

**Факултет инжењерских наука
Универзитета у Крагујевцу**



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Мастер академске студије

Модул: Енергетика и процесна техника

Предмет: Соларна техника

Број индекса: 399/2015

Никола М. Станковић

**Фотонапонски системи за генерисање
електричне енергије**

мастер рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. др Данијела Николић - доцент
2. _____
3. _____

Датум
одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог мастер рада кандидат треба да проучи препоручену и ширу литературу која се односи на врсте фотонапонских ћелија и данас доступних технологија за њихову израду. Посебан осврт треба дати на ефикасност соларних ћелија. Такође је неопходно да се представе врсте фотонапонских система (самостални и мрежно повезани фотонапонски системи) и да се опишу њихове компоненте. На крају, кандидат треба да опише примену фотонапонских система у зградарству, са посебним освртом на њихову интеграцију у омотач зграде као један од најсавременијих трендова у зградарству који се односи на енергетски ефикасне зграде.

Препоручена литература:

- [1] V.V. Tyagi, Nurul A.A. Rahim, N.A. Rahim, Jeyraj A., L. Selvaraj, Progress in solar PV technology: Research and achievement, India, 2012.
- [2] T.M.Razykov, C.S. Ferekides, D. Morel, E. Stefanakos, H.S. Ullal, H.M. Upadhyaya, Solar photovoltaic electricity: Current status and future prospects, 2011.
- [3] Ламбић М., Соларне технологије – топлотни и фотонапонски системи, Београд 2013.
- [4] Д. Николић, М. Бојић, Ј. Радуловић, Ј. Скерлић, Д. Тарановић, Review of non-silicon and new photovoltaics technology for electricity generation, Proceedings of The Second International Conference on Renewable Electrical Power Sources MKOIE 2013, Београд 2013.

Крагујевац
фебруар 2017.

Ментор:

Др Данијела Николић, доцент

РЕЗИМЕ

Тема овог мастер рада јесте приказ, анализа и примена фотонапонских технологија. Поред основних појмова о соларној енергији, дат је приказ и принцип рада фотонапонске ћелије која је основа фотонапонских технологија. Даље у раду су представљени материјали и технологије за израду фотонапонских ћелија различитих карактеристика. Разматране су различите врсте фотонапонских ћелија, њихова ефикасност, начин повезивања као и могуће апликације у архитектури.

Кључне речи: фотонапонске технологије, соларна енергија, фотонапонска ћелија

Abstract

The subject of this master thesis is presentation, analysis and application of photovoltaic technologies. In addition to the basic concepts of solar energy, this master thesis contains working principle of photovoltaic cell which is the foundation of photovoltaic technologies. Further in thesis are presented different materials and technologies for the production of photovoltaic cells with different characteristics. Different types of photovoltaic cells, their efficiency, the way of connection and possible applications in architecture were considered.

Key words: photovoltaic technologies, solar energy, photovoltaic cell

Садржај

1. УВОД	6
2. ОБНОВЉИВИ ИЗВОРИ ЕНЕРГИЈЕ И СОЛАРНА ЕНЕРГИЈА.....	8
2.1 Обновљиви извори енергије	8
2.2 Соларна енергија.....	9
2.3 Инсолација.....	12
2.3.1 Прорачун инсолације.....	12
2.3.2 Сунчево зрачење на хоризонталну површину	14
2.3.3 Сунчево зрачење на произвољно нагнуту површину.....	16
3. СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИЈЕ ЗА КОРИШЋЕЊЕ СОЛАРНЕ ЕНЕРГИЈЕ	17
3.1 Соларна ћелија	18
3.2 Технологија фотонапонских ћелија	19
3.2.1 Фотонапонске ћелије од силицијума	20
3.2.1.1 Монокристални силицијум	20
3.2.1.2 Поликристални силицијум.....	21
3.2.1.3 Аморфни силицијум	22
3.3 Поликристалне танкослојне ФН ћелије.....	23
3.4 Монокристалне танкослојне ФН ћелије и вишеслојна структура ФН ћелије.....	24
3.5 Соларне ћелије од кадмијум-телурита (CdTe)	25
3.5.1 Главни технички проблеми у коришћењу CdTe соларних ћелија	26
3.6 Фотонапонски системи новијих генерација	27
3.6.1 Органске фотонапонске ћелије.....	27
3.6.2 Фотонапонске ћелије са фотоосетљивим пигментима.....	29
3.6.3 Нанотехнологија у изради фотонапонских ћелија.....	31
3.6.3.1 Соларне ћелије са квантним тачкама	31
3.6.3.2 Фотонапонске ћелије са наноцевима	33
4. ЕФИКАСНОСТ ФОТОНАПОНСКЕ ЋЕЛИЈЕ	37
4.1 Утицај температуре на ефикасност ФН ћелије	38
4.2 Утицај запрања на ефикасност ФН ћелије	40
4.3 Утицај врућих тачака - Hot Spots	41
4.4 Утицај соларног зрачења.....	44
5. ПОВЕЗИВАЊЕ ФОТОНАПОНСКИХ ЋЕЛИЈА – ФОТОНАПОНСКИ МОДУЛ И ПАНЕЛ.....	46
6. ФОТОНАПОНСКИ СИСТЕМИ.....	49
6.1 Подела фотонапонских система	49

6.1.1 Мрежно спојени ФН системи (On-Grid)	51
6.1.2 Самостални ФН системи (Off-Grid)	52
6.2 Хибридни системи	55
6.3 Хибридни соларни пријемници	56
7. ОДРЖИВЕ ЗГРАДЕ, СОЛАРНА АРХИТЕКТУРА - ИМПЛЕМЕНТАЦИЈА ФН СИСТЕМА	58
7.1 Имплементација ФН систем на крову	59
7.2 Полу-транспарентни соларни модули	61
7.3 Стаклени кровови	62
7.4 Употреба фотонапонских панела као засенчење	63
8. ЗАКЉУЧАК	64
ЛИТЕРАТУРА.....	65

1. УВОД

Основни видови енергије који омогућавају функционисање данашње цивилизације су углавном топлотна и електрична енергија, које се у даљим технолошким поступцима применом одређених претварача (конвертора) могу превести у остале видове енергије. Топлотна и електрична енергија се данас у великом проценту добијају из необновљивих извора енергије.

Под појмом необновљивих извора енергије се подразумевају сви потенцијални носиоци неког вида енергије који су једном створени, али се за сада не могу обновити. Такви носиоци енергије су фосилна горива: угаљ, нафта и деривати нафте, природни гас, као и фисиона (нуклеарна) горива.

Проблеми са необновљивим изворима енергије су прво у њиховој количини и распрострањености. Залихе фосилних горива су ограничене и брзо нестају, а услед концентрације енергетских ресурса у свега неколико области у свету, коришћење необновљивих горива створило је одређен систем међузависности, тако да се државе које зависе од увоза фосилних горива налазе у подређеним положајима.

Други проблем је загађење човекове околине. Сагоревање фосилних горива, нарочито оних базираних на нафти и угљу, представља један од највероватнијих узрока глобалног загревања и ефекта стаклене баште услед емисије угљен-диоксида, сумпорних и азотних једињења. Промена климатских услова представља једну од најозбиљнијих опасности за Земљин еколошки систем због могућег утицаја на производњу хране. Са друге стране, примена нуклеарне енергије, представља условно чисту технологију, али у случају катастрофа може доћи до изузетно великих загађења са огромним последицама на човека и животну средину. Такође, велики проблем представља и проблем одлагања радиоактивног отпада.

Под појмом обновљиви извори енергије подразумевају се сви природни извори енергије који се регенеришу делимично или у потпуности, попут сунчеве светлости, ветра, депонијског гаса и геотермалне енергије. Потреба за коришћењем таквих извора енергије јавила се протеклих неколико деценија пошто су објављени алармантни подаци о последицама емисије гасова са ефектом стаклене баште, који настају сагоревањем фосилних горива. То је довело до климатских промена у свету које се пре свега огледају у повећању просечне температуре, односно глобалном загревању. Потрагу за новим изворима енергије подстакла је и ограниченост других ресурса, попут фосилних горива која се масовно експлоатишу. Светске нафтне залихе се непрекидно смањују, а цена нафте расте, због чега ова сировина, према неким проценама, већ средином 21. века неће бити довољно комерцијална.

Сунце је нама најближа звезда те, непосредно или посредно, извор готово све расположиве енергије на Земљи. Ова се енергија у виду светлости и топлоте шири у свемиру, па тако један мали део долази и до Земље. Сунчева енергија је потпуно бесплатан и свуда доступан извор енергије.

Поред традиционалног коришћења, данас се енергија Сунчевог зрачења најчешће користи на следећа два начина:

- **Соларни колектори** – системи који претварају Сунчеву енергију у топлотну енергију воде (или неке друге течности). Системи за грејање воде могу бити отворени, у којима вода коју треба загрејати пролази директно кроз колектор, или затворени, где колектор представља размењивач топлоте.

• **Фотонапонски системи** – на принципу фотонапонског ефекта директно претварају соларну енергију у електричну. Фотонапонски системи се могу користити као самостални или додатни извори енергије. Као самостални извори енергије користе се за напајање потрошача који немају приступ електроенергетској мрежи, нпр. пловни објекти, сателити, мање куће у планинским пределима и сл. Као додатни извор енергије, фотонапонски системи могу да раде у комбинацији са електроенергетском мрежом у циљу уштеде електричне енергије.

Сунчева енергија је бесплатна, али уређаји који претварају сунчеву енергију у електричну нису. Трошкови одржавања и погона су мали, али је цена уређаја релативно висока и време поврата инвестиције релативно дуго.

Овај рад има за циљ да нас упозна са основним параметрима који утичу на карактеристике претварања енергије Сунчевог зрачења у електричну енергију уз помоћ фотонапонских система. Пошто енергија сунчевог зрачења представља најбитнији улазни параметар приликом пројектовања фотонапонских система, први део рада посвећен је управо енергији Сунца, вредностима енергије која допире до Земље и која нам као таква стоји на располагању. Други параметар јесте позиција фотонапонског система у односу на геометрију Сунце – Земља, тако да су у даљем излагању дати основни појмови соларне геометрије. У даљем излагању су представљене релације помоћу којих рачунамо одређене углове битне за одређивање положаја фотонапонског система. Приказано је на који начин можемо доћи до података о енергији сунчевог зрачења, као и то која је позиција фотонапонског система оптимална са становишта искоришћења енергије. Даље у раду анализирана је фотонапонска ћелија као основна јединица фотонапонског система. Описан је принцип рада и основне карактеристике фотонапонске ћелије. Поред овога дат је преглед материјала и технологија које се примењују приликом израде фотонапонских ћелија, као и неке од њихових примена у архитектури.

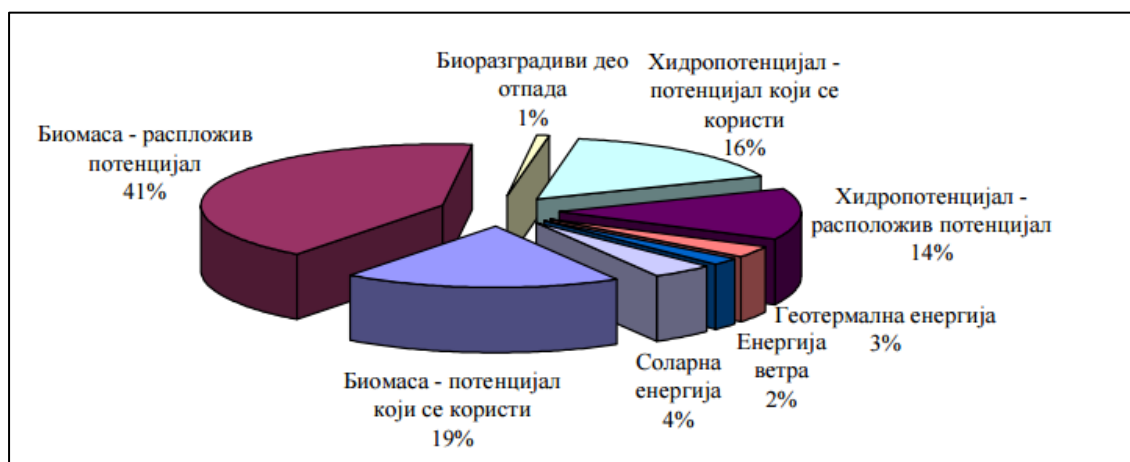
2. ОБНОВЉИВИ ИЗВОРИ ЕНЕРГИЈЕ И СОЛАРНА ЕНЕРГИЈА

2.1 Обновљиви извори енергије

Енергија се данас највећим делом добија из необновљивих извора енергије, као што су нафта, угаљ и природни гас, чије су залихе ограничене, брзо се троше и концентрисане су у свега неколико области у свету. Нафта, угаљ и природни гас обезбеђују највећи део примарне енергије која се данас користи на Земљи. Поред велике економске зависности од фосилних извора енергије, у свету је стално присутан проблем заштите животне средине од загађења. Сагоревање фосилних горива, нарочито оних базираних на нафти и на угљу, представља узрок глобалног загревања и доводи до стварања ефеката „стаклене баште” услед емисије угљен-диоксида (CO_2), угљен-моноксида (CO), метана (CH_4), водене паре, као и сумпорних и азотних једињења.

