

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: 184/2008

Лазар Д. Мрдаљ

**Ефикасност соларних панела и 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 уради анализу повраћаја енергије која је утрошена да би се направили соларни панели, као и анализу трошкова фотонапонских технологија.

Препоручена литература:

- [1] Tyagi V.V., Nurul A.A., Rahim N.A., Jeyraj A., Selvaraj L.; Progress in solar PV technology: Research and achievement 23 September 2012
- [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 January 2011

Крагујевац, 25.04.2014.год.

ментор:
Проф. др Јасна Радуловић

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 Wp. PV технологија танког филма је развијена 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 allso 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

Садржај

1. Увод

2. Преглед доступних технологија

3. Ефикасност соларних ћелија

3.1 Монокристалне ћелије

3.2 Поликристалне ћелије

3.3 Соларне ћелије изграђене технологијом танког филма

3.4 Галијум арсен

3.5 Органске и полимерне ћелије

3.6 Нове технологије PV ћелија

4. Анализа ефикасности

5. Фактори који утичу на ефикасност PV ћелија

5.1 Температура

5.2 Утицај запрљања

5.3 Појава „ Hot Spots “

5.4 Утицај соларног зрачења

6. Период повраћаја енергије потребне за израду PV модула „ Embodied energy “

7. Анализа трошкова фотонапонских технологија

8. Закључак

9. Референце

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, биогаз 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. Фотонапонска (PV) конверзија је претварање сунчеве енергије у електричну енергију. 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* лабораторијама у САД-у, што представља зачетак развоја фотонапонске технологије. Фотонапонски системи се састоје од соларних 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 (ps-Si) и технологији танког филма, 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 индустрија фотонапонских панела 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

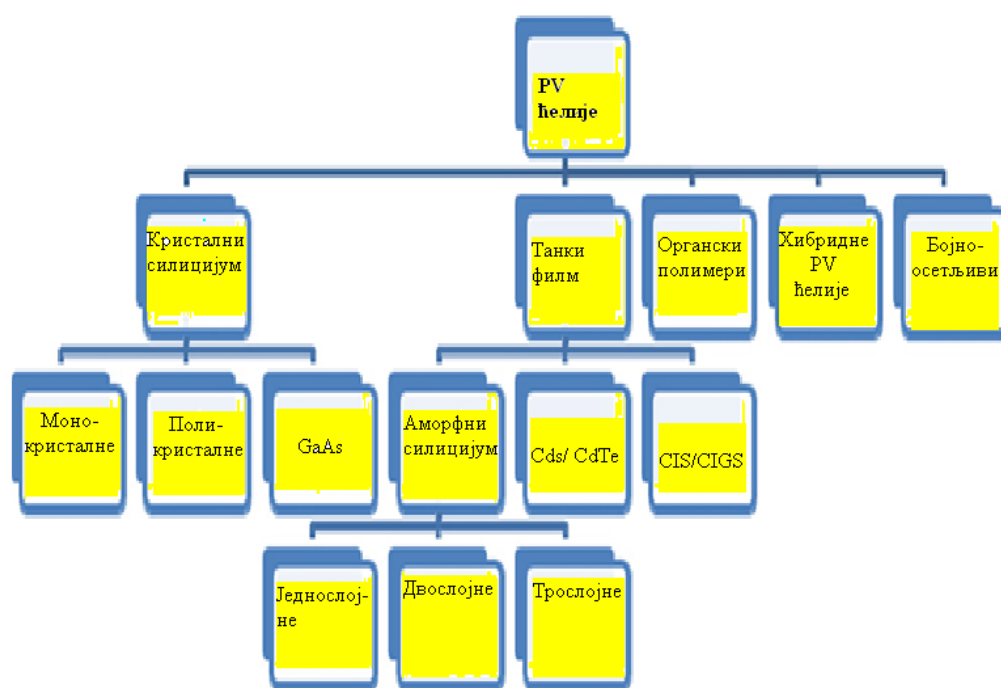
премашује цифру од милион корисника. Фотонапонска технологија је технологија са највећим годишњим растом, преко 40%, у поређењу са свим до сада развијеним технологијама. Расте број компанија и организација које узимају активно учешће у промоцији, развоју и производњи *PV* уређаја и система. Компаније које производе и дистрибуирају електричну енергију у сарадњи са произвођачима фотонапонске технике, локалним самоуправама и фондацијама, планирају и реализују пројекте кроз стицање неопходног искуства, скретањем пажње јавног мњења и подстицањем да ел.енергију добијену на тај начин откупљују по знатно већим тарифама (*Feed-in tariff*). енергије.

Најрепрезентативније компаније у области фотонапонске индустрије су и водеће нафтне и технолошке компаније као што су: *BP Amoco, Shell, Kyocera, Mitsubishi, Sanyo* и *Sharp*. Развој фотонапонске технологије последњих година је убрзан захваљујући технолошким иновацијама, смањењу трошкова за израду производа 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 у употреби. 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 се приближава вредношћу од 30%. У овом раду ће примарно бити разматран напредак фотонапонске технологије у области технологија производње, а разматраће се тренутни статус и карактеристике водећих типова соларних ћелија као што су c-Si, pc-Si, a-Si, 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, анализа повраћаја уложене енергије за израду соларних панела, анализа трошкова.

2. Преглед доступних технологија

Ефикасност генерално описује у којој мери су ресурси, нпр. време, напор или трошак, добро искоришћени за намењени задатак или сврху. Често се користи како би указао на способност одређене радње (активности) да произведе одређени исход ефикасно, са минималном количином отпада и најмањим трошком. Ефикасност се може приказати процентуално у односу на идеалан случај у којем је ефикасност 100%. Силицијумска технологија је водећа у производњи соларних ћелија услед своје велике ефикасности. Кратак преглед материјала који се користе у производњи соларних ћелија дат је на слици 1 [1].



Слика 1. Материјали за соларне ћелије [1]

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

на животну средину. Једно од решења које нуди технологија танког филма је коришћење полимера или органских материјала. Полимерни материјали имају вишеструке предности, као што су ниска цена, релативно мала маса и не загађују животну средину. Проблем се јавља са малим степеном искоришћења у односу на друге технологије, који износи 4-5%.

Соларне ћелије произведене од кристалног силицијума имају виши степен искоришћења од соларних ћелија произведених од било ког другог материјала. Поред тога, силицијум као материјал за производњу јако је доступан, налази се на другом месту лако доступних сировина.

3. Ефикасност соларних ћелија

3.1 Монокристалне ћелије

Овај врста материјала има широку употребу у производњи соларних панела услед своје високе ефикасности у поређењу са поликристалним ћелијама. У процесу производње, полупроводнички силицијум високе чистоће се топи у реторти направљеној од кварца, затим му се додају супстанце (допанти) у малим количинама како би изменила његова својства. Ово утиче на електрична својства силицијума. Прецизно орјентисано „семе кристала“ причвршћено на шипку се утаче у истопљени силицијум. Шипка се полако ротира и извлачи на горе. Прецизном контролом градијента температуре, брзине ротације и извлачења шипке могуће је извући један велики ингот из растопа. Овај процес се обично изводи у инертној атмосфери аргона. У односу на остале типове соларних ћелија, монокристалне соларне ћелије имају највиши степен искоришћења који износи преко 20%, али због комерцијализације, произвођач гарантује вредност од 15 до 17% [1].

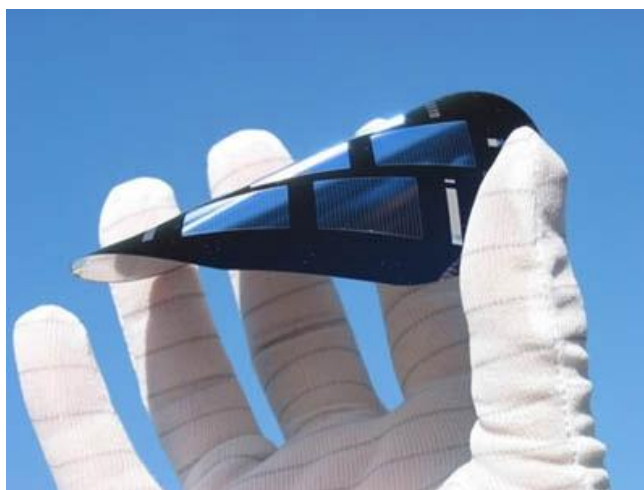
3.2 Поликристалне ћелије

Поликристалне ћелије су погодне за смањење трошкова PV модула, међутим ефикасност је нижа у односу на монокристалне ћелије и друге материјале. Поликристал се производи топљењем силицијума па очвршћавањем при коме се фиксно усмеравају кристали силицијума и добија се облик ингота које се касније секу на танке вафере. Поликристалне ћелије имају мана у погледу контаминације металом и кристалне структуре у односу на монокристалне ћелије. Степен искоришћења поликристалних ћелије је од 11 до 15% [1].

3.3 Соларне ћелије изграђене технологијом танког филма

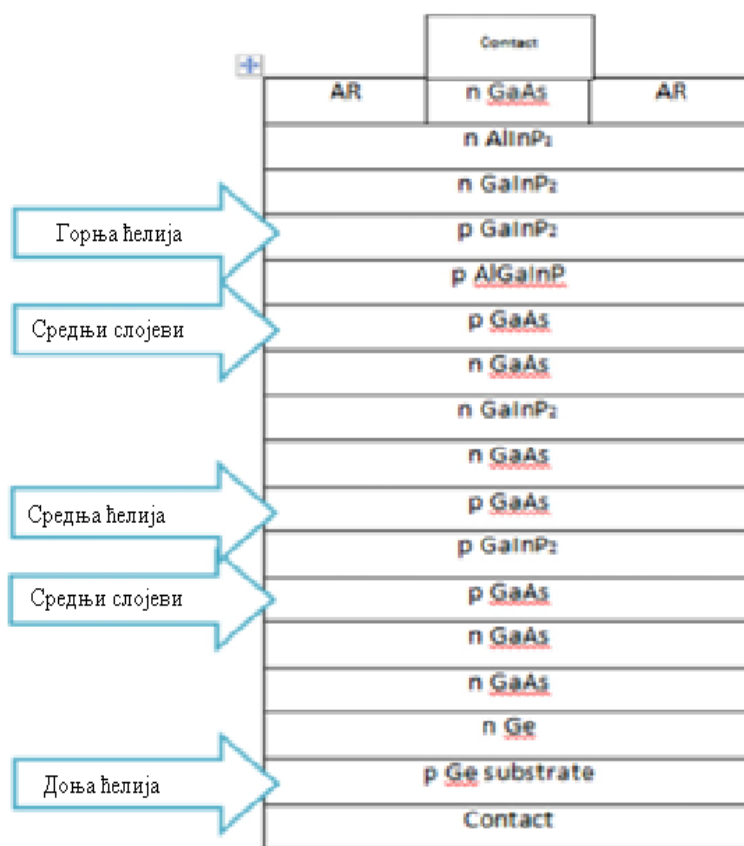
У поређењу ћелија базираним на кристалном силицијуму, технологија танког филма је јефтинија услед мање количине коришћених материјала и производних процеса. Коришћење мање количине материјала резултује мањом масом и дебљином ћелије која износи 25-260 нанометара. Соларне ћелије изграђене у технологији танког филма имају степен искоришћења од 5 до 12%.

