материјали за соларне ћелије, ефикасност, фактори који утичу на карактеристике фотонапонских модула, преглед трошкова, анализа фотонапонске технологије и њен утицај на околину.

2. Технологије израде соларних ћелија

2.1. Соларне ћелије од монокристалног силицијума (c-Si)

За комерцијалне Si соларне ћелије користе се бором допирани монокристални вафери (око 400 μm дебљине) добијени у CZ процесу тј. процесу Чохралског (Czochralski). Ово је стандардни процес који се користи за потребе микроелектронике. CZ Si је без грешака у структури, али садржи нечистоће као што су кисеоник, угљеник и транзиционе металне јоне. Кисеоник уведен из реторте кварца је значајан за микроелектронику јер даје чврстину ваферима а може се користити и за спречавање стварања дефеката на површини вафера. Кисеоник реагује са бором и формира електро активне дефекте који ограничавају квалитет материјала после осветљавања (Green, 2001). Магнетно ограничавање се користи за смањење количине кисеоника приликом трансфера материјала из реторте у растопину. Si добијен у процесу зоне плутања (FZ) је најпожељнији за употребу код соларних ћелија јер има највишу ефикасност услед најмањих губитака рекомбинације. Може се произвести FZ Si са дужинама дифузије до 800 μm за $1\Omega\text{cm}$ материјала.

Ефикасност Si ћелија може се поделити у четири фазе, од којих свака фаза одговара новим решењима у технологији или ћелијској структури. У почетку "полупроводничког доба" (после открића биполарног транзистора 1948.) убрзан процес Si технологије омогућио је производњу Si ћелија са ефикасношћу од 15%. У другој фази (1970.) постигнута је ефикасност од 17% захваљујући достигнућима у микроелектроници (фотолитографија). Најзначајнији резултати су остварени у трећој (1980.) и четвртој фази (2000.) када је достигнута ефикасност од 25%. Ове ефикасности су омогућене побољшањем контаката и пасивизацијом површине ћелије, као и раумевањем значајне улоге механизма хватања светла у Si уређајима (Green, 2001). За Si ћелије 80 μm дебљине максимална ефикасност је 28,8%.

Главне карактеристике Si ћелија су забележили Wettling (1995.) и Green (2000.). Задњи метални контакти служе као ефикасан рефлектор. Као последица јавља се хватање светла у ћелији до 40 пута (Green, 2000.). За нискоквалитетне вафер *burried-contact* ћелије су мање битне јер волтажа отвореног кола је издоминирана рекомбинацијом у главним зонама ћелије пре него у зонама контаката. Локално дифузована ћелија са пасивним емитером (PERL) на F3 ваферу постиже ефикасност од 24,7% (волтажа отвореног кола $[V_{oc}]=706\text{mV}$, густина струје кратког споја $[J_{sc}]=42,2\text{ mA/cm}^2$ и фактор пуњења $[FF] = 0,828$) што је највиша пријављена ефикасност за a-Si соларну ћелију (Zhao, 2001.). Комерцијалне c-Si ћелије имају ефикасност од 15-22%. [1]

2.1.1. Поликристалне вафер Si соларне ћелије

pc-Si вафери могу се произвести на великим површинама. Плазма процесирани јефтини pc-Si се користи у облику високопроводне површине како би се повећала апсорпција светла. Процес познат као процес гравуре реактивних јона (*reactive-ion etching*) омогућава око 40% релативног повећања апсорпције. Важност текстурисања pc-Si за остварење пуног потенцијала је разматрана од стране Zolper-a (1989.) и Inomota-e (1996.). Произведена је pc-Si

Ћелија са текстуром ефикасности 19,8%. Главна хидрогенизација и пасивизација нитридима 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%.[1]

2.1.2. pc-Si и c-Si соларне ћелије танког филма

Si соларна ћелија танког филма 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 (Green, 2001). 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. Технологију је развио Basore (2004.) и она укључује директну депозицију силицијума на стакло, кристализацију у чврсту фазу приступом који се назива "crysaltine silicon on glass" (CSG) и производњу мини модула ефикасности 8%. Најефикасније Si базирани ћелије дате су у табели 1. [1]

Уређај	Ефикасност [%]	Референца
c-Si (вафер)	24.7	Green (2000a)
pc-Si (вафер)	19.8	Inomota et al.(1996)
c-Si (танки филм)	8.2	Zhao et al. (1998)
pc-Si (танки филм)	13.7	Hamakawa (1994)

Табела 1. Ефикасности соларних ћелија базираних на Si [1]

Континуалан poli-Si филм на стакленом субстрату је добио Ebil(2004.) користећи *in situ* алуминијумом индуковану технику кристализације на 430 $^{\circ}\text{C}$. poli-Si филм има просечну величину зрна 10-15 μm и одговарајући однос величине зрна и дебљине не већи од 20. Статус ове области разматрао је Roedern (2003.) Ћелија дебљине 2 μm демонстрирала је ефикасност од 10,7% (Yamamoto, 1999.). Ова област још је у почетној фази.[1]

2.1.3. a-Si и nano-Si соларне ћелије танког филма

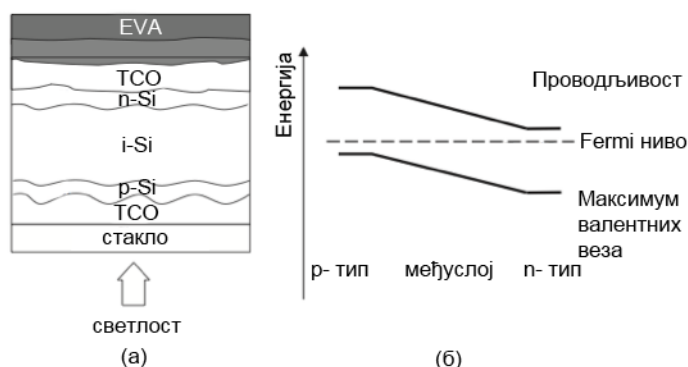
a-Si филмови обично садрже неколико процента водоника како би се пасивизирале слободне везе и повећао квалитет материјала. Плазма депозиција хемијских испарења (CVD) је у широкој употреби у производњи ових филмова. Конструкција ћелија оптимизује прикупљање електрицитета јер између n и p слоја постоји међуслој i чија је дебљина довољна да се прикупи скоро сво светло које доспе на њега. Међутим, физичка својства i - слоја деградирају под осветљењем јер се Si-H везе кидају под видљивим светлом. Овај ефекат се не може елиминисати али се може смањити пажљивом контролом процеса депозиције, смањујући дебљину и слоја и коришћењем више спојева (Hamakawa, 1994). Највише ефикасности 13,7% и 9,8% остварене су пре много година на трослојним ћелијама и модулима (Guha, 1992). Ћелије у комерцијалној употреби имају ефикасност од 6-7% (Табела 2.). [1]

Компанија	Уређај	Величина [cm ²]	Ефикасност	Снага [W]	Датум
Mitsubishi Heavy	a-Si	15625	6.4	100	7/05
Global Solar Energy	CIGS	8709	10.2	88.9	5/05
Würth Solar	CIGS	6500	13	84.6	6/04
Unitd Solar	a-Si	9276	7.6	70.8	9/97
First solar	CdTe	6624	10.2	67.4	2/04
Shell Solar GMBH	CIS	4938	13.1	64.8	6/04
Sharp	nano-Si	4770	11	52.5	7/05
Antec Solar	CdTe	6633	7.3	52.3	6/04
Kaneka	a-Si	8100	6.3	51.0	7/04
Shell Solar	CIS	3644	12.9	46.8	5/05
Showa Solar	CIGS	3459	13.4	46.4	8/02
EPV	a-Si	7432	5.7	42.3	10/02

Табела 2. Преглед карактеристика модула танког филма различитих произвођача [1]

2.1.4. a-Si соларне ћелије и њихове конфигурације

Конвенционалне конфигурације p- и n-споја a-Si:H базираних соларних ћелија имају разна нераздвојива ограничења услед присуства великог броја дефектних стања чак и после процеса пасивизације.



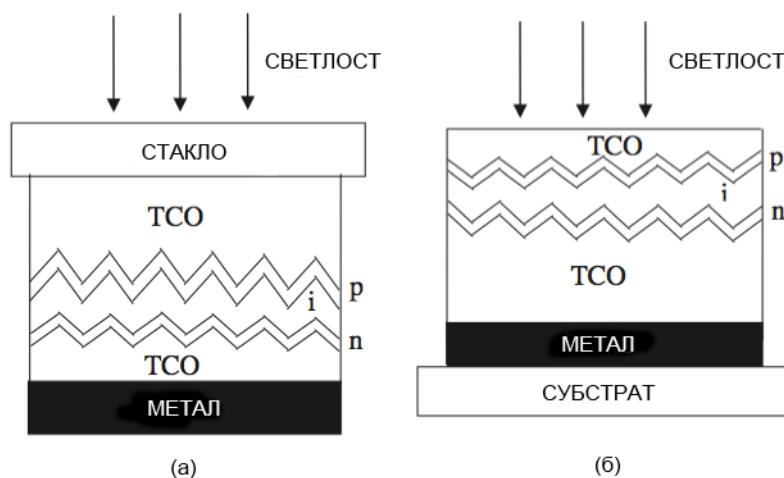
Слика 1. (а) Конфигурација једноспојне a-Si соларне ћелије, (б) Дијаграм енергеског процепца p-i-n соларне ћелије [1]

Допирање a-Si:H повећава ову концентрацију што смањује животни век слободних носача као резултат велике вероватноће рекомбинација и малих дужина дифузије од 0.1 μm . Услед тога соларне ћелије у конфигурацији p-n не функционишу. Основна структура a-Si соларне ћелије има конфигурацију "p-i-n" као што је приказано на Сlici 1а. која илуструје дебљину различитих слојева у конфигурацији када су приближени и паралелни једни на друге, са текстуром транспарентне проводне електроде за појачано хватање светла у a-Si слоју, о чему ће касније бити речи. p-i-n тип конфигурације (слика 1б.) увео је Carlson из RCA лабораторја, САД (Carlson и Wronski, 1976.), где се међуслој a-Si:H налази у "сендвичу" између n- и p- допираног слоја a-Si:H или његове легуре.

Услед кратког века трајања носача, допирани слој не доприноси генерацији фотострује (фотони заробљени у овом слоју доприносе оптичким губицима), али p- и n-слојеви стварају електрична поља дуж i-слоја. Ова електрична поља покрећу електроне у i-слоју у супротним правцима тако да се i-слој понаша као апсорбер у a-Si:H соларној ћелији. Електрично поље зависи од p- и n- допираних слојева као и од дебљине i-слоја. Зато што n- и p- слој не

доприносе стварању фотострује и не користе рекомбинацију генерисаних носача пре проласка кроз слој, веома је битно да се смањи њихова дебљина, која је обично око 10-30nm. Горња граница дебљине i-слоја је 0.5 μm јер дефекти пуњења смањују ефективно поље и зато ако је ширина i-слоја превазилази простор између, онда сувишна ширина се понаша као "мртав" слој без доприношења стварању фотострује. [1]

Предност аморфног силицијума (a-Si) је у томе што соларне ћелије могу настати у конфигурацији "субстрата" или "суперстрата", као што је приказано на Слици 2. У конфигурацији "суперстрата" ћелија настаје у p-i-n секвенци (почевши од p- слоја) на подлози која мора бити провидна (нпр. стакло), услед чега конфигурација није погодна за металне подлоге или непровидне полимерне подлоге.



Слика 2. (а) Конфигурација "суперстрата" (б) конфигурација "субстрата" [1]

Конфигурација "субстрата" настаје на било којој подлози, стаклу или флексибилним металним или полимерним фолијама. Настаје у конфигурацији n-i-p, почевши од n- слоја, а светлост улази почевши од последњег p- слоја.

Генерално, a-Si ћелије на стаклу су доступне у конфигурацији "суперстрата" почевши од слоја провидног проводљивог оксида (TCO), затим p-i-n слојева и још једног TCO слоја са крајњим рефлектујућим слојем. Водећа америчка компанија United Solar користи конфигурацију субстрата за *roll-to-roll* производњу соларних ћелија на нерђајућем челику и полимерним фолијама. Ћелије настају у секвенци n-i-p или p-i-n. Независно да ли је реч о конфигурацији "супстрата" или "суперстрата", светлост улази кроз p- слој јер он има вишу вредност енергетског процепа од i- или n- слоја (Rech и Wagner, 1999.).

Избор TCO материјала, као и електро и оптичка својства, битни су за електро контакте али и за ефикасност хватања светла у уређају. Хватање светла (*light trapping*) има велики значај за перформансе ћелије, док дебљина слоја је ограничена неким факторима, нпр. тањи i- слој је пожељан због мање деградације перформанси индукованих светлом. Дебљина међуслоја (i- слоја) је лимитирана на 300 nm, што није значајно за апсорпцију већег дела соларног спектра. Рефлексија се смањује антирефлекционим слојем на површини стакла

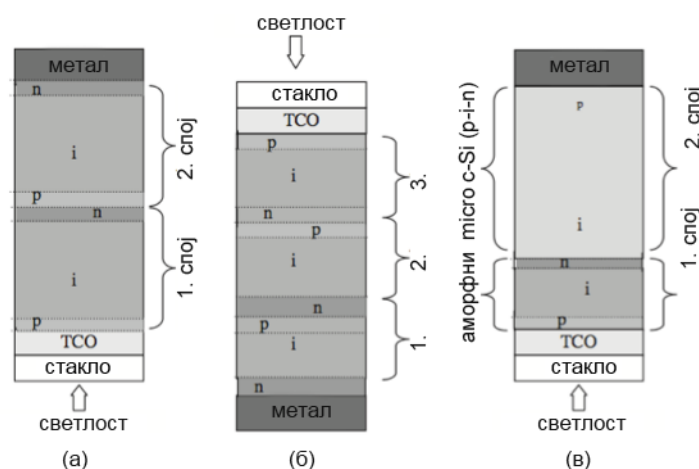
кроз коју светлост улази у PV модул и одговарајућом текстуром површине TCO која одовара таласној дужини светла. Вишеструко сакупљање светлости је остварено применом металних рефлектора. За детаљнији преглед TCO погледати Goetzberger et al. (2003.) Muller et al. (2004.), Granqvist (2003.), и Shah et al. (2004). TCO ка што су $\text{SnO}_x\text{:F}$, танки оксид индијума (ITO) и ZnO:Al имају широку примену у а-Si ћелијама. Неки од услова које морају да испуњавају :

- Стакло и предњи TCO морају да имају високу транспарентност (>80%) за цео спектар,
- TCO са отпором панела највише 10-15 $\Omega/\text{квдрату}$ (висока проводљивост) остварена пре повећавањем мобилности носача него концентрацијом носача како би се смањила апсорбција слободних носача преко регије која је близу инфрацрвене ,
- TCO и допирани силицијумски слојеви који не доприносе фотогенерисању и сакупљању морају бити што је могуће тањи и са што мањим апсорбујућим коефицијентима,
- TCO слојеви не смеју деградирати услед хемијске редукције током а-Si:H депозиције,
- Употреба задњих рефлектора са што је могуће мањим коефицијентом апсорбције.

Својства допираних слојева и међуслојева су опсежно проучавана, међутим хватање светла кроз различите структуре и шеме су релативно нови напредци који отварају простор за даље унапређивање перформанси уређаја (Muller et al., 2004; Granqvist, 2003.). [1]

2.1.4.1. Вишеспојне или тандем соларне ћелије

Деградација индукована светлом је значајан проблем а-Si технологије. Генерални ефекти центара за хватање и рекомбинацију су ограничили дебљину слојева уређаја, које последично ограничава апсорбцију светла. Паметна p-i-n конфигурација , која је некада имала велики потенцијал за остваривање велике ефикасности и смањење трошкова, онемогућена је овим условом нестабилности.



Слика 3.(а) двоспојна конфигурација "суперстрата";(б) троспојна конфигурација "субстрата";(в) микроморфни спој у конфигурацији "суперстрата" [1]

Темељно се ради на развоју тандем ћелија које користе двоструке и троструке спојнице са лимитом i - слоја од 300 nm а користе разне аранжмане за хватање светла. Једноспојне a -Si соларне ћелије се данас ретко користе услед ниске ефикасности и проблема са стабилношћу. Вишеспојне ћелије имају боље искоришћење соларног спектра и побољшану стабилност. Стабилна ефикасност (мале површине) једноспојних соларних ћелија које користе a -Si:H и његове легуре је 9,3%, двоспојне 12,4% и тростпојне 13% (Guha, 2004). Слика 3. шематски приказује вишеспојне структуре. Развој вишеспојних соларних ћелија је базиран на следећим стратегијама:

1. Прва стратегија је базирана на коришћењу само a -Si:H међуслојева. Двоспојне ћелије су развијене у FUJI Electronics & Co. (Јапан), Phototronic (Немачка) и др.. Стабилизована лабораторијска ефикасност је 8,5%, а комерцијално доступни модули имају ефикасност 5,5% (Diefenbach, 2005.).
2. Друга стратегија укључује коришћење a -Si и Ge легура са различитим комбинацијама енергетског процепа (мањим од 1,7 eV) за стварање тандем спојева, горња ћелија (1.7 eV; a -Si:H) - доња ћелија (1.5-1.3 eV; a -SiGe:H). United Solar (USSC) је развио тростпојну ћелију са ефикасношћу од 13% у конфигурацији супстрата и у комерцијалну продају пустио модул са ефикасношћу од 6,5%.
3. Трећа стратегија је уведена 1994.године од стране IMT (Неушател, Швајцарска) и базира се на концепту комбинације lc -Si:H (енергетски процеп 1.1 eV) и a -Si:H (енергетски процеп 1.7 eV) базираних ћелија. Ова комбинација има велики потенцијал услед великог смањења ефекта деградације светлости у тандем ћелијама (Shah et al., 2004.). Деградација се јавља једино у a -Si слоју који је оптимизован на 0.2-0.3 μm , док је lc -Si слој дебљине 1-2 μm . Kaneka Corporation (Јапан) је скоро достигла инцијалну ефикасност велике површине модула (910x455 mm) од 13,2% (Yamamoto, 2004.).[1]

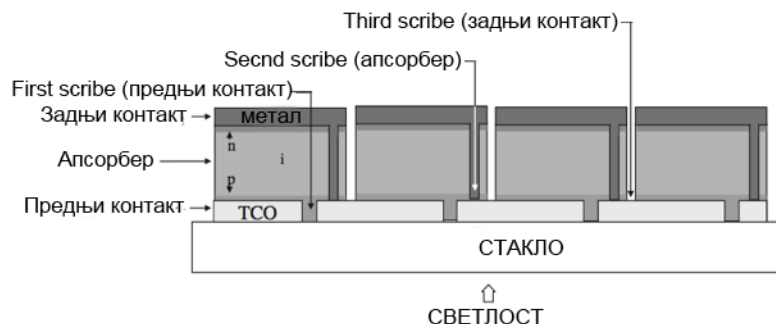
2.1.4.2. Хибридне соларне ћелије

a -Si ћелије се комбинују са нано кристалним ћелијама са силицијумским спојем и са другим типовима ћелија као што су CIGS. Још један значајан напредак у развоју је формирање дебело/танког (*thick/thin*) типа структуре интерфејса (хетероструктуре) између a -Si:H слоја и c -Si вафера. Њих је развила компанија SANYO из Јапана и назвала HIT ћелијама (хетеро спојне са међуслојем од танког филма). Њихова ефикасност је близу 21% за површину ћелије од 10100 mm². Ова технологија користи CZ силицијумски вафер n -типа као основу (апсорбер светлости) и нискотемпературни процес са структуром a -Si(p +)/ a -Si(i)/ c -Si(n)/ a -Si(i)/ a -Si(n +). Међуслој a -Si је веома битан јер је он спој са слојем c -Si на оба краја и обезбеђује пасивизацију и стабилност система. Ове ћелије су показале одличну стабилност и пилот производно постројење компаније SANYO је већ у изградњи.[1]

2.1.4.3. a-Si монолитни модули

Сви соларни модули захтевају већи број соларних ћелија међусобно повезаних електро контактима како би обезбедили напајање. Повезивање водова и енкапсулација ради заште од спољних утицаја неопходни су како би се објединила структура модула. Структура "суперстрата" има великих предности за остваривање монолитне електричне међувезе како би се формирао соларни модул јер подлога (стакло, полимер) има улогу изолатора.

Слика 4. илуструје шему монолитних међувеза соларног модула са структуром "суперстрата".



Слика 4. Дизајн монолитног модула са једноспојном a-Si ћелијом у конфигурацији "суперстрата" [1]

За међуповезивање ћелија користи се ласер у три фазе: прво се одваја предњи ТСО контакт, употребом ласера на a-Si слоју међусобно се повезују ћелије, за изолацију проводљиве задње електроде како би се остварила серијска веза међу ћелијама. Овај поступак отклања потребу за одвајањем и повезивањем ћелија чиме се штеди на времену и смањују трошкови процеса производње.[1]

2.1.4.4. Флексибилне a-Si соларне ћелије

Веома битна перспектива PV технологије танког филма су флексибилни модули за употребу у космичким условима, војној техници, интеграцији на кровове и фасаде зграда, ауто индустрији, потрошачкој електроници и сл..

Услед могућности производње у различитим бојама, облицима и величинама, ове флексибилне a-Si ћелије имају перспективу у подмиривању ниских и средњих потреба за ел. енергијом. Неке од истакнутих компанија које су тренутно укључене у производњу и развој флексибилних a-Si базираних модула приказане су у Табели 3.[1]

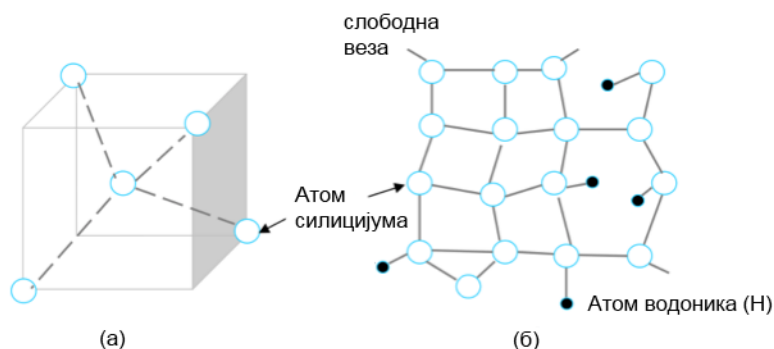
United Solar, Iowa Thin Films, FUJI и SANYO тренутно имају релативно висок степен производње док Flexcell и AKZO почињу са пилот производним постројењима за потрошачки оријентисано тржиште. Да би били конкурентни са c-Si модулима морају остварити ефикасност изнад 12% и дугорочну стабилност перформанси модула великих димензија, а како би остали лидер међу другим технологијама танког филма морају развити модул ниске цене и производни процес великог капацитета.[1]

Компаније	Технологија	Производња	Напомена
United Solar	троспојне SiGe легуре на нерђајућем челику RF-PECVD	линија од 30MW, RF-PECVD, модули и потрошачки производи	Модули 6.5%-6.8% Процес сечења-склапања Модули се ефикасношћу од 8% за војну употребу
VHF-Technology	Si на PEN, полиамид VHF-PECVD	Пилот производња и потрошачки производи	Ефикасност производа 4%
Iowa Thin-film technology	a-Si на полиамиду RF-PECVD	Пилот производња и потрошачки производи	Ефикасност производа 4%
FUJI Electric	a-Si/a-Si на полиамиду RF-PECVD	Пилот производња и потрошачки производи	Модули од 7% и активне површине 8% ефикасности
SANYO	a-Si на пластици RF-PECVD	Потрошачки производи	-
Canon	μс-Si:H/a-Si:H на нерђајућем челику (VHF-PECVD)	Развој	-
Akzo Nobel	Аморфни p-i-n на Al RF-PECVD	Развој/пилот производна линија	Субстрат се раствара после депозиције

Табела 3. Компаније које су тренутно укључене у производњу и развој флексибилних a-Si базираних модула[1]

2.1.5. Материјали соларних ћелија од кристалног силицијума и њихова својства

Нафтна криза раних седамдесетих година дала је подстицај истраживању и развоју PV технологије, а убрзо су се појавили нови концепти технологија танког филма. Први извештај о a-Si ћелијама танког филма појавио се 1976 (Carlson and Wronski, 1976.). a-Si је тренутно најпроучаванији и најзаступљенији материјал за соларне ћелије танког филма. Предност Si је његова обилна количина као ресурса и што пратећи трендове c-Si технологије, a-Si је током година постала индустријски зрела технологија (Rech and Wagner, 1999.). Кристални силицијум има атомске редове дужине и по неколико десетина милиметара у једном кристалу, док код аморфног силицијума та дужина не прелази 1 nm. a-Si има неправилну решетку са локалним квадратним везама и покиданим Si-Si везама као што је приказано на Слици 5.



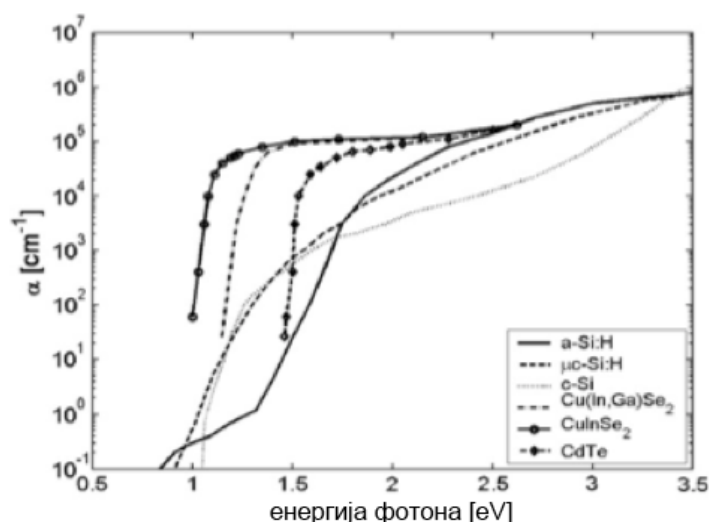
Слика 5. (а) Шема квадратних веза кристалног Si(а) и (б) мрежа a-Si:H која приказује покидане везе атома Si, које су пасивизирани атомом H [1]

Аморфни силицијум има неправилну решетку са квадратним везама, али и покидане Si-Si везе случајне оријентације. Ове покидане везе називају се висеће везе и доприносе стварању дефекта густине материјала.

Коефицијент апсорбције а-Si је два степена на скали виши од c-Si, услед чега захтева дебљину од неколико микрона за ефикасну апсорпцију и коришћење соларног спектра. Услед преобладајуће неравномерности у структури, високог броја (густине) локалних дефеката (10^{19} cm^{-3}) стварају се стања са енергетским процепом, изазивајући *Fermi level pinning*, услед чега се не може допирати материјал јер због дефектних стања која функционишу као замке за све слободне носаче генерисане у материјалу. Један од ефикасних начина за превазилажење овог проблема је пасивизација незасићене везе а-Si помоћу атома мањег пречника које могу да продру у кристал и вежу се за слободне везе. Ово се ради додавањем 5-10% водоника у а-Si, и тада се водоник везује за покидане везе услед своје високе активности што смањује број (густину) незасићених веза са 10^{19} cm^{-3} на 10^{15} cm^{-3} . При овој густини могуће је допирање, тако да се материјал може направити као p- или n- тип коришћењем бора или фосфора, респективно. Густина дефеката и поред допирања остаје висока, тако да се *Fermi* ниво не помера много већ остаје у главном са добором и утиче на нивое у центру међупростора у случају допирања n- типа.