Ефекат „стаклене баште” представља загревање планете Земље, које је настало поремећајем енергетске равнотеже између количине зрачења које Земљина површина прима од Сунца и које зрачи у свемир, односно то је резултат повећања количине зрачења које Земљина површина не може да емитује у свемир већ је гасови „стаклене баште” упију и тиме долази до пораста температуре Земљине атмосфере.

Према Закону о енергетици Републике Србије, енергија из обновљивих извора је енергија произведена из природних обновљивих извора као што су: водотокови, биомаса, ветар, сунце, биогаз, депонијски гас, гас из погона за прераду канализационих вода и извори геотермалне енергије. Према Директиви 2009/28/EЗ енергија из обновљивих извора је енергија из нефосилних обновљивих извора и то: енергија ветра, соларна, аеротермална, геотермална, хидротермална, енергија океана, хидроенергија, биомаса, депонијски гас, гас из постројења за обраду отпада и биогаз [1].



Слика 1. Структура ОИЕ у Републици Србији [2013] година [1]

Карактеристика обновљивих извора енергије је да се током коришћења њихове залихе не смањују као код фосилних горива, има их у огромним количинама и, што је веома важно, не загађују околину. Енергија ветра и Сунца спадају у највише коришћене обновљиве енергије данас у свету. Поред тога што се ради о еколошки чистим

енергијама, битан фактор за значајну експанзију је и чињеница да је експлоатација извора обновљиве енергије постала и економски конкурентна. Последњих година је у читавом свету, а нарочито у Европској унији дошло до наглог пораста примене свих облика обновљиве енергије. Директно коришћење извора обновљиве енергије није једини пут ка побољшању енергетске ситуације. Све већи значај у новије време добија и унапређење енергетске ефикасности са ослоном на стратегију рационалног коришћења енергије. Генерално се ради о коришћењу прилива соларне енергије и истовременом редуковању губитака енергије [2].



Слика 2. Изглед комбинованог система обновљивих извора енергије (коришћење енергије ветра и сунца) [3]

2.2 Соларна енергија

Сунце је најближа звезда планети Земљи под чијим утицајем је настао данашњи свет у коме живимо. Сунце је милионима годинама обликовало живот на планети Земљи и оно је директно или индиректно одговорно за готово све расположиве изворе енергије које ми данас експлоатишемо.

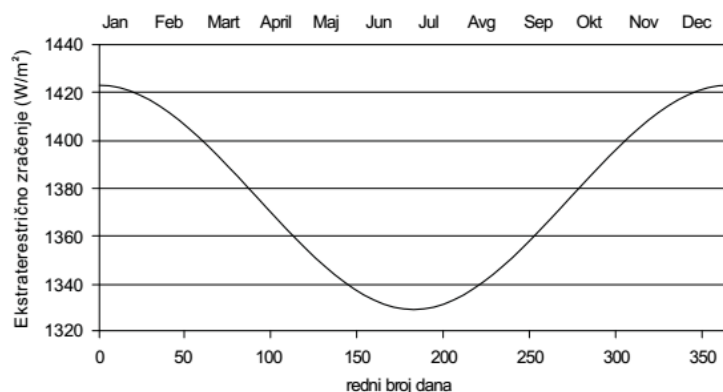
Сунце је готово савршена ужарена кугла, у средишту нашег соларног система, пречника око 1,4 милиона километра, средње густине 1410 kg/m^3 и масе $2 \times 10^{30} \text{ kg}$ (скоро 99% масе целог Сунчевог система). Сунце се окрене око своје осе за 25 дана (екватор), односно 33 дана на половима, што указује на његово флуидно стање (стање плазме).

Сунце се у највећем делу састоји од водоника који чини 75% његове масе (92% његове запремине), који се у унутрашњости, под високим притиском и температуром од неколико милиона Келвина, у току процеса термонуклеарне фузије претвара у хелијум (око 24% масе и 7 % запремине). Осим ова два елемента могу се уочити и веома мале количине осталих елемената, укључујући гвожђе, никл, кисеоник, силицијум, сумпор, магнезијум, угљеник, неон, калцијум и хром [4].

Нуклеарна фузија одвија се на Сунцу већ око 5 милијарди година, колика је и његова процењена старост, а према расположивим залихама водоника може се израчунати да ће се наставити још отприлике 5 милијарди година. Овај процес ослобађа велику количину енергије коју одаје у Космос. Средња температура сунчеве површине износи 5800 К, а исијавање (луминисценција) износи негде око $3,83 \cdot 10^{20} \text{ MW}$ [2].

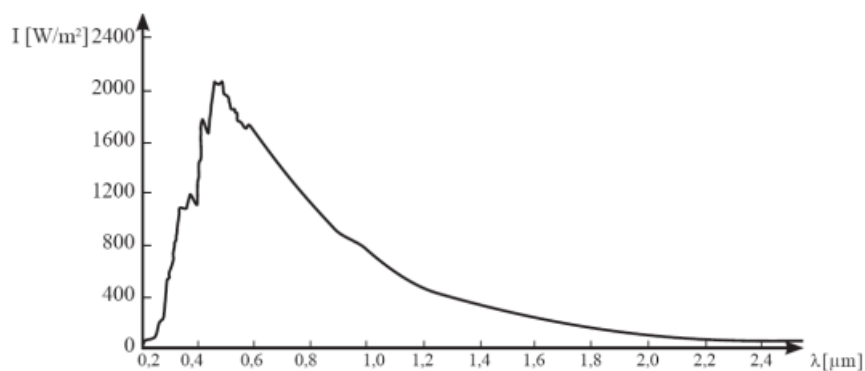
Земља се налази на 150 000 000 километра удаљености од Сунца, уз мале варијације удаљености у току године услед елиптичне путање. Зрачење које стигне до површине земље тј до горње границе Земљине атмосфере износи $174,3 \cdot 10^9$ MW, што представља тек њен $4,55 \cdot 10^{-10}$ део [2].

Сунчево зрачење које допире до површине Земљине атмосфере назива се екстратерестијално зрачење (ирадијација) и представља веома мали део енергије коју Сунце зрачи са своје површине. Будући да се удаљеност Земље од Сунца мења током године, тако се мења и екстратерестијално зрачење и креће се око 3% на површини која је нормална на смер зрачења [5].



Слика 3. Екстратерестијално зрачење на површини атмосфере [5]

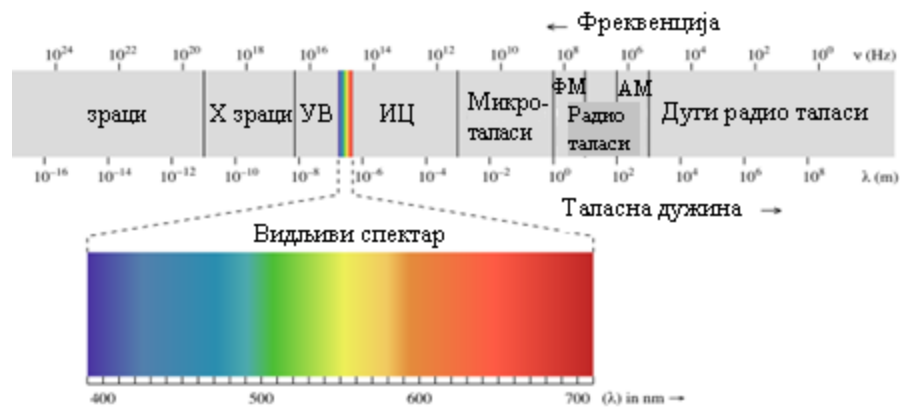
Средње екстратерестијално зрачење тј. средњи топлотни флуks Сунчевог зрачења на површини Земљине атмосфере назива се соларном константом и износи $I_s=1367 \text{ W/m}^2$ [1].



Слика 4. Екстратерестијално зрачење [5]

Сунчев спектар (сл. 5) садржи зрачења таласних дужина мањих од 100 nm па све до 3 μm . Основна подела сунчевог зрачења је на [1]:

1. Јонизујуће (λ до 100 nm, γ и X зраци)
2. Нејонизујуће ($\lambda > 100$ nm, ултравиолетно, видљиво и инфрацрвено зрачење)



Слика 5. Сунчев спектар [6]

Када Сунчево зрачење доспе на Земљину површину (терестријално зрачење), због присуства троатомних гасова у атмосфери, аеросола, као и ефекта расипања светлости долази до смањења енергије зрачења. Ефекат расипања светлости (*Rayleigh*-ово расипање) подразумева ефекат расипања електромагнетних таласа при наиласку на честице које су мање од таласних дужина истих. Ефекат је нарочито присутан у гасним срединама, и плава боја ведрога неба се објашњава овим ефектом.

На слици 6 је приказан сунчев спектар зрачења на нивоу мора и може се видети да од соларне константе, колико износи екстратерестријално зрачење ($I_s = 1367 \text{ W/m}^2$), до земље у идеалном случају стиже 1120 W/m^2 (директно и дифузионо зрачење), а реално и мање [2].



Слика 6. Сунчев спектар зрачења на нивоу мора [7]

Сву енергију која Земља прими зрачењем са Сунца мора вратити у васиону, са изузетком једног скоро занемарљивог дела Сунчевог зрачења (од око 0,1 %) који се користи и остаје везан у процесу фотосинтезе, у виду хемијске енергије.

Од укупног годишњег Сунчевог зрачења, које просечно износи 343 W/m^2 , 30% се рефлектује назад са облака и земљине површине (земљин албедо – α), 11,7 % се израчи директно са Земљине површине, 10,2% израче облаци, а за 48,1 % Земљиног сјаја су заслужни гасови стаклене баште. Овај део зрачења се поново враћа на Земљу и после њеног загревања је напушта [2].

Соларна енергија коју Земља прими на површини атмосфере, E_s (W) [2]:

$$E_s = I_s \pi R_E^2 (1 - \alpha) \text{ [W]}$$

где је:

R_E [m] – Земљин полупречник који износи 6371km

Енергија коју Земља излучује у Космос [2]:

$$E_s = 4\pi R_E^2 \sigma T_E^4 \text{ [W]}$$

где су:

$\sigma \left[\frac{W}{m^2 K^4} \right]$ – Стефан Болцманова константа апсолутно црног тела

T_E [K] – Еквивалентна температура Земље као апсолутно црног тела

Потребна температура Земље да би вратила дозрачену енергију у Космос [2]:

$$T_E = \left[\frac{I_s (1 - \alpha)}{4\sigma} \right]^{\frac{1}{4}} = 255 \text{ [K]} = -18 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Просечна температура Земљине површине износи 288K (15°C), ова разлика температура се објашњава присуством гасова стаклене баште у Земљиној атмосфери.

2.3 Инсолација

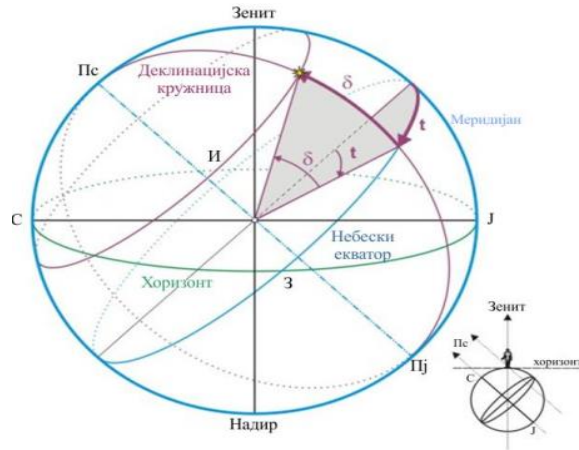
Количина дозрачене Сунчеве енергије на неку површину на Земљи (инсолација) зависи од локације пријемне површине, позиције површине у простору у односу на хоризонталну раван, оријентације површине у односу на стране света, доба године, услова атмосфере, величине пријемне површине, карактеристика пријемне површине, времена озрачености.