Слика 2. Фотонапонска соларна ћелија направљена технологијом танког филма [2]



3.4 Галијум арсен

Галијум арсен ($GaAs$) је полупроводничко једињење формирано од галијума (Ga) и арсена (As), и има сличну структуру као силицијум. Ефикасност $GaAs$ соларне ћелије може се повећати легирањем одређеним елементима као што су Al , In , Pb и Sb . У поређењу са ћелијама базираним на силицијуму, $GaAs$ има виши степен искоришћења и мању дебљину слоја. Услед своје отпорности на високе температуре $GaAs$ има примену код концентраторских PV модула и у свемирској техници. У односу на поли и монокристални силицијум, $GaAs$ има мању масу. Међутим, цена материјала и производње је висока [2].

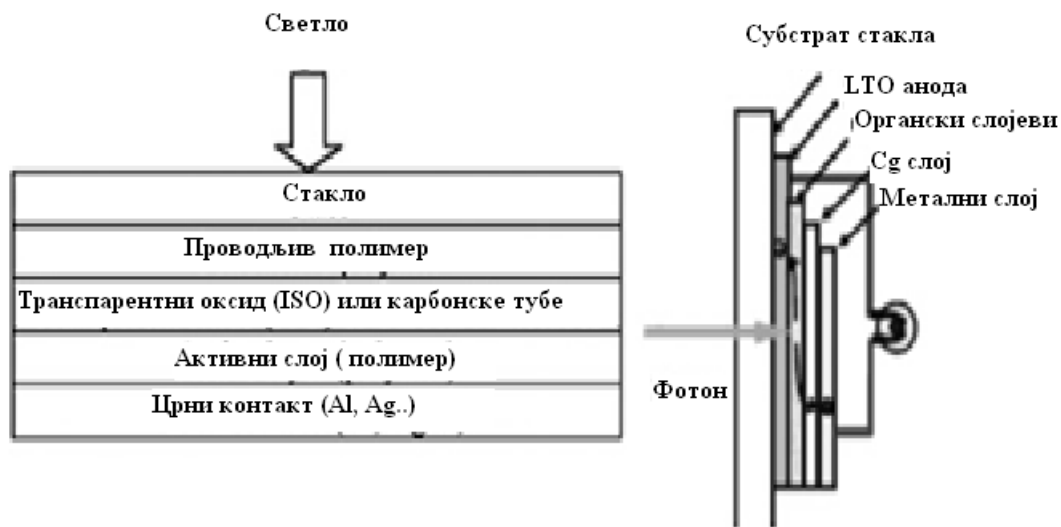


Слика 2. Слојеви $GaAs$ соларне ћелије [2]

3.5 Органске и полимерне ћелије

Технологија органских соларних ћелија је нова технологија у фази развоја као и $CIS/CIGS$ технологија. Иако има веома малу ефикасност око 4-5%, веома је интересатна због својих својства као што су механичка флексибилност, лаке могућности одлагања без ризика по околину и релативно ниске цене. Већина органских материјала има ниске напоне отвореног кола. Поједини полимери имају потенцијал да

у будућности замене силицијумске *PV* модуле, узевши у обзир масу и цену производње [3].



Слика 3. Органска соларна ћелија [1]

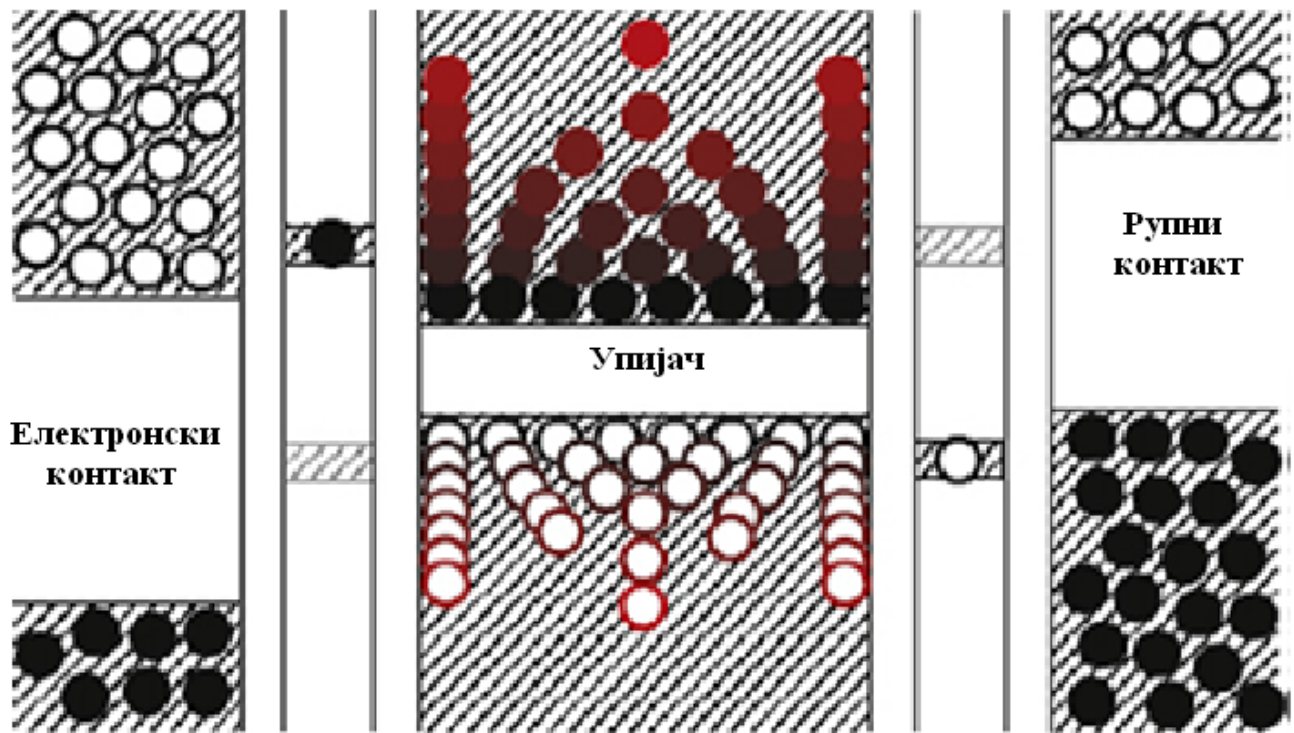
3.6 Нове технологије *PV* ћелија

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

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

Quantum dots (Квантне тачке) (*QDs*): Ова технологија се може описати као поступак у коме се материјалу додаје специјални полупроводнички систем који има способност контроле енергетског процепа. Излазни напон може повећати вредност енергетског процепа али са друге стране смањење енергетског процепа такође повећава поменућу вредност. Као решење, *QDs* се користи јер има могућност варирања апсорпције светлости и емисионог спектра светлости [4].

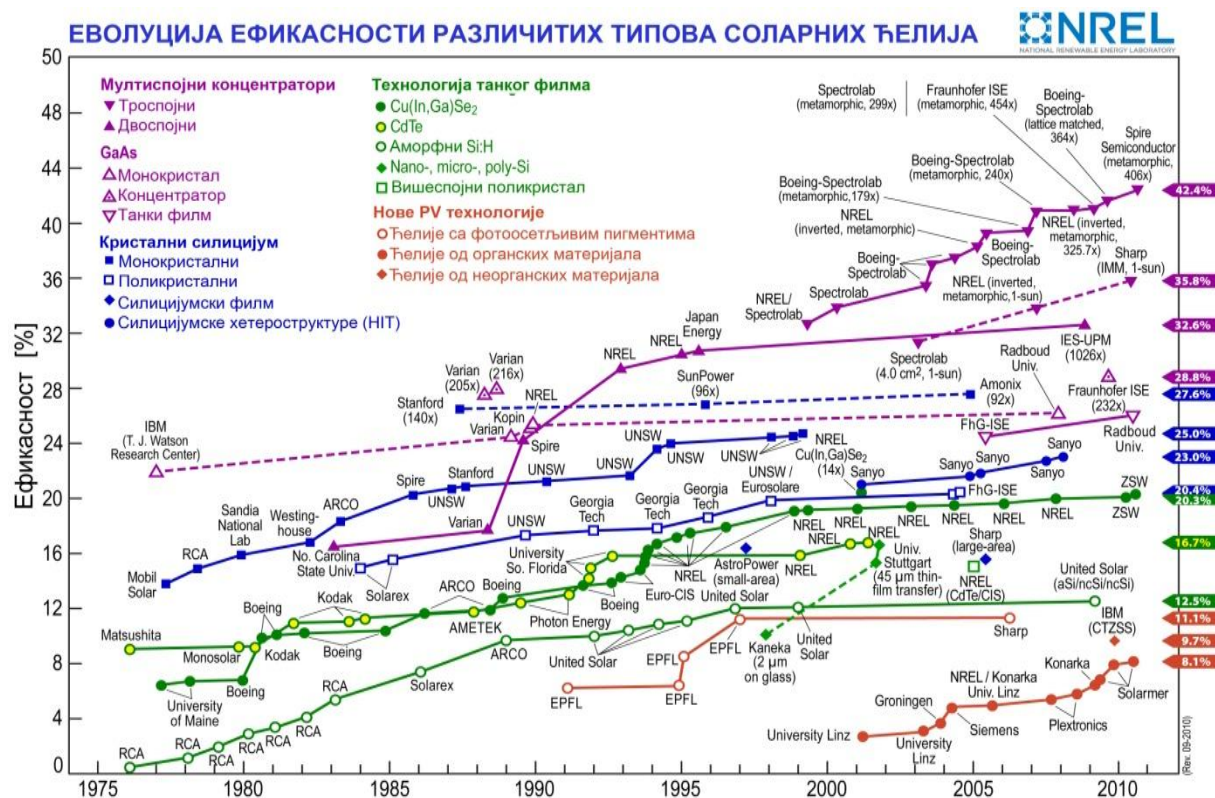
Hot carrier solar cells (Соларне ћелије топлотни носачи): *HC* метод је изазовнији у односу на *CNT* и *QD* услед потребе за селективним енергетским контактом током процеса претварања светлости у електричну енергију без генерисања топлоте. Ефикасност достиже вредност од 66%, што је три пута виша вредност у односу на постојеће силицијумске ћелије. Услед непостојања материјала који има малу вредност степена хлађења, *HC* никада није комерцијализована већ остаје само експериментална технологија [5].



Слика 4. Шематски приказ *HC* соларне ћелије [5]

4. Анализа ефикасности

Ефикасност монокристалних соларних ћелија се повећава из године у годину. 1959 год ефикасност је износила 15%, 1970 године 17% и до дан данас она постепено повећавала до 28%. Према истраживању које је спроводио *Zhao* [6] унапређења у „хватању“ светла у поликристалним соларним ћелијама, контакта и површине соларне ћелије доприносе повећању ефикасности. Поликристалне соларне ћелије достижу ефикасност до 19,8% . али комерцијална ефикасност поликристала је између 12% и 15%. Ефикасност различитих материјала за период од 1975. до 2010. године дат је у табели приказаној на слици 5.