Аморфни силицијум се може посматрати као легура силицијума и водоника. Дисторзија дужине веза и углова веза после пасивизације водоником модификује дистрибуцију дефеката и за последицу има промену електро и оптичких својстава. Многе студије су показале да промена у условима наслага водородом може се добити разређени монокристални силицијум (lc-Si) различитих својстава (Vetterl et al., 2000.; Guha et al., 1981, 1986; Matsuda et al., 1986). [1]

Слика 6. даје упоредни приказ апсорбционих коефицијената а-Si:H, c-Si и lc-Si, као и других PV материјала.



Слика 6. Оптичка апсорпција и енергетски процеп c-Si и других материјала за соларне ћелије танког филма [1]

Absorbtion bands који се појављују у ниским енергетским вредностима за a-Si:H и lc-Si су приписани великој густини *mid-gap* дефеката и *band-tail* стања. Коефицијент апсорбције (α) монокристалног Si вафера и микрокристалног филма Si имају исти почетак транзиције, али lc-Si има вишу регију ниских таласних дужина. Дебљи слој lc-Si је потребан за ефективну апсорбцију соларног спектра. Комбинација два микрокристална и једног слоја аморфног силицијума је прикладна за апсорбцију највећег дела спектра у танким слојевима.

Прву успешну примену овог метода остварио је IMT (Neuchatel, Швајцарска), а потом и неколико других групација је успешно направило a-Si/lc-Si тандем (микроморфне) соларне ћелије. На енергетски процеп a-Si може се утицати додавањем O, C и Ge како би се произвели аморфни материјали са мањим или већим процепом (нпр. додавањем C и Ge у a-Si, енергетски процеп од 2.2-1.1 је достижан, али са инфериорним електро својствима).

У Табели 4. дата је листа легура са њиховим вредностима енергетског процепа. Одговарајући a-Si:H и a-SiGe:H за соларне ћелије има вредност енергетског процепа од приближно 2.0 и 1.3 eV, респективно. [1]

Материјал (полупроводник/легура)	Eg min [eV]	Eg max [eV]
c-Si	1.1	1.1
micro c-Si:H	1.0	1.2
a-Si:H	1.7	1.8
a-SiC:H	2.0	2.2
a-SiGe:H	1.3	1.7
a-Ge:H	1.1	-

Табела 4. Вредности енергетског процепа (E_g) одређених легура a-Si:H са германијумом и угљеником који се користе у вишеспојним соларним ћелијама [1]

2.1.6. Технике депозиције

Можда и најбитније својство a-Si материјала је широк опсег температура током депозиције (од собне температуре до 400 °C). Депозиција на собној температури дозвољава коришћење разних супстрата (стакло, метал, пластику) а посебно коришћење јефтине PET пластике, која може дати значајну предност у смањењу цена модула. Постоје различити процеси за депозицију a-Si:H материјала. Силан (SiH_4) који је у суштини гас, користи се у свим процесима који користе CVD методу, али искључује распршивање и не преферира се за активне полупроводничке слојеве у a-Si:H. Типична температура депозиције за a-Si:H мора бити испод 500 °C, у супротном инкорпорација водоника у слој танког филма није могућа. На ниским температурама субстрата пред-дисоцијација SiH_4 се не одвија лако. Слојеви настали на собним температурама имају нижу ефикасност и квалитет. Услед тога користи се плазма за дисоцијацију силан гаса. Два најчешће коришћена метода за растварање су плазмом појачана депозиција хемијских испарења (PECVD) и *glow discharge* (CVD). Користе се 13.56 MHz фреквенције побуде плазме са оптималном по-будом снаге плазме и притиском 0.1-1 mbar. SiH_4 увек се разређује водоником (10%) када се користи за таложење a-Si:H, где повећање концентрације резултује стварањем lc-Si:H

слоја са мањим степеном раста. Типична стопа раста за a-Si ћелије је 1Å/s и резултује дугим временом депозиције (50 минута за слој од 0.3 μm a-Si:H и 5 сати за слој 1.8 μm Ic-Si). 3 Å/s или више је пожељно у производним постројењима. За постизање високог степена брзине депозиције тренутно се развијају нове технологије засноване на бази врло високих фреквенција (VHF), микроталаса и плазме високог притиска. Стопа раста од 10Å постигнута је у лабораторијским условима. Алтернативне методе депозиције коришћењем *hot wire CVD* технике (HVCVD), електронског циклотрон ре-зонантног реактора (ERC) као и комбинација HWCVD и PECVD. Детаљан опис техника дали су Lechner и Schade (2002.), Sopori (2003.), Deng и Schiff(2003.).[1]

2.2. Халкогене соларне ћелије танког филма

Елементе 16. групе периодног система називамо халкогеним елементима. Назив халкогени потиче од грчких речи *chalkos* (руда) и *genesis* (постанак). У слободном преводу то би значило "оно што сачињава руде". Почетком 1960. година развијене су $\text{Cu}_x\text{S}-\text{CdS}$, $\text{Cu}_x\text{Se}-\text{CdSe}$, and $\text{Cu}_x\text{Te}-\text{CdTe}$, соларне ћелије танког филма. Производни процес ових ћелија био је релативно једноставан. Танки филмови CuS , CuSe и CuTe су произвођени процесом депозиције хемијских испарења. Cu_xS , Cu_xSe и Cu_xTe слојеви су произвођени потапањем CdS , CdSe , и CdTe филмова у течни раствор CuCl на неколико секунди (Cusano, 1963.; Leburn, 1966.). Остварена је ефикасност ових ћелија од преко 10%. Међутим, истраживање и развој ових ћелија су обустављени услед деградације халкогених бакарних слојева (дифузија бакра). [1]

2.2.1. II-VI соларне ћелије

2.2.1.1. CdTe соларне ћелије

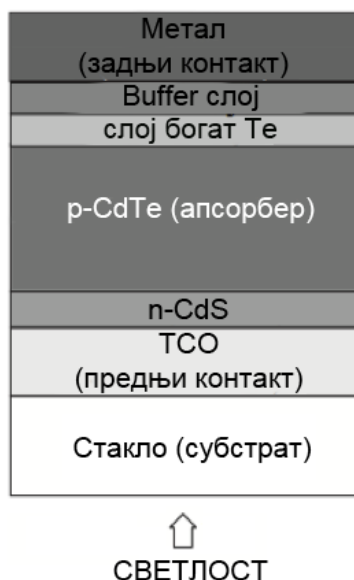
Својства	III-VI	I-III-VI ₂
Апсорбциони коеф. [cm^{-1}]	10^4-10^5	10^5
Дебљина слоја, [μm]	2-5	2-3
Енергетски повор [eV]	0-3.7 (ZnS)	1.05 (CIS)-3.49(CuAlS ₂)

Табела 5. Основна својства II-VI и I-III-VI₂ филмова соларних ћелија [1]

Кадмијум телурид (CdTe) је материјал са директним енергетским процепом. Енергија енергетског процепа CdTe од 1,еV пожељна за претварање соларног спектра зрачења у електрицитет за једноспојне соларне ћелије. Његова висока вредност оптичке апсорпције (10^5 cm^{-1}) проводљивост p- типа чине га идеалним материјалом за примену у PV техници. Има "zincblende" кристалну структуру и једноставни фазни дијаграм јер његови састојци имају висок притисак испаравања. Депозиција слојева CdTe може се вршити разним процесима, а једињење се може релативно лако стварати у стохиометриском облику на температурама преко 400 °C.

Као и код других II-VI материјала, електро допирање је контролисано субституцијом атома на празна места. Иако је контрола допирања n- типа релативно једноставна, допирање p- типа CdTe је комплексно услед ефекта компензације. Уобичајена структура CdTe соларне ћелије танког филма се састоји од CdTe апсорбујућег слоја p-типа и пролазног слоја CdS n- типа који

формира хетероспој. Тренутне структуре соларних ћелија су базиране на уређају приказаном на Слици 7., а различите методе производње CdTe филмова дате су у Табели 6.



Слика 7. CdTe/CdS соларна ћелија у конфигурацији "суперстрата" [1]

Различите методе производње CdTe филмова за соларне ћелије	
1. Термална евапорација	8. Прскање
2. Електродепозиција	9. "Hot-wall" евапорација
3. Пиролиза прскањем	10. "Ion-assisted" евапорација
4. Депозиција хемијских испарења	11. Метал-органска хемијска депозиција испарења
5. Сублимација на малој удаљености	12. Епитаксија молекуларним зраком
6. Хемијско молекуларна зрачна депозиција	13. Депозиција транспортованим испарењима
7. Screen printing	14. Депозиција атомског слоја

Табела 6. Различите методе производње CdTe филмова за соларне ћелије[1]

Ефикасност CdTe ћелија које су произведене технологијама из Табеле 10. износи 10%, а највиша до сада остварена ефикасност је 16,5 % (Wu et al., 2001). CdTe соларне ћелије могу настати у конфигурацији "субстрата" или "суперстрата", али највише ефикасности су остварене у конфигурацији "супертрата". Слика 19. илуструје шематски приказ CdTe соларне ћелије настале на стакленој подлози превученој са TCO у конфигурацији "суперстрата". Стаклена подлога може бити јефтино стакло за температуре процесирања испод 500 °C или боросиликат за температуре процесирања преко 500 °C. Конфигурација "субстрата" захтева депозицију CdTe на металне фолије или стаклене подлоге превучене металом. Међутим, лош квалитет задњег контакта је ограничавајући фактор у овој конфигурацији јер CdTe/CdS спој се остварује на високим температурама при којима мејудифузија деградира CdTe задњи контакт. Услед тога тежи се ка конфигурацији "суперстарта" за CdTe соларне ћелије. У конфигурацији "суперстрата", слојеви

TCO, CdS, CdTe и задњи метални контакт секвенционално настају на стакленој подлози. Антирефлексиона превлака на задњој страни стакла се обично примењује ради смањења рефлексије. Случајна светлост која прође кроз стакло, TCO и CdS је апсорбована у CdTe слоју где ствара електронске парове који доприносе стварању PV струје.[1]

2.2.1.1.1. TCO (Transparent Conductive Oxide) предњи електро контакт

Високотранспарентни проводљиви TCO слој n- типа са електронским афинитетом испод 4.5 eV неопходан је како би се створио омски контакт и остварило поравнање везе (*band alingment*) са n-CdS. Већина TCO, као што су: $\text{SnO}_x\text{:F}$, ITO, ZnO:Al и Cd_2SnO_4 (кадмијум станат) користе се ради стварања високоефикасних соларних ћелија (>12%). Највишу ефикасност (16,5%) остварио је Wu (2001.) слагањем слојева отпорног Zn_2SnO_4 и проводљивог Cd_2SnO_4 . Иако један слој TCO производи високоефикасне ћелије, комбинација два слоја ниско и високо отпорног TCO се обично користи као заштита од "скретања електрицитета" изазваног малим рупама у CdS слоју. Најчешће употребљиван TCO у индустријској производњи је $\text{SnO}_x\text{:F}$. ITO предњи контакт је осетљив на третман прекаљивањем. Повећање електронског афинитета преко 4-5eV може бити изазвано оксидацијом или третирањем пост депозицијом, међутим ITO има високу цену и уколико је могуће треба бити избегаван.[1]

2.2.1.1.2. CdS пролазни слој

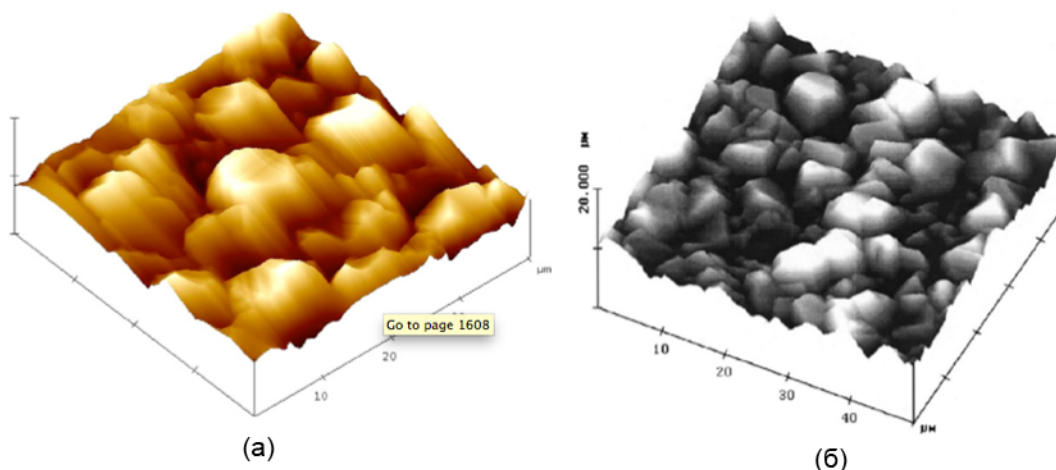
CdS има вредност енергетског процепа од 2,4 eV и електро проводљивост n- типа, формира хетероспојеве са CdTe. Типична дебљина слоја CdS у соларним ћелијама креће се око 10-500 nm. Током високо-температурних корака у производњи дебљина овог слоја може се смањити услед међудифузије са CdTe. Ради смањења губитака услед апсорбције фотона и доласка максималног броја истих до CdTe слоја, пожељна је дебљина слоја CdS од 10-50 nm. Међутим, мора се направити компромис јер мала дебљина CdS слоја може водити ка ниском напону отвореног кола и малом фактору пуњења. CdS слој може се створити различитим методама као што су: депозиција у хемијском купатилу (CBD), испаравање, сублимација, транспорт испарења, метал органска VCD (MOVCD), и прскање (McCandless i Sites, 2003; Romeo et al., 1999). Највећи напредак код овог типа ћелија направљен је смањивањем дебљине CdS слоја.[1]

2.2.1.1.3. CdTe апсорбујући слој

Танки филм CdTe је најбитнији део ћелије јер апсорбује соларно зрачење и доприноси стварању фотогенерисане струје. Услед директног енергетског процепа потребна је дебљина материјала од само 2 μm како би се апсорбовао најкориснији део соларног спектра. Још једна предност CdTe технологије је флексибилност захваљујући методама производње (Compaan, 2004; Mathew et al., 2003). Слојеви CdTe могу настати разним вакуумским и невакуумским

методама класификованим у нискотемпературне и високо-температурне процесе (Табела 10.)

Неке од често коришћених високотемпературних метода су: сублимација на уском простору (CSS), транспорт испарења (VT), депозиција транспортаних испарења (VDT) и депозиција изнад 500 °C. Методи као што су: електродепозиција (ED), "screen printing" (SP), хемијско прскање (CS), вакуумска евапорација (HVE) и прскање са температуром депозиције испод 450°C су класификовани као нискотемпературни процеси. У зависности од метода депозиције, типична дебљина CdTe слоја је 2-6 μm .



Слика 8. Морфологија CdTe филма произведеног (а) хемијском депозицијом молекуларним зраком и (б)сублимацијом на уском простору [1]

На слици 8а. (Razykov et al., 2009.) и 8б.(Romeo et al., 2000.) приказана је морфологија CdTe филмова произведених најефикаснијим поцесом CSS и хемијско молекуларни процес депозиције.

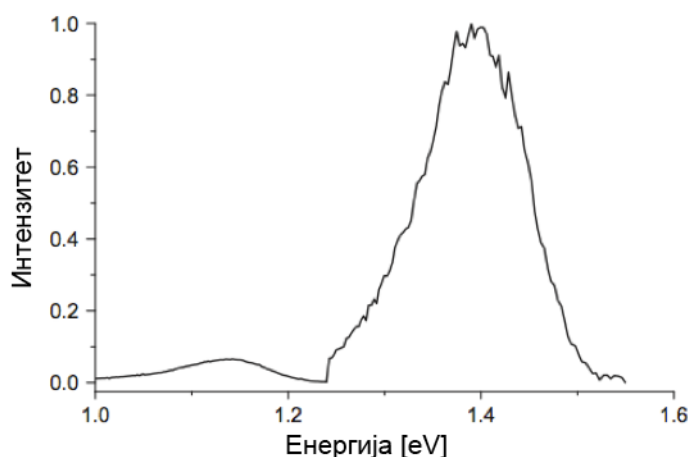
Упркос свим проблемима, изванредни резултати су остварени у послењих пар година у области CdS/CdTe соларних ћелија (von Roedern et al., 2005.; Compaan, 2004.; Schock и Phisterer, 2001; Razykov et al., 2004). Ефикасност од 15-16% постигло је неколико истраживача (Britt и Ferekides, 1993; Aramoto et al., 1997; Wu et al., 2001)., а ефикасност од 10,6% и 11,2% остварена је на веома танком слоју CdTe од 0,55 μm и 1 μm , респективно (Amin et al., 1999). CdTe ћелија на пластичној фолији има ефикасност од 11,4% (Uradhuana et al., 2007). Тренутна цена CdTe модула који производи First Solar, САД је 0,75\$/W. [1]

2.2.1.1.4. Ефекти третирања CdCl₂

Депозиција CdTe/CdS има слаба PV својства и захтева специјални третман прекаљивања који значајно повећава ефикасност ћелије (фактор побољшања 2-3). Ово се постиже излагањем CdTe/CdS наслага третману загревања у Cl-O атмосфери на температурама од 350 до 600 °C. Овај поступак је назива "CdCl₂ третирање" или "процес активирања спојева". После процеса прекаљивања приметно је значајно повећање величине зрна (у зависности од иницијалне величине зрна) у слоју CdTe који је настао нискотемпературним методама депозиције. Код високотемпературних процеса настајања постоји

тенденција $\text{CdS}_x\text{Te}_{x-1}$ формације да претвара мала зрна CdS у CdTe услед међудифузије на споју и приметан је низак раст зрна после третмана активације. Стабилан CdS/CdTe спој може се остварити за дифузију атома сумпора од 6%. У условима неравнотеже дифузија сумпора смањује дебљину CdS филма стварајући рупе и евентуелно води до кратких веза кроз спојницу. Ово је критични проблем за CdTe соларне ћелије који ограничава примену тањих слојева CdS ради смањења губитака оптичке апсорбције.

Термичко третирање слоја CdS се често користи како би се спречила међудифузија сумпора. Формирање $\text{CdS}_x\text{Te}_{x-1}$ после активације помаже у смањењу грешака решетке међу CdS и CdTe али је занемарљиво у односу на побољшања у електро променама које изазивају Cl , O и S . Поред смањења густине грешака слагања и дислокација постоји и опште повећање у концентрацији плитких пријемника у CdTe који воде повећаном р-допирању после прекаљивања. Регије граница зрна постају р- допирани услед склоности ка дифузији границе зрна и сепрегацији Cl и O . Као резултат је измерена повећана ефикасност сакупљања носача напона и вредност тог фактора је 2-3. Типичан нискотемпературни спектар фотоосветљења је приказан на Слици 9. (Razykov et al., 2009). [1]



Слика 9. Спектар фотоосветљења на 20К за CdTe филм ($\text{Cd}/\text{Te}=1.0$) [1]

Peak на 1.4 eV је услед прелаза електрона из проводљиве везе на ниво пријемника $E_v+0.15\text{eV}$ и може допринети упражњеном месту атома кадмијума V_{Cd}^- или интерстицијалним атомима телура Te_i^- у CdTe филму. Пик на 1,12eV је вероватно изазван рекомбинацијом електрона из дубљег нивоа донора $E_c-0.48\text{eV}$ и слободним местима у валентној вези. Донорски ниво може допринети слободним местима атома телура V_{Te}^{++} или интерстицијалним атомима кадмијума Cd_i^{++} . После излагања третману CdCl_2 структура филма остаје непромењена. PL веза лоцирана на 1,41eV је још увек присутна, међутим, веза на 1,12eV је исчезла. Један од закључака је да је веза на 1,12eV повезана са празним местом атома телура кога је заменио кисеоник приликом CdCl_2 третмана (Razykov et al., 2007). Ово може бити главни разлог повећања проводљивости р- CdTe које се јавља након CdCl_2 третмана. Ови резултати показују да CdCl_2 третман не води увек ка повећању зрна али има утицај на тачкасте грешке у CdTe филму. [1]

2.2.1.1.5. Утицај Cd на животну средину

CdTe и CIGS технологије танког филма показале су изванредан потенцијал за исплативу конверзију соларне у ел. енергију. Међутим, ове технологије, а посебно CdTe, имају у свом саставу токсичне елементе који се налазе као стабилна једињења у модулима танког филма. Постављена питања тичу се опасности везаних за материјале који се користе током процеса производње CdTe/CdS и CdS/CIGS соларних ћелија као и ризика током експлоатационог процеса ових модула. Питања опасности по околину и здравље људи CdTe соларних модула интензивно су проучавана од стране неколико независних агенција, укључујући и националне лабораторије у Европи и САД (Fthenakis et al., 1999).

CdTe технологија нема перспективу без употребе Cd међутим постоје неколико могућности у CIGS технологији елиминацијом слоја CdS, али остаје да се испита шта би заменило тај слој. Иницијални успех је постигнут за ћелије ефикасности 16,18,8% и модуле од 13,4% који су развијени са алтернативним "Cd-free" *buffer* слојевима (Kusihua, 2004).

Везано за питања опасности и перцепције Cd, Ftheniakis (Brookhaven National Laboratory, USA) и Yweibel (NREL, USA) представили су детаљан преглед својих студија 2003. године на састанку у Националном центру за преглед PV програма, потврђујући да су PV панели бенигни, са нултом емисијом и без опасности по здравље. Студија је указала на неколико тачака које треба размотрити:

Кадмијум је нуспродукт ископавања руда цинка, олова и бакра. ZnS (сфалерит) као главна сировина из које се добија Cd садржи само 0,25%. Кадмијум се испушта у околину из фосфатних ђубрива, горива, металуршких и процеса ископавања руда, производње цемента, одлагања металних производа. Емисије из искоришћених Cd производа, нпр. NiCd батерије, минимално доприносе излагању људи јер се Cd налази у затвореним структурама. Највећа изложеност Cd је услед узимања хране а томе највише доприноси пољубравање, муљ из канализације, стајско ђубриво и таложење из атмосфере. Дуготрајна изложеност елементарном кадмијуму је канцерогена, има утицај на бубреге и кости, и о томе постоје ограничена сазнања из токсикологије. Међутим једињење CdTe је доста стабилно и мање раствориво од елементарног Cd и зато је и много мање опасно. Емисија гаса Cd током производње CdTe праха у електролитичким рафинеријама износи 0.001%, што одговара 0,01g/GWh.

Једина потенцијална опасност може се јавити услед избјања пожара. Процењен је квантитативни максимум температуре ватре на 900 °C што је ниже од температуре тачке топљења Cd (1041°C). Поред тога, притисак паре CdTe на 800 °C износи 0,003 атмосфера, тако да је ризик минималан када се Cd једном затвори (енкапсулира) између две стаклене плоче.

Главни закључак ове студије је да су ризици везани за CdTe технологију минимални. Свака производња енергије са собом носи директне или индиректне опасности, али оне везане за CdTe не треба да представљају проблем. [1]

Донети су следећи закључци:

- Cd се прозиводи као нуспродукт Zn и може се или употребити у корисне сврхе или се испустити у околину, изазивајући могуће ризике по здравље,
- Употреба CdTe у PV техници је много безбеднија него у другим областима у којима се користи,
- CdTe технологија користи кадмијум 2500 пута ефикасније него у NiCd батеријама,
- Ризици по здравље су минимални,
- Током PV производње не постоји никаква емисија,
- Ризик од емисије приликом избијања пожара је минималан,
- CdTe технологија и модули су безбедни и не представљају никакав ризик.

2.2.2. I-III-VI₂ соларне ћелије

Међу I-III-VI₂ једињењима CuInSe₂ има најповољнија својства за производњу соларних ћелија танког филма (табела 5.):

- веома велики коефицијент оптичке апсорбције (105cm⁻¹) и последично веома танак слој (0,1-0,3μm) је неопходан за функционисање,
- могућност промене типа проводљивости (p- или n-) и отпорности,
- формирање чврстих раствора (различитих вредности енергетског процепа) дозвољава манипулисање вредностима енергетског процепа и производњу високоефикасних соларних ћелија танког филма.

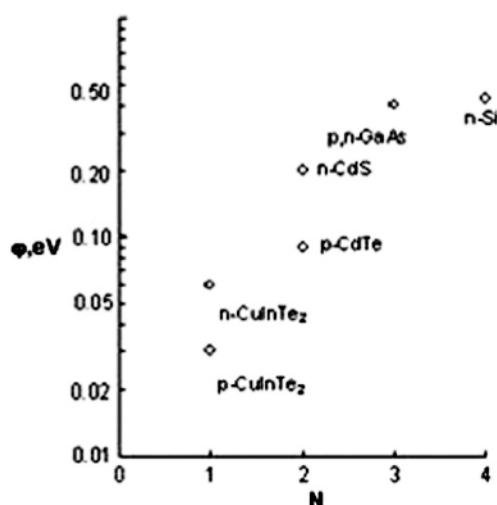
Вредност енергетског процепа од 1 eV је превише ниска за употребу у соларним ћелијама и зато се обично индијум замењује легурама индијума или галијума - Cu(In,Ga)Se₂ - како би се повећала вредност енергетског процепа и волтаже отвореног кола. Различите методе производње ових филмова дате су у Табели 7.

Различите методе производње Cu(In,Ga)Se ₂ филмова	
1. Коевапорација	6. Хибридна евапорација/прскање
2. Електродепозиција/селенизација	7. Реактивно прскање
3. Снопом електрна/селенизација	8. Напрскавање
4. Хибридна селенизација	9. Пренос испарења на блиском простору
5. Селенизација прскањем	

Табела 7. Различите методе производње Cu(In,Ga)Se₂ филмова [1]

Најбољи резултати производње остварени су методом коевапорације. Светски рекорд у ефикасности од скоро 20% CIGS ћелија је остварен од стране NREL (Ramanathan et al., 2003; Repins et al., 2008). CIGS ћелија на металној фолији остварила је ефикасност од 17,5% (Upadhuaua et al., 2007). У условима употребе у великим размерама на Земљи, овај материјал показује извесне недостатке јер су индијум и галијум веома лимитирани као ресурс. Заменом галијума алуминијумом остварна је ефикасност од 17% за Cu(In,Al)Se₂ ћелије (Marsillae et al., 2002). Треба напоменути да процес пасивизације (кључни корак у a-Si и pc-Si технологијама) није неопходан код II-VI и I-III-VI₂ ћелија танког филма услед ефекта самопасивизације (Слика 12., Razykov, 1996.). Изванредни

резултати остварени су употребом полимерних субстрата (Upadhuaua et al., 2007.). [1]



Слика 10. Зависност висине енергије баријере међу зрнима од валентности нисковалентних елемената различитих поликристалних полупроводника [1]

2.2.2.1. Материјали за I-III-VI₂ соларне ћелије и њихова својства

Полупроводничка једињења из I-III-VI₂ групе у периодном систему елемената, као што је бакар-индијум-диселенид (CIS), бакар-галијум-диселенид (CGS), и њихова легура бакар-индијум-галијум-селенид (CIGS) се називају халкопиритима због своје тетрагоналне кристалне структуре. Променом стохиометрије и спољашњим допирањем мења им се електро проводљивост. Међутим за употребу код соларних ћелија погодна су једињења p- типа оскудна бакром. У зависности од односа [Ga]/[In+Ga] вредност енергетског процепа код CIGS може да варира од 1,04 до 1,68 eV. Тренутни високоефикасни уређаји имају вредност енергетског процепа 1,2-1,25 eV што одговара односу [Ga]/[In+Ga] између 20% и 30%.