Просечно Сунчево зрачење, на годишњем нивоу на хоризонталну површину, назива се годишња осунчаност или инсолација. Сунчево зрачење се може апсорбовати, одбити (рефлектовати) или може мање или више несметано проћи кроз атмосферу (трансмитувати се). У складу са тим, на Земљину површину пада директно и дифузно Сунчево зрачење са неба и рефлектовано зрачење са Земље и околних предмета.

2.3.1 Прорачун инсолације

За одређивање положаја Сунца у односу на Земљу користимо два координатна система: екваторски и хоризонтски. Екваторски координатни систем има координатни почетак у посматрачевом оку. Раван екватора је основна раван екваторског координатног система. Екватор је велики круг небеске сфере по којој се креће Сунце. Екватор је нормалан на Земљину осу ротације (светска осовина ПС и ПЈ). Места где вертикала сече хоризонт су зенит и надир.

Деклинацијски круг је велики круг небеске сфере коме припадају Земљина оса ротације и Сунце. Координате Сунца у екваторском координатном систему, приказаном на слици 6, су деклинација, δ и часовни угао, t .



Слика 7. Екваторски координатни систем [7]

Деклинација представља угао у равни деклинацијског круга који се мери од равни екватора до правца који спаја посматрача и Сунце и изражава се у степенима. Тачке северно од екватора имају позитивну, а јужно од екватора негативну деклинацију. Тако, деклинација северног небеског пола износи $+90^\circ$, а јужног небеског пола -90° .

Вредност деклинације за било који положај Сунца се може израчунати коришћењем једначине, а да притом има веома мала одступања од стварне деклинације :

$$\delta = \left(23 + \frac{27}{60} \right) \cdot \sin \left(\frac{2\pi * brd_{21}}{365.25} \right) \frac{\pi}{180}$$

где су:

δ $[\circ]$ -деклинација

brd_{21} [-] - број дана протеклих од пролећне равнодневнице

Координате Сунца у дефинисаном систему су деклинација и часовни угао. Часовни угао је дефинисан као угаоно растојање између часовног круга и меридијана посматрача, мерено у равни небеског екватора у ретроградном смеру. Са обзиром на то да је деклинација непромењљива у зависности од места посматрања и привидног дневног кретања Сунца, часовни угао се мења.

Часовни угао, t одређује право сунчано време коришћењем једначине:

$$t = \left(t_0 - 12 - TZ + \frac{\lambda}{15} \right) \frac{\pi}{12}$$

где су:

t [rad] - право сунчано време

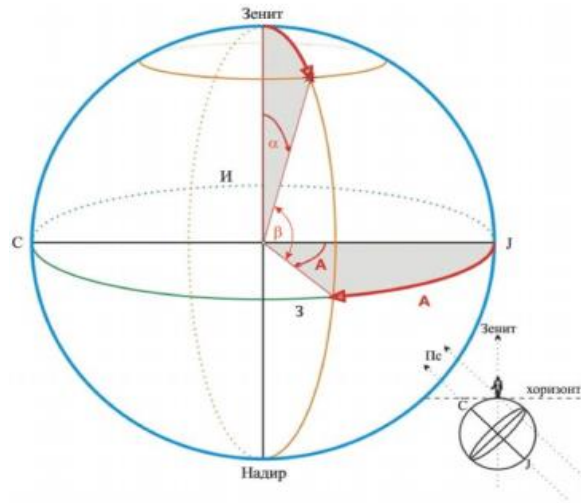
t_0 [h] - светско време

TZ [-] - временска зона

λ $[\circ]$ - географска дужина места

Хоризонтски (азимутски) координатни систем је сферни координатни систем који има координатни почетак у посматрачевом оку. Положаји Сунца у хоризонтском координатном систему нису стални и мењају се због Земљине ротације. Раван хоризонта је основна раван хоризонтског (азимутског) координатног система. Основни правац је

правац ка јужној тачки на хоризонту. Основне тачке у овом координатном систему су зенит, надир и јужна тачка на хоризонту. Зенит је тачка у којој је права, која пролази кроз тачку на којој се налази посматрач, нормална на хоризонтску раван и сече небеску сферу, док је надир, њој супротна тачка (налази се испод хоризонта). На небеској сфери, у хоризонтском координатном систему, положај Сунца одређујемо помоћу углова, соларне алтитуде, α и азимута.



Слика 8. Хоризонтски (азимутски) координатни систем [7]

Соларна алтитуда је угао у вертикалној равни, који се мери од хоризонта до визууре ка Сунцу, дефинише се као:

$$\sin \beta = \sin \delta \sin \varphi + \sin t \cos \varphi$$

где су:

$\sin \beta$ [°] - соларна алтитуда

φ [°] - географска ширина места

Време изласка односно заласка Сунца може се дефинисати као:

$$t = \arccos(-\tan \delta \tan \varphi)$$

$$t = t_{za}$$

где је:

t_{za} [rad] - време заласка Сунца

2.3.2 Сунчево зрачење на хоризонталну површину

Просечно дневно зрачење на врху атмосфере (екстратерестријално) може се израчунати као:

$$H_o = \frac{I_s}{\pi} [1 + 0.033 \cos(0.0172142brd)] \cdot (\cos \varphi \cos \delta \sin t_{za} + t_{za} \sin \varphi \sin \delta)$$

где су:

H_o [W/m²] - средње екстратерестријално зрачење

I_s [W/m²] - соларна константа ($I_s = 1367 \left[\frac{W}{m^2} \right]$)
 brd [-] - редни број дана у години почевши од 01.01.

Да бисмо одредили средње дневно зрачење на површини Земље (терестријално) користимо релацију:

$$\frac{H}{H_0} = a + b \frac{S}{Z}$$

где је:

H [W/m²] - средње дневно терестријално зрачење

a, b [-] - коефицијенти

S [h] - број јасних сунчаних сати

Z [h] - обданица

Однос броја јасних сунчаних сати и обданице, S/Z , дефинише се као удео јасних сунчаних сати у току обданице. Коефицијенти се рачунају по обрасцима:

$$a = -0.309 + 0.539 \cos \varphi - 0.0693h + 0.29 \frac{S}{Z}$$

$$b = 1.527 - 1.027 \cos \varphi - 0.0926h - 0.359 \frac{S}{Z}$$

Однос часовне и дневне екстратерестријалне и терестријалне инсолације се представља једначином:

$$\frac{H'}{H} = (a1 + b1 \cdot \cos t) \frac{H'_0}{H_0}$$

где су:

H' [W/m²] - дневна екстратерестријална инсолација

$a1, b1$ [-] - коефицијенти

H'_0 [W/m²] - часовно (тренутно) зрачење на врху атмосфере

Коефицијенти се рачунају по следећим једначинама:

$$a1 = 0.409 + 0.5016 \sin \left(t_{za} - \frac{\pi}{3} \right)$$

$$b1 = 0.6609 - 0.4767 \sin \left(t_{za} - \frac{\pi}{3} \right)$$

Часовно екстратерестријално зрачење се одређује према обрасцу:

$$H'_0 = I_0 [1 + 0.033 \cos(0.0172142brd)] (\sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos t)$$

где је:

$I_0 = I_s$ [W/m²] - соларна константа

Да би одредили дифузионо и директно зрачење на површини Земље користимо једначине:

$$\frac{H_{dif}}{H} = 0.974 + 0.693 \frac{H}{H_0} - 6.067 \left(\frac{H}{H_0} \right)^2 + 6.416 \left(\frac{H}{H_0} \right)^3 - 1.931 \left(\frac{H}{H_0} \right)^4$$

где су:

H_{dif} [W/m²] - дифузионо зрачење

При чему је директно зрачење:

$$H_{dir} = H - H_{dif}$$

где је:

H_{dir} [W/m²] - директно зрачење

2.3.3 Сунчево зрачење на произвољно нагнуту површину

Према Ламбертовом закону интензитет зрачења на површину зависи од косинуса упадног угла. Упадни угао је угао између зрака и нормале површине, представља се као:

$$\cos i = [\cos G \sin \varphi - \sin G \cos \varphi \cos(\pi - \alpha)][\cos G \cos \varphi + \sin G \sin \varphi \cos(\pi - \alpha)] \cos \delta \cos t + \sin G \sin(\pi - \alpha) \cos \delta \sin t$$

где је:

i [°] - угао између зрака и нормале произвољно постављене површине

G [°] - нагиб посматране површине у односу на хоризонталу

α [°] - оријентација посматране нагнуте површине

Укупно Сунчево зрачење на произвољно оријентисану и нагнуту површину се представља као:

$$I_p = H'_{dir} \frac{\cos i}{\sin \beta} + \frac{H'_{dif}(1 + \cos G)}{2} + \frac{g_r H'(1 - \cos G)}{2}$$

где су:

I_p [W/m²] - укупно Сунчево зрачења

g_r [-] - Земљин алbedo

3. СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИЈЕ ЗА КОРИШЋЕЊЕ СОЛАРНЕ ЕНЕРГИЈЕ

Мноштво је могућности за класификацију система за коришћења енергије соларног зрачења, па је неопходно прво напоменути разлику између соларног система и пријемника Сунчеве енергије.

Соларни системи представљају заокружене инсталације за дефинисани вид коришћења соларне енергије, могу се делити на:

- Пасивне соларне системе - представљају саставни део неког већег склопа који није примарно намењен искоришћењу соларне енергије.
- Активне соларне системе – имају примарну улогу коришћења соларне енергије и обавезан део ових система је пријемник и уједно трансформатор енергије соларног зрачења.

Технологије за коришћење енергије соларног зрачења базирају се на два основна принципа у зависности од пријемника соларне енергије, и то:

- На коришћењу топлотног дејства соларног зрачења, при чему се енергија соларног зрачења трансформише у топлотну енергију на апсорберу пријемника соларне енергије.
- На коришћењу фотоелектричног ефекта, при чему се енергија соларног зрачења трансформише у електричну енергију у фотонапонском пријемнику соларног зрачења.

Подела пријемника соларне енергије се према начину трансформисања може извршити на:

- фотонапонске ћелије
- соларне колекторе
- хибридне соларне колекторе

Подела пријемника према врсти радног флуида која се користи код соларних или хибридних соларних колектора:

- водене
- ваздушне
- који користе друге течне флуиде (термичка уља)

Под фотонапонском конверзијом соларног зрачења подразумева се претварање енергије соларног зрачења у електричну енергију. Фотонапонска конверзија соларног зрачења врши се у соларним ћелијама које се израђују од полупроводничких материјала, једноставне су грађе, немају покретне делове, не загађују околину и имају дуг век трајања.

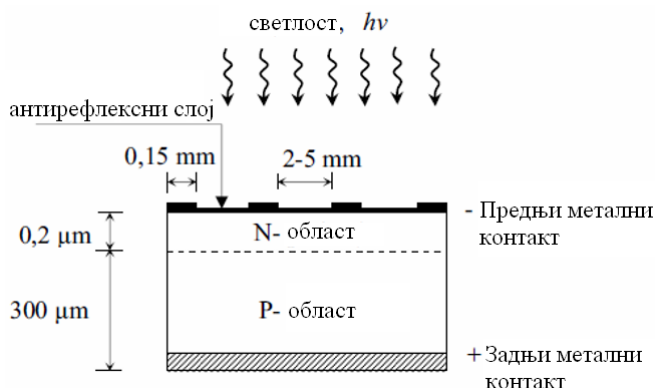
Развој соларних ћелија почиње 1839. године када је Бекерел приметио да се јачина струје између две електроде у електролиту повећава приликом осветљавања електрода. Исти ефекат на чврстом телу (селену) први су приметили Адамс и Дау 1877. године. Захваљујући овоме убрзо је направљен уређај за мерење интензитета светлости. Одмах затим истраживачи су се окренули решавању проблема коришћења соларних ћелија као комерцијалних извора електричне енергије. Нагли развој соларних ћелија почиње 1954. године када су Пеарсон, Фуллер и Чапин направили прву соларну ћелију од монокристалног силицијума.

Почев од лансирања првог сателита 1958. године соларне ћелије представљају незаменљив извор електричне енергије на сателитима, свемирским бродовима и станицама. У земаљским условима, од самог почетка развоја, соларне ћелије су нашле примену на усамљеним објектима, светионцима, аеродромима, истраживачким платформама на мору, стамбеним и индустријским објектима, итд [8].