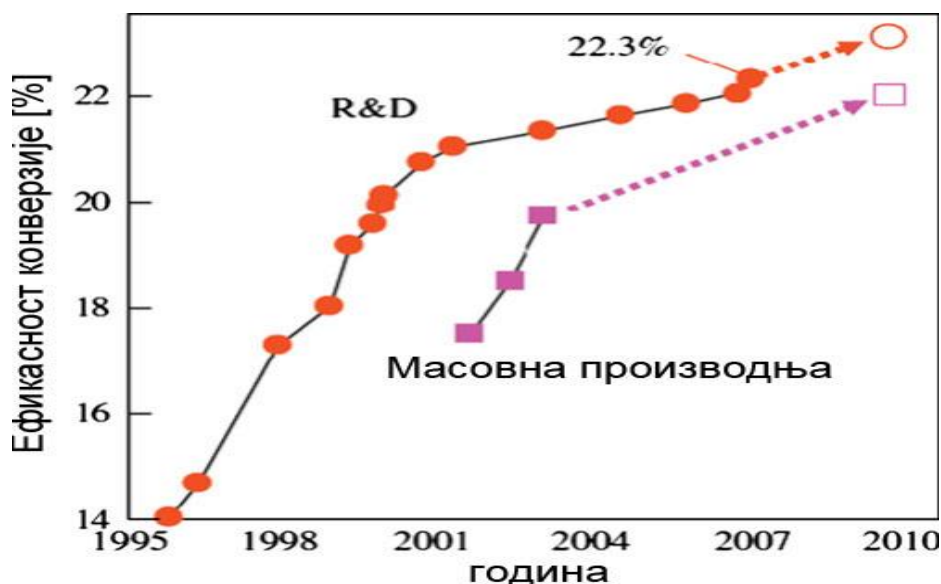
Слика 5. Еволуција ефикасности материјала соларних ћелија у периоду од 1975. до 2010. Године. [6]

Са слике се вида да *GaAs* има највећу ефикасност од 40,7% у 2010. Години. Нови материјали као нпр. Обојено осетљиви и органски имају ниску ефикасност од 5,4% у 2010. Години. Монокристалне соларне ћелије имају ефикасност од 24,7%, поликристалне од 20,3% а соларне ћелије танког филма 19,8% у 2010. години, респективно. У табели број 1 приказане су ефикасности *PV* модула компанија које производе *PV* технику.

Компанија	Тип модула	Ефикасност
<i>Suntech power</i>	Монокристални	15.30-15.70
	Поликристални	14.50-14.80
<i>Yigli solar</i>	Монокристални	15.30-16.20
	Поликристални	14.10-15.00
<i>Trina solar</i>	Монокристални	14.50-15.20
	Поликристални	13.70-15.00
<i>Canadian solar</i>	Монокристални	13.70-15.26
	Поликристални	12.65-14.12
<i>Sharp</i>	Монокристални	14.40
	Поликристални	10
<i>Hanwha solar one</i>	Монокристални	3.60-15.10
	Поликристални	13.30-15.30
<i>Jinko solar</i>	Монокристални	14.05-15.27
	Поликристални	14.36-15.59
<i>LDK solar</i>	Монокристални	14.49-15.67
	Поликристални	13.32-15.67
<i>Solar world</i>	Монокристални	14.31
	Поликристални	14.31

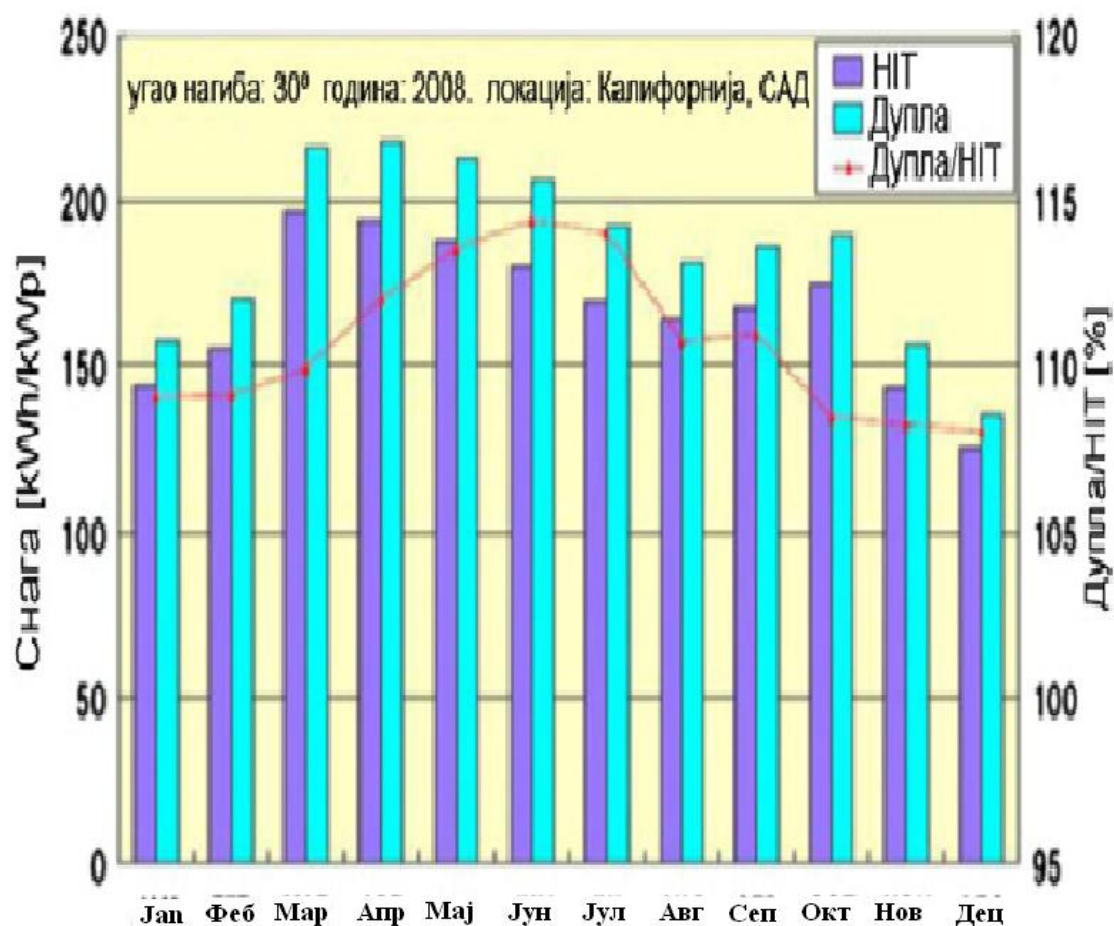
Табела 1. Ефикасност модула неких од произвођача [6]

Највећи степен конверзије силицијумске соларне ћелије величине 4100 cm^2 је остварила *Tsunomura* [7]. Развили су процес чишћења који даје чисту површину кристалног силицијума унапређену структуру, нижи степен оштећења, нижи светлосно апсорбујући ТСО, финију мрежу електрода са смањеном површином. Прогрес у ефикасности НИТ соларних ћелија практичне величине 100 cm^2 у последњих 15 година приказан је на слици 7.



Слика 6. Прогрес ефикасности НИТ соларних ћелија [7]

Mishima [8] је за *Sanyo Electric* описао статус развоја високо ефикасних HIT соларних ћелија. Током једногодишњег теста HIT двоструких соларних ћелија и једностраних HIT модула, закључено је да излазна снага код HIT двоструке соларне ћелије је већа од снаге HIT једностраног модула.



Слика 7. Тренд излазне снаге једностраних HIT и двостраних HIT модула током године. [8]

Двоструки HIT производи 10,9% већу излазну снагу у поређењу са HIT модулом. Остварили су напон отвореног кола од 743 mV и висок степен конверзије од 22.8% користећи само субстрат дебљине 98mm. Резултат студије је показао да HIT соларна ћелија има потенцијал за даље усавршавање перформанси. *Chenad Zhu* [9] је симулирао a-Si/c-Si хетероспојну соларну ћелију високе ефикасности конверзије уз помоћ компјутерске симулације. Дизајнирали су a-Si:H/N⁺ c-Si соларну ћелију високих перформанси са ефикасношћу конверзије од 21, 8%, високим фактором пуњења од 0,86 и високим напоном од 0,86 V. Резултати симулације добијени током ове студије имају велику вредност за будући развој соларних ћелија високе ефикасности конверзије и ниских цена. *Friedman* [10] је описао следећу генерацију високоефективних мулти

спојних соларних ћелија са ефикасношћу изнад 40% које ће превазићи перформансе било које конвенционалне једноспојне ћелије. На табели број 2 приказана је ефикасност високоефикасних ћелија у поређењу са једнослојним ћелијама.

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

Табела 2. Високоефикасне ћелије у поређењу са конвенционалним једноспојним ћелијама [10]

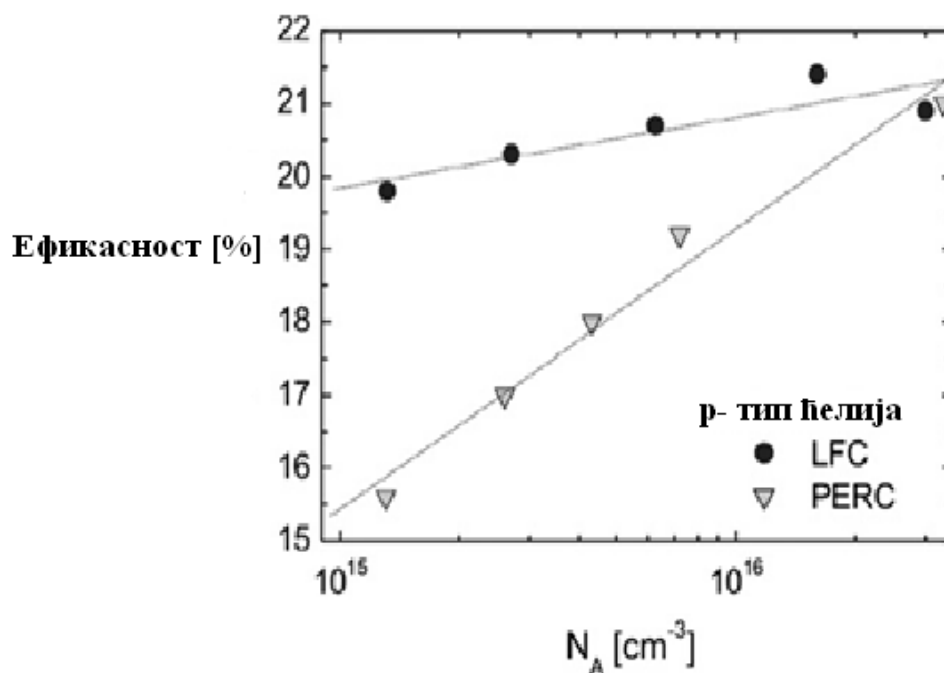
Закључили су да нове генерације високоефикасних мултиспојних ћелија са ефикасношћу изнад 40%, су најефикасније икада направљене. Приступ који је коришћен ради остваривања ове ефикасности је пут континуираног развоја у побољшању перформанси соларних ћелија. Очигледно је да ће ефикасност од 45% бити достигнута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

Yamaguchi [11] је развио високоефикасну мултиспојну и концентраторску InGaP/InGaAs/Ge трослојну соларну ћелију са ефикасношћу од 36,5%. Успешно су тестирали и InGaP/InGaAs/Ge концентраторску трослојну ћелију која држи светски рекорд у ефикасности од 37, 5% са 200 сунчаних дана у 2004.години током овог истраживачког рада креирана је табела (табела 3) главних проблематичних питања које треба решити а која се тичу вишеспојне соларне ћелије.