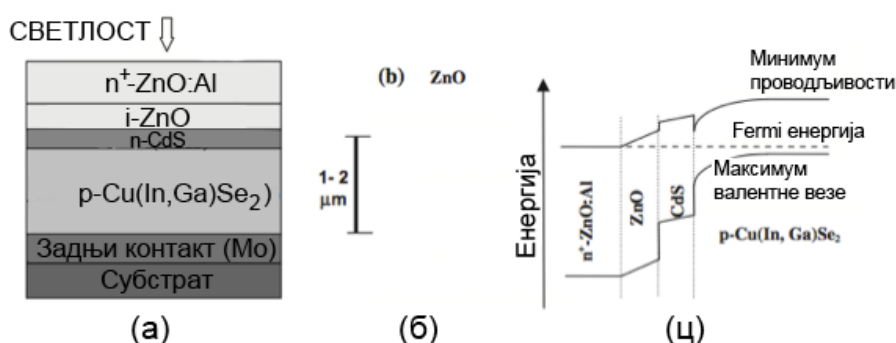
Други халкопирити као нпр. CuInSe₂ и CuInTe₂ имају знатно нижу ефикасност од CIS. HMI Berlin је развио CuInSe₂ ћелију са ефикасношћу од 11,4%. Прва CIS ћелија од монокристалног материјала са ефикасношћу од 12% развијена је од стране Wagner-а (1974), а прва соларна ћелија танког филма ефикасности 4% од стране Kaumerski(1976) процесом испаравања CuInSe₂ материјала. Први значајан пробој на пољу CIS технологије танког филма остварен је од стране Boeing корпорације (САД) где су користили евапорацију елемената из три извора Cu, In, Se и остварили ефикасност од 5,7% 1980.године, преко 10% 1982.године. Овај успех, упркос сложености процеса, јасно је показао потенцијал овог материјала. 1987. године Arco Solar (САД) је повећао ефикасност ћелија на 14% коришћењем различитих процеса депозиције CIS где су извршили селенизацију металних слојева у H₂Se атмосфери. Значајна побољшања ефикасности остварена су од стране EURODIS конзорцијума и NREL (САД) који држе рекорд ефикасности од 19,5% (Ramanathan et al., 2003). Прву индустријску производњу CIS модула започео је Siemens (касније Shell Solar) базирану на технологији Arco Solar-а. Wurth Solar и Global Solar започели су производњу CIS модула коевапорационим методама. Фазни дијаграм тројног једињења описан је у псеудобинарном фазном

дијаграму. Једнофазни халкопирит CuInSe_2 постоји при малом недостатку бакра. Једињења богата бакром нису погодна за употребу у PV уређајума. Поред сложене кристалне структуре и мултикомпонентног система, својства материјала за PV релевантна једињења су толерантна на грешке и на њих значајно не утичу мале девијације стохиометрије у области мањкавој бакром. Површине и границе зрна CIGS једињења лако се пасивизују што резултује високоефикасним соланим ћелијама чак и код материјала код којих је величина зрна мања од микрона. PV CIGS материјал мањкав бакром има тетрагоналну кристалну структуру са слободним местима (ваканцијама) и интерстицијама и услед тога материјал има својства да се сам поправља (*selfhealing*) услед релаксације коју изазивају јони Cu који су у интеракцији са ваканцијама. Дефекти у CIGS изазвани спољним утицајима, нпр. радијација, су моментално исправљени. Ово је велика предност CIGS материјала која води до високо стабилних соларних ћелија. Међутим мора се водити рачуна о адекватној енкапсулацији уређаја због могућих влажних радних услова, јер у супротном случају јавља се деградација електро контаката (TCO или MO) услед дејства влаге. Стабилност адекватно затворених CIGS соларних ћелија није проблем као што је доказано разним теренским испитивањима које су спровели ZSW, Shell и NREL. CIGS је толерантан на радијацију из свемира, супериорнији је од Si и GaAs монокристалних ћелија а незнатно инфериорнији од CdTe. [1]

2.2.2.2. Конфигурације CIGS соларних ћелија

CIGS соларне ћелије могу настати у конфигурацији "субстрата" и "суперстрата", али само конфигурација "субстрата" обезбеђује настанак високоефикасних ћелија услед повољних услова производног процеса (Слика 11.) Међутим, она захтева додатни енкапсулациони слој и/или стакло које ће штитити површину ћелије, који нису неопходни у конфигурацији "суперстрата".

Структура "суперстрата" је проучавана 1980. година али њихова ефикасност је испод 5%. Значајни напори су уложени да се ефикасност повећа на 13%. То је могуће увођењем недопингованог ZnO уместо CdS бафер слоја и коевапорацијом Na_xSe током CIGS депозиције. Развој двостране (*bifacial*) соларне ћелије показује значајан напредак (Nakada et al., 2004). [1]



Слика 11. (а)CIGS ћелија у конфигурацији "субстрата"; (б) SEM попречни пресек CIGS уређаја (ц) квалитативни енергетски дијаграм CIGS соларне ћелије [1]

2.2.2.2.1. Задњи електро контакт

CIGS соларне ћелије у конфигурацији "субстрата" могу настати на стаклу као и на металним и полимерним фолијама. Молибден нанет прскањем или *e-beam* евапорацијом је најчешће употребљаван материјал за задњи електро контакт CIGS ћелија. Настанак соларне ћелије почиње депозицијом Mo на подлогу (субстрат) који формира електро проводљиву задњу электроду са CIGS. Када се нанесе CIGS на Mo, међуслој MoSe_2 се аутоматски формира што помаже транспорту јона између CIGS и Mo. Недавно је пронађен нови материјал као алтернатива за задњи електро контакт, али индустријска производња се и даље базира на Mo. [1]

2.2.2.2.2. CIGS апсорбујући слој

Услед високог коефицијента апсорбције, за апсорбцију максималног случајног зрачења довољан је слој дебљине 2 μm . CIGS слој може настати разним методама депозиције. Иако величина зрна и морфологија (храпавост површине) зависе од метода депозиције, постигнута је ефикасност преко 13% за већину метода, што показује да је граница зрна у CIGS бенигна и може се лако пасивизирати. Високо ефикасне ћелије имају $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ *bulk* p-типа док је дефектна халкопиритна фаза $\text{Cu}(\text{In,Ga})_3\text{Se}_5$ у облику танког слоја одвојена на горњој површини n- типа посебно када је допирана атомима који дифундују из *buffer* слоја. Верује се да је ова инверзна површина која води ка p-n хомоспојевима у CIGS апсорберу круцијална за високоефикасне ћелије. [1]

2.2.2.2.3. Buffer слој

Неколико полупроводничких једињења са проводљивошћу n- типа и вредностима енергетског процепа од 2 и 3,4 eV примењена су као *buffer* да би се формирали хетероспојеви у CIGS соларним ћелијама. Међутим, CdS остаје као најиспитанији *buffer* слој јер континуирано доприноси настанку високоефикасних ћелија. CdS за високоефикасне CIGS ћелије обично настаје јефтиним CBD процесом. Проблем се јавља код линијске производне методе базиране на вакууму. CdS слој настао процесом физичке депозиције испарења (PVD) ствара нискоефикасне ћелије јер танак слој настао PVD процесом нема једнако прекривање CIGS. Последњи тренд у *buffer* слојевима је да се CdS замени "*CdS-free*" полупроводницима и да се CBD замени линијски компатибилнијим процесом. Проучавају се алтернативни материјали попут In_2S_3 , ZnO, ZnS и ZnSe коришћењем различитих метода као што су PVD, RF прскање, MOCVD, ALD или нова техника ILGAR (Chaisitsak et al., 2001; Ohtake et al., 1995; Bhattacharua и Ramanathan, 2004; Spiering et al., 2003). Рекорд у ефикасности недавно је постигнут за CBD-ZnS (Nakada и Mizutani, 2002.). Индустијски се претежно користи CBD-CdS, али Showa Shell је достигла ефикасност од 14,2% за 864 cm^2 ZnS(O,OH) *buffer* слој модула развијеног CBD процесом (Kushiua, 2004.). [1]

2.2.2.2.4. Предњи електро контакт

TCO са енергетским процепом изнад 3 eV је најприкладнији и постао је најчешћи избор за предњи електро контакт услед своје одличне оптичке проводљивости (>85%) и добре електро проводљивости (Wang et al., 2009.). Тренутно CIGS ћелије користе или ITO или RF прскани ZnO допиран Al. Користи

се и комбинација међуслоја и ZnO допираног слоја. Допирање проводљивог ZnO слоја остварује се елементима III групе, претежно алуминијумом. Испитивања су показала да је бор погодна алтернатива јер ствара носаче напона велике мобилности и већи пренос спектра светлости који има веће таласне дужине доприносећи тиме стварању већих струја. За високоефикасне ћелије, температура депозиције TCO треба бити испод 150°C како би се избегла интердифузија на CdS/CIGS споју. RF прскање није погодно за индустријску производњу па се користе алтернативна прскања и CVD методе. [1]

2.2.2.2.5. Инкорпорација натријума у CIGS

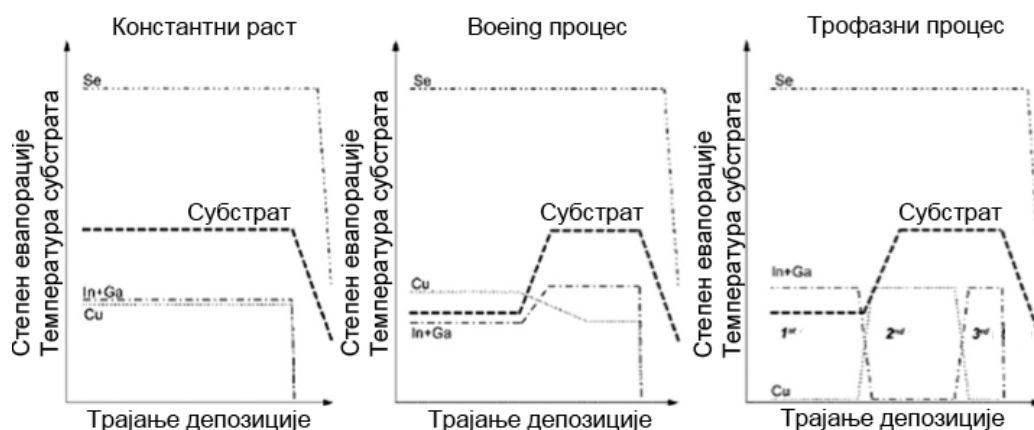
Продор у CIGS технологији настао је када је субстрат/подлога од алумина или боросиликатног стакла замењен *soda-lime* стаклом како би се ускладили коефицијенти ширења, што је резултовало значајним побољшањем ефикасности. Као последица закључено је да натријум има велику улогу у високоефикасним CIGS соларним ћелијама је утиче на микроструктуру и пасивизира границе зрна што води ка променама у електро проводљивости до чак два степена на скали. Повећање ефикасности се јавља због повећања V_{oc} и FF вредности соларних ћелија. Натријум се уводи у CIGS дифузијом из *soda-lime* стакленог субстрата током депозиције апсорбујућег слоја. Међутим, тај начин инкорпорације није нити контролисан нити поуздан тако да се користе алтернативне методе додавања Na из спољних извора током или после процеса депозиције CIGS слоја. Ове методе укључују или коевапорацију или депозицију танке превлаке једињења Na као што је NaF, Na₂Se или Na₂S на субстрат у коме нема присуства Na, што укључује *soda-lime* стакло прекривено слојем баријере нпр. Al₂O₃, Si₃N₄ које користи Shell Solar. Ови слојеви баријере спречавају дифузију натријума из стакленог субстрата. CIGS на флексибилним субстратима (метал или полиамидне фолије) захтева контролисану инкорпорацију натријума која се обезбеђује из слоја који се наноси пре или после настајања CIGS слоја. [1]

2.2.2.2.6. Депозиција и настајање(раст) CIGS апсорбујућег слоја

Постоји неколико процеса депозиције CIGS танког филма који ће бити описани у даљем тексту.

2.2.2.2.6.1 Процес коевапорације

Вакуумска евапорација (испаривање) је најуспешнија техника за депозицију CIGS апсорбујућег слоја за високоефикасне ћелије. Метода вакуумске евапорације подразумева симултано (истовремено) испаривање саставних елемената из више извора у једном или секвенционом процесу током целог процеса депозиције апсорбера. Варијација In/Ga односа током процеса депозиције води малим променама у кинетици раста (настајања), међутим, варијација садржаја бакра има далеко већег утицаја на раст (настајање) филма. Тако су различите коевапорационе процедуре класифи-коване по њиховом профилу евапорације Cu (Слика 12).



Слика 12. Дијаграм који представља "рецепте" у корацима коевапорационог процеса депозиције $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ за константни раст, би-слој (Boeing) и трофазни процес [1]

Једна варијанта коевапорације је двослојни процес (Boeing процес) који потиче из рада Mickelsen-а анд Chen-а (McCandless и Dobson, 2004.) и производи већа зрна у поређењу са једнофазним константним процесом. Овај резултат доприноси формирању Cu_xSe фазе током првог дела процеса богатог бакром који побољшава мобилност атома III групе током процеса раста (настајања). Највише ефикасности достигнуте у лабораторији у овом такозваном трофазном процесу остварио је NREL (Gabor et al., 1994.). Овим процесом CIGS слој је добијен почетном депозицијом $(\text{In,Ga})_x\text{Se}_y$ која је праћена депозицијом Cu и Se до постизања једињења претежно богатог бакром. Коначно, укупна концентрација бакра је подешена субсеквентном депозицијом In, Ga и Se. Неколико групација широм света је трофазним процесом постигла ефикасност од 16-19,5%. [1]

2.2.2.2.6.2 Алтернативни процеси настанка(раста) CIGS апсорбујућег слоја

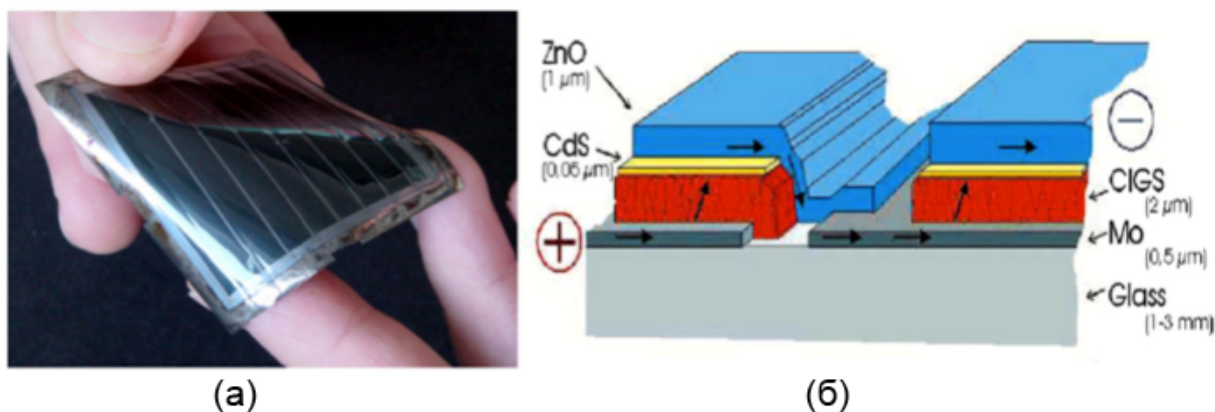
Иновативни приступ је коришћење стабилности оксида за производњу *precursor* честица нано величине (Kaelin et al., 2004.; Eberspacher et al., 2001.). Метални оксиди нано размера се мешају са суспензијом мастила што омогућава јефтину депозицију великих размера методама "doctor blading", "screen printing" или прскањем *precursor*-а. Невакуумска депозиција *precursor* омогућава ефикасно искоришћење, скоро стопроцентно, материјала галијума или индијума. ISET (САД) су третманом селенизације слој *precursor* су претворили у CIGS слој који има ефикасност преко 13%. Један од проблема процеса селенизације је токсичност гаса H_2Se . Међутим, тренутни фокус је на селеном штампаним *precursor* путем паре Se (Kaelin et al., 2004). CIGS једињење може се формирати директно методом електродепозиције у хемијском купатилу. Неколико групација, укључујући EDF-CNRS (Француска), CIS Solar Technologies (Немачка) и CISCUT (Немачка), користе овај приступ којим се остварује ефикасност соларне конверзије од преко 10%. Ефикасност од 15.4% остварена је од стране NREL (САД) хибридном методом која подразумева додатну вакуумску депозицију на електродепоновани *precursor* слој. [1]

2.2.2.2.7. Флексибилне CIGS соларне ћелије

Ултимативна предност технологије танког филма је "roll-to-roll" производња којом се производе монолитни међуповезани соларни модули чије је време отплате инвестиције кратко услед јефтине производње и мале цене система. Флексибилни CIGS модули танког филма од скоро привлаче велику пажњу на флексибилне соларне ћелије на металним и пластичним фолијама услед своје високе ефикасности, стабилности и флексибилности. Поред очекиване високе ефикасности и дугорочне стабилности, флексибилни CIGS има изванредан потенцијал за употребу у космичкој технологији услед своје толеранције космичке радијације, од 2 до 4 пута супериорнији од конвенционалних Si и GaAs соларних ћелија. Мала тежина и флексибилна структура ће смањити цену космичких соларних модула али и направити умањење цене самих сателита. Преглед развоја и тренутног статуса флексибилних соларних ћелија дали су Kessler и Rudmann (2004). Флексибилне CIGS ћелије могу настати на полиамиду као и на различитим металима нпр. нерђајући челик, Mo и Ti. Одабир субстрата/подлоге је веома битан услед разних предности али и мана:

1. Густина коришћених метала је 4-8 пута већа од густине полимера, тако да соларне ћелије на металном субстрату имају већу масу;
2. Метали су електропроводљиви и имају релативно храпаву површину тако да развој монолитних модула на металу је знатно компликованији него на полимерним фолијама;
3. Фолије нерђајућег челика захтевају екстра баријеру како би се спречила дифузија штетних нећистоћа метала у CIGS слој током процеса депозиције;
4. Металне фолије могу издржати више температуре депозиције (550-600°C) што води ка вишој ефикасности него код полимерних фолија које нису погодне за процесирање на температурама преко 450 °C.

Рекорд ефикасности флексибилних CIGS соларних ћелија на металном субстрату држи DAUSTAR (САД) а 14,1% на полимерном субстрату ETH (Цирих, Швајцарска). Global Star (САД) тренутно једини има производно пилот постројење иако је велики број групација и индустрија укључен у развој овог типа ћелија. Производе соларне ћелије на металним фолијама површине 6880mm² ефикасности 13,17%, модуле површина 38980mm² и 70850mm² ефикасности 11,13% и 10,10%, респективно. Соларни модули на фолијама нерђајућег челика нису монолитно повезане али су направљени индивидуалним повезивањем ћелија великих површина *overlap* методом. ZWS (Немачка) развија *scribing* и *patterning* методу за монолитно повезане соларне модуле на металним и полимерним фолијама. Основни шематски пресек монолитног модула приказан је на Слици 13., заједно са прототипом мини модула развијеног на полимерној фолији од стране ZSW и ETH (Цирих) током Европског колаборативног пројекта.



Слика 13. (а) Прототип монолитног CIGS модула на полимерној фолији (б) шематски приказ попречног пресека модула [1]

Табела 8. даје преглед различитих технологија флексибилних соларних ћелија укључујући и органску и TiO_2 PV технологију фотоосетљивих пигмената. У поређењу са технологијом a-Si ћелија технологије флексибилних CIGS и CdTe соларних ћелија нису толико развијене, делимично услед каснијег почетка проучавања и развоја, међутим висока ефикасност конверзије и одлична стабилност представљају одличан потенцијал за даљи развој ових технологија. Највиша тренутно постигнута ефикасност CIGS модула танког филма износи 11%. (Табела 9.) [1]

	CIGS	CdTe	a-Si	органска и TiO_2
Лабораторијска ефикасност на пластичној фолији	14.1% Једноспојна	14.1% Једноспојна	8-12% Вишеспојна	5%-8%
Лабораторијска ефикасност на металној фолији	17.5% Једноспојна	8% Једноспојна	14.6%/13% Вишеспојна	-
Индустријска ефикасност	6-11% на металној фолији	-	4%-8% На металној и пластичној фолији	-
Стабилност на светлу	Материјал стабилан	Материјал стабилан	Деградира	Стабилност није доказана

Табела 8. Различите технологије флексибилних соларних ћелија [1]

Ефикасност модула	Опис модула	Исти тип модула са најнижим карактеристикама
19.3	Sun Power 315 (mono-Si) Tcoeff.=-0.38%/C, V _{oc} /cell = 673mV	Sun Power 305, eff. 18.5%
17.1	Sanyo HIP-215NKHAS (mono CZ Si) Tcoeff.=-0.30%/C, V _{oc} /cell = 717mV	HIP-200, eff. 15.9%
14.4	Suntech Stp280-24/Vd (multi Si) Tcoeff.=-0.47%/C, V _{oc} /cell = 622mV	Suntech Stp 260, eff. 13.4%
14.4 (mono)	BP 4180T, Tcoeff.=-0.5%/C, V _{oc} /cell = 606mV	BP 4165, eff 13.4%
14.1 (multi)	Kyocera KD210GX-LP (multi Si) V _{oc} = -0.123V/C, V _{oc} /cell = 609mV	205W, eff.13.8%
14.1	Suntech STP180S-24Ad (mono Si) Tcoeff.=-0.48%/C, V _{oc} /cell = 622mV	Suntech STP 170, eff 13.3%.
14.1	Sharp U-175 (mono Si) Tcoeff.=-0.485%/C, V _{oc} /cell = 617mV	Sharp NU-170, eff. 13%
13.8	BP 3230 N (multi Si) Tcoeff.=-0.5%/C, V _{oc} /cell = 607mV	220W, eff. 13.2%
13.7	Solar World Sunmodule 230/220 (mono Si) Tcoeff.=-0.33%/C, V _{oc} /cell = 617mV	220W, eff. 13.1%
13.7	Sharp ND-224-UC1 (multi Si) Tcoeff.=-0.485%/C, V _{oc} /cell = 610mV	ES-200, eff. 12%
13.4 (трака)	Evergreen Solar ES210, Tcoeff.=-0.45%/C	ES-200, eff. 12.7%
11 (CIS)	Würth Solar WS GOO25, Tcoeff.=-0.36%/C	WS GOO25, eff. 10.3%
10.8 (CdTe)	First Solar FS277 (CdTe) Tcoeff.=-0.25%/C, V _{oc} /cell = 773mV	FS270, eff. 9.7%
9.0(a-Si/nc-Si)	Sharp NA-V128H5 (tandem) Tcoeff.=-0.24%/C	Sharp NA-V115H5, eff. 7.7%
8.4 (a-Si/nc-Si)	Sunfilm Q120 (tandem), Tcoeff.=-0.3%/C	Q110, eff. 7.7%
8.3 (a-Si/nc-Si)	Mitsubishi Heavy MT, 130 Tcoeff.=-0.28%/C	-
7.6 (CdTe)	Calyxo CX 55 (CdTe), Tcoeff.=-0.25%/C	40W, eff. 5.6%
6.7 (a-Si,3-j)	Uni Solar PVL 144, Tcoeff.=-0.21%/C	124W, eff. 5.7%
6.3 (a-Si,1-j)	Kaneka T-SC (EC)-120	-
6.2 (a-Si,1-j)	Bosch Solar T90, Tcoeff.=-0.21%/C	75W, eff. 5.3%
6.0 (a-Si/a-Si)	EPV 5 x 56W, Tcoeff.=-0.19%/C	50W, eff. 5.3%
1.7 (органски)	Konarka KT 3000, Tcoeff.=-0.27%/C	-

Табела 9. [1]

Већина водећих технологија постигла је адекватну ефикасност (Табела 10.), а императив треба ставити на развој исплативих производних технологија које могу значајно смањити цену производње на испод 1,5\$/Wp. Производна цена CdTe соларних модула танког филма је 0,76\$/Wp (First Solar). [1]

Ефикасност модула	Опис	Изразна снага [W]	Продајна цена [\$/Wp]
12	Q-cells(Solibro) UF-90 Tcoef=-0.37%/C	UF-70, eff. 9.3%	2.25\$/Wp
11.9	AVANCIS 130W, Tcoef=-0.37%/C	100W, eff. 9.2%	2.25\$/Wp
11	Würth Solar WSGOO36E, Tcoef=-0.36%/C		
11.1	First Solar ES 380 (CdTe), Tcoef=-0.25%/C	FS370, eff. 9.7%	2.25\$/Wp
10.7	Solar Frontier SF85-US-B, Tcoef=-0.35%/C	80W, eff. 10.1%	2.25\$/Wp
9	Calyxo CX55/65, Tcoef=-0.25%/C	55W, eff. 7.6%	2.25\$/Wp
6.7	Uni Solar PVL 144, Tcoef=-0.21%/C	136W, eff.6.3%	2.25\$/Wp
6.3	Kaneka T-SC-120	-	2\$/Wp
1.7	Konarka 620	-	-

Табела 10. Продајне цене модула по произвођачима [1]

Продајне цене CdTe, CIGS и a-Si модула су 2-2,25\$/Wp (табела 10.) (von Roedern, 2010). Омасовљавањем производње ове цене се могу значајно снижити.

2.3. III-V једноспојне и вишеспојне соларне ћелије

Теоретска ефикасност једноспојних ћелија је око 31%. Ефикаснијим искоришћењем соларног спектра постиже се боља ефикасност. Комбиновањем две или више ћелија које имају различите вредности енергетског процепа у мултиспојну конфигурацију повећава се рад извршен по једном фотону. За повећање снаге ћелије морају имати подешене вредности струја и бити спојене у серије одвојене, на пример, тунел диодом. Очигледан начин повећања ефикасности је израда тандем ћелија коришћењем већег броја материјала са различитим вредностима енергетског процепа. Најбоље мултиспојне ћелије су већ постигле ефикасност од око 41%, међутим технологија израде је веома скупа и зато се ови типови ћелија углавном користе за примену код космичке технике. Крајем 1980.године GaAs ћелије су коришћене за израду плочастих уређаја за космичку употребу због своје високе ефикасности и слабије деградације услед изложености радијацији од Si ћелија. GaAs једноспојне соларне ћелије са ефикасношћу од 25% одавно се користе за AM0 концентрисано зрачење Сунца (Sundaram et al., 1992.; Andeev, 1994.). MOCVD, епитаксија течне фазе и епитаксија молекулским снопом (MBE) су уобичајене методе за производњу III-V соларних ћелија. Повећање ефикасности може се остварити слагањем GaAs или монолитно или механички на ћелије појачиваче са материјалима који имају нижу вредност енергетског процепа као што је Si, Ge, CIS, GaSb или InGaAs. За широку примену ултра ефикасних соларних ћелија неопходно је побољшати ефикасност конверзије и смањити трошкове. Један од приступа је производња GaAs/Si ћелија, али треба напоменути да GaAs филмови садрже дислокације. Још један од проблема је дифузија нечистоћа из високодопираних тунел спојева током настанка горњег слоја ћелије чиме се повећава отпорност тунел спојева.