3.1 Соларна ћелија

За директно претварање соларног зрачења у електричну енергију користе се соларне ћелије. Соларна ћелија се састоји од р и п полупроводника, код кога се услед апсорпције Сунчевог зрачења у р–п споју јављају парови електрон-шупљина. Уколико су парови формирани далеко од р–п споја, брзо се рекомбинују и не доприносе претварању Сунчевог зрачења у електричну енергију. Међутим, приликом апсорпције соларног зрачења унутар или у близини р–п споја (прелазна област), унутрашње електрично поље раздваја електроне и шупљине, тако да се електрони крећу према п страни, а шупљине према р страни.

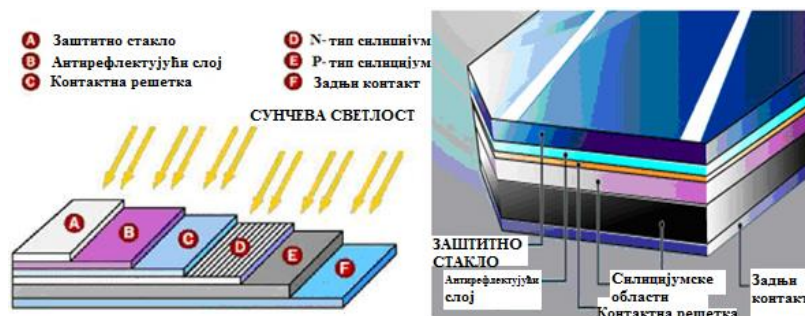
То доводи до смањења контактне разлике потенцијала р–п споја и до стварања напона на крајевима соларне ћелије. Принцип рада соларне ћелије који је претходно објашњен приказан је на слици 9.



Слика 9. Соларна ћелија – принцип рада

Поред дефинисаних р, п и р-п спојева класична соларна ћелија садржи још неколико слојева. Први слој је заштитно стакло тј. SiO_2 , које штити ћелију од спољашњих утицаја. Испод је антирефлектујући слој који смањује рефлексију светлости и обезбеђује да што више енергије доспе до полупроводника (повећава се ефикасност ћелије).

За формирање антирефлексног слоја се користи титанијум-диоксид или у последње време силицијум-титрит. Затим се налази систем транспарентних електрода. Тај систем контролише полупроводник са р-п спојем у коме се врши захватање фотона Сунчеве светлости. Са доње стране је метализација-задњи контакт.



Слика 10. Слојеви соларне ћелије (силицијумска)

Издвајање електричне струје, генерисане у полупроводнику, врши се помоћу металних електрода (контакта) на предњој и задњој страни соларне ћелије. Овај метални слој проводника даје највећи отпор преласку струје и у одређеној мери спречава продор светлости до целокупне предње стране ћелије. Овде се поставља проблем оптимума – што боља запоседнутост пријемне површине металном мрежом даје мање отпоре и боље одводи електрицитет, али истовремено смањује површину која може бити изложена светлости.

Губици у енергији услед условљености које постављају фундаментални закони физике, као и расположиве технологије производње соларних ћелија могу да износе и преко 80%, што значи да се само мање од 20% дозрачене енергије може трансформисати у електричну енергију на излазу.

Усавршавањем производних технологија могуће је неке од наведених губитака умањити, тако да теоријски максимални степен искоришћења силицијумских ћелија износи 22%. У лабораторијским условима достигнуте су вредности ефикасности до 33,4%, мада фото ћелије из масовне производње достижу максималну ефикасност од 18% [2].

3.2 Технологија фотонапонских ћелија

Фотонапонске ћелије могу бити израђене од различитих типова полупроводничких материјала, који могу бити сложени у различите структуре са циљем постизања што боље ефикасности трансформације енергије сунчевог зрачења у електричну енергију. За израду фотонапонских ћелија користе се следећи полупроводнички материјали и технологије:

- силицијум (Si) – укључујући монокристални силицијум, поликристални силицијум и аморфни силицијум,
- монокристални танкослојни материјали,
- поликристални танкослојни материјали,
- вишеслојне структуре материјала – комбинације разних полупроводничких материјала.

Што се тиче технологија у зависности од израде може се истаћи још једна подела, и то [2]:

1. Фотонапонске ћелије прве генерације – силицијумске ФН ћелије од монокристалног или поликристалног силицијума

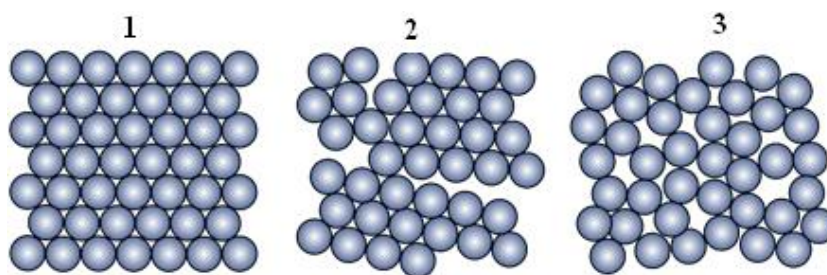
2. Фотонапонске ћелије друге генерације – представља технологију наношења полупроводника у танком филму на одређену подлогу (аморфни силицијум, кадмијум телурид, галијум – арсенид, итд)

3. Фотонапонске ћелије треће генерације – представља ФН ћелије на другачијем принципу фото-електро-хемијског ефекта, који подразумева коришћење полимера, органских ФН ћелија и нанокристала

4. Фотонапонске ћелије четврте генерације – представља комбинацију полимера и наночестица у структурама које могу апсорбовати и трансформисати различите делове електромагнетног спектра.

3.2.1 Фотонапонске ћелије од силицијума

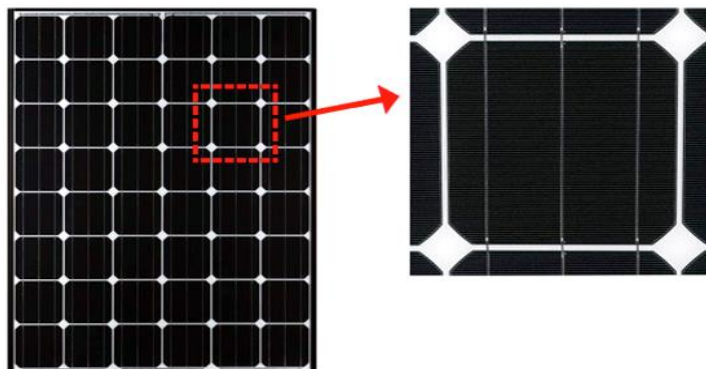
Силицијум је после кисеоника најзаступљенији елемент у земљиној кори, лако се добија и прерађује, није токсичан и не гради једињења која су штетна по околину. У погледу структуре може бити аморфан, поликристалан и монокристалан. У савременој индустрији представља главни полупроводнички елемент и електронске компоненте од силицијума су стабилне на температурама до 200 °C [9].



Слика 11. Структура силицијума: 1) монокристални, 2) поликристални, 3) аморфни

3.2.1.1 Монокристални силицијум

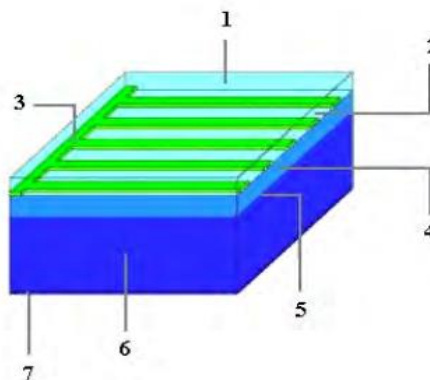
Фотонапонске ћелије израђене од монокристалног силицијума имају тзв. једнолику структуру, што значи да се састоје од истог материјала који је модификован тако да је на једној страни ћелије р-слој, а на другој п-слој Si полупроводника. Унутар ћелије, р-п спој је лоциран тако да се максимум Сунчевог зрачења апсорбује близу споја. Напон таквих ћелија је од 0,55 до 0,70 V [2]. Теоријска ефикасност им је око 22%, док је стварна ефикасност око 15% [10]. Једина мана ћелија израђених од монокристалног силицијума је висока производна цена, због компликованог процеса производње.



Слика 12. Монокристални силицијум [11]

Поступак израде соларне ћелије од монокристалног силицијума састоји се у припреми плочице од монокристалног силицијума, допирању плочице, припреми задње стране плочице, метализацији контакта и наношењу антирефлексионог слоја.

Соларне ћелије од монокристалног силицијума састоје се од полупроводника р типа, дебљине око 300 μm , р-п споја и полупроводника п типа, дебљине око 0,2 μm , металних контакта (електрода) и антирефлексионог слоја [2].



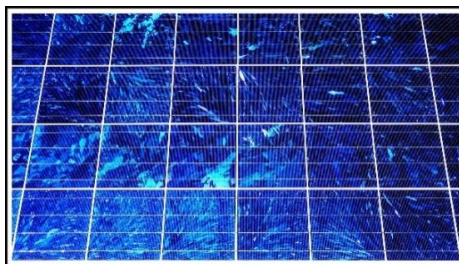
Слика 13. Шематски приказ пресека монокристалне силицијумске ћелије:
1) стакло, 2) антирфлексни слој, 3) предња електрода, 4) п слој, 5) р-п слој, 6) р слој, 7) задња електрода

Антирефлексиони слој се користи за смањење рефлексије и брзине површинске рекомбинације наелектрисања. Због високог индекса преламања силицијума, рефлексија Сунчевог зрачења са соларне ћелије од монокристалног силицијума износи 30 – 60%. За антирефлексиони слој могу се користити материјали са индексом преламања од 1,5 до 2 [12].

У такве материјале спадају: SiO , SiO_2 , TiO , TiO_2 , Ta_2O_3 , итд [12]. У зависности од материјала од кога је направљен антирефлексиони слој могу се произвести соларне ћелије од монокристалног силицијума у различитим бојама.

3.2.1.2 Поликристални силицијум

Идентично ћелијама од монокристалног силицијума, ФН ћелије израђене од поликристалног силицијума имају тзв. једнолику структуру. Супротно монокристалном силицијуму, поликристални силицијум сачињен је од више малих кристала, због чега долази до појаве граница. Границе се супростављају току електрона, те их подстичу на рекомбинацију са шупљинама, што резултује смањењем излазне снаге таквих ћелија.



Слика 14. Соларни модули од поликристалног силицијума [13]

Поступак добијања поликристалне Si ФН ћелије идентичан је поступку код монокристалних ћелија. Исто тако, пресек ћелије идентичан је пресеку монокристалне силицијумске ћелије. Једина разлика је у облику поликристалних ћелија, које су четвртасте тако да се могу боље сложити у ФН модуле. Процес производње ћелија од поликристалног силицијума је знатно јефтинији од процеса производње монокристалних ћелија, али поликристалне ФН ћелије имају мању ефикасност од монокристалних ћелија. Теоријска ефикасност им је око 18 %, стварна ефикасност им је између 10 и 13 % [2].

3.2.1.3 Аморфни силицијум

Атоми унутар аморфних материјала нису сложени у неку правилну структуру, односно не формирају кристалну структуру. Такође, аморфни материјали садрже велики број структурних дефеката те лошу повезаност атома, што значи да атоми немају суседа са којим би се могли повезати. Због наведеног разлога електрони ће се рекомбиновати са шупљинама уместо да формирају струјни круг. Будући да дефекти лимитирају ток електричне струје, овакве врсте материјала су иначе неприхватљиве у електронским уређајима. Дефекти се могу делимично уклонити ако се у аморфни силицијум убаци мала количина водоника. Последица таквог третирања аморфног силицијума је комбинација атома водоника са атомима аморфног силицијума који немају суседа (нису везани) тако да електрони могу несметано путовати кроз материјал.

Аморфни силицијум упија сунчево зрачење 40 пута ефикасније у односу на монокристални силицијум, тако да слој дебљине 1 μm може упити око 90 % енергије Сунчевог зрачења. Управо то својство аморфног силицијума би могло умањити цену ФН технологије [2].



Слика 15. Соларни панел од аморфног силицијума

Остале предности аморфног силицијума такође су економског карактера, тако на пример аморфни силицијум је могуће произвести на ниским температурама те може бити положен на јефтине подлоге (пластика, стакло, метал и сл.) што га чини идеалним за интеграцију ФН технологије као саставног дела објеката. Највећи недостатак фотонапонских ћелија израђених од аморфног силицијума је нестабилност. Због деловања Стаблер-Вронског ефекта излазна снага a-Si ћелија се након првог излагања сунчевој светлости смањује кроз одређени временски период. Деловање ефекта резултује губицима излазне снаге од 10 до 30 % док се ћелија не стабилизује [14]. Треба напоменути да ћелије по подели спадају у тзв. танкослојне материјале. Теоријска ефикасност аморфних ћелија је око 11,5 %, стварна ефикасност је око 7 % (и мање)[2].