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

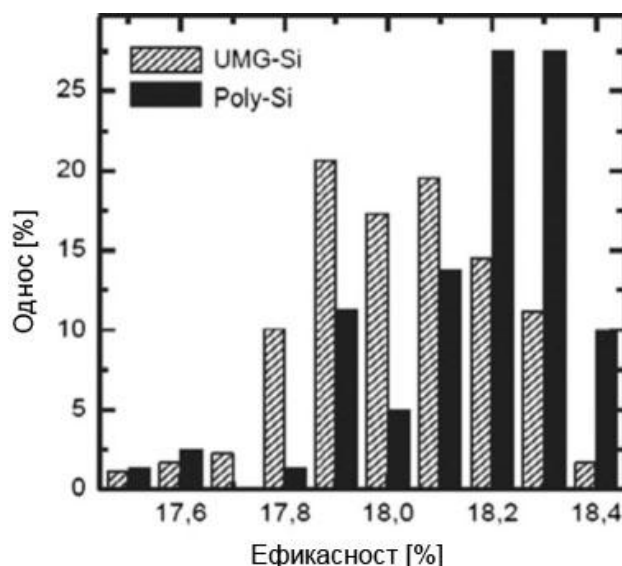
Табела 3. Главна проблематична питања вишеспојне соларне ћелије [11]

Рад *Fraunhofer* [12] *ISE* у области високоефективних силицијумских соларних ћелија је углавном заснован на стварању индустриске производње високо ефикасних силицијумских соларних ћелија. Ради се на производњи ласерских испалених (*LFC*) соларних ћелија на веома танаким подлогама. У циљу поређења ове технологије са стандардним високо ефикасним процесним шемама *LFC* и *PERC* ћелије су произведене од монокристалног силицијума р-типа у опсегу отпорности између $0,5 \Omega/\text{cm}$ и $10 \Omega/\text{cm}$, и на силицијуму п-типа са отпорношћу од $1 \Omega/\text{cm}$ и истој серији. Измерене ефикасности *LFC* и *PERC* ћелија дате су на слици 8.



Слика 8. Ефикасност *LFC* и *PERC* ћелија [12]

Креирање вишеспојне III-IV мултиспојне ћелије са ефикасношћу од 40% са концентracијом од 500x је веома битан циљ у *PV* програму *SAD*. Ефикасност ћелије се може повезати “слагањем” више слојева полупроводника који апсорбују различит спектар соларног зрачења. То подиже општу ефикасност ћелија коришћењем ширег спектра по квадратној јединици *PV* материјала. Тренутно, теоретска ефикасност четворослојне $\text{Ga}_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{P}$ ћелије је пројектована на 32%, док GaAs комбинација превазилази 40% у одређеним околностима. *Engelhart* [13] је известио о пилот производњи Si ћелија р-типа у *Reiner-Lemoine* истраживачком центру са *Q-cells SE* које имају ефикасност од 18%. Ове ћелије су са двостраним контактом које прати допинговани емитер, фино штампана мрежа од сребра у комбинацији са метализацијом платинским гасом и диелектричном пасивизацијом локалних контакта. Остварили су ефикасност ћелије 18% и преко 18% на (*UMG*) и (*Poly*) ћелијама на великим површинама (243cm^2), (слика 9).



Слика 9. Ефикасност (UMG) и (Poly) ћелија [13]

Gu [1] је открио квазијединични кристални силицијум (QSC) као потенцијални материјал који може остварити високу ефикасност соларних ћелија, по ниској цени. У поређењу са мултикристалним силицијумом (MC), QSC силицијум има мањи животни век носача и уједначенију дистрибуцију животног циклуса. Сугестовано је да је код соларне челије индустриске 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 у PV индустрији као супстрата следеће генерације.

Fleischer [14] експериментално проучава повећање ефикасности соларне ћелије танког филма користећи транспарентни проводљиви оксид (TCO) са апсорбером и стаклом. Корист три различита слоја материјала и упоређују им ефикасности. Резултат истраживања показује да AlZnOx и $\text{SnO}_2: \text{S, F}$ у комбинацији са a-Si:H соларном ћелијом танког филма, добит ефикасности је 6, 3 % што резултује укупном ефикасношћу од 9,6%. Међутим, резултати симулације показују да се може добити ефикасност од 10, 4%. Као додатак повећања ефикасности јавља се смањење трошкова по јединичном вату ћелије. Поуздани пилот пројекат соларних ћелија кроз који пролази метални замотај (MWT) које се базирају на новоме дизајну контакта успешно је развио Clementetal [15]. У овој студији, спроведено је неколико корака оптимизације, посебно оптимизација контакта задње стране структуре и изолационог процеса. Са MWT остварена је ефикасност од 16% и ефикасност модула од 15% у поређењу са референтним ћелијама (модулима) истог MC Si блока.

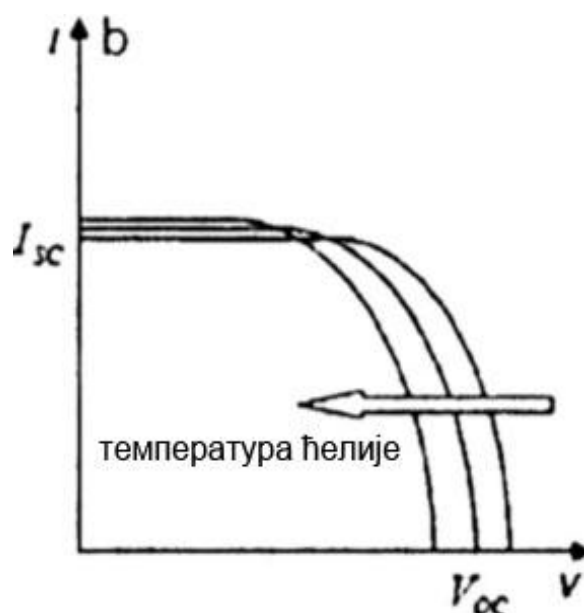
Morikawaetal [16] је развио поликристалну соларну ћелију танког филма велике површине (10cm x 10cm.) Открили су да комбинација фосфорног третмана и ниско носеће концентрације BSF је довољно ефикасна да силицијумске ћелије танког филма остваре ефикасност конверзије од 16%. Технике производње TiO_2 танког филма за обојено осетљиве соларне ћелије са ефикасношћу од 10% у конверзији су прављене од стране Itoetal [17]. Користили су антирефлексциони филм (ARF) ради повећања IPCE или “екстерне квантне ефикасности” уређаја да би достигао апсорпцију 94%.

5. Фактори који утичу на ефикасност *PV* ћелија

Како је поменуто, ефикасност је један од главних параметара за примену *PV* технологије. Главни фактори који утичу на ефикасност ћелије су: 1) температура соларне ћелије 2) утицај запрањања (прашина, инсекти итд.) 3) појава “*Hot Spot*-а “ 4) соларно зрачење

5.1 Температура

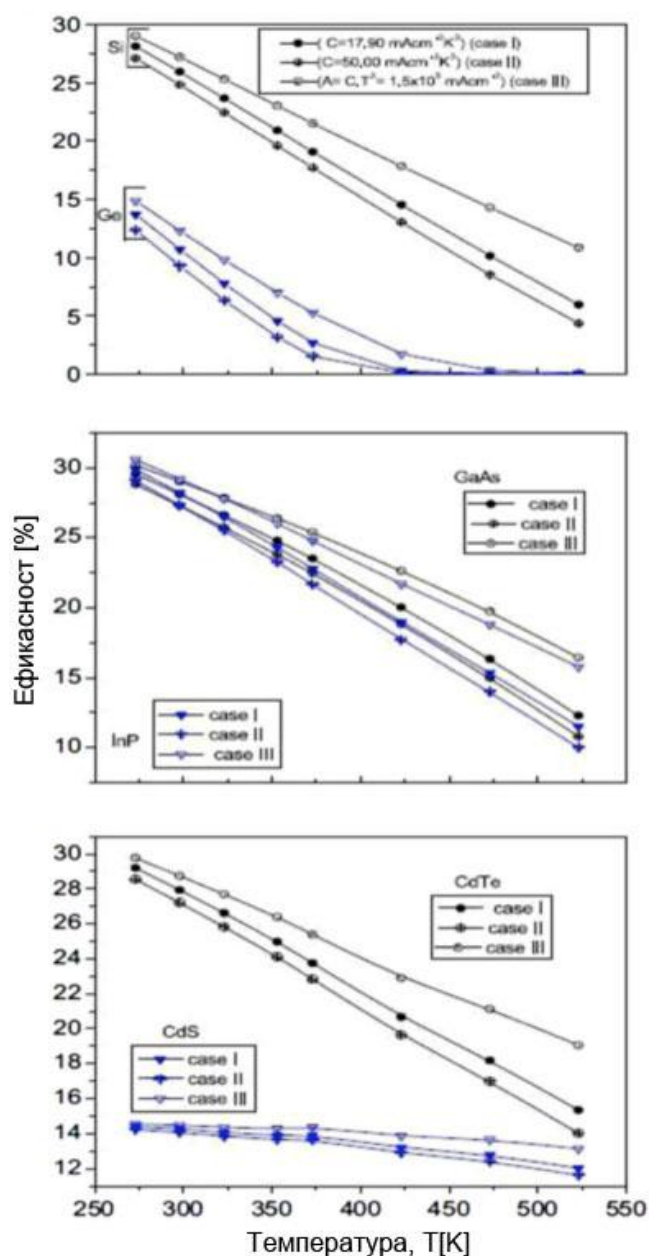
Опште прихваћено је да ефикасност соларне ћелије опада са порастом температуре, тако да је хлађење неопходно у условима високе изложености осветљењу, као што су концентрисани сунчеви зраци, космички или тропски услови. Температура је критичан фактор који води до пада *PV* ефикасности и излазне снаге. Услед чињенице да са порастом температуре смањује енергетски процеп услед чега се јавља пад у напону отвореног кола.



Слика 10. Утицај температуре на карактеристике *PV* ћелија [18]

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

Singh i Ravindra [18] су анализирали детаљну студију зависности ефикасности од температуре у температурном опсегу од 273-523K (слика 11).