InGaP/InGaAs/Ge троспојне концентраторске ћелије демонстрирале су ефикасност од 37%(Yamaguchi et al., 2005.). Однос концентрације дефинисан је повећањем вредности односа I_{sc} и $I_{sc}/I_{sc}(1-sun)$. Висока вредност ефикасности конверзије од преко 36% измерена је под концентрисаном светлошћу од 30 до 200 Сунаца AM1.5G. При концентрацији 200 Сунаца AM1.5G ефикасност конверзије је 37,4%. Yamaguchi et al. (2008) представили су нов приступ нових материјала и структура за 50% ефикасне мултиспојне соларне ћелије.[1]

2.4 Quantum well соларне ћелије

Конкурентне цене и перформансе се могу постићи коришћењем *quantum well* и *quantum dot*-а у кристалним соларним ћелијама. Quantum well соларна ћелија (QWSC) је нов уређај са потенцијалом да постигне високу ефикасност алтернативним приступом тандем или каскадним ћелијама. Barnham et al. (2003) дали су детаљнији преглед QWSC. Различити губици у p-n споју лимитирају ефикасност на 30% а начине за превазилажење ових проблема и значајно повећање ефикасности QWSC анализирао је Green (2000). У простим QWSC, *quantum well* материјал ниже вредности енергетског процепа настаје у простору пуњења p-n или p-i-n структуре. Методе MBE или MOCVD се користе

за производњу QWCS ћелија. Инкорпорација CdTe *quantum well* у $\text{Cd}_x\text{Mn}_{1-x}\text{Te}$ p-i-n структуре показала се као успешан метод за повећање фотоосетљивости већих таласних дужина (Ashenfrod et al., 1995.). QWSC могу да појачају струју кратког кола и волтажу отвореног кола ($V_{oc}=1,07\text{V}$ и $1,022\text{V}$) у односу на конвенционалне ћелије формиране од метала баријере. AlGaAs/GaAs QWSC имају већу ефикасност у поређењу са AlGaAs ћелијама услед смањења губитака рекомбинације (Barnham et al., 2003; Ekins-Dauke et al., 2000.). Тренутни статус QWSC недавно су описали Mazzer et al. (2006). [1]

2.5 Quantum dot соларне ћелије

Quantum dot (QD) су кристални проводници нано величине који се могу произвести различитим методама (Woogan, 1997.). Предност QD је способност подешавања прага апсорбције једноставним одабиром пречника *dot*-а. QD је кристал полупроводничког материјала нанометарске величине. Увођењем *dot*-а једне величине у уређени низ у међуслоју p-i-n соларне ћелије Lyque и Marti израчунали су теоретску ефикасност од 63%.

QD су познати под називом "вештачки атоми" јер дају прилику за контролу енергије носача подешавањем ограничења у све три просторне димензије. Уским паковањем QD-а нивои ограничења се преклапају како би формирали минивезе у QD суперрешетки. Ово побољшава оптичка и електро својства полупроводничког материјала. Контролом минивезе енергетског нивоа и ширине везе, QD суперрешетка има веома интересантне могуће примене код "треће генерације" PV, посебно код тандем ћелија. QD се успешно користе за побољшање уређаја као што су ласери, LED и фотодетектори. Основни принцип повећања ефикасности QD соларних ћелија су дискретна стања која резултују инклузијом *dot*-а које дозвољавају апсорпцију енергија нижих вредности од вредности енергетског процепа.

Marti et al. (2006.) први су представили функционисање првог прототипа QD соларне ћелије. Теоретски резултати ефекта величине *dot*-а, растојања међу *dot*-овима и матрице материјала дали су Jiang и Green (2006.). [1]

2.6. Ћелије са фотоосетљивим пигментима

Ћелије са фотоосетљивим пигментима (DSSC) су интензивно проучаване услед својих добрих фотоелектричних конверзионих ефикасности, једноставне технологије израде и потенцијално ниске цене. Осетљивост полупроводника, нпр. ZnO, на органске боје проучавана је од стране неколико групација (Gersicher и Tributsch, 1968.; Hauffe et al., 1970.) ради примене у електро-фотохемијским процесима (PEC). Ефикасност конверзије од 1% у обојено осетљивим ZnO фотоелектродима остварио је Tsubomura et al. (1976.). Прва примена обојено осетљивих TiO_2 честица и танког филма у PEC конфигурацијама пријављена је од стране Deb et al. (1978.). PEC приступ конверзији соларне енергије је ставио у употребу полупроводнике са уским енергетским процепом, нпр. Si, GaAs, CdSe, у конјукцији са електролитима аналогно металним полупроводницима *Schottky-barrier* уређаја. DSSC базирани на течним електролитима достигли су ефикасност од 10% под AM1.5 (Nazeeruddin et al., 1993.). Употреба течних електролита ствара потешкоће у

заптивању (енкапсулацији) и дугорочној фотохемијској стабилности уређаја (Parageorgiou et al., 1997.). Како би превазишли ове проблеме, истраживачи су покушали замену течних електролита чврстим или квазичврстим материјалима носача напона (Nogueira et al., 2001.). У поређењу са другим типовима материјала носача напона, гел електролити показали су се као бољи амбијент за јонску проводљивост (6-8 mS/cm) и бољу стабилност, услед чега неколико типова гел електролита је већ нашло примену у DSSC квазичврстог стања (Stathos и Lianos, 2003.; Wang et al., 2004.). Органско - неоргански нанокомпозити као што гел електролити или *sol-gel* силицијум могу очврснути течне електролите и тиме постићи више вредности ефикасности конверзије (Stathos et al., 2004). Међутим, употреба течних електролита и дугорочна стабилност остају као баријере будућем развоју технологије.

Област DSSC развоја привукла је значајну пажњу после Graetzel-овог извештаја о коришћењу Ru базиране боје за остваривање високе ефикасности соларних ћелија направљених од TiO₂ наночестица (O'Regan and Graetzel, 1991.). Остварили су значајан напредак у побољшању ефикасности конверзије соларне енергије од 11% у обојено осетљивим TiO₂ соларним ћелијама танког филма (Graetzel, 2001.). Ово остварење демонстрирано је PEC уређајем који се састоји од нанокристалног и *mesomorphic* TiO₂ танког филма осетљивог на комплекс *Ru-terpydine* боје у неводеном растварачу. Студија о ниско-температурној производњи TiO₂ на флексибилном проводљивом филму проучавана је ради стварања брзог и јефтиног процеса производње DSSC модула. DSSC показује ефикасност конверзије сличну a-Si соларним ћелијама танког филма од око 10% али далеко јефтинију цену производње (Ekins-Daukes et al., 2000.; Green, 2004.). [1]

2.7. Органске соларне ћелије

Са теоретском ефикасношћу сличном као код конвенционалних полупроводничких уређаја и трошковима структуре проистеклим из пластичног процесирања, органске PV ћелије нуде дугорочни потенцијал за постизање циља, PV технологије која је економски исплатива за генерисање енергије великих размера.

Први високопроводни полимер, хемијски допиран полиацетилен, пријављен је од стране Chinag et al. (1977.). Органски молекули и полупроводнички полимери налазе све већу примену у оптоелектронским уређајима. Неке кључне предности органских PV ћелија су: ниска цена органских полимера, одлична способност оптичке апсорпције која омогућује дебљину филма од неколико стотина нанометара, компатибилност са пластичним субстратима, могу се масовно производити на ниским температурама методама добро познатих техника штампања у "roll-to-roll" процесу. Могућност стварања и синтезе молекула и касније интеграције у органско-органске и органско-неорганске композите даје јединствену шансу за израду материјала за нове уређаје. Главни изазов представља стабилност органских материјала. Деградација уређаја огледа се претежно у променама морфологије, губитку споја међу слојевима, интердифузије компонената и хемијској декомпозицији. Користећи слој бакар фталодијанина као донорског слоја и парилена деривата као пријемника, Tang (1986.) је створио структуру позитивне електрода/донор

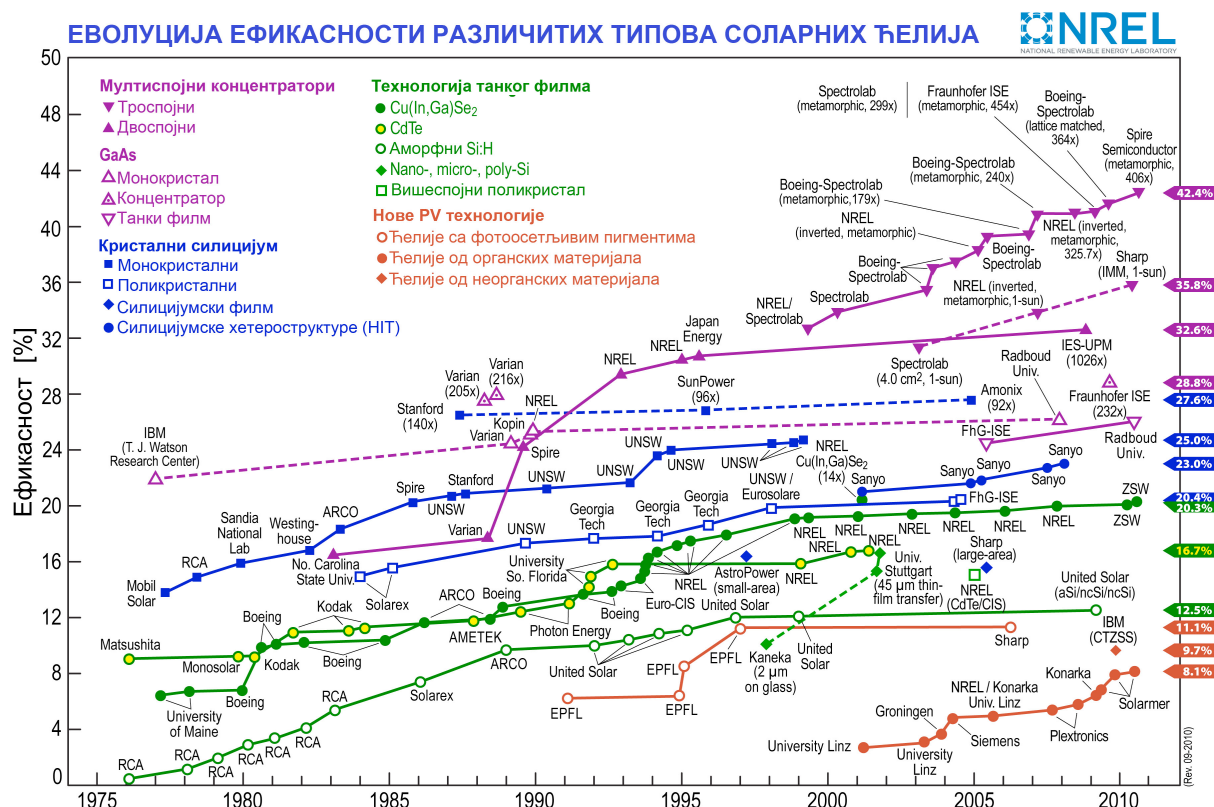
пријемник/негативне електроде. Овај уређај има ефикасност конверзије енергије од 1% под симулираним соларним зрачењем.

Механизам функционисања органских PV ћелија је другачији од механизма конвенционалних PV ћелија. Ове разлике детаљно је описао Gregg (2005.). Један од значајних ограничења свих органских једињења је релативно мали спектар апсорбције, тако да органска соларна ћелија не може да апсорбује цео спектар соларног зрачења коришћењем једног пара донор-пријемник. Волтажа отвореног кола већине органских хетероспојних ћелија је мала и варира од 0,4 до 0,8V. Ради побољшања апсорбције соларног зрачења органских соларних ћелија неопходно је произвести материјале са широким апсорбционим спектром или *narrow-band* апсорбери морају бити сложени и помешани у мултиспојеве (Peumans et al., 2003.). Коришћењем два или више материјала са непреклапајућим спектром апсорбције у тандем или вишеспојне ћелије, може се покрити шири спектар видљивог и један део инфрацрвеног зрачења. Forrest (2005.) је приказао комбинацију стратегија које воде ка повећању ефикасности конверзије на 5,7% за тандем ћелије базиране на материјалима малих молекулских тежина. Преглед тренутног статуса и будућих перспеката органске PV технологије разматран је у раду Peumans и Hadipour (Peumans et al., 2003.; Hadipour et al., 2008). [1]

2.8. CNT соларне ћелије

Угљеникове нанотубе (CNT) су формиране као шестоугаоне решетке атома угљеника [68]. Један од истраживачких тимова пронашао је фотодиодну соларну ћелију од угљеникових нанотуба и побољшао јој ефикасност и јачину излазног напона [69]. Иако има малу ефикасност, 3-4%, спровешће се многа нова истраживања како би се унапредила ова технологија.[2]

3. Ефикасност соларних ћелија



Слика 14. Еволуција ефикасности различитих типова соларних ћелија од 1975. до 2011. године [2]

Ефикасност је веома битан параметер који има за циљ да успостави и одржи ову технологију на тржишту. Тренутно се спроводи обиман истраживачки рад на унапређењу ефикасности соларних ћелија које су у комерцијалној употреби. Ефикасност монокристалиних соларних ћелија се повећава из године у годину. 1950. године ефикасност је износила 15%, 1970. године 17% и до данас континуирано повећавала вредност до 28%. Према истраживањима које је спроводио Zhao [56] унапређења у хватању светла поликристалних соларних ћелија, побољшања контакта и површине соларне ћелије доприносе повећању ефикасности. Поликристалине соларне ћелије достижу ефикасност од 19,8%, али комерцијална ефикасност поликристала је између 12% и 15%.

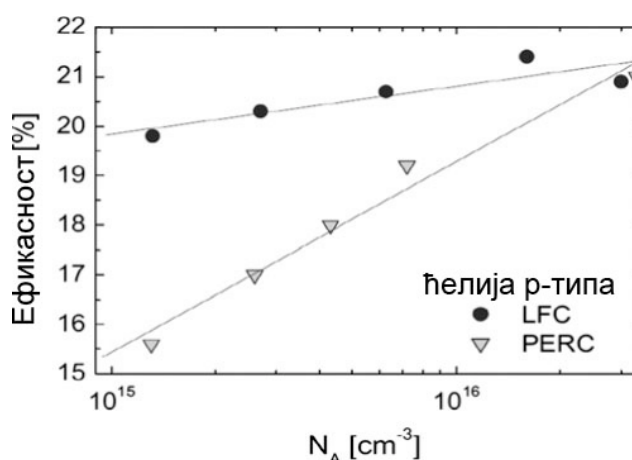
Ефикасност различитих материјала за период од 1975. до 2011. године дата је на Слици 14. Са слике се види да је GaAs достигла највећу ефикасност (40,7%) у 2010. години. Нови материјали као нпр. обојено осетљиви и органски, достигли су ниску ефикасност од 5,4% у 2010. години. Монокристалине соларне ћелије имају ефикасност од 24,7%, поликристалне 20,3% а соларне ћелије танког филма 19,9% у 2010. години, респективно. У Табели 11. дате су ефикасности модула компанија које производе PV технику.

Рад Fraunhofer ISE у области високо ефикасних силицијумских соларних ћелија је углавном заснован на отпочињању индустријске производње високо ефикасних силицијумских соларних ћелија [66]. Ради се на производњи ласерски испалених контакат (LFC) ћелија на веома танким подлогама. У циљу

поређења ове нове технологије са стандардним високо ефикасним процесним шемама, LFC и PERC ћелије су произведене од монокристалног силицијума p-типа у опсегу отпорности између $0,5 \Omega/\text{cm}$ и $10 \Omega/\text{cm}$, и на силицијуму n-типа са отпорношћу од $1 \Omega/\text{cm}$ у истој серији. Измерене ефикасности LFC и PERC ћелија дате су на Слици 15.

Компанија	Тип модула	Ефикасност	Референца
Suntech power	Монокристални	15.30-15.70	[94]
	Поликристални	14.50-14.80	
Yigli solar	Монокристални	15.30-16.20	[95]
	Поликристални	14.10-15.00	
Trina solar	Монокристални	14.50-15.20	[96]
	Поликристални	13.70-15.00	
Canadian solar	Монокристални	13.70-15.26	[97]
	Поликристални	12.65-14.12	
Sharp	Монокристални	14.40	[98]
	Поликристални	10	
Hanwha solar one	Монокристални	3.60-15.10	[99]
	Поликристални	13.30-15.30	
Jinko solar	Монокристални	14.05-15.27	[100]
	Поликристални	14.36-15.59	
LDK solar	Монокристални	14.49-15.67	[101]
	Поликристални	13.32-15.67	
Solar world	Монокристални	14.31	[102]
	Поликристални	14.31	

Табела 11. Ефикасности модула неких од произвођача [71]

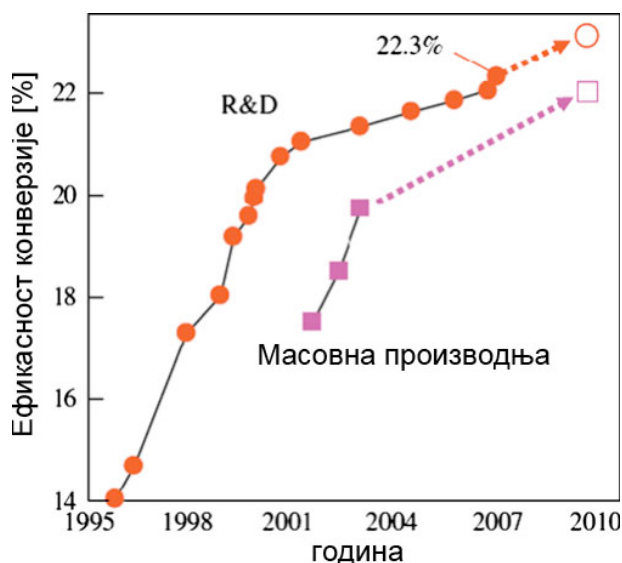


Слика 15. Ефикасност LFC и PERC соларних ћелија [71]

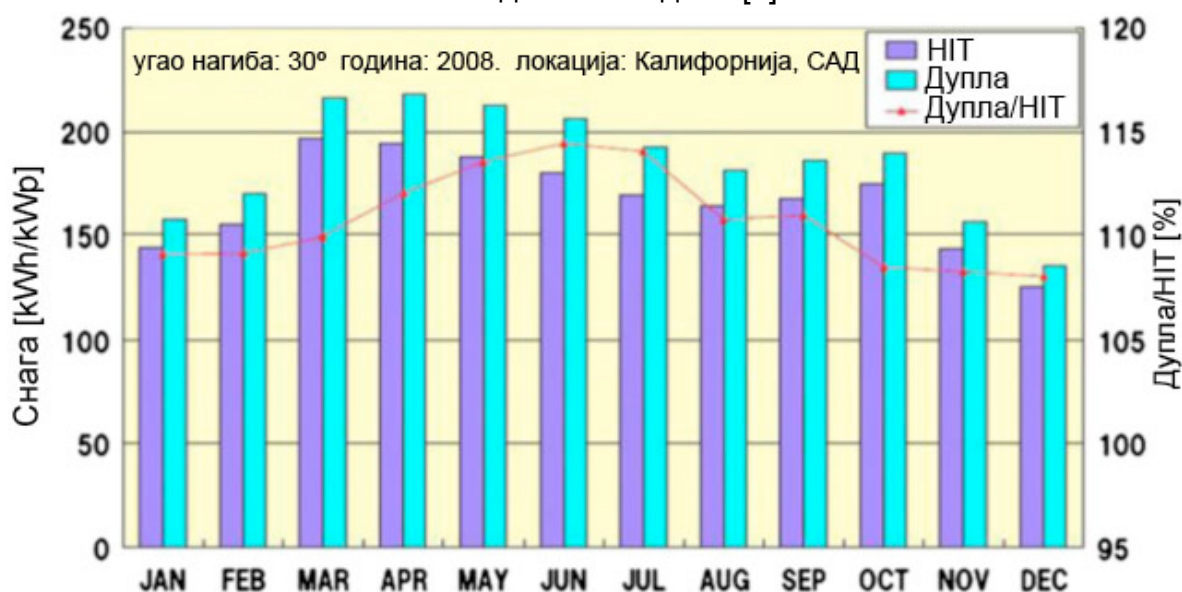
Највећи степен конверзије силицијумских соларних ћелија величине 4100cm^2 је остварио Tsunomura [72]. Развијен је процес чишћења који даје чисту површину кристалног силицијума, унапређену текстуру структуре, нижи степен оштећења услед таложења, ТСО са нижим коефицијентом апсорпције светла, финију мрежу електрода са смањеном зоном ширења. Прогрес у ефикасности конверзија HIT соларних ћелија практичне величине 100 cm^2 у последњих 15 година дат је Сликаом 16.

Mishima [68] је за SANYO Electric описао статус развоја високо ефикасних хетеро спојница са протоком у слоју (HIT) соларних ћелија. Током једно-годишњег теста HIT двоструких соларних ћелија и једностраних HIT модула

(Слика 17.) закључено је да излазна снага код HIT двоструке соларне ћелије је већа од снаге HIT једностраног модула.



Слика 16. Прогрес ефикасности HIT соларних ћелија у последњих 15 година [4]



Слика 17. Тренд излазне снаге једностраних HIT и двостраних HIT дуплих модула током године [4].

Двоструки HIT производи 10,9% већу излазну снагу у поређењу са HIT модулом. Остварили су висок напон отвореног кола (V_{oc}) од 743mV, и висок степен конверзије од 22.8% користећи субстрат дебљине 98mm. Резултат студије је показао да HIT соларна ћелија има потенцијал за даље унапређење цене - перформанси. Chenad Zhu [5] 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 21,894%, високим фактором пуњења од 0,866 и високим напонот отвореног кола од 0,861V. Резултати симулације добијени током ове студије имају велику вредност за будући развој соларних ћелија високе

ефикасност конверзије и ниских цена. Friedman [6] је описао следећу генерацију високоефикасних мултиспојних соларних ћелија са ефикасношћу изнад 40% које ће превазићи перформансе било које конвенционалне једно-спојне ћелије (Табела 12.)

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

Табела 12. Високоефикасне ћелије у поређењу са конвенционалним једноспојним ћелијама [1]

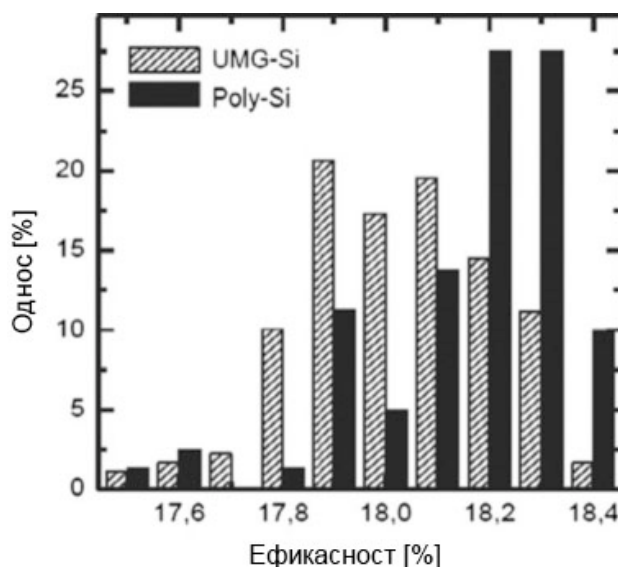
Закључили су да нове генерације високоефикасних мултиспојних ћелија са ефикасношћу изнад 40%, су најефикасније икада направљене. Приступ који је коришћен ради остварења ове ефикасности је пут континуираног развоја у побољшању перформанси ћелија. Очигледно је да ће ефикасност од 45% бити достигнута у наредних пар година, док на дуже стазе, са огромним напорима уложеним у развој, ефикасност од 50% је реалан циљ. Yamaguchi [7] је развио високоефикасну мултиспојну и концентраторску InGaP/InGaAs/Ge троспојну соларну ћелију са ефикасношћу од 36,5%. Успешно су тестирали и InGaP/InGaAs/Ge концентраторску троспојну ћелију која држи светски рекорд у ефикасности од 37,4% са 200 сунчаних дана у 2004.години. Током овог истраживачког рада креирана је табела (Табела 13.) главних проблематичних питања које треба решити а која се тичу вишеспојне соларне ћелије (MJ).

Главни проблем	Прошлост	Садашњост	Будућност
”Top cell” материјал	AlGaAs	InGaP	AllnGaP
Материјал трећег слоја	None	Ge	GaInNAs
Субстрат	GaAs	Ge	Si
Тунел спојница	DH-структура GaAs тунел J	DH-структура InGaP тунел J	DH-структура InGaP или GaAs
Упаривање решетке	GaAs средња ћелија	InGaAs средња ћелија	(In)GaAs средња ћелија
Ограничење носача	InGaP-BSF	AllnP-BSF	Widegap-BSF
Ограничење фотона	None	None	”Bragg reflector”

Табела 13. Главна проблематична питања вишеспојне соларне ћелије (MJ) [7]

Креирање вишеспојне III-IV мултиспојне ћелије са ефикасношћу од 40% са концентрацијом од 500X је веома битан циљ у PV програму САД [8]. Ефикасност ћелије се може повећати ”слагањем” више слојева полупроводника који апсорбују различит спектар соларног зрачења. То подиже општу ефикасност ћелије коришћењем ширег спектра по квадратној јединици PV материјала. Тренутно, теоретска ефикасност четвороспојне Ga_{0,5}In_{0,5}P ћелије је пројектована на 32%, док GaAs комбинација прелази 40% у одређеним околностима. Engelhart [9] је известио о пилот производњи Si ћелија p-типа у Reiner-Lemoine истраживачком центру са Q-cells SE које имају ефикасност од 18%. Ове ћелије су са двостраним контактом који прати допирани емитер, фино

штампана Ag мрежа у комбинацији са метализацијом платинским гасом и диелектричком пасивизацијом локалних контаката. Остварили су медијанску ефикасност ћелије >18% и највишу ефикасност од 18,35% (UMG) и 18,45%(Poly) на великим површинама ћелије (243cm²), (Слика 4.).



Слика 18. Ефикасност пилот серије UMG и Poly ћелија [9]

Zhao [10] је извео демонстрацију соларне ћелије од кристалног силицијума са ефикасношћу енергетске конверзије од 24,7% у лабораторијским условима. Ово истраживање је обезбедило преглед разноврсти силицијумских супстрата, нпр. FZ(B), MCZ(B), CZ(Ga), FZ(Ph) и CZ(Ph) и постојећих ефикасности и организација (Табела 14.).