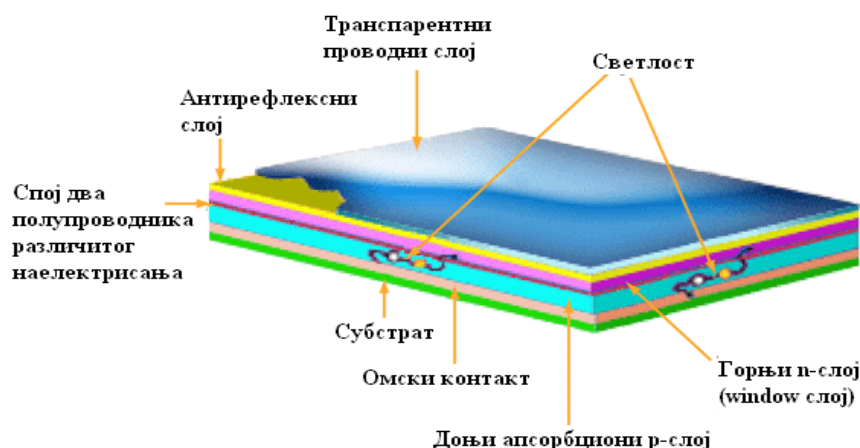
3.3 Поликристалне танкослојне ФН ћелије

Термин „танкослојни“, тачније „танки филм“ односи се на технологију полагања филма, а не на дебљину филма (слоја), пошто се танкослојне ФН ћелије полажу у изразито танким, узастопним слојевима атома, молекула или јона.

ФН ћелије израђене технологијом танког филма имају пуно предности у односу на ћелије израђене класичним методама[12,15]:

- при изради танкослојних ћелија користи се пуно мање материјала пошто дебљина таквих ћелија варира од 1 до 10 μm , док су класичне Si ћелије дебљине од 100 до 300 μm ,
- танкослојне ћелије производе се аутоматизованим, непрекидним процесима и могу се полагати на јефтине подлоге (стакло, нерђајући челик, пластика и сл.),
- због флексибилности производне технологије полагања слојева танког филма, ћелија стандардних димензија (125 mm x 125 mm) и модул сачињен као једна велика ћелија (75 cm x 150 cm) могу се произвести истом апаратуром,
- ћелијама израђеним технологијом танког филма није потребна метална мрежа за горњи контакт (као код класичних силицијумских ћелија), већ користе танки слој транспарентног проводљивог оксида,
- слојеви танког филма полажу се на одабрану подлогу укључујући антирефлексни слој и транспарентни проводљиви слој оксида, чиме се скраћује процес производње.

Поликристалне танкослојне ћелије производе се од малих кристалних зрна полупроводничких материјала. Материјали који се користе за израду поликристалних танкослојних ћелија имају другачија својства него силицијумски полупроводнички материјали. Стога се за стварање електричног поља унутар ћелије користе два различита полупроводничка материјала, а таква структура ћелија назива се мешовита структура.



Слика 16. Поликристална танкослојна ФН ћелија [16]

Типична поликристална ћелија израђена технологијом танког филма има јако танак (мањи од 0,1 μm) горњи слој p-типа који се назива „window“ слој (у дословном преводу слој који делује као прозор). Улога горњег слоја је фокусирање Сунчевог зрачења и то само високоенергетског дела спектра. Он мора бити јако танак, а мора имати довољно широк енергетски процеп (2,8 eV или више) како би пропустио што већу количину енергије сунчевог зрачења доњем (апсорбујућем) слоју. Доњи слој већином је допиран

p-типом полупроводника, а обично се налази испод „window“ слоја. Полупроводнички материјал p-типа мора бити високо апсорбујућег карактера и притом имати прикладан енергетски процеп како би се добиле веће вредности напона ћелије. Ипак, доњи p-слој је јако танак, дебљине од 1 до 2 μm .

3.4 Монокристалне танкослојне ФН ћелије и вишеслојна структура ФН ћелија

Монокристалне танкослојне ФН ћелије већином су израђене од Галијум-Арсенида. Галијум (Ga) је по хемијским особинама сличан алуминијуму. У природи, галијум се може наћи само у ограниченим количинама, углавном у смеси са алуминијумовим, цинковим или германијумовим рудама. Галијумови минерали су врло ретки па се због тога он добија искључиво као споредни производ у производњи алуминијума или цинка. Арсен (As) није редак хемијски елемент, али је токсичан. Осим што се користи у ФН технологији, Ga-As се користи код LED диода, ласера и осталих сличних електронских компоненти које користе светлост. Ћелије сачињене од Галијум-Арсенида углавном имају вишеслојну структуру.

Вишеслојном структуром ФН ћелије постиже се висока ефикасност трансформације будући да се обухвата већи део соларног спектра. У типичној вишеслојној структури, ћелије са различитим енергетским процепима су поређане једна изнад друге на такав начин да сунчева светлост прво пада на материјал са највећим енергетским процепом. Фотони који нису апсорбовани у првој ћелији се преносе на другу ћелију која упија високо-енергетски део преосталог Сунчевог зрачења за време чега остаје транспарентна за ниско-енергетске фотоне. Овакав селективни процес апсорбовања се наставља до задње ћелије која има најмањи енергетски процеп. При „слагању“ вишеслојне структуре ћелије се могу спајати механичким путем или се приликом производње полажу у слојевима и на крају спајају у каскадну структуру.

Већина истраживања каскадних структура фокусира се на ћелијама од Галијум-Арсенида као једном (или свим) од компоненти такве структуре. Теоријска ефикасност таквих ћелија била би изнад 35 %, али искључиво под деловањем фокусираног Сунчевог зрачења.

Дакле, полупроводнички материјал Галијум-Арсенид прикладан је код високо ефикасних ФН ћелија и ћелија које имају вишеслојну структуру и то због следећих разлога [28]:

- Енергетски процеп од 1,43 eV је готово идеалан за високо-ефикасне ФН ћелије,
- Због изразито високог својства апсорпције, ФН ћелије израђене од Ga-As дебљине су неколико микрометара у односу на Si ћелије које су дебљине 100 μm и више,
- За разлику од Si ћелија, Ga-As ФН ћелије су релативно неосетљиве на температуру, па радне температуре Ga-As ћелија могу бити изразито високе (концетраторски системи),
- Легуре Ga-As са алуминијумом, фосфором, антимоном или индијумом задржавају својства Ga-As што омогућава флексибилност при дизајну таквих ћелија,

- Ga-As је изразито отпоран на оштећења изазвана Сунчевим зрачењем, па је због тога, али и због изразито високе ефикасности идеалан за свемирске апликације.

Највећа мана Галијум-Арсенида је висока цена монокристалних Ga-As слојева. Због тога се Ga-As ћелије претежно користе у концентраторским системима, где је површина ћелије свега $0,25 \text{ cm}^2$. У концентраторским системима, због високо ефикасне трансформације цена Ga-As ФН ћелија је конкурентна класичним ФН ћелијама. Теоријска ефикасност таквих ћелија је 28%, док је стварна ефикасност 17% [2].



Слика 17. ФН ћелија Ga-As [2]

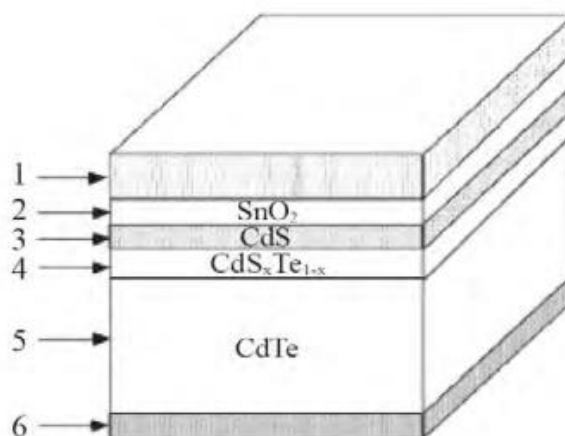
Најефикаснија структура (и најскупља) вишеслојне ФН ћелије направљена је управо од галијум-арсенида са примесама. У лабораторијским условима под концентрисаним Сунчевим зрачењем дала је ефикасност од 35% [2].

3.5 Соларне ћелије од кадмијум-телурита (CdTe)

Научници су дошли до открића да је кадмијум-телурит један од најидеалнијих материјала за инкорпорацију и развој танкослојних соларних ћелија због неколико његових карактеристика. Овај материјал има оптималну ширину провдне зоне од $\sim 1,5 \text{ eV}$ ($1,45 \text{ eV}$) што је оптимално за соларну конверзију. Поседује висок коефицијент апсорпције сунчевог зрачења. Због своје толеранције да се не деформише и не ствара неправилне границе, могући су јефтини процеси електро-таложења и сито-штампе. [17]

Напредовањем технологије танког филма може се остварити већа конверзијска ефикасност и ниже производне фабричке цене. Скорашња истраживања су показала да постоје различите технике за таложење CdTe што нуди доста флексибилности приликом масовне производње и линијског процеса са великом брзином таложења. Велика брзина таложења дозвољава управљање већим количинама соларних ћелија што доводи до бољег развојног плана, који је више усклађен за велике соларне изворе.

CdTe соларне ћелије састоје се од стакла, транспарентне SnO_2 електроде, n слоја (CdS), p-n споја ($\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$), p слоја (CdTe) и металне електроде [17]. Шематски приказ попречног пресека CdTe соларне ћелије дат је на слици 18.



Слика 18. CdTe соларна ћелија: 1) стакло, 2) транспарентна SnO_2 електрода, 3) n слој, 4) p-n слој, 5) p слој, 6) метална електрода

CdTe соларне ћелије су осетљиве у области таласних дужина од 0,3 до 0,95 μm , а максимум њихове осетљивости налази се на таласним дужинама између 0,7 – 0,8 μm . Лабораторијске CdTe соларне ћелије имају ефикасност око 16%, док комерцијалне соларне ћелије имају ефикасност око 8% [18].

3.5.1 Главни технички проблеми у коришћењу CdTe соларних ћелија

Неки од најкритичнијих проблема CdTe соларних ћелија се морају решити пре масовне производње. За економичну производњу ових соларних ћелија морају се решити следећи критични проблеми [15]:

- Прављење спојева без дефекта,
- Кристализација филма са високим квалитетом,
- Положај и формирање задњих контакта са минималним отпором.

Важно је напоменути да је производња различитих слојева CdTe соларних ћелија комплекснија у односу на конвенционалан p-n спој, зато што захтева мешање CdS и CdTe слојева на истој оптималној температури без деградације квалитета слојева. Мешање ова два слоја ствара гранични слој уместо непрекидне различите слојне структуре. Као што је раније напоменуто, дизајн ових соларних ћелија дозвољава производњу соларних уређаја са великим површинама, што доводи до производње соларних ћелија са високом добити а ниском ценом производње.

Пошто су и Cd и Te токсични материјали, који захтевају посебно руковање у току производње и фазе тестирања. Једињење CdTe је само по себи стабилно и безопасно, што потврђују бројна истраживања[15].

Сваки енергетски извор или продукт може директно или индиректно утицати на загађење животне средине, али оне од стране CdTe не представљају велики проблем. Приликом истраживања се дошло до следећих закључка [15]:

- CdTe се производи као нус продукт цинка и може бити искоришћен или одложен у природу где представља извор загађења
- CdTe у соларним ћелијама је безбеднији од његових других примена
- CdTe у соларним ћелијама искоришћава Cd 2500 пута ефикасније него у Ni–Cd батеријама
- У току рада соларних ћелија нема емисије
- Ризик од пожара је минималан

3.6 Фотонапонски системи новијих генерација

Подстакнути растом становништва, глобалном потрошњом енергије и брзом индустријализацијом у земљама у развоју, научници су присиљени да траже нове и унапређују старе начине за ефикасну и економичну производњу електричне енергије са што мањим утицајем на околину. Дакле, пошто је Сунце највећи извор енергије на планети Земљи научници константно унапређују постојеће и развијају нове врсте соларних ћелија.