Слика 10. Утицај температуре на ефикасност PV ћелија [18]

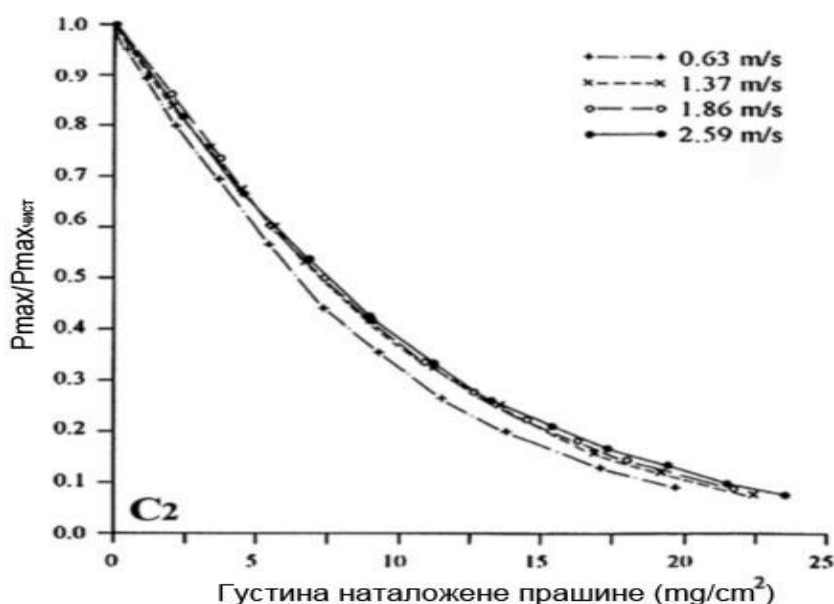
Рачунали су ефикасност у три температурна случаја: температура која повећава температуре, повећање обрнутог засићења струјом, смањење V_{oc} које смањује фактор пуњења, самим тим и ефикасност соларних ћелија. Истовремено енергетски процеп се смањује са повећањем температуре што резултује повећањем J_{sc} који има улогу у повећању ефикасности ћелије. Тако да тенденција V_{oc} да се смањи и J_{sc} да се повећа са порастом температуре соларних ћелија резултује смањењем ефикасности.

Ting i Chao [19] су експериментално проучавали утицај температуре на ефикасност фотоелектричне конверзије обојено осетљивих соларних ћелија (DSSCs). Резултати студије показују да смањењем решетки μ_v , μ_i , μ_p имају растујући тренд са порастом температуре. Од 5.7°C до 75.5°C , максимална вредност μ_v је сса. је 45%, μ_i сса 14% и μ_p 55%. *Rodriguezetal* [20] је проучавао рад соларне ћелије на релативно високим температурама (100-200°C) и коришћење вишка топлоте у хибридни системима ради повећања тоталне ефикасности соларне ћелије. Користили су високе

температуре термоелектрични генератор или топлотни мотор (*Stirlingov* 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 енергије у електричну може бити преко 30%, без употребе скувих материјала и технологија. Узгред ове нове ћелије би биле идеалне за примену за рад у условима где су високе температуре неизбежне

5. 2 Утицај задрљања

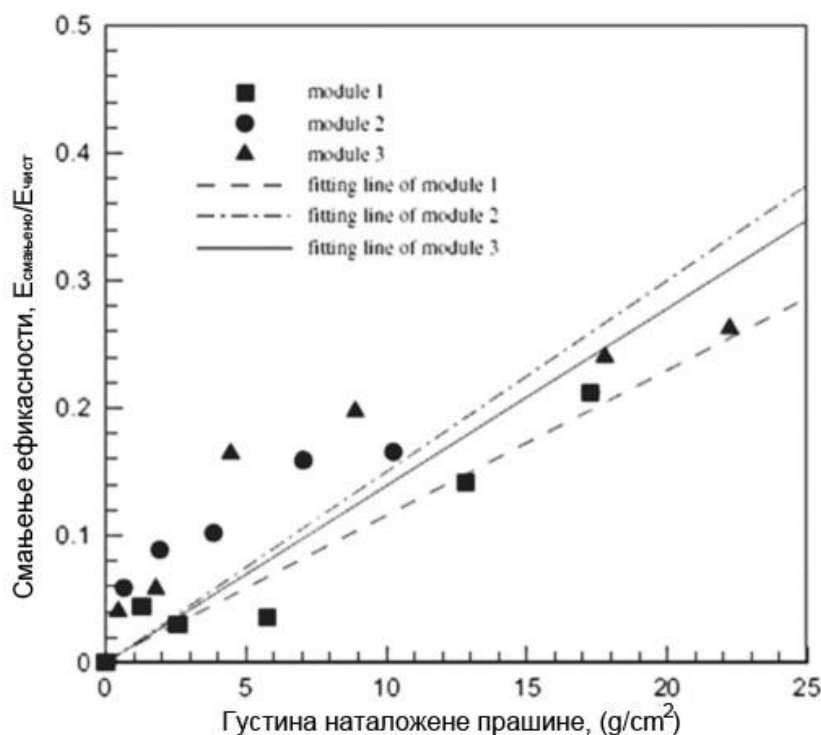
Прашина такође има негативан утицај на ефикасност *PV* конверзије услед блокирања долазећег зрачења на *PV* модуле. *Goossens* i *Kerschaefer* [21] су истраживали утицај брзине ветра и концентрације прашине у ваздуху, који изазивају акумулацију прашине, на перформансе *PV* ћелија. Експериментално су проучавали излазну снагу *PV* ћелија за различите густине прашине и брзине ветра.



Слика 11. Утицај прашине на излазну снагу *PV* ћелије [21]

Са графика се може видети да излазна снага опада драстично са порастом густине прашине и различите брзине ветра.

Jiang [22] је тестирао утицај прашине у ваздуху на три *PV* модула, од монокристалног, пликристалног и аморфног силицијума. Експеримент је проведен у лабораторијским условима коришћењем симулатора Сунца и генератора прашине. Утицај густине за сваки тип *PV* модула приказан је на слици 12.



Слика 12. Утицај наслага прашине на ефикасност *PV* ћелија [22]

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 22 g/m², одговарајућа редукација излазне ефикасности *PV* модула се креће од 0 до 26%. Редукација ефикасности има линеаран однос са густином наслага прашине, а разлика услед типова ћелија није очигледна.

Elminir [23] проучава ефекте прашине на провидан покривач соларних колектора. Резултат студије је показао да смањење у нормалној пропустљивости стакла зависи 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/m² до 4.48 g/m². Студија о утицају акумулације прашине на *PV* перформансе је спроведена од стране *Sulaiman-a* [24]. У овој студији *PV* панел је тестиран под константим зрачењем са утицајем различитих типова прашине. Генерисана снага панела је приказана у Табели 4.

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

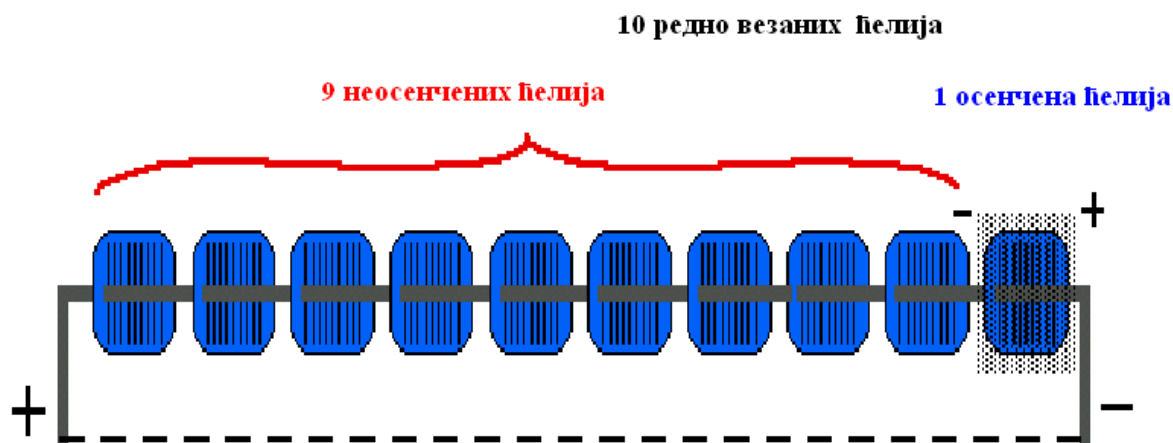
Табела 4. Излазна снага PV панела под константним зрачењем у различитим условима [24]

Kaldellis и *Kapsali* [25] су симулирали утицај прашине на енергетске перформансе PV генератора базирајући се на експериментална мерења. Према резултатима ове студије, примећено је значајно смањење ефикасности фотонапонског панела због стварања наслага и акумулирања масе на површини панела. Слична студија о утицају прашине различитих физичких својстава на перформансе соларних ћелија је спроведена од стране *El-Shobokshu* [26] и *Hussein* [26] Користили су различите типове прашине; кречњак, цемент и угљеникове честице. Контролисани експерименти су спроведени коришћењем соларног симулатора као извора светла. У експерименту је 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 ефикасност PV модула уколико дође до стварања наслага на површини ћелија. *Hee* [27] је проучавао услове таложења прашине у Сингапур 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 угао 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%.

5.3 Појава „*Hot Spota*“

Појава „*Hot Spota*“ се јавља када је соларна ћелија осенчена, у том случају соларна ћелија се загрева до таквих екстремних температура, такве високе температуре доводе до трајног оштећењем соларне ћелије.

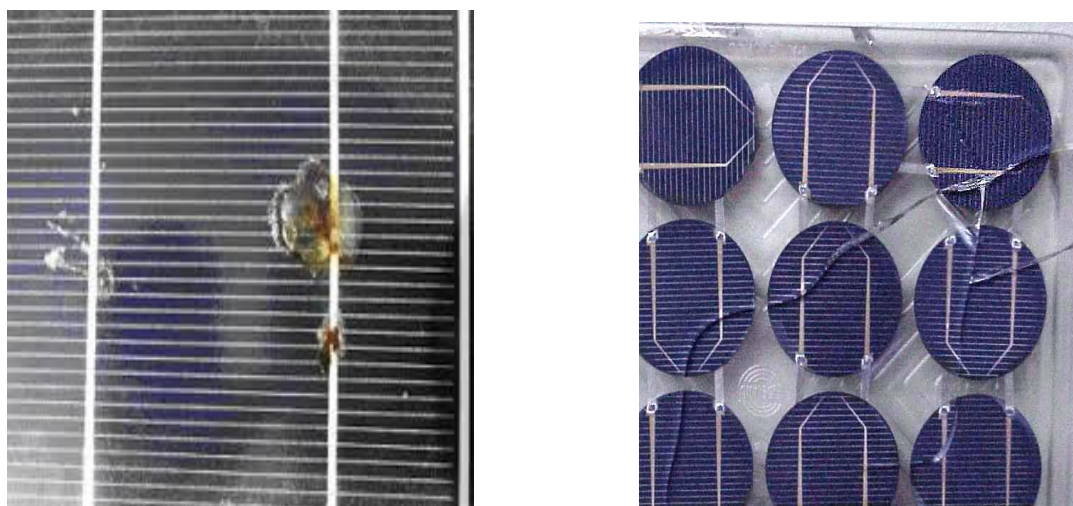
Под нормалним условима рада соларна ћелија генерише струју. Насупрот томе осенчена соларна ћелија не генерише струју али кроз њу пролази струја из других ћелија. Струја из других ћелија пролази кроз затамњену ћелију која се у том случају понаша као отпорник, долази до повећања температуре ћелије која на крају доводи до оштећењем исте. (слика 13).