Структура ћелије	Организација	Статус	Материјал субстрата	повр. ћелије (cm ²)	V _{oc} (mV)	J _{sc} (mA/cm ²)	FF (%)	Ефикасност (%)
LFC	Fraunhofer ISE	Спремно за производњу	FZ	4	679	38,6	81,1	21,3
OECO	ISFH	Спремно за производњу	FZ	4	666	40,5	78	21,1
OECO	ISFH	Спремно за производњу	FZ	96	649	38,1	81,1	20
HIT	SANYO	У производњи	n-CZ	-	710	-	-	21,3
Задњи контакт	SunPower	План за производњу 25MW	PV-FZ	148,8	668,2	38,4	79,6	20,4

Табела 14. Развој високоефикасних силицијумских ћелија по организацијама [10]

Gu [11] 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. Сугестирали су да је код соларне ћелије индустријске величине, QSC

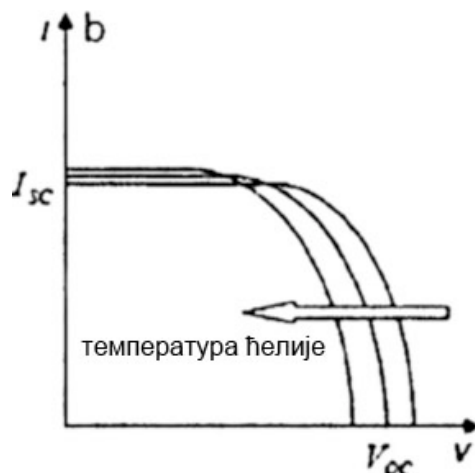
соларна ћелија супериорнија у односу на MC и да може остварити већу ефикасност кроз алкално текстурање. Резултати ове студије показују велики потенцијал примене QSC силицијума у PV индустрији као супстрата следеће генерације. Fleischer [12] експериментално проучава повећање ефикасности соларне ћелије танког филма користећи транспарентни проводљиви оксид (TCO) са апсорбером и стаклом. Користе три различита слоја материјала и упоређују им ефикасности. Резултат истраживања показује да AlZnO_x и $\text{SnO}_2:\text{S},\text{F}$ у комбинацији са $\alpha\text{-Si:H}$ соларном ћелијом танког филма доприносе добити ефикасности од 6,2% што резултује укупном ефикасношћу од 9,6%. Међутим, резултати симулације показују да се може достићи ефикасност од 10,4%. Као додаток повећању ефикасности јавља се смањење трошка по јединичном вату ћелије. Поуздани пилот пројект соларних ћелија кроз које пролази метални намотај (MWT) које се базирају на новом дизајну контакта успешно је развио Clement et al. [13]. У овој студији, спроведено је неколико корака оптимизације, посебно оптимизација контаката, задње стране структуре и изолационог процеса. Са MWT остварена је ефикасност ћелија од 16% и ефикасност модула од 15%. Остварен је добитак у ефикасности од 0.6% у поређењу са референтним ћелијама(модулима) истог MC Si блока. Morikawa et al. [14] је развио поликристалну соларну ћелију танког филма велике површине (10cm x 10cm). Открили су да комбинација фосфорног третмана и ниско носеће концентрационе BSF је довољно ефикасна да Si 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 пријављене од стране Ito et al. [15]. Користили су антирефлекциони филм (ARF) ра-ди повећања IPCE или “екстерне квантне ефикасности” уређаја да би достигли апсорпцију 94% таласних дужина и открили да нанокристални слој TiO_2 (12-14 μm) има кључну улогу у дизајну ћелије. Високо ефикасне обојено осетљиве соларне ћелије са пластичним субстратом (DSCs) створене методом пресовања су развијене од стране Yamaguchi et al. [16]. Ефикасност конверзије ћелије је побољшана оптимизацијом процеса пресовања, дебљине TiO_2 слоја и површинским третирањем пластичног субстрата. Остварена је ефикасност од 8% ћелије површине 0.25cm² са испод 100mW/cm². Произвели су и DSC ћелију величине 1.111 cm² са ефикасношћу од 7,6% и тестирали у Националном институту за фотонапонска мерења у Јапану. Yamaguchi et al. [17] је унапредио ефикасност обојено осетљиве соларне ћелије на више од 10% уз помоћ серијски повезаног ЕМ метода. Оптимизовали су комбинацију боја (NKH-2677, N719, NK-6037 и црну боју), TiO_2 слој (структура и дебљина), електролите (TBP концентрацију) и успешно достигли ефикасност од 10.4%, што је мало више од црно обојене јединичне ћелије.

3.1 Фактори који утичу на ефикасност соларних ћелија

3.1.1 Температура

Опште прихваћено је да ефикасност соларне ћелије опада са порастом температуре, тако да је хлађење неопходно у условима високе изложености осветљењу, као што су концентрисани сунчеви зраци, космички или тропски услови. Температура је критични фактор који води до пада PV ефикасности и излазне снаге. То се дешава услед чињенице да се са порастом температуре смањује вредност енергетског процепа услед чега се јавља пад у напону

отвореног кола. На Слици 19. приказан је утицај температуре на карактеристике PV ћелије. Утицај температуре је знатно већи код монокристалних силицијумских ћелија него код поликристалних силицијумских ћелија и ћелија танког филма. Пад ефикасности од 15% и 5% јавља се код ћелија од монокристалног силицијума и ћелија танког филма, респективно [18].

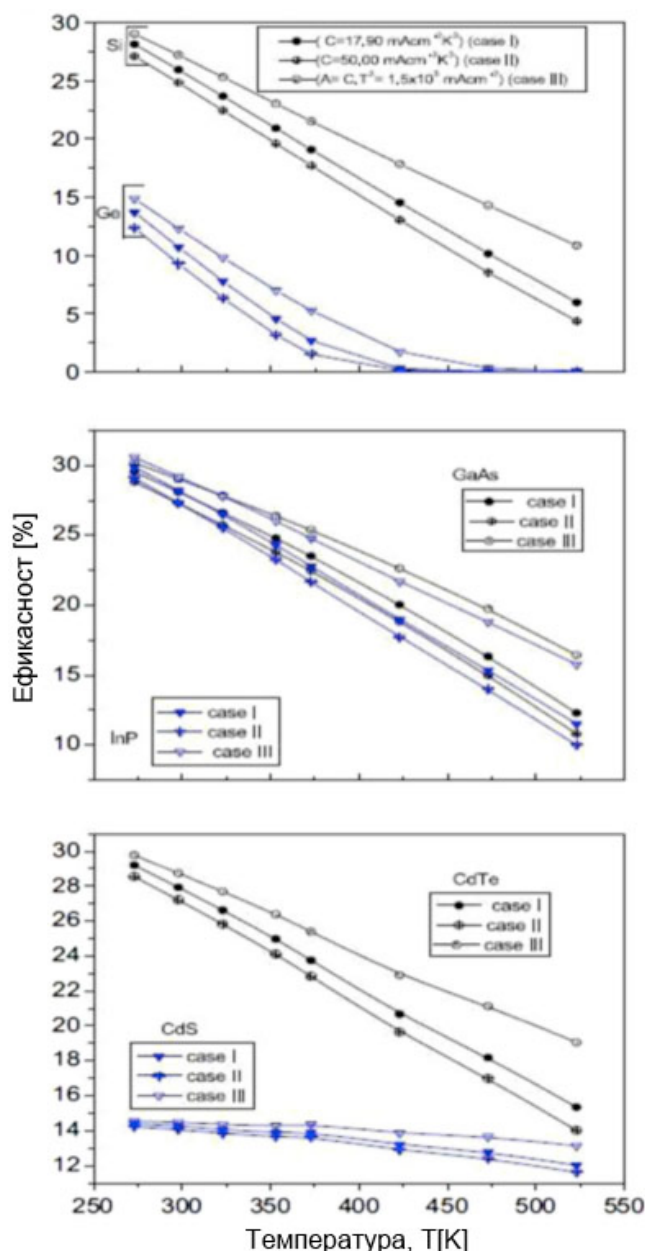


Слика 19. Утицај температуре на карактеристике PV ћелија [84]

Singh и Ravindra [19] су анализирали детаљну студију зависности ефикасности од температуре у температурном опсегу од 273-523 °K (Слика 20.) Рачунали су ефикасност у три температурна случаја: температуре која повећава температуру, повећање обрнутог засићења струјом, смањење V_{oc} које смањује фактор пуњења, самим тим и ефикасност соларних ћелија. Истовремено, енергетски процеп се смањује са повећањем температуре што резултује повећањем J_{sc} који има улогу у повећању ефикасности ћелије. Тако, тенденција V_{oc} да се смањи и J_{sc} да се повећа са порастом температуре соларних ћелија резултује смањењем ефикасности.

Ting и Chao [20] су експериментално проучавали утицај температуре на ефикасност фото-електричне конверзије обојено осетљивих соларних ћелија (DSSCs). Резултати студије показују да смањења решетки μ_v , μ_i , μ_p имају растући тренд са порастом температуре. Од 5.7 °C до 75.5 °C, максимална вредност μ_v је сса. 45%, μ_i сса. 14% и μ_p сса. 55%. Опадајући тренд ефикасности је сличан као у раду Beringс et al. [21] на монокристалној силицијумској соларној ћелији.

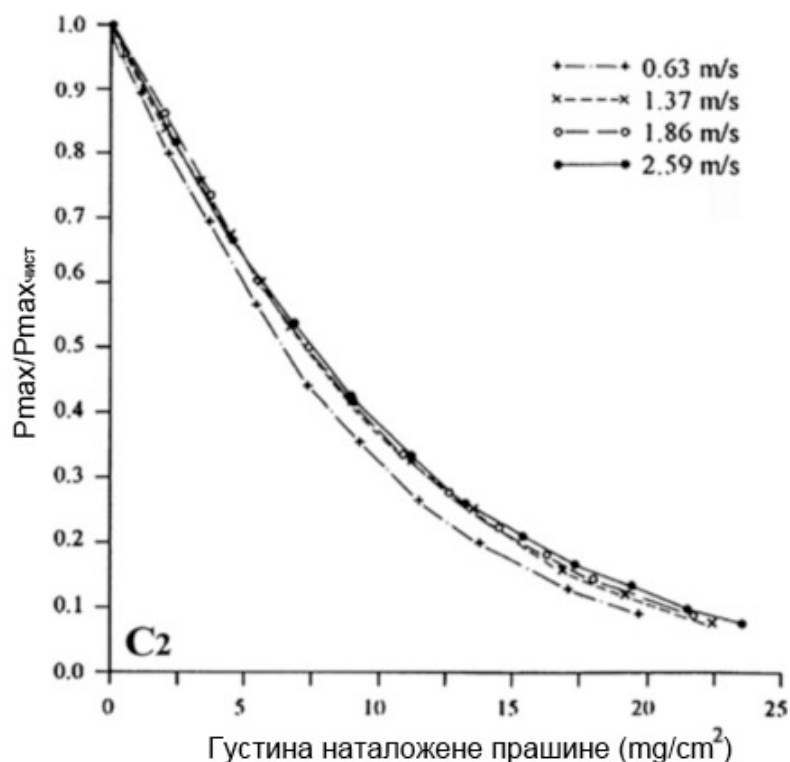
Rodriguez et al. [22] је проучава рад соларне ћелије на релативно високим температурама (100-200°C) и коришћење вишка топлоте у хибридним системима ради повећања укупне ефикасности соларне ћелије. Користили су високе температуре за термоелектрични генератор или топлотни мотор (Стирлингов мотор) да би унапредили ефикасност соларних ћелија и искористили топлоту. Открили су да механичка енергија може бити конвертована у електричну са ефикасношћу од преко 90%, што значи да укупна ефикасност хибридног система за претварања соларне у електричну енергију може бити преко 30%, без употребе скувих материјала и технологија. Узгред, ове нове ћелије би биле идеалне за примену и рад у условима где су високе температуре неизбежне.



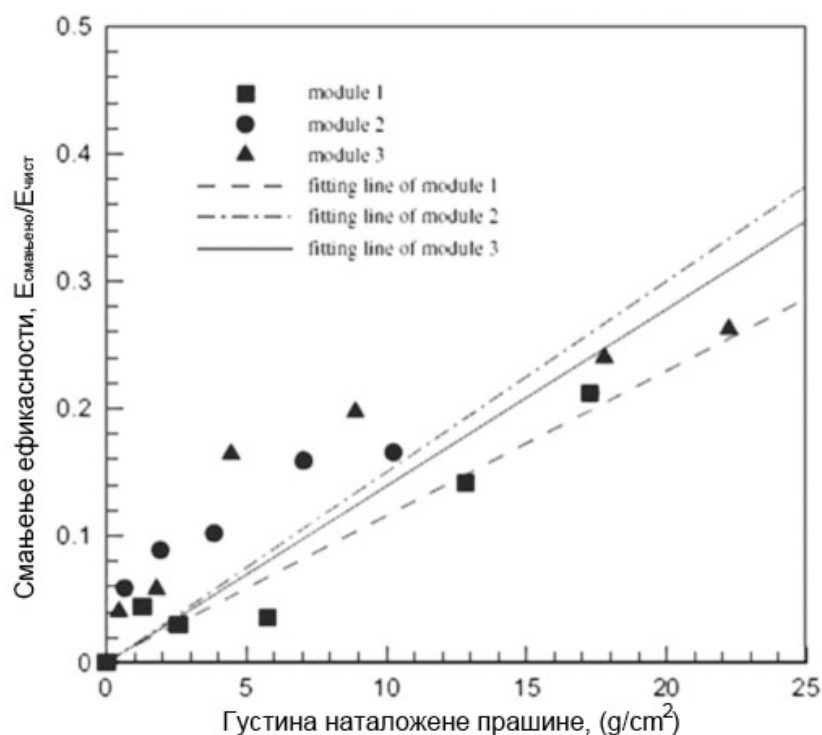
Слика 20. Утицај температуре на PV ефикасност [19]

3.1.2. Прашина

Прашина такође има негативан утицај на ефикасност PV конверзије услед блокирања долазећег зрачења на PV модуле [23]. Goosens и Kerchaever [24] су истраживали утицај брзине ветра, концентрацију прашине у ваздуху и акумулацију прашине на перформансе PV ћелија. Експериментално су проучавали излазну снагу PV ћелија на сваком нивоу. На Слици 21. приказана је излазна снага PV ћелија за различите густине прашине и различите брзине ветра. Са графика се може видети да излазна снага опада драстично са порастом густине прашине. Jiang [25] је тестирао утицај прашине у ваздуху на три типа PV модула; од монокристалног, поликристалног и аморфног Si. Експеримент је спроведен у лабораторијским условима коришћењем симулатора Сунца и генератора прашине. Утицај густине прашине за сваки тип PV модула приказан је на Слици 22. .



Слика 21. Утицај прашине на излазну снагу PV ћелије [24]



Слика 22. Утицај наслага прашине на PV ефикасност [25]

Закључили су да прашина у ваздуху смањује струју кратког кола и утиче на ефикасност PV модула, која опада линеарно са порастом густине наслага прашине. Резултати ове студије показују да загађење прашином има значајан утицај на излазну снагу PV модула. Са густином наслага прашине од 0 до 22g/m^2 , одговарајућа редукција излазне ефикасности PV модула се креће од 0

до 26%. Редукција ефикасности има линеаран однос са густином наслага прашине, а разлика услед типова ћелија није очигледна. Elminir [26] проучава ефекте прашине на провидан покривач соларних колектора. Резултат студије је показао да смањење у нормалној пропустљивости стакла зависе у главном од густине наслага прашине у вези са углом нагиба, као и оријентације површине у односу на доминантни правац ветра услед густине наслага прашине која се креће од 15.84 g/m^2 до 4.48 g/m^2 . Студија о утицају акумулације прашине на PV перформансе је спроведена од стране Sulaiman-а [27]. У овој студији PV панел је тестиран под константим зрачењем са утицајем различитих типова прашине. Генерисана снага панела је приказана у Табели 15. Резултат студије показује да прашина смањује ефикасност али, овај ефекат се смањује са повећањем интензитета зрачења. Предложили су стално чишћење PV панела које за циљ има повећање ефикасности.

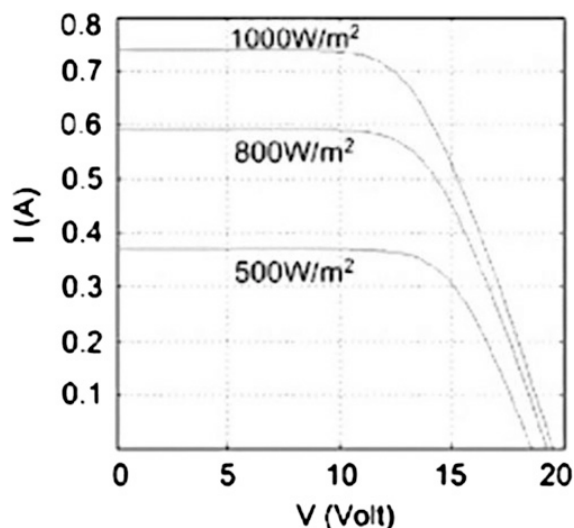
Услови	снага [W]		
	225 W/m ²	301 W/m ²	340 W/m ²
Не пластични	4,25	4,12	3,62
Прозирна пластика	4,25	3,75	3,16
Фина прашина	3,48	3,43	3,49
Блато	3,55	3,22	1,73

Табела 15. Излазна снага PV панела под константним зрачењем у различитим условима [27]

Kaldellis и Kapsali [28] су симулирали утицај прашине на енергетске перформансе PV генератора базирајући се на експериментална мерења. Према резултатима ове студије, примећено је значајно смањење PV енергије и ефикасности због стварања наслага и акумулирања масе на површини панела. Слична студија о утицају прашине различитих физичких својстава на перформансе PV ћелија је спроведена од стране El-Shobokshu и Hussein [29]. Користили су различите типове прашине; кречњак, цемент и угљеникове честице. Контролисани експерименти су спроведени коришћењем соларног симулатора као извора светла. У експерименту се употребљено пет типова прашине са различитим физичким својствима, од којих су три врсте кречњачког камена, цемент и угљеникове честице. Закључили су да fine честице прашине имају већи утицај на PV перформансе од крупнијих честица. Fine честице грађевинских материјала, као нпр. цемент и сл., које су присутне у урбаним срединама, значајно смањују PV перформансе уколико дође до стварања наслага на површини ћелија или модула. Hee [30] је проучавао услове таложења прашине у Сингапору и њихов утицај на оптичку пролазност кроз стаклене модуле. Откривено је да се пролаз светла кроз раван слој стакла смањује са 90,7% на 87,6%. Узорци сакупљени близу извора прашине и других извора загађења, као нпр. саобраћајнице и сл., показују негативнији утицај од оних који су сакупљени у шумовитијим пределима. Испитивали су и утицај нагиба панела на одржање чистоће. Стаклене подлоге су нагнуте за углове од 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 и 90 степени и изложени спољном утицају. Пролаз светлости кроз стакло у доњим зонама био је мањи од пролаза кроз горње зоне услед испирања због кише. После 33 дана просечан пролаз светлости кроз горње зоне био је 88,7% а кроз доње 87,9%.

3.1.3. Соларно зрачење

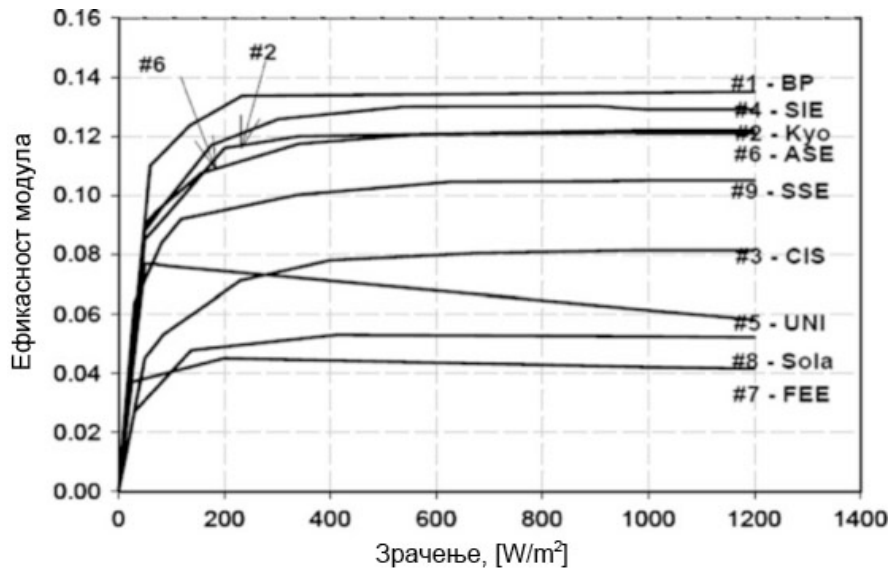
Са повећањем соларног зрачења ефикасност PV модула расте услед све већег броја фотона који падају на модул. Формира се велики број електронских парова услед повећања зрачења што резултује стварањем веће количине струје [18]. Слика 23. показује утицај повећања зрачења на карактеристике PV ћелије [31]. Eikelboom и Jansen [32] су спровели експеримент у спољним и унутрашњим условима како би испитали перформансе девет типова PV модула различитих произвођача.



Слика 23. Утицај зрачења на карактеристике PV модула [31]

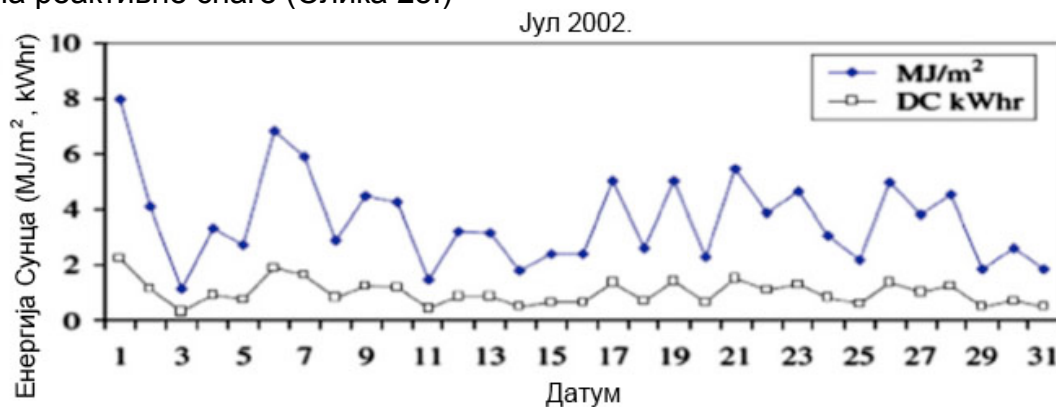
Одабрани су PV модули следећих произвођача: Solarex (монокристални), Kyocera и Shell (поликристални), Siemens (CIS и монокристални), United Solar System (аморфни), ASE (EFG силицијумска плоча) Free Energy Europe и BP Solarex (аморфни). После излагања спољним условима, CIS модули модули од аморфног силицијума показали су јаку деградацију максималне STC (standard test conditions), (Siemens и BP Solarex) нису показали деградацију, мултикристални Kyocera и Shell Solar Energy модули су имали мале промене а промене ASE модула су биле занемарљиве. Тестне карактеристике свих PV модула дате су на Слици 24. Закључено је да су карактеристике PV модула танког филма боље у условима слабијег зрачења.

Hult [33] је збох PV перформанси пручавао базу података соларног зрачења у Африци и Европи. Студија се заснивала на подацима прикупљеним из 20 станица уз помоћ PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System). Потврђени резултати ове студије показали су да су мале укупне грешке PVGIS-CMSAF, око 2%, док стандардне девијације индивидуалних станица износе око 5%. Ови подаци су корисни за детаљно прорачунавање система ван мреже као и за проверу алгоритама коришћених у PVGIS web апликацији. Thongpron и Kritikara [34] спровode студију фокусирану на утицају ниског зрачења на квалитет струје PV система повезаног на мрежу.



Слика 24. Ефикасност PV модула у различитим условима зрачења [31]

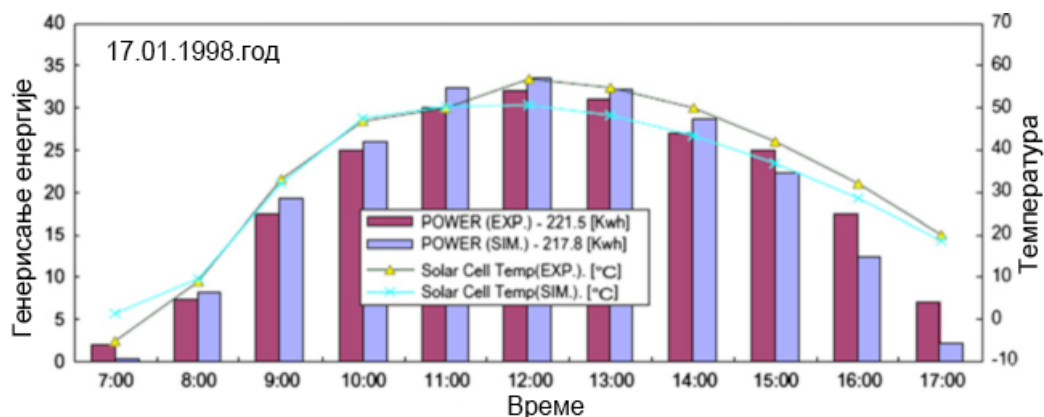
Проучавали су 4.2 kW/p систем кровних јединица и посматрали како PV систем генерише значајну количину реалне снаге, у опсегу и проценту комплексне снаге, у високим вредностима зрачења. На ниским нивоима зрачења, када систем не производи довољно излазне снаге, реактивна снага се црпи из дистрибутивног трансформатора и похрањује се преко инвертера у складишта. Засновано на резултатима са тест полигона и подацима за дугорочно зрачење Бангкока, процењено је да у условима тропске клима, нпр. Тајланд, значајна количина енергије зрачења, око 20-30%, је доступна као форма реактивне снаге (Слика 25.)



Слика 25. Излазна снага PV модула у условима зрачења испод 400 W/m² [34]

Значај варијације соларног спектра за соларне ћелије танког филма експериментално је проучавао Gottschalg [35]. Студија се базирала на три врсте ћелија танког филма, CIGS, a-Si и CdTe. На годишњој основи, најосетљивији материјал је a-Si. Процењено је да корисна фракција a-Si се креће од +6% до -9%, респективно годишњем просеку. CdTe и CIGS варирају од +4% до -6% са $\pm 1.5\%$, респективно годишњем просеку. Yoo [36] је проучавао излазну снагу BIPV током једногодишње симулације теренском експерименталном (field experiment) методом у Кореји. Веза између излазне енергије и степена зрачења је приказана на Слици 26. Приметили су да је током поднева, када је количина

зрачења највећа, и генерисана енергија PV модула је највећа. Резултат студије је показао да перформанса PV модула зависи од количине зрачења која доспе на површину модула. Резултати симулације показују добру усклађеност са експерименталном методом.