Пред новим генерацијама соларних ћелија се поставља низ захтева, и то:

- висока конверзијска ефикасност
- побољшана поузданост
- ниске цене процеса производње
- ниске цене уградње
- ниске емисије у процесу производње и коришћења
- дуг век трајања
- могућност једноставне имплементације у архитектури градње

У новије генерације соларних ћелија спадају:

- Органске ФН ћелије
- ФН ћелије са фотоосетљивим пигментима
- ФН ћелије израђене нанотехнологијом (квантне тачке и наноцеви)

3.6.1 Органске фотонапонске ћелије

Органске соларне ћелије су релативно нова технологија, која има потенцијал да постане водећа технологија са знатно мањим ценама (у односу на друге технологије добијања соларних ћелија) и стога да омогући бржи повратак инвестиција. Ова технологија би се заснивала и на потпуно безбедним материјалима, што се тиче човека и животне средине, којих на планети има у неограниченим количинама.

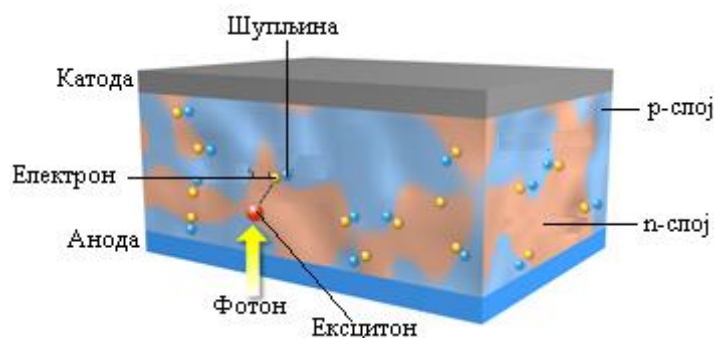
Органске ћелије су такође познате као и пластичне ћелије. Оне су лаганије, флексибилније, полу-транспарентне и више еколошке од свих других типова ћелија. Такве карактеристике отварају могућности за низ нових апликација, посебно у архитектури, где ове ћелије могу бити интегрисане у сам дизајн зграда. Друге области које нуде потенцијал за ову технологију обухватају производњу аутомобилских делова и потрошачких добара.



Слика 19. Органска соларна ћелија [19]

Органске и полимерне соларне ћелије су израђене од танких филмова (100 до 500 nm) органских полупроводника, попут полифенилен винилена и спојева малих молекула попут бакар фталоцијанина (плави или зелени органски пигмент), и фулерена и деривата фулерена. Ефикасности претварања енергије употребом проводних полимера достигнуте до данас су ниске у поређењу са неорганским материјалима. Знатна побољшања су остварена у задњих неколико година и највиша потврђена ефикасност је 6.77% [17]. Ове ћелије би такође могле бити корисне у применама где су битни механичка флексибилност и могућност нешкодљивог уклањања.

Ове ћелије се разликују од ћелија начињених од неорганских полупроводника по томе што се не ослањају на велико уграђено електрично поље р-п споја за раздвајање електрона и шупљина створених при апсорпцији фотона. Активно подручје органске ћелије састоји се од два материјала, једног који делује као дозор електрона, а други као прималац. Када се енергија фотона претвори у пар електрон-шупљина (ексцитон) у ФН ћелији, типично у дозорском материјалу, набоји теже да остану везани у облику ексцитона и раздвајају се када ексцитон дифузује на спој дозор-прималац [19].



Слика 20. Органска соларна ћелија – органски р-п слој [19]

Кратке дифузијске даљине ексцитона већине полимерних система ограничавају ефикасност таквих уређаја. То значи да органске соларне ћелије имају лимитиран и прилично узак апсорпциони спектар соларног зрачења. Треба узети у обзир да је још увек немогуће апсорбовати читав Сунчев спектар користећи један пар дозор-примаоц

који формирају органску ћелију. Ово и представља једну препреку њиховом масовнијем коришћењу.

Да би проширили апсорпциони спектар соларног зрачења органских ћелија, морају бити произведени материјали са широким апсорпционим пољем, или материјали са ужим апсорпционим пољем у више слојева. Када се два (или више) донорска материјала, чији се апсорпциони спектри не преклапају, користе у више слојева могуће је проширити апсорпциони спектар на цео видљив спектар и део инфрацрвеног спектра [17].

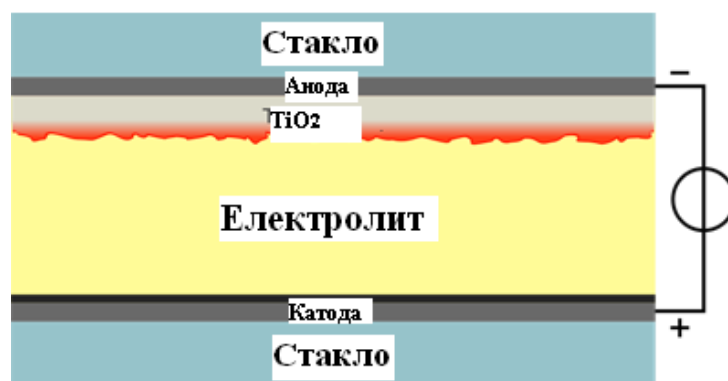
Још један од главних проблема код органских соларних ћелија јесте стабилност органског материјала. Разградња система се одвија на различите начине, проистиче углавном од промене морфологије и губитка интерфејсне адхезије, затим интердифузије компоненти, а може бити и хемијско разлагање. Пажљивим пројектовањем и добрим инжењерингом материјала може се знатно побољшати животни век уређаја.

3.6.2 Фотонапонске ћелије са фотоосетљивим пигментима

Соларне ћелије са фотоосетљивим пигментом (DSSC - *Dye-sensitized-solar-cell*) су релативно нова група танкослојних соларних ћелија. Први пут су их направили М. Гретцел и Брајан Орегон 1991. године. DSSC је тип фотосензитивне пигментне ћелије код које је силицијум замењен са полупроводљивим титанијум оксидом, којег има више, јефтинији је и мање токсичан, што додатно побољшава зелене акредитиве соларне енергије. Ефикасност ових технологија је од 5 до 10%, а технологија има велики потенцијал у прекривању стакала која ће производити електричну енергију [17].

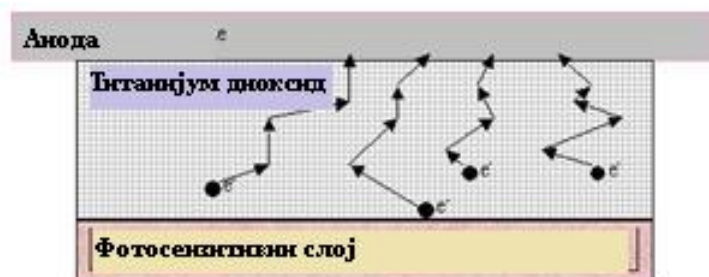
Ћелије с фотоосетљивим пигментима су направљене од јефтиних материјала. Умногome се очекује да ће бити знатно јефтиније од старијих дизајна ћелија у техници чврстог стања. Ове соларне ћелије се могу израдити као савитљиви листови, и премда им је ефикасност претварања мања од најбољих ћелија од танког филма, однос перформанса/цена би требао бити довољно висок да им омогући такмичење са производњом електричне енергије из фосилних горива.

Типично се користи металоргански пигмент рутенијума као монослој материјала осетљивог на светлост. Ћелије с фотоосетљивим пигментима зависе од порозног слоја наночестичног титан диоксида који знатно повећава апсорпциону површину материјала. На слици 21 је приказан изглед овакве соларне ћелије.



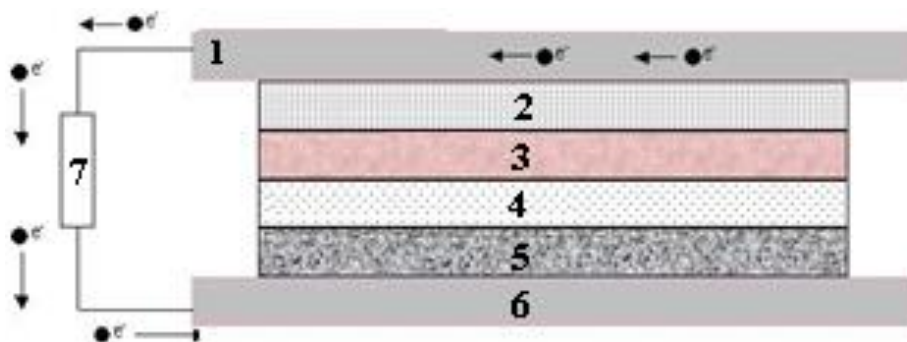
Слика 21. Фотосензитивна соларна ћелија [20]

Фотогенерисани електрони из "фотоосетљивог пигмента" се предају TiO_2 n-типа, а шупљине апсорбује електролит на другој страни пигмента. Електрони пролазе кроз наночестице титанијум диоксида ка кондуктивном слоју (аноде), а захваљујући танком слоју од неколико микрона узбуђени електрони не прелазе дуг пут до аноде [21].



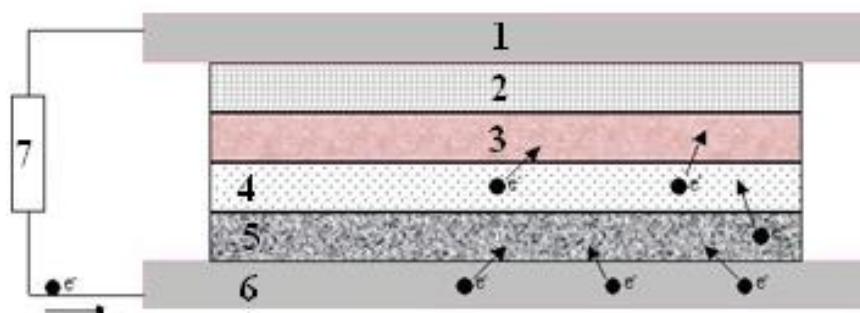
Слика 22. Кретња побуђених електрона [21]

Када фото електрони дођу до аноде, они мигрирају кроз електрично коло где се конвертују у електричну енергију погодну за потрошача [21].



Слика 23. Кретња електрона кроз електрично коло: 1) Анода, 3) Фотосензитивни слој, 4) Електролит, 5) Графит, 6) Катода, 7) Електрични потрошач [21]

Фотосензитивни слој је одао електроне и сада се налази у стању дефицита електрона чиме је нарушена његова структура, а самим тим и функција одавања електрона. Да би се успоставила равнотежа електрона уз фотоосетљиви слој се налази електролит чија је улога обнављање одатих електрона у фотоосетљивом слоју. Са друге стране електролит преузима електроне са стране кондуктивне плоче на дну ћелије (катоде), чиме се и затвара круг пута електрона. Овај процес се непрестано понавља што значи да електролит има улогу катализатора који се не троши у процесу реакције [21].



Слика 24. Обнављање електрона: 1) Анода, 3) Фотосензитивни слој, 4) Електролит, 5) Графит, 6) Катода, 7) Електрични потрошач [21]

Овај тип ћелије омогућава флексибилнију употребу материјала и типично се производи штампањем на филм и/или употребом ултразвучних млазница, с потенцијалом ниже цене обраде него оне код масивних соларних ћелија [17]. Међутим, пигменти у овим ћелијама су подложни деградацији под утицајем топлоте и UV зрачења, а кућиште ћелија је тешко запечатити због растварача коришћених у уређају. Упркос томе, ово је популарна технологија у помолу, са предвиђањима комерцијалног утицаја током ове деценије.

3.6.3 Нанотехнологија у изради фотонапонских ћелија

Научна истраживања су показала да је могуће применити нанотехнологију у области искоришћења соларне енергије, у самом дизајну фотонапонских соларних ћелија. Производња оваквих ћелија се заснива на технологији нанокристала, наножица, и квантних тачака. Супериорне оптичке, електричне и хемијске особине наноматеријала у односу на друге материјале дају могућност производње соларних ћелија веома високе ефикасности.

Предности коришћења овог типа соларних ћелија:

1. Мања цена производње због коришћења нижих температура у односу на високе температуре код других кристалних соларних ћелија.
2. Производња флексибилних ролни уместо ригидних соларних панела.
3. Тренутно доступне ћелије са нанотехнологијом нису тако ефикасне, али су зато нижом ценом приступачније. Развојом технологије очекује се велико повећање ефикасности у односу на конвенционалне соларне ћелије.