У овом случају осенчена ћелија се понаша као отпорник и кроз њу не може да пролази електрична енергија других редно везаних соларних ћелија

Слика 13. Редно везане соларне ћелије и појава „*Hot Spota*“ [28]

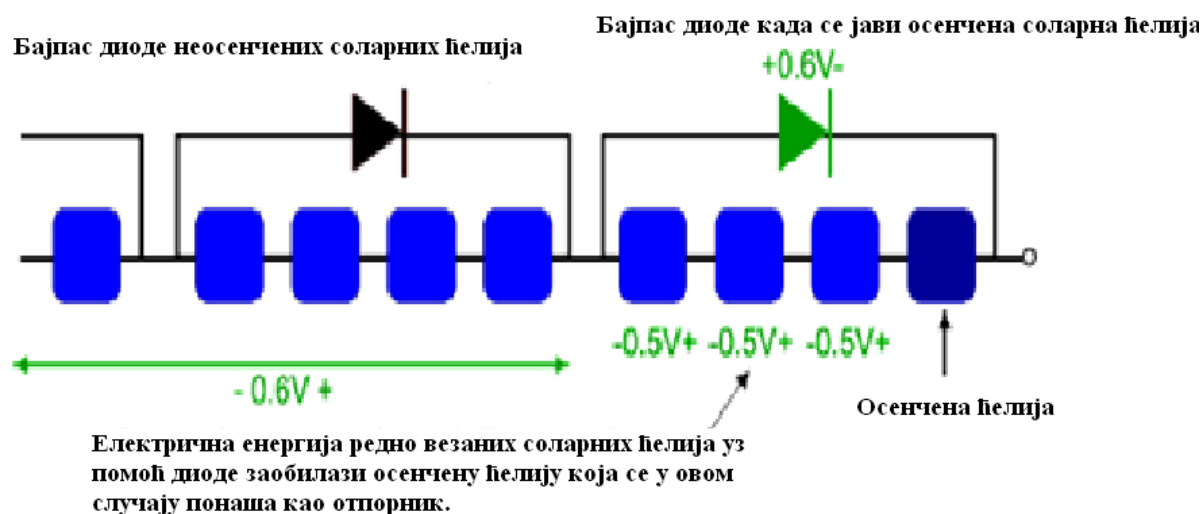
Појава „*Hot Spota*“ је веома честа, посебно у урбаним срединама. Соларни панели на својој површини генеришу високе температуре, дешава се да инсекти често буду спржени на њиховим површинама и самим тим стварају услове за појаву *Hot Spota-a*. Ова појава доводи до таквих оштећења материјала које некада могу да резултују и самим паљењем модула, пуцање стакла и топљење соларне ћелије приказани су на на слици 14. [28]



Слика 14. Оштећење PV модула услед појаве „*Hot Spota*“ [28]

Да би спречили појаву *Hot Spot-a* у свим стандардним модулима данас, користи се бајпас диоде. Ако је соларна ћелија у сенци, праве се обилазнице диоде које ће преусмерити струју коју генеришу соларне ћелије које нису под тим ефектом *Hot Spot-a*. На овај начин спречава се појава загревања соларне ћелије и оштећење исте. У пракси је међутим бајпас диоде једне ћелије прескупа варијанта, уместо тога ради се бајпас групе диода соларних ћелија. Напон затамњене или делимично

затамњене соларне ћелије једнак је преднапону соларних ћелија које деле исти бајпас диоде, плус напон обилазнице диоде. То је приказано на слици испод. [28]



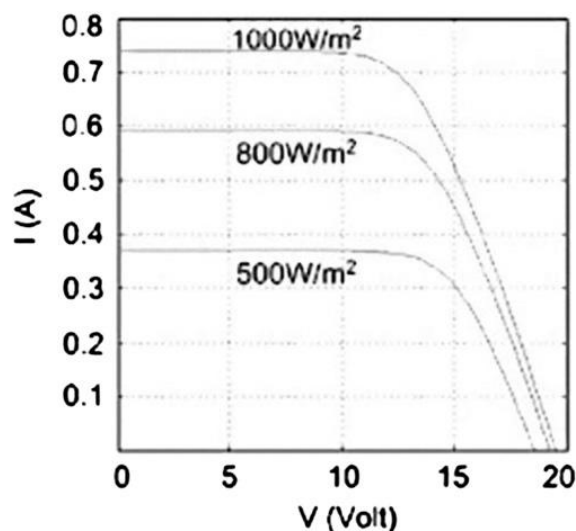
Слика 15. Бајпас диоде соларне ћелије [28]

Напон преко соларних ћелија зависи од степена затамљења на соларној ћелији. На пример ако је ћелија потпуно осенчена, онда ће друге соларне ћелије бити везане у кратаком споју и напон ће бити $0.6V$. Ако је затамљена ћелија само делимично у сенци нека струја из редно везаних соларних ћелија може да пролази кроз њу, док ће остатак струје преко обилазница прослеђује преко затамљене соларне ћелије и на тај ће начин стварати мање губитке.

5.4 Утицај соларног зрачења

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 електричне енергије. Слика 16. показује утицај повећања зрачења на карактеристике *PV* ћелије.

Eikelboom и Jansen [29] су спровели експеримент у спољним и унутрашњим условима како би испитали перформансе девет типова *PV* модула различитих произвођача.

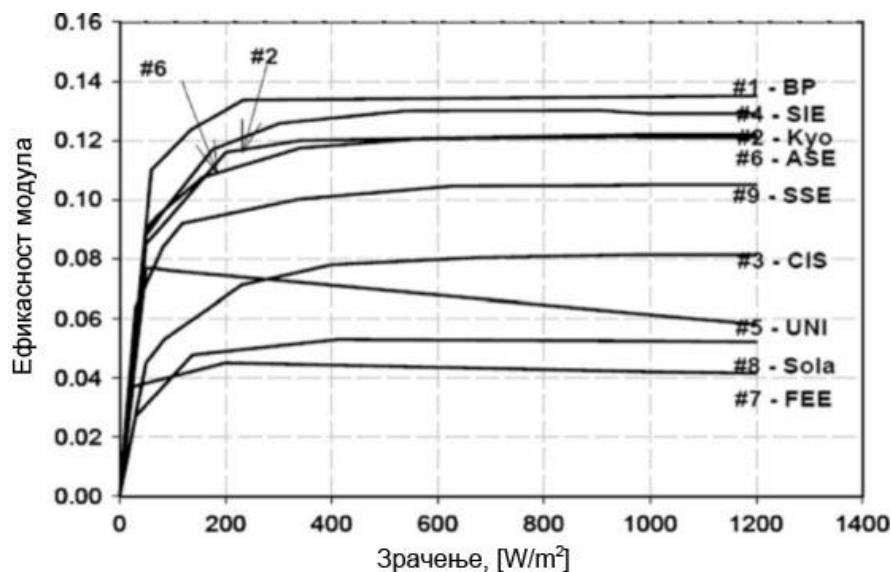


Слика 15. Утицај зрачења на карактеристике *PV* модула [29]

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 16. Закључено је да су карактеристике *PV* направљеног технологијом танког филма боље у условима слабијег зрачења.

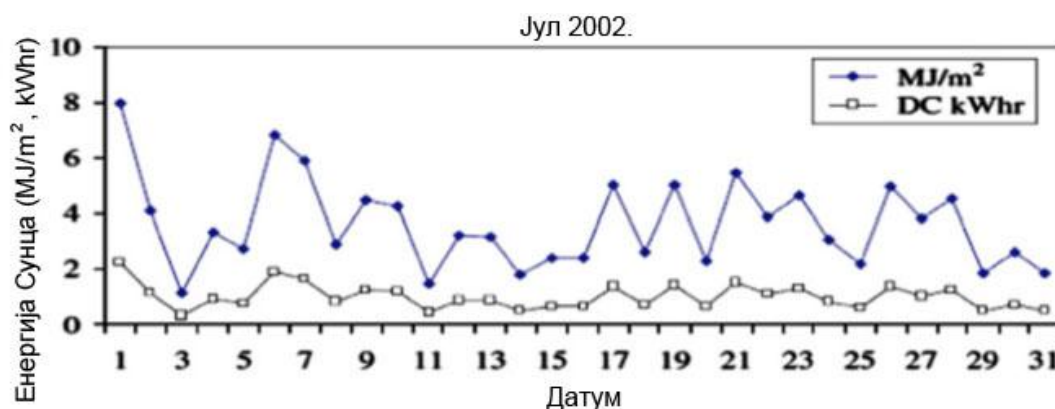
Hult [30] је збох *PV* перформанси пручавао базу података соларног зрачења у Африци и Европи. Студија се заснивала на подацима прикупљеним из 20 станица уз помоћ *PVGIS* (*Photovoltaic Geographical Information System*). Потврђени резултати ове студије показали су да су мале укупне грешке *PVGIS-CMSAF*, 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* [31] спроводе студију фокусирану на утицају ниског зрачења на квалитет струје *PV* система повезаног на мрежу.



Слика 16. Ефикасност *PV* модула у различитим условима зрачења [29]

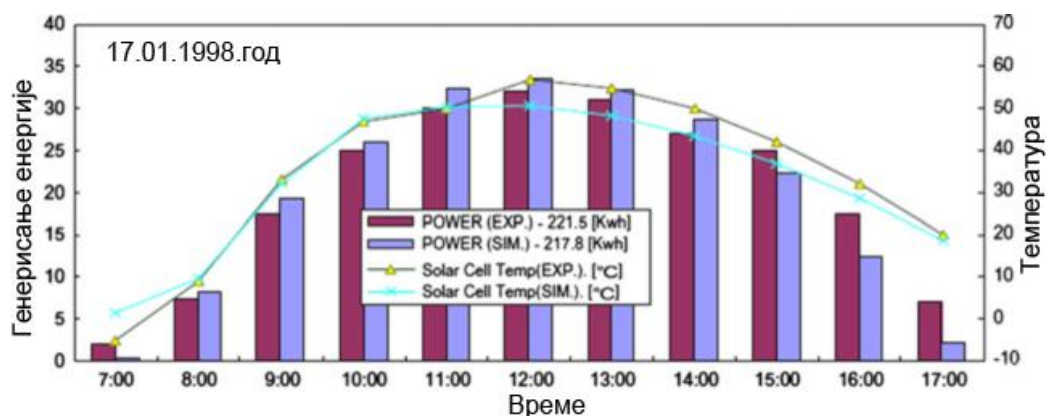
Проучавали су 4.2 kWp систем кровних јединица и посматрали како *PV* систем генерише значајну количину снаге, у високим вредностима зрачења. На ниским нивоима зрачења, када систем не производи довољно излазне снаге, реактивна снага се црпи из дистрибутивног трансформатора и прослеђује се преко инвертера у акумулациона складишта. Засновано на резултатима са тест полигона и подацима за дугорочно зрачење Бангкока, процењено је да у условима тропске климе, нпр. Тајланд, значајна количина енергије зрачења, око 20-30%, је доступна као облик реактивне снаге (Слика 17.)



Слика 17. Излазна снага *PV* модула у условима зрачења испод 400 W/m² [31]

Значај варијације соларног спектра за соларне ћелије израђене у технологији танког филма експериментално је проучавао *Gottschalg* [32]. Студија се базирала на три врсте соларних ћелија, *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 [33] 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 18. Приметили су да је током поднева, када је количина зрачења највећа, и генерисана енергија *PV* модула је највећа. Резултат студије је показао да перформансе *PV* модула зависе од количине зрачења која доспе на површину модула. Резултати симулације показују добру усклађеност са експерименталном методом.