Слика 26. Генерисање PV енергије током једног дана [36]

4. Утицај соларне фотонапонске технологије на животну средину

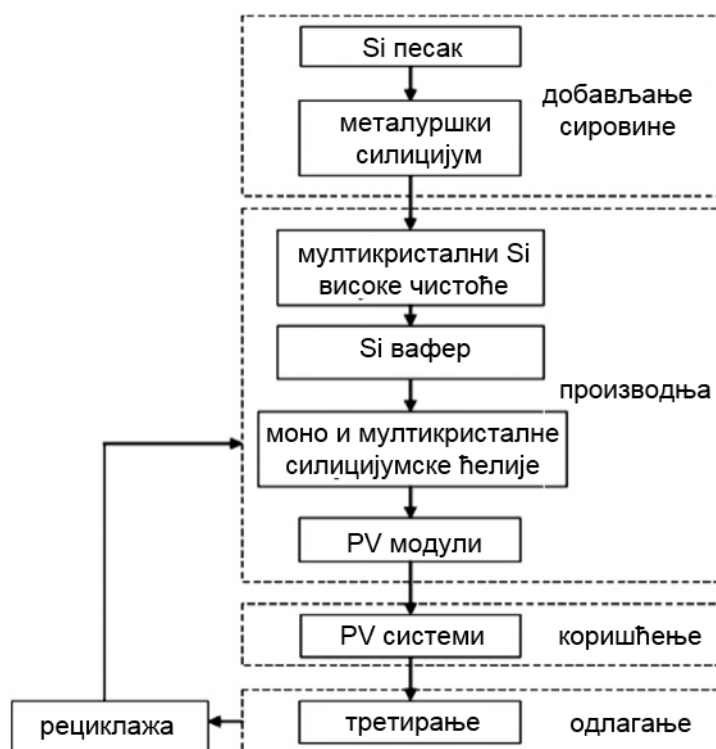
У циљу генерисања електрицитета помоћу PV модула, неки производни процеси захтевају различите материјале. Жвотни циклус PV модула дат је на Слици 27. [56]. Zhang [57] је дискутовао о факторима осетљивости животне средине, кључним факторима заштите од загађења, анализи утицаја на животну средину као и процени животог циклуса PV система базираног на кристалном силицијуму (Слика 28). Дискутовано је о најбитнијим еколошким проблемима у PV индустрији полисиликонских ћелија.

У процесу производње мултикристалног силицијума високе чистоће, металуршки силицијум се претвара у SiHCl_3 а потом се SiHCl_3 деоксидише водоником.



Слика 27. Животни циклус PV модула [57]

У целом процесу око 25% SiHCl_3 се претвара у полисилицијум а остатак је издувни гас који генерише нуспродукт у облику SiCl_4 . Предложено је да се PV систем на крају свог корисног живота демонтира, рециклира и одложи на сигурно чување како би се негатвни утицај на околину свео на минимум, ублажио недостатак сировина за PV уређаје и избегло растурање ресурса. Процена утицаја на животну средину на овом нивоу треба да се фокусира на разне технике рециклаже PV система. Као што је поменуто, различити материјали као нпр. силицијум, CIS, CdTe и други, се користе у производњи соларних ћелија.



Слика 28. Животни циклус PV система [57]

У циљу прибављана сировина за PV производњу неопходо је ископавање руда, а то може изазвати потенцијалну опасност по рударе. Рударске машине користе бензин и дизел гориво што изазива загађење ваздуха [56]. Може се видети да обојено сетљиве PV ћелије емитују висок ниво сумпороксида, азотоксида и угљендиоксида у поређењу са другим PV ћелијама. Сумпороксид и азотоксид у комбинацији са водом производе киселе кише које штете живим организмима и разарају многе друге материјале, док угљен-моноксид изазива глобално загревање [58].

PV тип	Емисија гасова стаклене баште (g-CO ₂ /Kwh _e)	PV тип	Емисија гасова стаклене баште (g-CO ₂ /Kwh _e)
Монокристални силицијум	2820.0	Поликристални силицијум	12.0
	90.0		53.4
	0.0		26.4
	64.8		104.0
	44.0		72.4
	217.0		12.1
Аморфни силицијум	165.0	CIS	9.4
	47.0		16.5
	50.0		
	39.0		Обојено осетљиве ћелија
	34.3		19-47
	15.6	CdTe	15.6

Табела 16. Преглед емисије гасова стаклене баште за различите материјале [60]

Од технологије танког филма се очекује животни век од 25 до 35 година[59]. Међутим, када PV ћелије достигну крај свог животног века могу штетити околини постајући токсичне уколико се правилно не одложе[127]. Sherwani [60] је дао преглед на LCA за PV модуле базирани на аморфном, монокристалном, поликристалном силицијуму као и другим типовима PV материјала. Резултат прегледа гасова стаклене баште дат је у Табели 16.

Пуна процена утицаја PV модула од монокристалног силицијума на околину дискутована је од стране Phulipsen и Alsem [61]. Студија упоређивања три PV случаја; 0.44m^2 , 0.65m^2 , 1m^2 је разматрана у његовом раду. Предлажу смањење употребе сребра као материјала за контакте услед тешке доступности и накнадног одлагања услед негативног утицаја на околину. Коришћење танких вафера у PV производњи је корисно ради смањења количине утрошеног материјала. Roes [62] је дао процену утицаја полимерних соларних ћелија и других материјала на животну средину. Упоредни резултати утицаја на животну средину полимера и монокристалног силицијума, као што су: NREU, промена климе, стварање озонских рупа, формирање фотохемијских оксида, ацидификација и еутрофикација, су показали да полимери имају ниске вредности негативног утицаја.

Закључено је да технологија полимера има најмање негативног утицаја у односу на друге технологије. Srivastava [63] је спровео истраживање утицаја на животну средину четири главних технологија соларних ћелија; мултикристални силицијум (mc-Si), кадмијум телурид (CdTe) и кадмијум индијум селен (CIS). У тој студији разматрани су следећи аспекти: потребе за енергијом и време исплаћивања инвестиције, потребе за материјалом и време нестанка материјала, утицај на околину, управљање отпадом, могућности за рециклажу модула, безбедност и здравље и спољна безбедност. За разматрање процене емисије и ризика коришћења кадмијума и селена у CdTe и CIS модулима, прихватљиво је поређење са неким постојећим производима као што су NiCd батерије или електране на угаљ. Закључак те студије је да ни једна технологија нема добре или изузетне резултате у свим аспектима, закључујемо да a-Si технологија има најмање негативног утицаја на животну средину а следећа је mc-Si технологија. Пуна процена CdTe базираних PV модула и њихових материјала спроведена је од стране Fthenakis [64]. Упоредили су употребу Cd у PV модулима и употребу у NiCd батеријама и закључили да је CdTe штетан материјал али уколико се нормално користи у нормалним условима он не генерише штетне гасове. Дискутовали су о питањима заштите животне средине везаним за CdTe у случају пожара и закључили да кадмијум није опасност јер се раствара у течном стаклу и задржава у њему. У реалности, када PV замени електране на угаљ, спречиће се емисија Cd као и емисија огромних количина CO_2 , NO_x и разних честица у атмосферу.

	g/јединици	mg/kWh (kg/GWh)
PV CdTe	7 g/m²	1,3
NiCd батерија AA величине	3.2	3265
NiCd батерија C величине	10,5	3265
NiCd батерија C величине	21	3265

Табела 17. Количина Cd у CdTe PV панелу и NiCd батеријама [64]

Производња соларних ћелија има негативан утицај на животну средину током самог процеса производње али има вишеструке предности приликом коришћења саме технологије. Производња електричне енергије путем PV система је чистија и безбеднија по околину у поређењу са електранама на фосилна горива. Предности и мане генерисања ел. енергије путем PV технологије, угља, фосилних горива и нуклеарних горива дата је у Табели 18.

Предности и мане	PV технологија	Нуклеарна енергија	Угаљ и горива
Предности	Ниска емисија CO ₂ ,бесплатан ресурс - Сунце, неограничен ресурс, нема штетних утицај на животну средину	Јефтина, висока ефикасност, не загађује ваздух, поуздана	Висока ефикасност, конвенционални енергетски извор, електране се могу градити било где, јефтин ресурс
Мане	Високи иницијални трошкови, ниска ефикасност, неопходна велика површина за инсталацију система, перформансе зависе од временских услова и локације	Веома опасна, извори уранијума се исцрпљују	Висока емисија CO ₂ и других штетних гасова, извори ресурса се исцрпљују, цена расте , извор гасова стаклене баште

Табела 18. Предности и мане PV технологије у поређењу са другим начинима добијања ел. енергије [64]

Поређење PV технологије са другим обновљивим изворима енергије дати су у Табели 19. Из табеле може се видети да PV технологија, као обновљиви извор енергије, има велики потенцијал за очување животне средине.

Предности и мане	Соларна енергија	Енергија плиме и осеке	Енергија ветра	Енергија таласа
Предности	Ниска емисија CO ₂ Бесплатан ресурс Нема покретних делова Нема штетног утицаја	Не користи горива Поуздана Јефтино одржавање Нема загађења	Привлачи туристе економична Нема загађења Бесплатан ресурс	Висока ефикасност Ниска цена Бесплатан извор ресурса Нема загађења
Мане	Перформансе зависе од времена и локације Заузима земљиште Захтева велике површине Ниска ефикасност Високи почетни трошкови	Може се инсталирати само на одређеним местима Ниска ефикасност Високи иницијални трошкови	Може усмртити птице које пролећу у близини Изазива буку Зависи од времена	Мора издржати тешке услове рада Може се градити само на обалама Бука Зависи од енергије таласа

Табела 19. Поређење PV технологије са другим обновљивим изворима енергије [64]

Неке од мана PV технологије везане за њено лоцирање на копну могу бити лако решене интегрисаним PV системима (BIPV) који се могу инсталирати на зидове или кровове зграда како би се уштедео простор. Ниска ефикасност услед пораста температуре лако се може решити јер већ многи истраживачи раде на фотонапонско-термалној (PVT) технологији, која ће повећати PV

ефикасност применом за грејање ваздуха или воде. Туаги [65] је дао преглед аспеката истраживања, развоја и примене хибридниh PV/T система. Закључено је да конверзија соларне у електричну енергију и грејање помоћу једног уређаја има неколико предности везаних за будуће потребе за енергијом. Неки истраживачи су показали да PV има добар потенцијал у CDM. Purohit и Michaelowa [66] процењују соларни потенцијал (SPV) Индије и показују да SPV има широк потенцијал у CO₂ миграцији у наводњавању у Индији. Mondal и Sadrul Islam [67] процењују утицај смањења емисије CO₂ у Бангладешком енергетском сектору од 2005.-2035. уз помоћ PV технологије. Ова анализа се базира на дугорочној оптимизацији модела енергетског система користећи MARKAL framework. Резултати студије показују да електрична енергија генерисана PV системима још уек није конкурентна оној добијеној из електрана које користе фосилна горива.

5. Анализа трошкова фотонапонских технологија

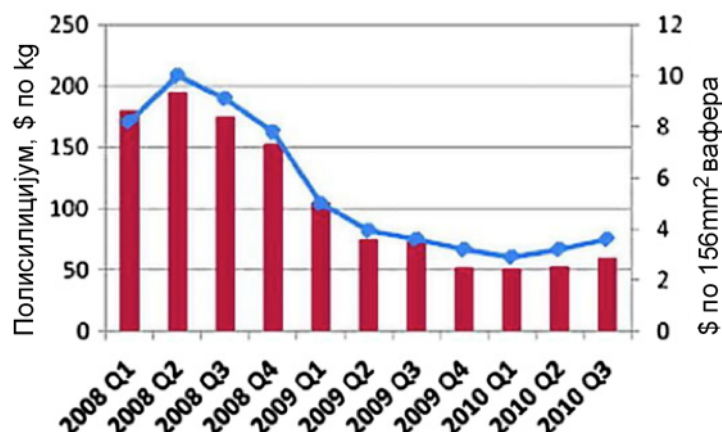
У овом делу дата је анализа трошкова базирана на доступним научним радовима и литературама произвођача. У протеклим деценијама се може видети да цена различитих материјала за соларне ћелије опада услед огромних напора уложених у развој и истраживање у области науке о материјалима. У поређењу са осталим материјалима за соларне ћелије, уочено је да монокристални силицијум има добру PV ефикасност али услед комплексности процеса производње цена му је релативно висока [37]. Трошкови по вату монокристалних материјала су били око 3,97\$ у 1996. години. Поликристални силицијумски материјал је јефтинији од монокристалног, а и процес производње је доста једноставнији. [38]. Анализа трошкова поли и монокристалног PV модула од 1996. до 2010. године коју је спровео Маусок [38] дата је у Табели 20. Из табле се може видети да цена сваког материјала опада, што је могуће применом: (1) иновација у области технологије материјала, (2) повећањем обима производње PV модула, (3) повећањем ефикасности коришћењем нових технологија, (4) продужавањем рока употребе PV система, (5) вођењем политике фаворизовања обновљивих извора енергије.

Опција	цена 1996.	2000. трошак/цена	2010. трошак/цена
Једноструки XTAL	3,30-4,25	1,50/2,50	1,20/2,00
Поликристал	3,30-4,25	1,50/2,50	1,20/2,00
Трака	-	1,50/2,50	1,20/2,00
Концентратор (модул + мотор тракера +)	4,00	1,20/2,00	0,80/1,33
Аморфна 81 (дупло сложена)	3,00-3,50	1,20/2,00	0,75/1,25
TI сферни	-	1,20/2,00	1,00/1,67
CIS	-	1,20/2,00	0,75/1,25
Si филм на LCS	-	1,20/2,00	0,75/1,25
Јефтини (BAU)	3,75	2,50	2,00
Јефтини (ACCEL)	3,00	2,00	1,25

Табела 20. Производна цена модула [38]

Цена p-Si материјала, базирана квартално од 2008. до 2010.године , дата је на Слици 29. Највиша цена је током 2008. године услед високе потражње а

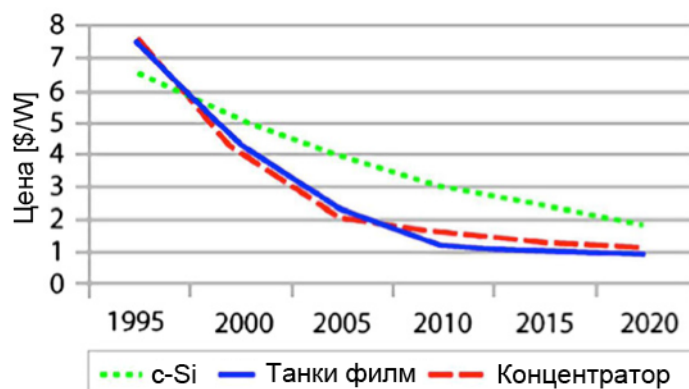
ниским залиха, али цена опада током сваког квартала [39]. Технологија танког филма представља изазов технологији кристалног силицијума и приморава на пад цена.



Слика 29. Цена p-Si од 2008. до 2010. године [39]

CdTe/CdS технологија има проблема са доступношћу сировна за производњу као и негативни утицај на животну средину, али и поред тога има релативно ниску цену по вату, која износи 2\$ [40]. За инсталацију модула на кровове ради употребе у домаћинствима, мора се додати приближно 5\$ по вату зависности од локације где се инсталација врши.

Федерална такса (САД) за инсталацију PV модула варира од државе до државе, и може износити чак и до 50% од цене инсталације [41]. Трошкове PV материјала од 1995. до 2012. године, са предвиђањем цена чак до 2020. године, анализирао је Adams [42]. Може се уочити драстичан пад цена од 1995. до 2012. године од чак 3\$ по вату (Слика 30).



Слика 30. Цена PV панела од 1995. до 2020. године [42].

Предвиђено је да ће у предстојећим годинама трошкови пасти на 1\$ по вату за технологију танког филма и 2\$ по вату за кристалне материјале [110]. Прорачуни анализе цена за PV модуле базиране на силицијуму дао је Powell [43]. Ова анализа укључује цену материјала, цену радне снаге, трошкове потрошње ел. енергије и укупни трошак производње PV модула у 2012. години и такође предвиђа поларитет трошкова у 2020. години (Табела 21.).

Назив	2012	2020
Ефикасност модула (%)	14,5	20,5
Дебљина ћелије (μm)	180	50,00
Искоришћење материјала (%)	0,45	0,90
Уговорна цена Si (\$/kg)	40	25,00
Трошак радне снаге (\$/h)	15,8	18,5
Број радне снаге (ppI/Mw/a)	2,9	1,5
Трошак ел. енергије (\$/kWh)	0,07	0,09
Капитални трошкови(MM/Mw/a)	1,08	1,19

Табела 21. Прорачун анализе трошкова PV модула базираних на силицијуму [43]

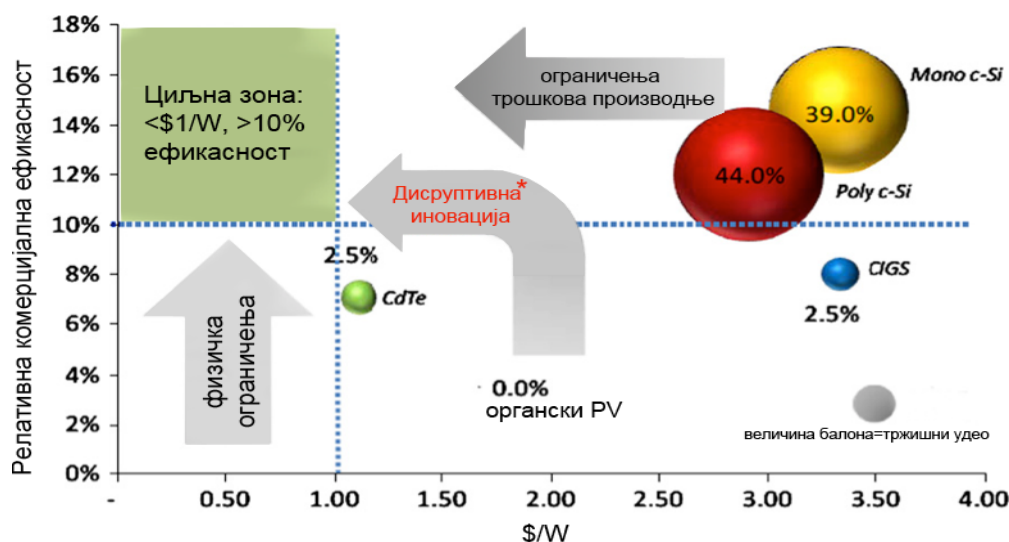
У 2020. години предвиђа се пораст цене рада, ел. енергије и капиталних трошкова услед економског развоја. На бази доступних података, цене PV панела различитих произвођача са поређењем снаге дата су у Табели 22. Ефикасност PV материјала и њихови производни трошкови по вату, као и удео на тржишту, дати су на Слици 31.[46] Соларне ћелије танког филма имају нижу цену производње у поређењу са силицијумским, али имају недостатке у виду ниже ефикасности, док су соларне ћелије од органских материјала и трећа генерација PV ћелија још увек у фази истраживања. Полимерне ћелије, у погледу цене производње, одличан су конкурент ћелијама од кристалног силицијума. Не само да су јефтиније већ се могу и брже производити[47].

Преглед полимерних PV материјала дат је у Табели 18. Kalowekато и Baker [48] су процењивали трошкове производње органских соларних ћелија разматрајући цене материјала, трошкове процеса укључујући капиталне и трошкове радне снаге. Дошли су до резултата да се цена производње органске соларне ћелије креће од \$48.8-\$138.9/m². Тако се цена модула ефикасности 5% креће од 1-2.83 \$/Wp.

Компанија	Технологија	Снага [W]	Цена [eur]	Референце
Avancis	CIS	110	196	[44]
Q cell	CIS	95	174	[44]
Kyocera	Поликристал	135	247	[44]
Solarpark	Поликристал	240	374,9	[44]
Solar wold	Поликристал	225	288,68	[44]
LG	Монокристал	250	382,9	[44]
Sanyo	Хетероспојне са међуслојем	214	418,9	[44]
Schott solar	Монокристал	190	308	[44]
UNI-solar	Аморфна	124	179	[45]

Табела 22. Цена PV панела према снази и произвођачима

Фотонапонски панели - технологије израде



* иновација која ствара ново тржиште постављајући нове вредности које неочекивано преузимају постојеће тржиште.

Слика 31. Комерцијална PV ефикасност у поређењу са ценом по вату [46]

Тип материјала	Цена по килограму (eur/kg)	Тип материјала	Цена по килограму (eur/kg)
Ероху	1,96 - 2,15	FEP	16,30 - 24,7
Ероху са стакленим влакнима (15-50%)	3,68 - 4,05	FEP са стакленим влакнима (20%)	18,4 - 20,2
ETFE	20-30	PEI	10,8 - 11,9
ETFE са стакленим влакнима (25%)	20,7 - 22,8	PEI са стакленим влакнима (30%)	8,68 - 9,74
PI	29 - 35	PTFE	8 - 16
PI са стакленим влакнима (30%)	23,5 - 25,9	PTFE са стакленим влакнима (15% and 25%)	10,9 - 13,1
PE	1,1 - 3,54	PMP	7,47 - 9,13
PE with са стакленим влакнима (20-30%)	2,18 - 2,61	PMP са стакленим влакнима (10-30%)	7,43 - 8,17
PP	1,12 - 2,37	TPU	8,67 - 9,54
PP са стакленим влакнима (10-50%)	1,9 - 2,92	TPU са стакленим влакнима (40%)	4,3 - 4,73
PVDF	12,3 - 18,5	EVA	0,49 - 0,55
Силикони	9,88 - 10,9	PB	1,5 - 1,7
PEN	2,67 - 2,94	Стакло	1,25 - 1,39

Табела 23. Цена полимерних PV материјала [70]

Nielsen [49] је анализирао тренутне трошкове који укључују материјале и трошкове производње за развој полимерне соларне ћелије површине 360cm^2 , излазне снаге 660 mW и закључио да износе 5.3491 еура. Emmot [50] је изјавио да за органску соларну ћелију ефикасности $0,27\%$ трошкови износе од $16,09$ до $33,33$ €/Wp. Међутим, не постоје компаније које производе органске соларне ћелије јер је технологија још увек у фази истраживања. Branker [51] је разматрао трошкове соларног фотонапонског електрицитетa. Процена цене инсталација широм света дата је у Табели 24.

Соларна PV технологија	Инсталирани PV трошак (\$/Wp)	Величина пројекта
Кристална (Европа)	5,00	<i>Utility</i>
Кристална (Кина)	4,42	<i>Utility</i>
Кристална	5,02	<i>Utility</i>
Танки филм CdS/CdTe	4,28	<i>Utility</i>
Танки филм a-Si/μ-Si	3,52	<i>Utility</i>
Кристална и танки филм (САД)	7,50	<i>Capacity weighted average (2009)</i>
Кристална и танки филм (Немачка)	7,70	Резиденцијални (2-5kW) (2009)
Кристална и танки филм (Јапан)	4,70	Резиденцијални (2-5kW) (2009)
Кристална и танки филм (САД, Канада)	5,90	Резиденцијални
Кристална и танки филм (САД)	7,30	Резиденцијални ≤ (2-5kW) (2009)
Кристална и танки филм (САД, Канада)	6,10	>100 kW (2010)

Табела 24. Укупни трошкови PV инсталације [51]

Треба напоменути да су просечни трошкови инсталације PV система нижи у Немачкој и Јапану него у САД. Соларна електрана базирана на CdS/CdTe технологији, снаге 2 GW, инсталирана је у Waldpolenz, Немачкој. PV модули снаге 40 MW су постављени од стране First Solar по цени од 3250 еура по киловату. Систем од 7,5 MW је инсталиран у месту Bluthe у Калифорнији, САД, где је California Public Utility Commision договорила испоруку електричне енергије од 12 центи по kWh[31]. Oerlikon Solea из Швајцарске тврди да имају технологију која може да смањи производне трошкове соларних ћелија танког филма на 0,5 еура по пик вату [120]. Ово је прва компанија која је направила фабрику соларних ћелија капацитета 1 GW базирану на CIS технологији [52]. До данас много је истраживача радило на смањењу трошкова производње ћелија танког филма путем метода софистициране вакуумске евапорације [53], смањења варничења металне легуре [54], слагањем слојева елементарних процеса [55] и слично.

6. Перспектива фотонапонске конверзије у Републици Србији

Европски енергетски закон има велики утицај на Србију и њен сектор обновљивијих извора енергије. Енергетска заједница се шири интерним енергетским тржиштем ЕУ на југоисточну Европу на основу правно обавезујућих споразума. Услед тога, Србија као члан Енергетске заједнице, обавезна је да, корак по корак, имплементира релевантне регулативе ЕУ које се тичу енергетског сектора. Способност Србије да преузме дужности чланства процењене су на основу примене споразума са ЕУ. Европска комисија је нагласила енергетски сектор као једно од поља у које ће Србија морати да уложи значајне напоре како би се усагласила са европским нормама [22]. Закон о енергији Републике Србије донет је 24. јула 2004. године. Овај закон регулише: циљеве енергетске политике и начине њеног спровођења, организационе и функционе шеме енергетског тржишта, услове временског и квалитативног испоручивања енергије крајњем купцу, услове за сигуран, поуздан и ефикасан начин производње енергије, управљање системима трансфера, транспорта и дистрибуције енергије и осигуравање њиховог непрекорног функционисања и развоја, услове примене и начина примене енергетских активности, услове који омогућавају енергетску ефикасност и заштиту животне средине, и коначно, управљење и мониторинг напора за

имплементацију овог споразума. Овај закон омогућава оснивање Агенције за енергетику и Агенције за енергетску ефикасност. Закон о енергији користи термин обновљиви извори енергије који подразумева изворе енергије који се могу наћи у природи и делимично или потпуно могу бити обновљени, нарочито енергија воде, ветра, неакумулирана сунчева енергија, биомаса, геотермална енергија и слично.

Енергетска политика Републике Србије обухвата мере и активности које се спроводе ради схватања дугорочних циљева у области енергетике а нарочито следеће:

1. Сигуран, квалитетан и поуздан извор енергије и енергената,
2. Балансиран развој енергетских активности у циљу обезбеђивања потребних количина енергије и енергената потребних за задовољавање потреба потрошача енергије и енергената.
3. Обезбеђивање услова за унапређење енергетске ефикасности и имплементацију енергетских активности и потрошње енергије.
4. Обезбеђивање услова за стимулацију коришћења обновљивих извора енергије и комбиновану производњу електричне и топлотне енергије.
5. Унапређење очувања животне средине и сл.