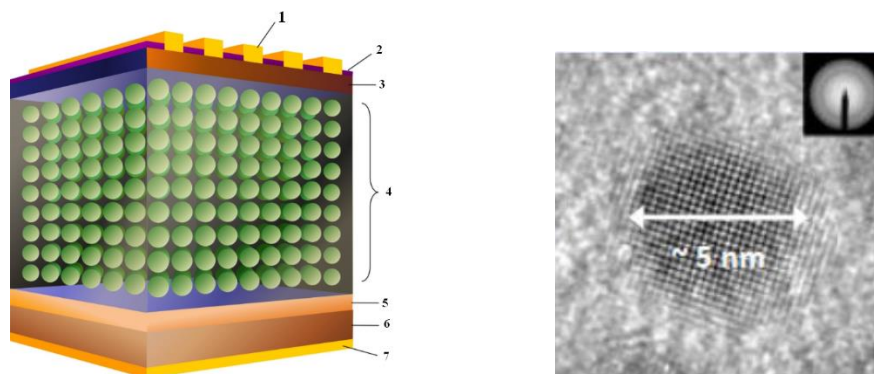
3.6.3.1 ФН ћелије са квантним тачкама

Квантне тачке (QDs - Quantum-Dots) су нанометарски кристални полупроводници који могу да се производе користећи више метода. Главна предност QDs је променљива потребна енергија за превазилажење енергетског процепа, тј. могућност подешавања процепа променом величине квантних тачака.

Дакле, нови материјали и структуре за производњу ФН ћелија морају имати ову способност подешавања, јер би подешавањем процепа за различите спектре светлости дошло и до повећања ефикасности конверзије електричне енергије.

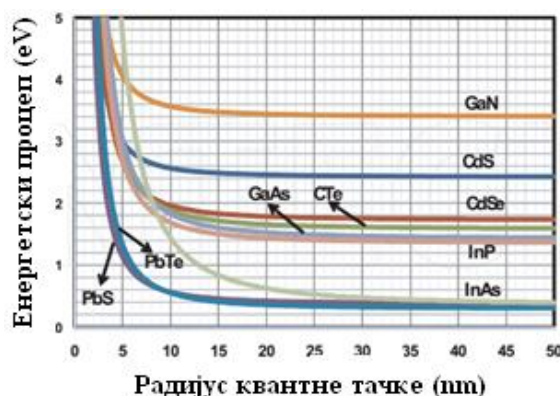
У већини материјала баријера је фиксна и зависи искључиво од избора материјала, што значи да сваки материјал има своју баријеру. Ова карактеристика квантних тачака је веома добра за производњу мулти-слојевитих ФН ћелија. Коришћењем доста различитих материјала за сваки слој могуће је повећати ефикасност апсорпције фотона, чиме се повећава и апсорпциони спектар ФН ћелије. Такође, квантне тачке могу бити обрађиване на такав начин да се стварају слојеви на јефтиним материјалима попут пластике, стакла и металних подлога. Могу се и комбиновати са органским и фото-осетљивим ФН ћелијама [22].

Нова истраживања су показала да квантне тачке могу емитовати три електрона по фотону због стварања мулти ексцитона (MEG- multiple exciton generation), док силицијумски могу само један електрон по фотону. Теоријски, ово откриће води до тога да се њихова ефикасност са 20% посто може подићи чак до 65% [15].

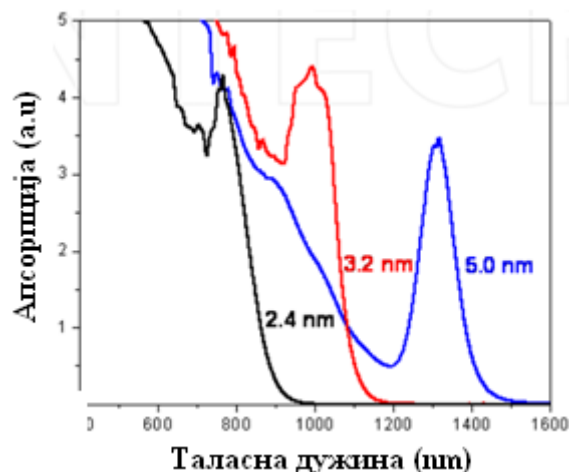


Слика 25. Изглед ФН ћелије са квантним тачкама: 1) Анода, 2) Анти рефлектујући слој, 3) р-слој, 4) Квантне тачке (десно), 5) н-слој, 6) Супстрат, 7) Катода [22,23]

Квантне тачке су реда величине неколико нанометра (3-50nm) састављених од материјала групе II-VI, III-V или IV-VI који имају способност заробљавања електрона (квантни затвор). Захваљујући овом феномену квантне механике, повећањем квантних тачка долази до смањења баријере и повећања апсорпционог спектра (највише у инфрацрвеном спектру). Супротно томе, када се тачке смањују баријера се повећава. На слици 26 и 27 је приказан апсорпциони спектар као и вредност енергетског процепа у зависности од величине квантних тачака [22].



Слика 26. Однос радијуса квантне тачке и енергетског процепа [22]



Слика 27. Апсорпциони спектар за различите величине квантне тачке [22]

3.6.3.2 Фотонапонске ћелије са наноцевима

Наноцеви су металне или полупроводничке честице које имају велики однос пропорција, где је дужина наноцеви реда μm , а попречни пресек реда nm . Наноцеви имају низак ниво рефлексије и добру апсорпцију Сунчевог спектра, што их чини веома пожељним у области соларне технологије.

Када се поставе у одређеном положају и низу у соларним ћелијама, омогућавају убрзан транспорт ексцитованих електрона и смањење губитка енергије електрона. Поред силикона, за израду наноцеви се користе и различити оксиди метала као што су: TiO_2 , ZnO , Fe_2O_3 , ZrO_2 , Nb_2O_5 , Al_2O_3 и CeO_2 . Од претходно напоменутих оксида метала, студије су показале да су титанујм-оксид TiO_2 и цинк-оксид ZnO за сада најбољи материјали за израду соларних ћелија са наноцевима [24].

Силиконске наноцеви

Истраживачи на Технолошком институту у Масачусетсу открили су да би силиконске наноцеви могле имати неке предности у односу на технологију танкослојних соларних ћелија.

На основу нумеричких симулација, научници верују да низ нанорода у неким конфигурацијама имају много нижу рефлексију у поређењу са танким филмом, што значи да се користи више дозрачене светлости. Самим тим се и више дозрачене енергије конвертује у већу количину корисне електричне енергије, што значи да је ефикасност ових соларних ћелија већа.

Типична дужина кристалних силиконских наноцеви варира од 1,2 до 4,7 μm , док се радијус креће између 50 и 80 nm . Наноцеви се постављају у низове у квадратној решетки од 100 nm , чији енергетски процеп варира од 1,1 до 4 eV [15]. Важно је напоменути да наноцеви имају ниске апсорпционе способности при нижим енергијама фотона у поређењу са силиконским танким филмом.

Међутим, када се фреквенција дозрачене енергије повећа, оптичка апсорпција наноцеви нагло порасте и превазилази ниво апсорпције танких филмова на 2,5 eV. С обзиром да су силицијумске наноцеви веома мале рефлексије, антирефлексни слој можда неће бити потребан, чиме се постиже јефтинија и мање сложена израда. Највећа слабост технологије силиконских наноцеви је у томе што има слабу апсорпцију на ниским нивоима енергије, која се може превладати техникама за ломљење светлости или употребом дужих кристалних силиконских наноцеви [15].

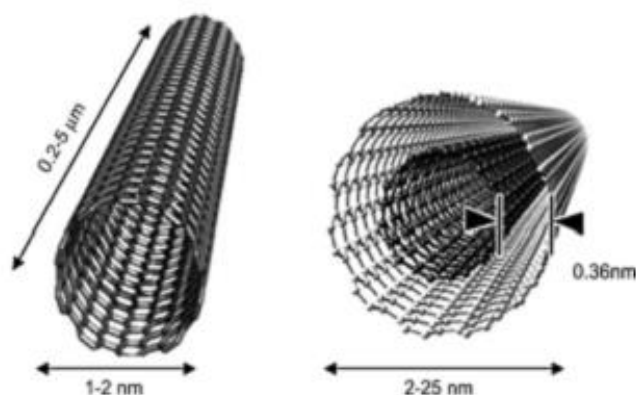
Угљеничне наноцеви (CNT-Carbon nanotubes)

Карбонске наноцеви (CNT) су израђене од хексагоналних угљеничних решетака које имају одлична механичка и електронска својства. Наноцеви могу бити од метала или полупроводничког материјала. Карбонске наноцеви дају највишу спектралну апсорпцију (нарочито по јединици масе) сунчевог спектра зрачења.

Карбонске наноцеви могу имати више форми, и то[25]:

- једнозидне карбонске наноцеви (Single-walled carbon nanotubes - SWCNTs),
- двозидне карбонске наноцеви (Double-walled carbon nanotubes - DWCNTs),
- вишезидне карбонске наноцеви (multi-walled carbon nanotubes - MWCNTs).

Једнозидне карбонске наноцеви се формирају мотањем једноатомског слоја графена у непрекорни цилиндар, док се двозидне и вишезидне карбонске наноцеви формирају концентричним мотањем два и више слојева једноатомског графена, респективно.



Слика 28. Једнозидне (лево) и двозидне (десно) карбонске наноцеви [25]

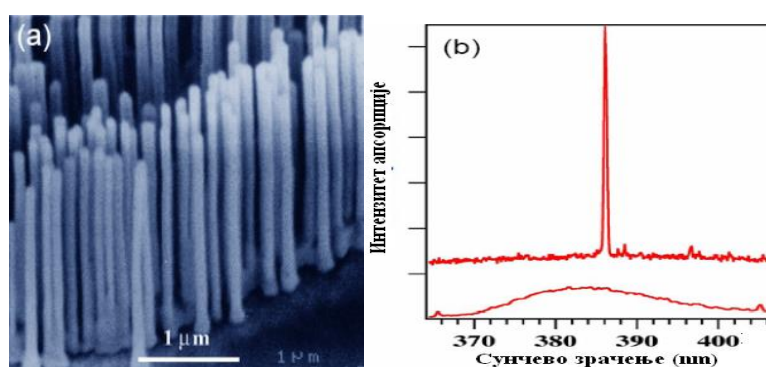
Карбонске наноцеви могу се користити као довољно ефикасни фото-осетљиви материјали. Када се наноцеви пресвуку специјалним слојем р и п типа полупроводника, формира се р-п спој и овакве наноцеви генеришу напон на својим крајевима под утицајем светлости, тј. генеришу електричну енергију. Оваквом методологијом повећава се и побољшава површина која производи електричну енергију.

Тренутно се ове наноцеви користе као транспарентне електроде за ефикасне и флексибилне полимерне соларне ћелије. Ефикасност ових соларних ћелија је још увек мала, од 3-4% те се још увек обављају бројна истраживања у циљу њеног повећања [25].

ФН ћелије са цинк-оксид нанопрови

Научници тврде да нанопрови цинк-оксида (ZnO) могу играти кључну улогу у дизајну и развоју фотонапонске ћелије и соларних уређаја. Ове ФН ћелије су најпогодније за мале електричне и електронске апарате као што су калкулатори, електронски сатови, извори сијаличног осветљења и други слични уређаји који захтевају малу количину електричне енергије. Тренутно, ефекти конверзије варирају од 5-8% што је релативно ниско у односу на остале ФН ћелије. Међутим, правилном селекцијом и варирањем димензија нанопрови у лабораторијским условима постигнута је максимална ефикасност од 12 %. Нанопрови су углавном пречника 1-2 μm , а њихова дужина може бити до 30 μm [26].

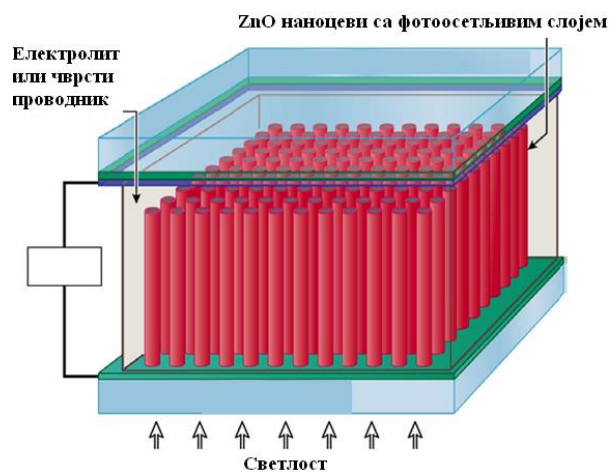
Могуће је побољшати ефикасност у одређеним спектрима соларног зрачења, поготово УВ зрачење код нанопрови на силицијумској основи (слика 29). Екстремно танка апсорпциона ЕТС (*Extremly-thin-absorber*) – ФН ћелија заснована на нанопрови, успешно је реализована коришћењем лако доступних технологија путем електрохемијских процеса [26]. Ово би могло знатно појевтинити израду оваквих ћелија, што би их учинило комерцијално приступачнијим.