Слика18. Генерисање *PV* енергије током једног дана [33]

6. Период повраћаја енергије потребне за израду PV модула

„ Embodied energy “

„ *Embodied energy* “ преставаља збир свих енергија потребних да би се произвео производ или услуга, сматра се да је та енергија регистрована или оличена у самоме производу. Концепт може бити користан у одређивању ефикасности енергетске производње или производње енергетских уређаја. Једна од главних сврха због којег се врши ово мерење је да се упореди количина енергије произведена или сачувана производњом у поређењу са количином енергије која је потребна за производњу истог. „ *Embodied energy* “ преставаља рачунарску методу чији је циљ да нађе суму свих енергија потребних за један животни циклус производа. Одређивање шта овај животни циклус укључује је енергија потребна за вађење сировина, транспорт, производњу, склапање, инсталацију, демонтажу и одлагање производа. [34]

Често мишљење о PV технологији је да је потребно више енергије да би се произвео PV систем него енергија коју ће тај систем дати кроз свој животни век, ова констатација зависи од услова и места где је модул постављен. Срећом, то није случај. Недавне студије о повраћају енергије (*EPBT*) показују да је PV систему потребно до три године да би произвео исту количину енергије која је потребна за његову производњу, посматран је PV систем у Колораду од поликристалних соларних ћелија где му је процењен животни век експлоатације од 20 год [35]. Имајући у виду да ће PV систем наставити да производи електричну енергију следећи низ година, долази се до закључка да ће PV систем далеко превазићи енергију која је потребна за његову производњу. Сваки PV систем се састоји од одређених делова као што су конектори, инвертори, повезујуће компоненте које укључују цеви, арматуре, електричне кутије, жице итд. За сваку компоненту система је потребна енергија за његову производњу и транспорт (*Embodied energy*), али од свих њих, модули захтевају највише енергије за производњу око 93% од целог система. [35]

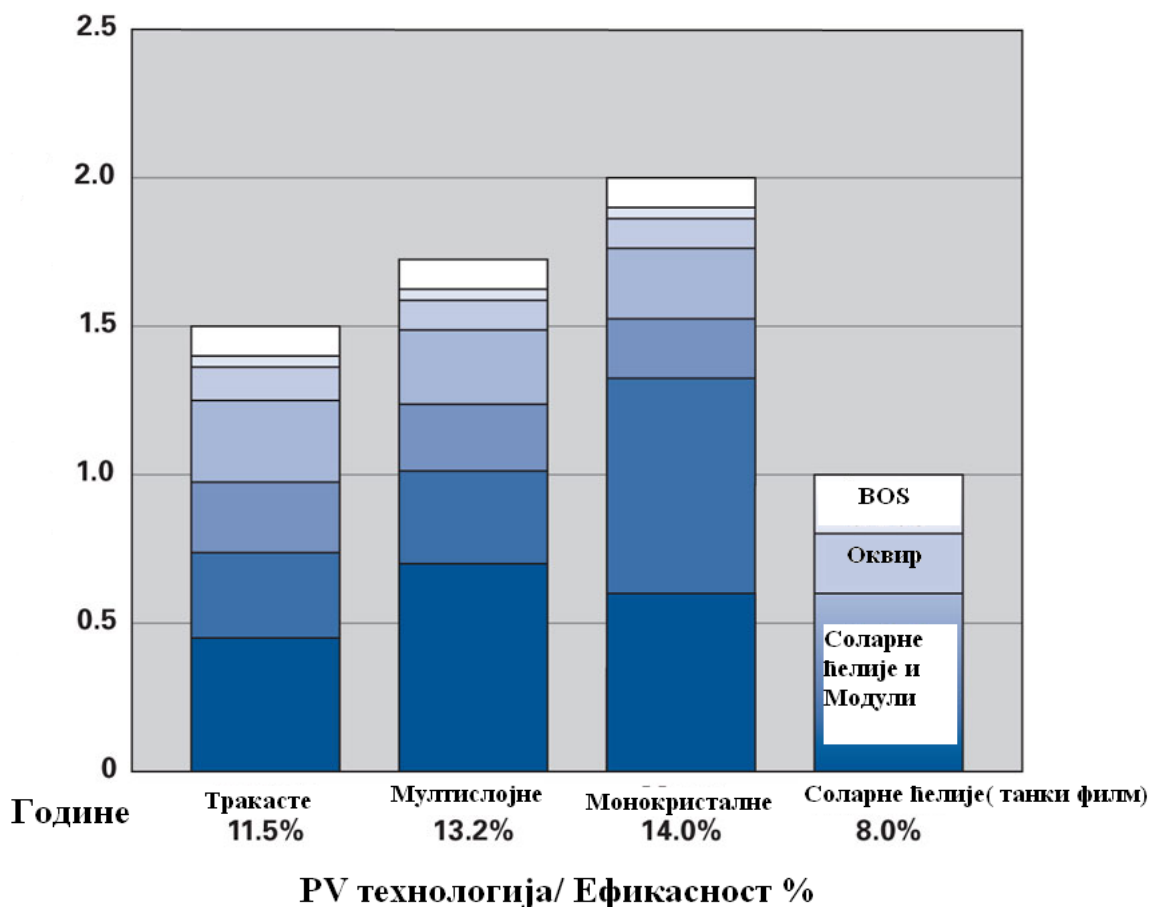
Монокристалне PV ћелије су обично произведене коришћењем (*CZ*) методом, где је "семе" убачено у пречишћен истопљен силицијум и полако подигнуто из посуде. Када се клица кристала подигне, растопљени силицијум се хлади и очвршћава у један цилиндрични кристал. Овај процес се назива "извачењем или епитаксијалним растом". Танки листови-око 200 микрона (0,008 инча) дебљине се секу из шипке и, уз додатак неког антирефлектујућег премаза и система за прикупљање електрона, постају појединачне PV ћелије. Да би се направио модул, неколико ћелија су поставља и повезује заједно. Коначно, модул добија заштитни облог, од стаклених рамова, а затим с затвара и урамљује у рам од екструдираног алуминијума. Сваки корак и материјал који се користи у том процесу производње захтева енергију. Пречишћавање и топљење силицијума захтева доста топлотне енергије. Ту је и количина енергије која се користи да би се произвео алуминијумски оквир модула, као и премази и стакла. Пречишћавање и раст силиконског кристала, уз потребну енергију (*Embodied energy*), чине велики утрошак енергије који су укључени у производњу.

Мултикристалне PV ћелије су углавном направљен помоћу процеса ливљења, где се растопљени силицијум сипа у калупе и оставља да очврсне. Ингот се сече на танке квадратне плочице, тако да је производња PV ћелија на сличан начин као код монокристалне PV ћелија. Када се ћелије се направе, производња се наставља као и код монокристалних модула. Мултикристални PV модули захтевају мање енергије да се произведу од (CZ - метода *Czochralski*) методе која се користи за производњу монокристалних PV модула. Делимично због тога што процес за хлађење ливеног ингота користи мање енергије. Време за повраћај енергије (*EPBT*) за мултикристалне PV системе је око 15% мање него монокристалних фотонапонских система.

Танкослојни PV модули користе процес таложења у коме се различити слојеви PV ћелија директно прскају на супстрат. Пошто нема појединачних кристала који могу да се сломе, тако да супстрат може да буде флексибилан и практично у било ком облику или величини. Највише енергије код технологије танког филма за производњу PV модула, утроши се на процес таложења, стварање супстрата, алуминијумског оквира, стаклене или пластичне облоге. Повраћај уложене енергије (*EPBT*) код технологије танког филма за производњу фотонапонских система је за око 50%[35] мање него код производње кристалних фотонапонских система.

Студије спроведене од стране *CrystalClear* [35], представљају истраживачки и развојни пројекат у стварању кристалног силицијума за PV технологије, дају 2006.године анализу повраћаја енергије (*EPBT*) за PV системе. Студија обухвата повраћај енергије (*EPBT*) за равнотежу система (*BOS*) где су укључени сви параметри производње компонента (оквири, инвертори, итд) и претпостављена је ефикасност система од 75%, где су урачунати губитци од температуре модула, инсталација и инверторске неефикасности. Студија користи просечне соларне податке за јужну Европу, која се процењује на 1.700 kWh/m² годишње. САД просек је нешто већи на 1,800 kWh/m² годишње, што значи да је време за повраћај енергије (*EPBT*) за америчке инсталације је још краће. Студија показује да за монокристалне модуле PV система треба две године. PV системи који користе мултикристалне модуле произведени методом ливења, *EPBT* се обрачунава на 1,7 година. PV системи са модулима произведених методом технологије танког филма смањио *EPBT* до 1,5 година. На слици 19. приказан је повраћај енергије за различите технологије PV производње модула.

Период повраћаја енергије



Слика 19. Повраћај енергије PV система за јужну Европу (где су узети соларни подаци о 1.700 KWH/m2 на годишњем нивоу и ефикасност система од 75%) [35]

Будућност (*EPBT*) пројеката: Године 1975, за већину PV модула повраћај енергије (*EPBT*) је процењен на 20 година. Данас, је потребно у просеку три године или мање да PV системи за производњу енергије врате уложену енергију за њихову производњу [35], и *EPBT* наставља да смањи тај временски период сваке године. Произвођачи PV увек траже да смање трошкове производње, кроз смањење количине потребног силицијума, унапређење ефикасности PV ћелија, експериментисање са новим материјалима, коришћењем нових метода производње.

Већина стратегије смањењем трошкова ће такође смањити енергетски повраћај енергије. У својим *EPBT* истраживања о *CrystalClear* [35] пројекту, процењују да ће се смањити трошкови и време енергетске отплате на PV инсталацијама (у јужној Европи) које износе тренутно од 1,5 до 2 године, до испод једне године. Са већим бројем сунчаних часова у Сједињеним Америчким Државама (у Илиноису или у Тексасу), повраћај енергије (*EPBT*) за модуле инсталиране код њих, ће бити још мањи.

Повраћај енергије (*EPBT*) зависи од доступности сунчеве светлости, *EPBT* прорачуни су под великим утицајем колико сунчеве светлости ће *PV* систем примити. Што више сунчеве светлости прими, више ће производити киловат часова по метру квадратном, *PV* систем ће производити више и брже ће вратити енергију која је уложена у његову производњу. Студија из 2006.године показале су да је повраћај енергије (*EPBT*) од једне до две године, засновано на просеку да има 4,7 сунчаних часова током дана које је *PV* примио у јужној Европи. Ако живите у клими где има више сунчаних дана и сати, онда ће време енергија отплате ће бити краће. На пример, систем инсталиран у *Colorado*, који у просеку имају око 5,8 сунчаних сати дневно, можете да смањите повраћај енергије (*EPBT*) више од 23%, у поређењу са јужно европским сунчаним данима. Међутим, ако живите у клими која има мало сунчаних сати на годишњем нивоу, повратак енергије за *PV* системе ће бити дужи. Садашњи укупан просек у свету за повраћај енергије (*EPBT*) је од једне до три. [35]

7. 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.