Енергетска политика се спроводи кроз примену Стратегије енергетског развоја Републике Србије, имплементацију програма стратегије и енергетског баланса. Производња електричне енергије подразумева производњу у хидроелектранама, термоелектранама, електроенергетским постројењима, термо електроенергетским постројењима и електранама на обновљиве изворе енергије или електранама на комунални отпад. Привилеговани произвођачи електричне енергије су они који у процесу производње користе обновљиве изворе енергије или комунални отпад, произвођачи који у складу са Законом о енергији спадају у мале произвођаче као и они произвођачи који симултано производе електричну и термалну енергију како би испоштовали критеријуме енергетске ефикасности. Предуслов за добијање статуса привилегованог произвођача електричне енергије и процена испуњавања ових услова је издата од стране Владе Републике Србије 3. Септембра 2009. године. У складу са овим законским актом ентитет или предузетник може добити статус привилегованог произвођача електричне енергије уколико у процесу производње користи минимум 90% обновљивих извора енергије а остатак од 10% чине фосилна горива или отпад. Акт подстицајних мера за производњу ел. и топлотне енергије коришћењем обновљивих извора енергије је донет од стране Владе Републике Србије 20. новембра 2009.године. Овим актом су предвиђене подстицајне мере за производњу електричне енергије коришћењем обновљивих извора енергије, њене куповине и дефинисани су енергетски објекти који производе ел. енергију из обновљивих извора енергије. Такође одређује садржај споразума о куповини ел. енергије путем подстицајних мера и сл.. Право на подстицајне мере дефинисане овим актом за ел. енергију произведену у постројењима које користе соларну енергију је ограничен на соларне електране инсталисане снаге до 5 MW. У складу са актом за 1 kW ел. енергије произведене у соларним електранама у интервал од 12 година од дана потписивања уговора, произвођачу је загарантована откупна цена од 23 еуро центи. Прикључивање соларних електрана малих размера инсталираних на приватним кућама регулисано је легислативом Електропривреде Србије (ЕПС).

Закон о енергији издат 1. августа 2011.године јасно дефинише подстицајне мере за коришћење обновљивих извора енергије у генерисању ел. енергије као и за мале произвођаче ел. енергије, како је наведено у Службеном гласнику Републике Србије бр. 27/2011. Република Србија је ратификовала споразум о финансирању енергетске заједнице између ЕУ и Албаније, Бугарске, БИХ, Хрватске, Македоније, Црне Горе, Румуније и привремене мисије УН на Косову и Метохији. У септембру 2008. године Европски парламент је усвојио сет регулатива које се односе на климатске промене које имају за циљ обезбеђивање смањења емисије гасова стаклене баште за 20%, унапређење енергетске ефикасности за 20% и партиципацију од 20% обновљивих извора енергије у укупној производњи ел. енергије у ЕУ до 2020.године, у поређењу са 1990. годином. Република Србија је прихватила инструкције ЕУ о обновљивим изворима енергије и улаже велике напоре за њихову примену. Република Србија је 26. јануара 2009.године постала члан Међународне агенције за обновљиве изворе енергије (IRENA) [79-82]. Политика обновљивих извора енергије у Републици Србији је разрађена у елаборату [83]. Циљ елабората [83] је да пружи увид у циљеве, инструменте и планиране мере Владе Републике Србије у области обновљивих извора енергије (RES). Метод је базиран на прегледу и анализи усвојених закона, регулација и званичних докумената. Резултати су открили да је у овој области направљен напредак у последњим годинама. Дефинисани су краткорочни циљеви пропорције енергије из RES у укупној енергетској потрошњи: усвојене су тарифе, легислативе и социјално економске баријере повећања експлоатације RES су анализиране и предложене су начини анализе и мерења за њихово решавање. Постојеће законске легислативе које се тичу обновљивих извора енергије су непрецизне и некомплетне. Бројна подзаконска акта, технички стандарди и смернице су још увек нејасни. Документи везани за RES су неконзистентни, нејасни и обмањујући када је у питању имплементација специфичних подстицајних мера за производњу енергије базиране на RES [83]. Анализа сектора обновљивих извора енергије у Србији дата је у раду [84]. Производња енергије из обновљивих извора у Србији је у иницијалној фази, тако да је овај рад усмерен на основне претпоставке, потенцијале и институционални оквир за развој ових активности у Србији. Закључак тог рада указује да целокупан неискоришћени потенцијал за производњу енергије из обновљивих извора, заједно са адекватним институционалним оквиром, може створити велике могућности за стране инвестиције [84]. Прилике и изазови политике одрживе енергије у југоисточној Европи су као и Споразум енергетске заједнице југоситочне Европе дат је у раду [85]. У том раду аутор је покушао да систематизује улогу енергетског сектора у југоисточној Европи у контексту процеса Европске енергетске политике. Овај рад подстиче свесност о постављеним потребама животне средине, о обновљивим изворима енергије и њиховој примени, а истовремено указује да је одговорност југоисточне Европе на ниском нивоу [85]. Перспективе одрживог развоја у земљама југоисточне Европе су дате у раду [86]. Земље југоисточне Европе су на самом почетку планирања свог развоја у складу са теоретским концептом одрживог развоја. Одрживи развој је дефинисан као базични императив и једини дугорочни модел развоја. Посебна пажња је дата интензивном мониторингу индикатора еколошких и економских подсистема. Између осталог, истраживања показују крхку везу вредности индикатора еколошког и економског подсистема, где било каква промена вредности једног од индикатора консеквентно води промени крајњег резултата

[86]. Имплементација Кјото протокола у Србији као визија одрживе енергетике и економског развоја дата је у раду [87]. У том раду је објашњена ниска енергетска ефикасност типична за српску економију, која се базира на застарелим и прљавим технологијама. Поређење одабраних економских индикатора и индикатора енергетске ефикасности, као у Србији тако и у ЕУ, показују предности примене Кјото протокола услед раста конкуренције на глобалном тржишту. Енергетска ефикасност, која је питање конкурентности сваке економије, може финансирати сама себе кроз механизме Кјото протокола продајом вишка резултата смањења емисије штетних гасова услед унапређивања енергетске ефикасности. [87].

Иако већина територије Републике Србије има значајно већи број сунчаних дана од већине земаља ЕУ (преко 2000 сати), високи трошкови соларних PV модула и пратеће опреме ометају интензивније коришћење обновљивих извора енергије и у главном зависе од социјалних мера подстицаја државе и примене националног Програма обновљивих извора енергије. Према доступним подацима коришћење соларне енергије је тренутно занемарљиво. Производња соларне енергије, базирана на потенцијалу сунчевог зрачења у Србији може се сматрати као примамљива инвестиција за иностране улагаче, али захтева значајне иницијалне инвестиције као и куповину иностране опреме, која је чини мање примамљивом у односу на добијање ел. енергије из других обновљивих извора. Производња RES енергије је један од најуспешнијих начина да Србија, као и друге чланице потписнице Кјото протокола, испуне захтеве и постигну адекватни ниво одрживог развоја [84].

Перспективе и процене соларног PV инжењеринга Републике Србије дати су у раду [77]. Рад [77] даје преглед кључних питања и изгледа везаних за соларни PV енерго инжењеринг Републике Србије. Енергетски соларни PV сектор у Републици Србији је слабо развијен упркос одличној географској позицији Републике Србије и скорашњег усвајања тарифног система од стране Владе Републике Србије. Поред тога, рад представља резултате прорачуна генерисања електричне енергије за фиксне и PV електране са системом за праћење путање Сунца путем PVGIS софтвера за 20 градова у Републици Србији. У раду је закључено да недовољна свест о могућностима производње ел. енергије помоћу соларне PV технологије може бити значајно ограничење и одлагати њено коришћење у Републици Србији. Тренутно соларна PV технологија није имплементирана у сектору обновљивих извора енергије Републике Србије али очекују се први чврсти кораци у том правцу [77].

Могућности производње PV електричне енергије системима повезаним у мрежу у урбаним условима Србије дате су у раду [88]. Овај рад даје резултате прорачуна прихода од генерисања ел. енергије током целокупног животног периода двоспратне куће у Београду као и инвестицију за куповину PV панела (тренутно доступних у Србији). Дискутовано је о тренутном степену економске исплативости овог решења и предложене су неопходне субвенције за подршку производњи соларног електрицитета, како помоћу тарифног система или путем других финансијских инструмената [88]. Соларни колектори и други уређаји за темалну конверзију сунчевог зрачења се производе у Републици Србији, за разлику од соларних ћелија и друге опреме за PV конверзију Сунчевог зрачења која се не производи. [73-75]. У Републици Србији се соларно зрачење у главном користи за загревање воде а ређе за генерисање електрицитета.

У Србији су до сада повезани на мрежу следећи PV системи: основна школа “Душан Јерковић” у Руми (3kWp, 2004. год.), манастир Девих близу Пирота (15kWp, 2010. год.), средња школа у Варварину (5kWp, 2010.год., Netinvest Co.), електротехничка школа “Раде Кончар” у Београду (5kWp, 2010.год., Netinvest Co.), виша техничка школа “Михајло Пупин” у Кули (5kWp, 2010.год., Netinvest Co.), Факултет техничких наука у Новом Саду (8kWp, 2011.год.), Електроинжењерском факултету у Нишу (1,2kWp, 2011.год., Alfates Co.), Математички факултет у Нишу (2kWp, 2012.год., Alfates Co.), приватна кућа у селу Блаце (10.44kWp, 2012.год., Netinvest Co.) приватна фирма у Лесковцу (30kWp, 2012.год., Alfates Co.), приватна фирма у Чачку (55kWp, 2012.год, Electrowat Co.), две привате куће у селу Меросина од 10kWp и 20kWp (2012.год., Telephone Engineering Co.) у селу Чортановци (10kWp, 2012.год., Telephone Engineering Co.), у Чачку (5kWp, 2012.год., Telephone Engineering Co.), у Земуну (2.5kWp, 2012.год., Telephone Engineering Co.). PV соларне електране у Варварину, Кули и Београду су инсталиране захваљујући донацијама Владе Шпаније и кроз Агенцију за енергетску ефикасност у Београду путем пројекта Развој инсталација и промоција и коришћења соларне енергије у Србији [75].

До сада је инсталирано у Србији више од 200 система ван мреже, снаге 50W до 4kW. Недавно је почела да јавља интензивнија употреба PV система за напајање семафора и саобраћане сигнализације. У недавно објављеној књизи са насловом “Бела књига електро индустрије Србије” може се наћи легислатура ЕУ која се односи на обновљиве изворе енергије, коришћење обновљивих извора енергије у Србији и законског оквира и могућности за коришћење обновљивих извора енергије у Србији. У књизи су дате смернице ЕУ за смањење емисије гасова стаклене баште за 20%, за смањење потрошње ел. енергије за 20% и обезбеђивање 20% неопходне енергије из обновљивих извора енергије до 2020. године. Поред тога, у књизи се наводи да ће PV соларна електрана капацитета 10MWp генерисати 14,710 MWh годишње и обезбедити 2,8% потребне ел.енергије у том подручју [76]. 27. Јуна 2011. године започета је изградња PV соларне електране у Чајетини.

Тренутно су у изградњи три PV соларне електране у Србији, у Чајетини и Мердарима код Куршумлије фиксне PV соларне електране снаге 2MW, у Лесковцу соларна PV електрана са системом за праћење путање Сунца од 950 kWp [75,81].

6.1. PVGIS и соларна мапа Републике Србије

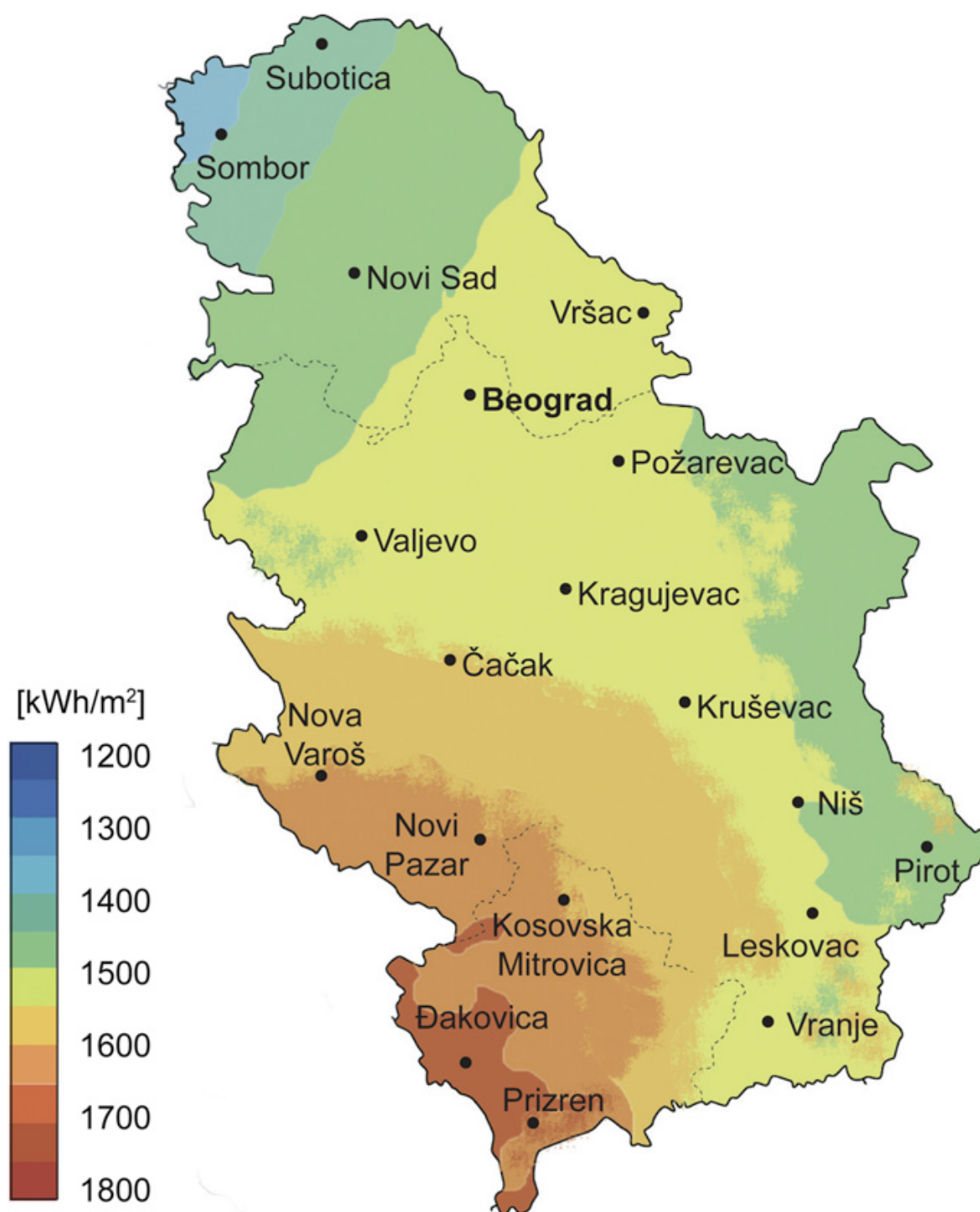
Количина преузетог сунчевог зрачења од стране површине Земље зависи од много фактора, као што су: географска ширина, годишње доба, период дана, чистоћа атмосфере, облачност, оријентација и нагиб површине и сл.. Ови подаци су веома битни због њиховог коришћења у прорачунима трошкова и ефикасности опреме која користи сунчево зрачење. Веома поуздани подаци могу се пронаћи у бази PVGIS (Photovoltaic Geographical Information - Фотоволтични Географски Информациони Систем) [75,77,90,91].

PVGIS је део SOLAREC плана који има за циљ да допринесе бољој имплементацији обновљивих извора енергије у ЕУ. SOLAREC је интерно финансиран пројекат PV соларне енергије за 7. оквирни програм. PVGIS је

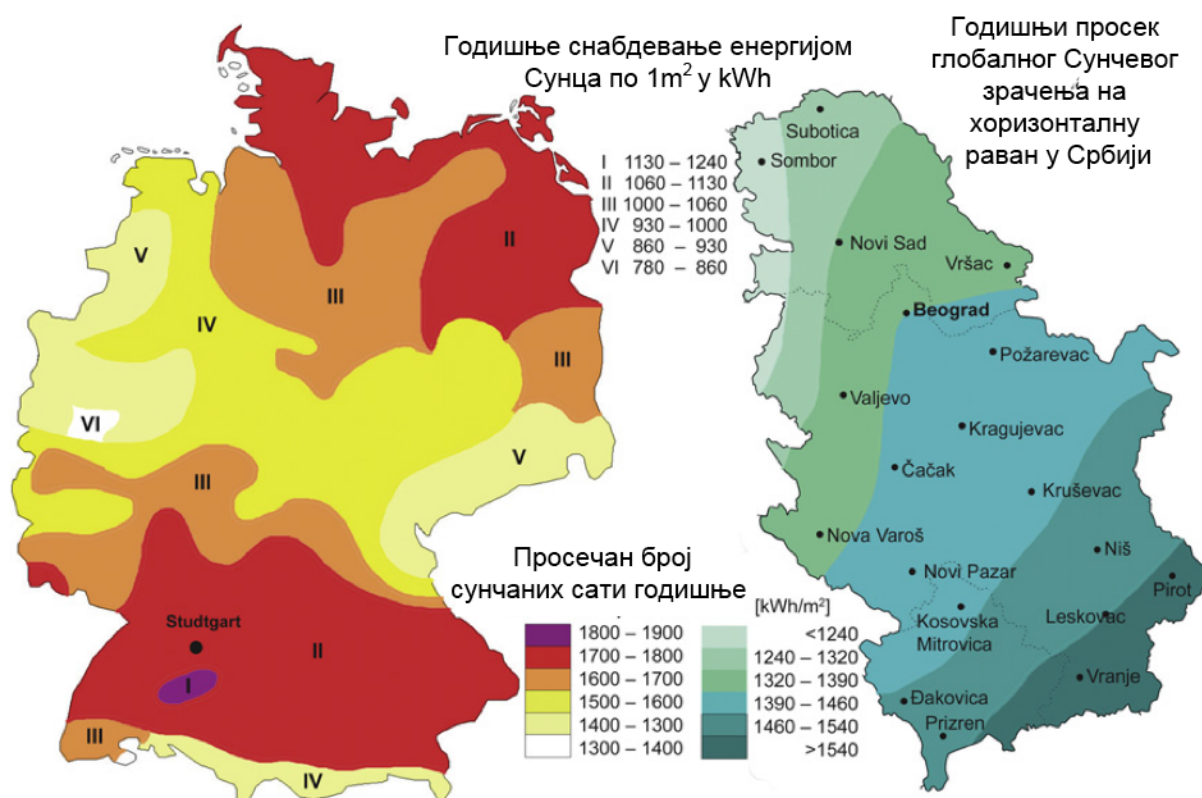
развијан у JRC (Joint Research) Европске комисије у њиховом Одсеку за обновљиве изворе енергије од 2001. године као истраживање GS оријентисаног алата ја процену перформанси соларних PV система у Европској географској регији. Од самог почетка функционисања PVGIS је предвиђен за локално коришћење, међутим приступ бази података PVGIS је отворен за професионалну и општу јавност средствима веб базиране интерактивне апликације. PVGIS обезбеђује податке за анализу техничких, природних у социо-економских фактора PV генерисања електричне енергије у Европи и система подршке за ЕУ земље које се одлуче на коришћење ове технологије. PVGIS методологија подразумева коришћење података за соларно зрачење, оријентацију и нагиб површине PV модула, ефекат сенке на околним теренима, тако да PVGIS представља неминовно основно средство за процену PV имплементације које процењује динамику корелација између соларног зрачења, климе, атмосфере, површине Земље и коришћене PV технологије. Неколико брзих web апликација омогућавају лаку и брзу процену потенцијала генерисања PV ел. енергије за специфичне локалитете у Европи [75,77,90-93].

У циљу прорачунавања генерисаног електрицитета у фиксним PV соларним електранама, PV електранама са системима за праћење путање Сунца са померањем по једној и две осе користе се лако доступни PVGIS софтверски пакети на интернету [90,93]. Ови програми могу обезбедити следеће податке: просечну дневну, месечну и годишњу вредност соларног зрачења по квадратном метру хоризонталне површине, или површине нагнуте под одређеним углом у односу на хоризонталну површину, промене у оптималном нагибном углу соларних модула током године, однос између глобалног и дифузованог зрачења, просечне дневне температуре и дневну, месечну и годишњу вредност генерисаног PV електрицитета у фиксним соларним PV електранама као и у PV соларним електранама са системом за праћење путање Сунца са померањем по једној или две осе.

Општа усвојена PVGIS вредност односа перформанси (губитак PV система) PV соларних постројења са модулима од моно или поликристалног силицијума износи 0,75 [75,77,90]. У овом раду коришћен је PVGIS-3. База података PVGIS-3 се заснива на мерењима изведеним на терену у периоду од 1981.-1990. године, са интерполацијом између тачака мерења како би се добила вредност зрачења у било којој тачки. Нова верзија PVGIS-CMSAF је недавно представљена. Она користи нову базу података соларног зрачења добијену од Постројења за сателитско праћење климе (CMSAF) у периоду од 1998.-2010. године. Узети у обзир могућност грешке теренских мерења и чињенице да се количина соларног зрачења у Европи повећала у последњих 30 година, прорачун помћу PVGIS-CMSAF даје веће вредности него застарели PVGIS-3.



Слика 32. Годишња сума укупног соларног зрачења на оптимално нагнут јужно оријентисан рV модул, у kWh/m^2 за територију Србије [90].
[<http://re.ec.europa.eu/pvgis/>]



Слика 33. Поређење доступних годишњих количина глобалног сунчевог зрачења на хоризонталну површину на територијама Немачке и Србије [90].

За територију Србије PVGIS-CMSAF даје 5% веће вредности соларног зрачења [75,77,90]. Овај програм даје мапу, уочава локацију будуће PV електране, сортира типове соларних ћелија и улазне снаге и типове PV соларне електране [75,77,90].

Годишња сума укупног соларног зрачења на оптимално нагнут јужно оријентисан PV модул, у kWh/m² за територију Србије добијен PVGIS-ом дат је на Слици 32. Са Слике 32. се јасно види да просек соларног зрачења не зависи само од географске ширине. Постоје регионалне разлике у глобалном соларном зрачењу услед карактеристика терена и климатских услова.

Поређење доступних годишњих количина енергије глобалног сунчевог зрачења на хоризонталну површину, у Србији и Немачкој, дате су на Слици 33. Просечне вредности енергије глобалног зрачења на територији Немачке износе 1000 kWh/m², док у Србији је та вредност око 1400 kWh/m². У Србији енергија Сунца равномерно расте од северозапада ка југоистоку док је у Немачкој доста комплекснији случај. Најниже вредности нису на северу већ у централним деловима земље, услед повећане замућености атмосфере [89].

6.2. Производња ел.енергије различитим типовима соларних PV постројења снаге 1MW у Републици Србији

Град	Укупно годишње зрачење по квадратном метру доспело на оптимално нагнуте модуле фиксног PV постројења снаге 1MW (kWh/m2/години)	Укупно годишње зрачење по квадратном метру доспело на оптимално нагнуте модуле PV постројења са системом за праћење путање Сунца по једној осе снаге 1MW (kWh/m2/години)	Укупно годишње зрачење по квадратном метру доспело на оптимално нагнуте модуле PV постројења са систе-мом за праћење путање Сунца по две осе снаге 1MW (kWh/m2/години)
Суботица	1143	1800	1840
Сомбор	1390	1750	1790
Нови Сад	1470	1890	1930
Вршац	1520	1980	2030
Београд	1510	1950	2000
Неготин	1460	1900	1940
Пожаревац	1510	1970	2020
Ваљево	1520	1950	2000
Крагујевац	1540	2000	2060
Ужице	1540	1960	2010
Зајечар	1490	1940	1990
Чачак	1490	1940	1990
Крушевац	1550	2040	2090
Нова Варош	1540	1900	1950
Ниш	1510	1970	2020
Куршумлија	1570	2040	2100
Нови Пазар	1630	2110	2170
Пирот	1460	1860	1900
Лесковац	1530	1990	2040
К.Митровица	1620	2110	2170
Врање	1500	1900	1950
Ђаковица	1670	2170	2230
Призрен	1650	2110	2170

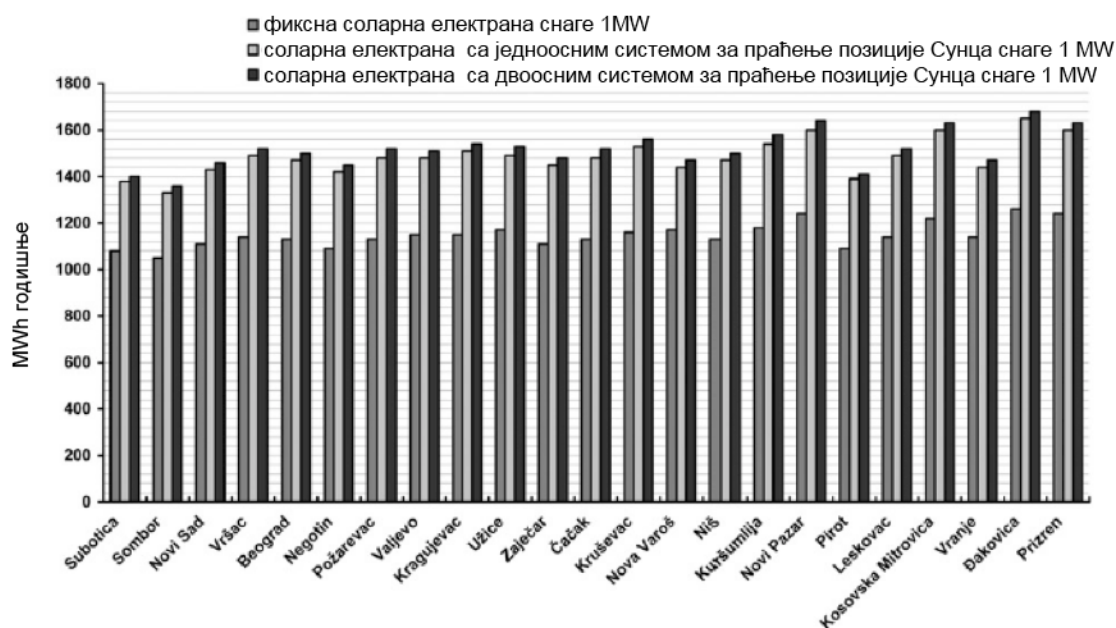
Табела 25. Вредности укупне годишње производње електричне енергије различитим типовима соларних PV постројења снаге 1MW за неке градове у Србији, добијене PVGIS-ом [3]

Табела 25. показује:

1. Не везано за тип соларног PV постројења, највише ел. енергије би се добило коришћењем CdTe соларних ћелија;
2. Укупна годишња производња ел. енергије у фиксним соларним PV постројењима снаге 1MW са соларним модулима од монокристалног силицијума креће се од 1050 MWh (Сомбор) до 1260 MWh (Ђаковица), са CdTe модулима од 1170 MWh (Сомбор) до 1390 MWh (Ђаковица) и са CIS модулима од 1070 MWh (Сомбор) до 1290 MWh (Ђаковица);
3. Укупна годишња производња ел. енергије у соларним PV постројењима са оптималним нагибом соларних модула од монокристалног силицијума и системом за праћење путање Сунца са померањем по једној осе креће се од 1330 MWh (Сомбор) до 1650 MWh (Ђаковица), са CdTe модулима од 1460 MWh (Сомбор) до 1800 MWh (Ђаковица) и са CIS модулима од 1360 MWh (Сомбор) до 1680 MWh (Ђаковица);
4. Укупна годишња производња ел. енергије у соларним PV постројењима са оптималним нагибом соларних модула од монокристалног силицијума и системом за праћење путање Сунца са померањем по две осе креће се од

1360 MWh (Сомбор) до 1680 MWh (Ђаковица), са CdTe модулима од 1490 MWh (Сомбор) до 1840 MWh (Ђаковица) и са CIS модулима од 1390 MWh (Сомбор) до 1720 MWh (Ђаковица).

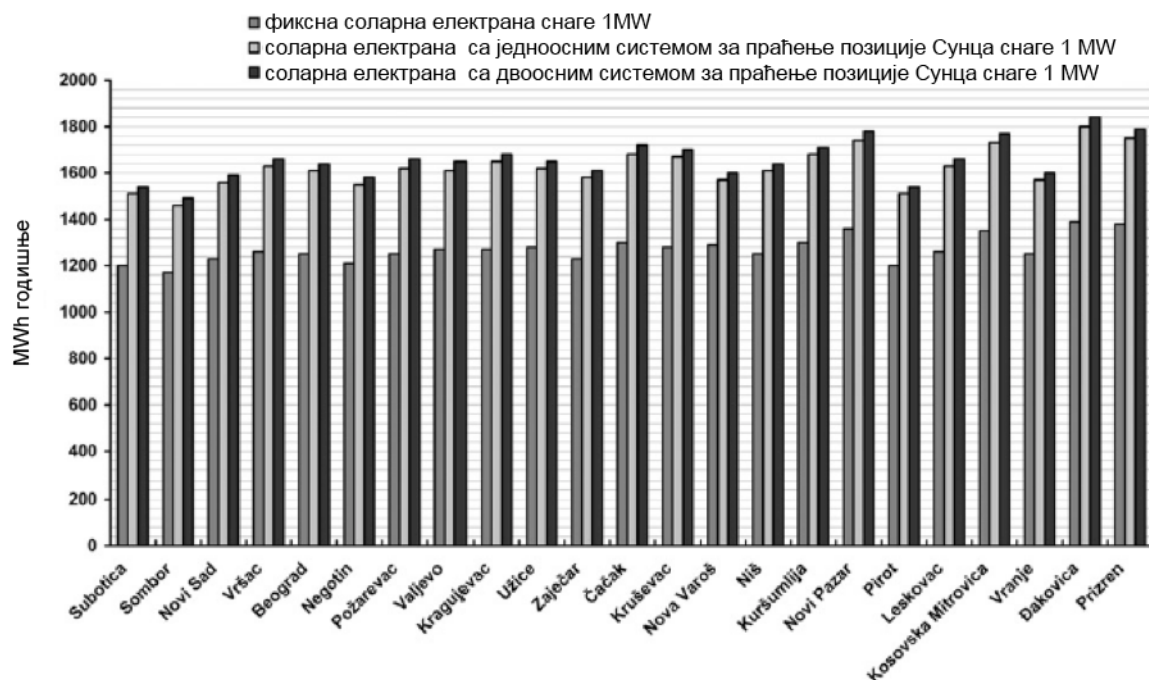
Процењени губици у соларним PV постројењима снаге 1MW неких градова у Србији, добијени PVGIS-ом приказани су на Слици 34. Поређење укупне производње ел. енергије за различите типове соларних PV постројења снаге 1 MW са модулима од монокристалног силицијума, добијен PVGIS-ом за неке градове у Србији, такође је приказано на Слици 34.



Слика 34. [3]

1. У Сомбору соларна PV електрана са модулима од монокристалног силицијума снаге 1MW са системом за праћење путање Сунца са померањем по две осе генерише 29,53% више ел. енергије у поређењу са фиксном PV соларном електраном а 2,26% више у односу на соларну PV електрану са померањем по једној оси.
2. У Ђаковици соларна PV електрана са модулима од монокристалног силицијума снаге 1MW са системом за праћење путање Сунца са померањем по две осе генерише 33,34% више ел. енергије у поређењу са фиксном PV соларном електраном а 1,82% више у односу на соларну PV електрану са померањем по једној оси.

Поређење укупне производње ел. енергије различитих типова соларних PV електрана са CdTe соларним модулима снаге 1MW у неким градовима у Србији дато је на Слици 35.

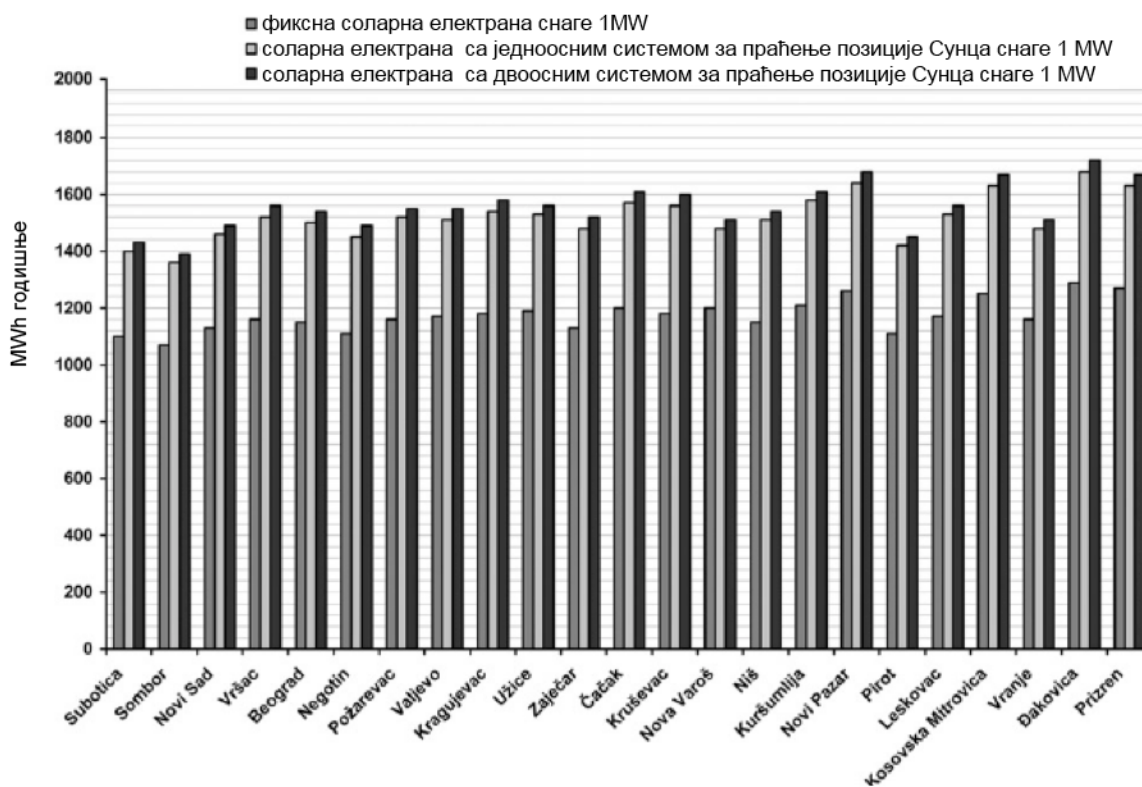


Слика 35. [3]

Слика 35. показује:

1. У Сомбору соларна PV електрана са CdTe модулима снаге 1MW са системом за праћење путање Сунца са померањем по две осе генерише 27,35% више ел. енергије у поређењу са фиксном PV соларном електраном а 2,06% више у односу на соларну PV електрану са померањем по једној осе.
2. У Ђаковици соларна PV електрана са CdTe модулима снаге 1MW са системом за праћење путање Сунца са померањем по две осе генерише 32,38% више ел. енергије у поређењу са фиксном PV соларном електраном а 2,23% више у односу на соларну PV електрану са померањем по једној осе.

Поређење укупне годишње производње ел. енергије различитих типова соларних PV електрана са CIS модулима снаге 1MW у неким градовима у Србији дато је на Слици 36.



Слика 36. [3]

Слика 36. показује:

1. У Сомбору соларна PV електрана са CIS модулима снаге 1MW са системом за праћење путање Сунца са померањем по две осе генерише 29,91% више ел. енергије у поређењу са фиксном PV соларном електраном а 2,21% више у односу на соларну PV електрану са померањем по једној осе.
2. У Ђаковици соларна PV електрана са CdTe модулима снаге 1MW са системом за праћење путање Сунца са померањем по две осе генерише 33,34% више ел. енергије у поређењу са фиксном PV соларном електраном а 2,38% више у односу на соларну PV електрану са померањем по једној осе.

7. Закључак

Потрошња ел. енергије се увећава из године у годину и различите технологије се користе како би се решио проблем производње и задовољавање енергетских потреба. Ради очувања и развоја људске врсте неопходно је установити еколошки баланс и применити брзу транзицију са необновљивих на обновљиве изворе енергије. Соларна PV технологија се развија убрзано током протекле деценије и има велику улогу у задовољавању светских енергетских потреба. Тренутни раст светског PV тржишта је 35-40% годишње. Велики број PV система инсталираних широм света показује озбиљност и одговорност сваке земље по питању проблема очувања околине коришћењем обновљивих извора енергије.

Ефикасност соларних ћелија је најбитнији параметер који има циљ да одржи ову технологију на тржишту. Перформансе соларних ћелија зависе и од утицаја околине као што су температура, соларно зрачење и прашина.

Више од 80% светске PV индустрије базирана је на c-Si и pc-Si технологијама. Једноспојне c-Si и GaAs соларне ћелије приближавају се горњој граници максималне теоретске ефикасности. Изванредни резултати у ефикасности остварени су у области технологија соларних ћелија танког филма: 19-20% за CIGS и 16-17% за CdTe и Si поликристалне соларне ћелије танког филма. III-V вишеспојне соларне ћелије оствариле су ефикасност од 40%. Међутим, соларне ћелије базиране на технологији танког филма, технологији полимера и трећа генерација соларних ћелија тренутно су у фази развоја и интензиван рад се спроводи на повећању ефикасности ради стављања истих у комерцијалну употребу. Даљи развој и проучавање биће усмерени у правцу повећања ефикасности CIGS, CdTe и Si соларних ћелија танког филма, мултиспојних III-V ћелија и нано PV уређаја. Већина водећих технологија има ефикасност која је већ постигла адекватан ниво па императив треба ставити на развој производних технологија које ће значајно снижити цену c-Si модула испод 1.5\$/Wp.

8. Референце

- [1] Razykov T.M., Ferekides C.S., Morel D., Stefanakos E., Ullal H.S., Upadhyaya H.M.; Solar photovoltaic electricity: current status and future prospects. *Solar Energy* 2011;85:1580-608.
- [2] Tyagi V.V., Nurul A.A., Rahim N.A., Jeyraj A., Selvaraj L.; Progress in solar PV technology: Research and achievement
- [3] Pavlović T., Milosavljević D., Radonjić I., Pantić L., Radivojević A., Pavlović M.; Possibility of electricity generation using PV solar plants in Serbia
- [4] Mishima T., Taguchi M., Sakata H., Maruyama E.; Development status of high-efficiency HIT solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 2011;95:18- 21.
- [5] Chen A., Zhu K.; Computer simulation of a-Si/c-Si heterojunction solar cell with high conversion efficiency. *Solar Energy* 2012;86:393-7.
- [6] Friedman D.J.; Progress and challenges for next-generation high-efficiency multijunction solar cells. *Current Opinion in Solid State and Materials Science* 2010;14:131-8.
- [7] Yamaguchi M., Takamoto T., Araki K.; Super high-efficiency multi-junction and concentrator solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 2006;90: 3068-77.
- [8] Rannels J.E.; The case for a 40% efficiency goal for photovoltaic cells in 2005. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 2001;65:3-8.
- [9] Engelhart P., Wendt J., Schulze A., Klenke C., Mohr A., Petter K., et al.; R&D pilot line production of multi-crystalline Si solar cells exceeding cell efficiencies of 18%. *Energy Procedia* 2011;8:313-7.
- [10] Zhao J.; Recent advances of high-efficiency single crystalline silicon solar cells in processing technologies and substrate materials. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 2004;82:53-64.
- [11] Gu X., Yu X., Guo K., Chen L., Wang D., Yang D.; Seed-assisted cast quasi-single crystalline silicon for photovoltaic application: towards high efficiency and low cost silicon solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 2012;101:95-101.
- [12] Fleischer K., Arca E., Shvets IV.; Improving solar cell efficiency with optically optimized TCO layers. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 2012;101: 262-9.
- [13] Clement F., Menkoe M., Kubera T., Harmel C., Hoenig R., Wolke W., et al.; Industrially feasible multi-crystalline metal wrap through (MWT) silicon solar cells exceeding 16% efficiency. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 2009;93:1051-5.
- [14] Morikawa H., Nishimoto Y., Naomoto H., Kawama Y., Takami A., Arimoto S., et al.; 16.0% efficiency large area (10 cm x 10 cm) thin film polycrystalline silicon solar cell. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 1998;53:23-8.
- [15] Ito S., Murakami T.N., Comte P., Liska P., Gratzel C., Nazeeruddin M.K., et al.; Fabrication of thin film dye-sensitized solar cells with solar to electric power conversion efficiency over 10%. *Thin Solid Films* 2008;516:4613-9.
- [16] Yamaguchi T., Tobe N., Matsumoto D., Nagai T., Arakawa H.; Highly efficient plastic-substrate dye-sensitized solar cells with validated conversion efficiency of 7.6%. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 2010;94:812-6.

- [17] Yamaguchi T., Uchida Y., Agatsuma S., Arakawa. H.; Series-connected tandem dye-sensitized solar cell for improving efficiency to more than 10%. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 2009;93:733-6.
- [18] Kumar R., Rosen M.A.; A critical review of photovoltaic-thermal solar collectors for air heating. *Applied Energy* 2011;88:3603-14.
- [19] Singh P., Ravindra N.M.; Temperature dependence of solar cell performance-an analysis, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 101, (2012), 36-45.
- [20] Ting C.C., Chao W.S.; Measuring temperature dependence of photoelectric conversion efficiency with dye-sensitized solar cells. *Measurement* 2010;43: 1623-7.
- [21] Berginc M., Krasovec U.O., Hocevar M., Topic M.; Performance of dye-sensitized solar cells based on ionic liquids: effect of temperature and iodine concentration. *Thin Solid Films* 2008;516:7155-9.
- [22] Rodriguez D.M., Horley P.P., Hernandez J.G., Vorobiev Y.V., Gorley P.N.; Photovoltaic solar cells performance at elevated temperatures. *Solar Energy* 2005;78:243-50.
- [23] Evans DL. Simplified method for predicting photovoltaic array output. *Solar Energy* 1981;27:555-60.
- [24] Goossens D., Kerschaever E.V.; Aeolian dust deposition on photovoltaic solar cells: the effects of wind velocity and airborne dust concentration on cell performance. *Solar Energy* 1999;66:277-89.
- [25] Jiang H., Lu L., Sun K.; Experimental investigation of the impact of airborne dust deposition on the performance of solar photovoltaic (PV) modules. *Atmospheric Environment* 2011;45:4299-304.
- [26] Elminir H.K., Ghitas A.E., Hamid R.H., El-Hussainy F., Beheary M.M., Abdel-Moneim K.M.; Effect of dust on the transparent cover of solar collectors. *Energy Conversion and Management* 2006;47:3192-203.
- [27] Sulaiman S.A., Hussain H.H., Razali N.; Effects of dust on the performance of PV panels. *World Academy of Science Engineering and Technology* 2011;58:588-93.
- [28] Kaldellis J.K., Kapsali M.; Simulating the dust effect on the energy performance of photovoltaic generators based on experimental measurements. *Energy* 2011;36:5154-61.
- [29] El-Shobokshy M.S., Hussein F.M.; Effect of dust with different physical properties on the performance of photovoltaic cells. *Solar Energy* 1993;51: 505-11.
- [30] Hee J.Y., Kumar L.V., Danner A.J., Yang H., Bhatia C.S.; The effect of dust on transmission and self-cleaning property of solar panels. *Energy Procedia* 2012;15:421-7.
- [31] Koutroulis E., Kalaitzakis K., Tzitzilioni V.; Development of an FPGA-based system for real-time simulation of photovoltaic modules. *Microelectronics Journal* 2009;40:1094-102.
- [32] Eikelboom J.A., Jansen M.J.; Characterisation of PV modules of new generations. *Results of tests and simulations* 2000.
- [33] Huld T., Muller R., Gambardella A.; A new solar radiation database for estimating PV performance in Europe and Africa. *Solar Energy* 2012; 86(6):1803-1815..
- [34] Thongpron J., Kirtikara K.; Effects of low radiation on the power quality of a distributed PV-grid connected system. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 2006;90:2501-8.

- [35] Gottschalg R., Infield D.G., Kearney M.J.; Experimental study of variations of the solar spectrum of relevance to thin film solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 2003;79:527-37.
- [36] Yoo S.H.; Simulation for an optimal application of BIPV through parameter variation. *Solar Energy* 2011;85:1291-301.
- [37] Meral M.E., Dincer F.; A review of the factors affecting operation and efficiency of photovoltaic based electricity generation systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2011;15:2176-84.
- [38] Maycock P.D.; Cost reduction in PV manufacturing impact on grid connected and building integrated markets. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 1997;47:37-45.
- [39] Ranjan S., Balaji S., Panella R.A., Ydstie B.E.; Silicon solar cell production. *Computers and Chemical Engineering* 2011;35:1439-53.
- [40] <http://www.solar-facts-and-advice.com/cadmium-telluride.html>; 25.04.2014
- [41] <http://www.easycoblog.com/140/new-2009-solar-federal-tax-credit>; 25.04.2014
- [42] Adams A., Subbaiah V., Chowdhary A.; Cost analysis comparison of bloom energy fuel cells with solar energy technology and traditional electric companies. A project report presented to the Faculty of the Department of General Engineering, San Jose State University, April 2011.
- [43] Powell D.M., Winkler M.T., Choi H.J., Simmons C.B., Needleman D.B., Buonassisi T.; Crystalline silicon photovoltaics: a cost analysis framework for determining technology pathways to reach base load electricity costs. *Energy & Environmental Science* 2012;5:5874.
- [44] [/http://www.solarshop-europe.net](http://www.solarshop-europe.net); 25.04.2014.
- [45] [/http://www.amazon.com](http://www.amazon.com); 25.04.2014.
- [46] Kong K.; The solar power (photovoltaic) industry in victoria: market forces, emerging industry structure and potential areas of value creation and competitive advantage for business enterprises. *PEC* 2010;624.
- [47] Krebs F.C.; Fabrication and processing of polymer solar cells: a review of printing and coating techniques. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 2009;93:394-412.
- [48] Kalowekamo J., Baker E.; Estimating the manufacturing cost of purely organic solar cells. *Solar Energy* 2009;83:1-8.
- [49] Nielsen T.D., Cruickshank C., Foged S., Thorsen J., Krebs F.C.; Business, market and intellectual property analysis of polymer solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 2010;94:1553-71.
- [50] Emmott C.J.M., Urbina A., Nelson J.; Environmental and economic analysis assessment of ITO-free electrodes for organic solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 2012;97:14-21.
- [51] Branker K., Pathak M.J.M., Pearce J.M.; A review of solar photovoltaic levelized cost of electricity. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2011;15: 4470-82.
- [52] Laird J.; Supplying solar PV: the solar photovoltaic (PV) industry is entering a new phase, and needs to innovate and reduce costs. *Renewable Energy Focus* 2011;12:72-7.
- [53] Ramanathan K., Contreras M.A., Perkins C.L., Asher S., Hasoon F.S., Keane J., et al. ; Properties of 19.2% efficiency ZnO/CdS/CuInGaSe₂ thin-film solar cells. *Progress in Photovoltaics* 2003;11:225-30.

- [54] Palm J., Probst V., Brummer A., Stetter W., Tolle R., Niesen T.P., et al.; CIS module pilot processing applying concurrent rapid selenization and sulfurization of large area thin film precursors. *Thin Solid Films* 2003;431:514-22.
- [55] Sharma M.C., Tripathi B., Kumar S., Srivastava S., Vijay Y.K.; Low cost CuInSe₂ thin films production by stacked elemental layers process for large area fabrication of solar cell application. *Materials Chemistry and Physics* 2012;131:600-4.
- [56] Aguado-Monsonet M.A.; The environmental impact of photovoltaic technology. January 1998.
- [57] Zhang J., Lv F., Zhang L.; Discussion on environment impact assessment in the lifecycle of PV systems. *Energy Procedia* 2012;16:234-9.
- [58] Sengul H., Theis T.L.; An environmental impact assessment of quantum dot photovoltaics (QDPV) from raw material acquisition through use. *Journal of Cleaner Production* 2011;19:21-31.
- [59] Berger W., Simon F.G., Weimann K., Alsema E.A.; A novel approach for the recycling of thin film photovoltaic modules. *Resources, Conservation and Recycling* 2010;54:711-8.
- [60] Sherwani A.F., Usmani J.A.; Life cycle assessment of solar PV based electricity generation systems: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2010;14:540-4.
- [61] Phylipsen G.J.M., Alsema E.A.; Environmental life-cycle assessment of multicrystalline silicon solar cell modules. September 1995. Report no. 95057.
- [62] Roes A.L., Alsema E.A., Blok K., Patel M.K.; Ex-ante environmental and economic evaluation of polymer photovoltaics. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 2009;17:372-93.
- [63] Srivastava M.K., Gupta S.K., Gupta A.; Environmental aspects of solar cell modules. Department of electronics engineering, MPEC, Kothi Mandhana, Kanpur.
- [64] Fthenakis V.M.; Life cycle impact analysis of cadmium in CdTe PV production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2004;8:303-34.
- [65] Tyagi V.V., Kaushik S.C., Tyagi S.K.; Advancement in solar photovoltaic/thermal (PV/T) hybrid collector technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2012;16:1383-98.
- [66] Purohit P., Michaelowa A.; CDM potential of SPV pumps in India. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2008;12:181-99.
- [67] Mondal Md.A.H., Sadrul Islam A.K.M.; Impacts of CO₂ emission constraints on penetration of solar PV in the Bangladesh power sector. *Renewable Energy* 2012;43:418-22.
- [68] Manna T.K., Mahajan S.M.; Nanotechnology in the development of photovoltaic cells. *IEEE* 2007:379-86.
- [69] <http://www.news.cornell.edu/stories/Sept09/NanotubeSolarCells.html>; 25.04.2014.
- [70] Gorter T., Reinders A.H.M.E.; A comparison of 15 polymers for application in photovoltaic modules in PV-powered boats. *Applied Energy* 2012;92:286-97.
- [71] Glunz S.W.; New concepts for high-efficiency silicon solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 2006;90:3276-84.
- [72] Tsunomura Y., Yoshimine Y., Taguchi M., Baba T., Kinoshita T., Kanno H., et al.; Twenty-two percent efficiency HIT solar cell. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 2009;93:670-3.

- [73] Oka S., Sedmak A., Ćurović-Petrović M.; Energy efficiency in Serbia-research and development activity. *Thermal Science* 2006;10(2):5-32.
- [74] Oka S., Sedmak A., Ćurović-Petrović M.; Energy efficiency in Serbia, national energy efficiency program-strategy and priorities for future. *Thermal Science* 2006;10(4):7-16.
- [75] Pavlović T., Milosavljević D., Radivojević A., Pavlović M.; Comparison and assessment of electricity generation capacity for different types of PV solar plants of 1 MW In Soko Banja, Serbia. *Thermal Science* 2011;15(3):605-18, <http://dx.doi.org/10.2298/TSCI110322065P>; 25.04.2014.
- [76] Marković D., Čeperković B., Vlačić A., Ressler S.; The white book of the electric power industry of Serbia, PE electric power industry of Serbia. Belgrade: Public Relations Sector; 2011.
- [77] Djurdjević D.; Perspectives and assessments of solar PV power engineering in the Republic of Serbia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2011;15(5):2431-46.
- [78] Reich D.; European energy law and its impact on Serbia progress, perspectives and possibilities. *Thermal Science* 2012;16(1):17-22.
- [79] National assembly of the Republic of Serbia. Energy law [Zakon o energetici]. Official Gazette of the Republic of Serbia 84/04, 2004. Available online at: <http://www.parlament.gov.rs/content/eng/> [in Serbian].
- [80] National assembly of the Republic of Serbia. Act for incentive measures for privileged producers of electricity [Uredba o merama podsticaja za povlašćene proizvođače električne energije], Official Gazette of the Republic of Serbia 72/2009 and 99/2009 [in Serbian].
- [81] Pavlović T., Milosavljević D., Lambić M., Stefanović V., Mančić D., Pirsl D.; Solar energy in Serbia. *Contemporary Materials (Renewable energy sources)* 2011;11(2):204-20, <http://dx.doi.org/10.5767/anurs.cmat.110202.en.204> UDK 620.92:523.9(497.11).
- [82] Schneider D.R., et al.; Mapping the potential for decentralized energy generation based on RES in Western Balkans. *Thermal Science* 2007;11(3):7-26.
- [83] Tešić M., Kiss F., Zavargo Z.; Renewable energy policy in the Republic of Serbia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2011;15(1):752-8.
- [84] Golusin M., Tesić Z., Ostojić A.; The analysis of the renewable energy production sector in Serbia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2010;14(5):1477-83.
- [85] Mihajlov A. Opportunities and challenges for a sustainable energy policy in SE Europe: SE European Energy Community Treaty. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2010;14(2):872-5.
- [86] Munitlak Ivanović O., Golušin M., Dodić S., Dodić J.; Perspectives of sustainable development in countries of Southeastern Europe. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2009;13(8):2079-87.
- [87] Golušin M., Munitlak Ivanović O.; Kyoto Protocol implementation in Serbia as precognition of sustainable energetic and economic development. *Energy Policy* 2011;39(5):2800-7.
- [88] Bojić M., Blagojević M.; Photovoltaic electricity production of a grid-connected urban house in Serbia. *Energy Policy* 2006;34(17):2941-8.
- [89] Study of the energy potential of Serbia for the use of sun radiation and wind energy, NPPE, Register no. EE704-1052A, Ministry of science and environmental protection, Belgrade, 2004.

- [90] PVGIS & European Communities; 2001-2008. Available online at: [/http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps3/pvest.php](http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps3/pvest.php); 25.04.2014.
- [91] Suri M., Huld T.A., Dunlop E.D.; PVGIS: a web-based solar radiation database for the calculation of PV potential in Europe. International Journal of Sustainable Energy 2005;24(2):55-67.
- [92] Gomez-Gil F.J., Wang X., Barnett A.; Energy production of photovoltaic systems: fixed, tracking, and concentrating. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2012;16(1):306-13.
- [93] [/http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php](http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php); 25.04.2014.
- [94] [/http://am.suntech-power.com](http://am.suntech-power.com); 25.04.2014.
- [95] [/http://www.yinglisolar.com](http://www.yinglisolar.com); 25.04.2014.
- [96] [/http://www.trinasolar.com](http://www.trinasolar.com) ; 25.04.2014.
- [97] [/http://www.canadiansolar.com](http://www.canadiansolar.com); 25.04.2014.
- [98] [/http://www.sharp-solar.com](http://www.sharp-solar.com); 25.04.2014.
- [99] [/http://www.hanwha-solarone.com](http://www.hanwha-solarone.com); 25.04.2014.
- [100] [/http://www.jinkosolar.com](http://www.jinkosolar.com); 25.04.2014.
- [101] [/http://www.ldksolar.com](http://www.ldksolar.com); 25.04.2014.
- [102] [/http://www.solarworld-usa.com](http://www.solarworld-usa.com); 25.04.2014.