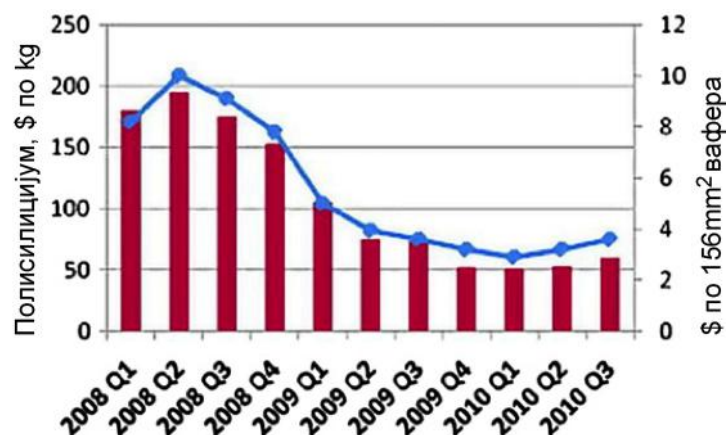
У поређењу са осталим материјалима за соларне ћелије, уочено је да монокристални силицијум има добру *PV* ефикасност али услед комплексности процеса производње цена му је релативно висока. Трошкови по вату монокристалних материјала су били око 3,97\$ у 1996. години. Поликристални силицијумски материјал је јефтинији од монокристалног, а и процес производње је доста једноставнији.

Анализа трошкова поли и монокристалног *PV* модула од 1996. до 2010. године коју је спровео *Maicosk* [36] дата је у Табели 5. Из табеле 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 5. Производна цена модула [36]

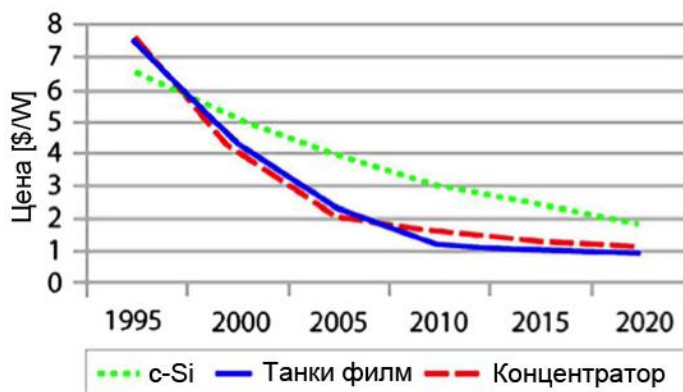
Цена *p-Si* материјала, базирана квартално од 2008. до 2010. године, дата је на Слици 19. Највиша цена је током 2008. године услед високе потражње а ниских залиха, али цена опада током сваког квартала. Технологија танког филма представља изазов технологији кристалног силицијума и приморава на пад цена.



Слика 19. Цена p -Si од 2008. до 2010.године [36]

$CdTe/CdS$ 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\$. 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. Трошкове PV материјала од 1995. до 2012. године, са предвиђањем цена чак до 2020.године, анализирао је Adams [37]. Може се уочити драстичан пад цена од 1995. до 2012.године од чак 3\$ по вату (Слика 20).



Слика 20. Цена PV панела од 1995. до 2020.године [37]

Предвиђено је да ће у предстојећим годинама трошкови пасти на 1\$ по вату за технологију танког филма и 2\$ по вату за кристалне материјале. Прорачуни анализе цена за PV модуле базиране на силицијуму дао је Powell [38]. 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 6.).

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 (ppl/Mw/a)	2,9	1,5
Трошак ел. енергије (\$/kWh)	0,07	0,09
Капитални трошкови(MM/Mw/a)	1,08	1,19

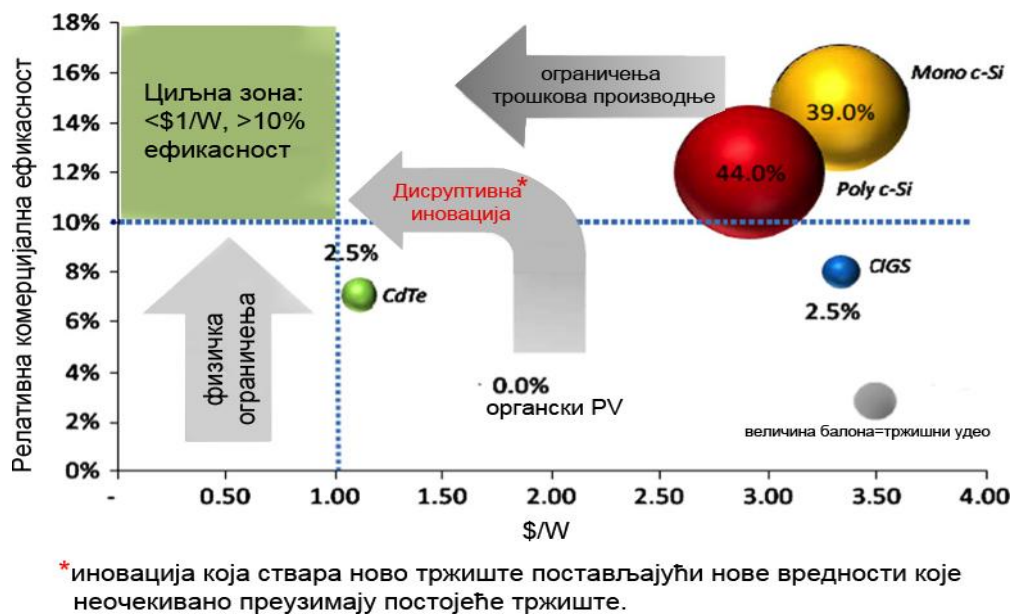
Табела 6. Прорачун анализе трошкова PV модула базираних на силицијуму [38]

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 7. Ефикасност PV материјала и њихови производни трошкови по вату, као и удео на тржишту, дати су на Слици 21. 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.

Преглед полимерних PV материјала дат је у Табели 7. *Kalowekamo* и *Baker* [39] 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
<i>Avancis</i>	CIS	110	196	
<i>Q cell</i>	CIS	95	174	
<i>Kyocera</i>	Поликристал	135	247	
<i>Solarpark</i>	Поликристал	240	374,9	
<i>Solar wold</i>	Поликристал	225	288,68	
<i>LG</i>	Монокристал	250	382,9	
<i>Sanyo</i>	Хетероспојне са међуслојем	214	418,9	
<i>Schott solar</i>	Монокристал	190	308	
<i>UNI-solar</i>	Аморфна	124	179	

Табела 7. Цена PV панела према снази и произвођачима [39]



Слика 21. Комерцијална PV ефикасност у поређењу са ценом по вату [39]

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

Табела8. Цена полимерних PV материјала [39]

Nielsen [40] је анализирао тренутне трошкове који укључују материјале и трошкове производње за развој полимерне соларне ћелије површине 360cm², излазне снаге 660 mW и закључио да износе 5.3491 еура. *Emmot* [41] 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* [42] је разматрао трошкове соларног фотонапонског електрицитета. Процена цене инсталација широм света дата је у Табели 9

Соларна PV технологија	Инсталирани PV трошак (\$/Wp)	Величина пројекта
Кристална (Европа)	5,00	Utility
Кристална (Кина)	4,42	Utility
Кристална	5,02	Utility
Танки филм <i>CdS/CdTe</i>	4,28	Utility
Танки филм <i>a-Si/μ-Si</i>	3,52	Utility
Кристална и танки филм (САД)	7,50	Capacity weighted average (2009)
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 9. Укупни трошкови PV инсталације [42]

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 *Walddolenz*, 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 Commission* договорилa испоруку електричне енергије од 12 центи по kWh. 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 . Ово је прва компанија која је направила фабрику соларних ћелија капацитета 1 GW базирану на CIS технологији . До данас много је истраживача радило на смањењу трошкова производње ћелија танког филма путем метода софистициране вакуумске евапорације , слагањем слојева елементарних процеса и слично.

8. Закључак

Потрошња електричне 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.

9. Референце

- [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 Upadhyaya H.M.; Solar photovoltaic electricity: current status and future prospects. Solar Energy 2011;85:1580-608.
- [3] Kalowekamo J., Baker E.; Estimating the manufacturing cost of purely organic solar cells. Solar Energy 2009;83:1-8. ^[L SEP]
- [4] Nielsen T.D., Cruickshank C., Foged S., Thorsen J., Krebs F.C.; Business, market and intellectual property analysis of polymer solar cells. Solar Energy
- [5] Ramanathan K., Contreras M.A., Perkins C.L., Asher S., Hasoon F.S., Keane J., al. ; Properties of 19.2% efficiency ZnO/CdS/CuInGaSe₂ thin-film solar cells. Progress in Photovoltaics 2003;11:225-30.
- [6] Aguado-Monsonet M.A.; The environmental impact of photovoltaic technology. January 1998. ^[L SEP]
- [7] 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. ^[L SEP]
- [8] Manna T.K., Mahajan S.M.; Nanotechnology in the development of photovoltaic cells. IEEE 2007:379-86.
- [9] Chen A., Zhu K.; Computer simulation of a-Si/c-Si heterojunction solar cell with high conversion efficiency. Solar Energy 2012;86:393-7. □
- [10] 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. □
- [11] 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. □
- [12] Glunz SW. New concepts for high-efficiency silicon solar cells. Solar Energy Materials and Solar Cells 2006;90:3276–84. □
- [13] 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. □
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] Ito S, Murakami TN, Comte P, Liska P, Graetzel C, Nazeeruddin MK, 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.
- [18] Singh P., Ravindra N.M.; Temperature dependence of solar cell performance- an analysis, Solar Energy Materials and Solar Cells, 101, (2012), 36-45.

- [19] Ting C.C., Chao W.S.; Measuring temperature dependence of photoelectric conversion efficiency with dye-sensitized solar cells. *Measurement* 2010;43: 1623-7.
- [20] 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.
- [21] Goossens D., Kerschaefer 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] Hee J.Y., Kumar L.V., Danner A.J., Yang H., Bhatia C.S.; The effect of dust transmission and self-cleaning property of solar panels. *Energy Procedia* 2012;15:421-7.
- [28] Christiana Honsberg, Stuart Bowden : PV education
- [29] Eikelboom J.A., Jansen M.J.; Characterisation of PV modules of new generations. Results of tests and simulations 2000.
- [30] 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..
- [31] Thongprong 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.
- [32] Gottschalg R., Infield D.G., Kearney M.J.; Experimental study of variations of solar spectrum of relevance to thin film solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 2003;79:527-37.
- [33] Yoo S.H.; Simulation for an optimal application of BIPV through parameter variation. *Solar Energy* 2011;85:1291-301.
- [34] http://en.wikipedia.org/wiki/Embodied_energy
- [35] Justine Sanchez: PV Energy payback: PV-Embodied-Energy_Home-Power
- [36] 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
- [37] Adams A., Subbaiah V., Chowdhary A.; Cost analysis comparison of bloom energy fuel cells with solar energy technology and traditional electric companies.
- [38] 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

- [39] Kalowekamo J., Baker E.; Estimating the manufacturing cost of purely organic solar cells. *Solar Energy* 2009;83:1-8. 
- [40] 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. 
- [41] 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. 
- [42] 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-