Слика 29. Изглед нанопрови (лево) и апсорпција сунчевог зрачења на силицијумској основи [26]

Нанопрови од комбинације цинк-оксида ZnO и кадмијум-селенида CdSe имају велики ефекат апсорпције светлости од приближно 89% и ефективном рефлексијом од 8% (у соларном спектру од 400-800 nm). Ефикасност код ФН ћелија где се примењују ове нанопрови износи 8%, а коришћењем технологије мултислојева могуће је повећати ефикасност [27]. Још једна од апликација која је још увек у развоју је коришћење ZnO нанопрови код ФН ћелија са фотоосетљивим пигментом. Због ниске цене и високе ефикасности фотоосетљиве соларне ћелије су добар кандидат за обновљив извор енергије.

Приликом представљања оваквих ФН ћелија, представљен је и нови органски пигмент који је у њима коришћен. Уместо конвенционалног пигмента на бази рутенијума коришћен је редокс пар, који са наночевима ZnO има ефикасност од 5,3% [27].



Слика 30. ZnO наночевци код ФН ћелија са фотоосетљивим пигментом [27]

4. ЕФИКАСНОСТ ФОТОНАПОНСКЕ ЋЕЛИЈЕ

Ефикасност (степен корисног дејства) ФН ћелије представља однос искоришћене и укупне енергије Сунчевог зрачења која падне на ФН ћелију [2]:

$$\eta = \frac{I_m U_m}{G S} = \frac{F U_{ph} I_{ks}}{G S},$$

где је:

I_m, U_m – струја и напон у оптималној тачки,

G – интензитет сунчевог зрачења,

S – површина ФН ћелије,

U_{ph} – напон празног хода,

I_{ks} – струја кратког споја,

R_s – серијска отпорност.

$F = \frac{U_m I_m}{U_{ph} I_{ks}}$ - Овај однос је познат као фактор испуне или филаинг фактор ФН ћелије.

Да би ефикасност ФН ћелија била што већа потребно је да U_{ph} и I_{ks} буду што већи и да фактор испуне буде што ближи јединици. Типичне вредности наведених величина за кристалне силицијумске ФН ћелије су [12]:

$$F = 0,82; R_s = 0,96 \Omega; U_{ph} = 0,57 \text{ V}; \eta = 12\%$$

Табела 1. Ефикасност неколико комерцијално произведених ФН соларних ћелија [2].

МАТЕРИЈАЛ	ЕФИКАСНОСТ У ЛАБОРАТОРИЈСКИМ УСЛОВИМА [%]	ЕФИКАСНОСТ У ЕКСПЛОАТАЦИЈИ [%]
Монокристални Si	24	14-17
Поликристални Si	18	13-15
Аморфни Si	13	5-7
Кадмијум-Телурид CdTe	16	6-8
Бакар-индијум-диселенид CuInSe ₂	18	6-8

Ефекти који утичу на ефикасност соларне ћелије, пре него што се енергија сунчевог зрачења претвори у електричну енергију су [12]:

- Оптичка рефлексија са површине ћелије, овај губитак се може свести до нивоа од 3% уколико се пријемне површина ћелије специјално обради ради наношења антирефлексионог слоја.
- Утицај извесног броја фотона из сунчевог спектра, чија је енергија мања од енергетског процепа између валентне и кондукционе зоне. Такви фотони не стварају струјне носиоце и не доприносе струји ћелије. За силицијумске ћелије (Е процепа = 1,1 eV) њихов енергетски удео у сунчевом спектру износи око 23 %.
- Фотони чија је енергија већа од 1,1 eV, мада стварају парове електрон "шупљина", предају кристалу више енергије него што је потребно, због чега тај вишак представља губитак (око 33 %).

- Око 17 % енергије се губи зато што је достигнут напон на крајевима ћелије увек мањи од енергетског процепа. То значи, да се користи сва енергија која је предата електрону при његовом пребацивању из валентне у кондукциону зону.
- Један део фотона се губи пошто осетљиви део ћелије није довољне дебљине, што спречава апсорпцију свих до ње доспелих фотона. Овај изгубљени део фотона се губи тако што се апсорбује на задњем контакту или преласком кроз ћелију. Постављањем одговарајућег рефлективног задњег контакта, омогућава се враћање значајног дела ових фотона у р-п спој, па овакав губитак може смањити испод 1%.
- Око 5 % почетне енергије зрачења се губи из разлога што производ $U_m \cdot I_m$ никад не може да буде једнак површини испод криве $U \cdot I$ карактеристике (експоненцијална крива), услед дејства других ефеката који смањује тај фактор испуне. Овај фактор у најповољнијем случају може да достигне вредност од 0,8%.
- Око 4% енергије се губи услед чињенице да електрони и шупљине произведени зрачењем имају ограничен век, те не стижу до електрода (рекомбинују се).
- Око 1% снаге се губи на серијском отпору диоде.

Ефикасност соларних ћелија је један од најважних параметара у циљу успостављања ове технологије на тржишту. У току је обиман истраживачки рад за побољшање ефикасности соларних ћелија за комерцијалну употребу.

Постоји мноштво фактора који утичу на ефикасност ФН ћелије, а као главни и најутицајнији фактори се могу издвојити [28]:

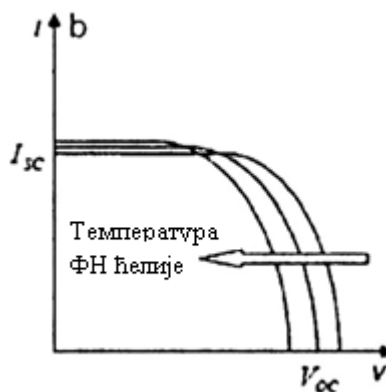
- 1) Температура соларне ћелије
- 2) Утицај запрљања (прашина, инсекти итд.)
- 3) Појава врућих тачака - "Hot Spot"
- 4) Соларно зрачење

Оно што је важно напоменути да се коефицијент ефикасности дефинише за стандардне тест услове (*Standard Test Conditions - STC*) и то су [29]:

1. Фотонапонски панел је чист, без прашине и других нечистоћа које су могуће у реалним условима.
2. Соларна ирадијација на површини панела је 1000 W/m^2 .
3. Температура ћелије је 25°C .
4. Коефицијент ваздушне масе је 1,5.

4.1 Утицај температуре на ефикасност ФН ћелије

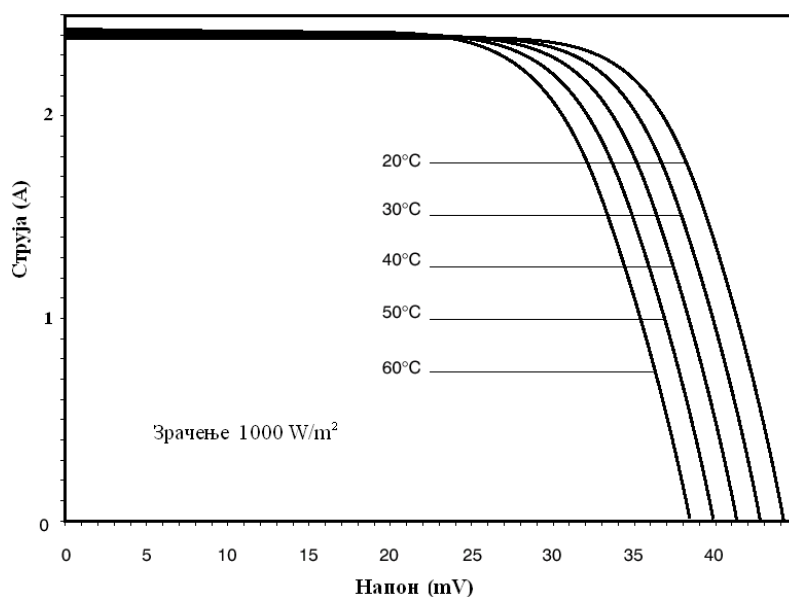
Приликом истраживања рада соларних ћелија у различитим условима дошло се до закључка да је температура један од критичних фактора који утиче на ФН конверзију и излазну снагу ФН ћелије, самим тим и на ефикасност конверзије. Порастом температуре ФН ћелије опада њена ефикасност, што значи да ФН ћелија мора имати хлађење, посебно у условима изложености високом Сунчевом зрачењу као што су концентрисано Сунчево зрачење, космички или тропски услови.



Слика 31. Утицај температуре на снагу ФН ћелије [2]

Приликом повећања температуре ФН ћелије долази до смањења енергетског процепа, што доводи до тога да напон отвореног кола опада. Услед повећања температуре због карактеристика ФН ћелије електрони лакше прелазе из валентне у кондукциону зону, што значи да се апсорбује више Сунчевог зрачења и генерише струја веће јачине. Повећање јачине струје је далеко мање у односу на пад напона, те у складу са тим опада излазна снага ФН ћелије [28].

На слици су приказане карактеристике моно-кристалне соларне ћелије при различитим температурама.



Слика 32. Утицај температуре на напон и јачину струје соларне ћелије од монокристалног силицијума [30]

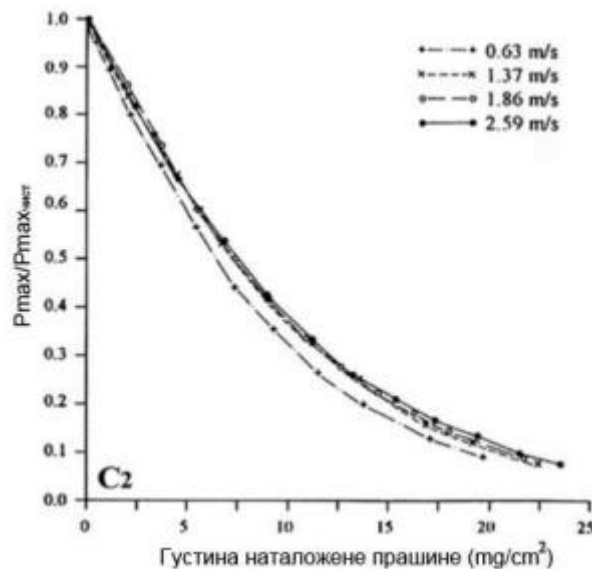
Типични силиконски соларни панели имају температурни коефицијент од -0,4 до -0,5 %, што значи да за сваки пораст од 1°C изнад 25 °C излазна снага опадне за тај проценат. При 45 °C силицијумски соларни панел снаге 40 W, са температурним коефицијентом од -0,4% производи нешто мало мање од 37 W снаге. Овај коефицијент дају произвођачи унутар спецификације соларног панела [31].

4.2 Утицај запрљања на ефикасност ФН ћелије

У реалним условима рада ФН модули су изложени спољним утицајима, тако да на површини модула може доћи до таложења прашине, песка или неке друге врсте нечистоћа које у одређеној мери или потпуно блокирају соларно зрачење. Талог који се акумулирао на површини ФН модула може знатно утицати на његову ефикасност.

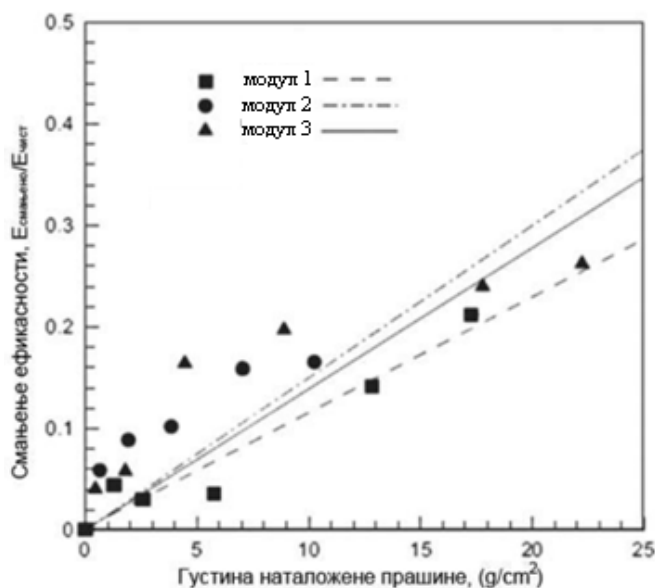
У циљу дефинисања утицаја запрљања површине ФН ћелије на ефикасност обављена су бројна истраживања. Обављена су и истраживања која су обухватила и утицај прашине у ваздуху на ефикасност ФН модула.

Експериментално је проучавана излазна снага ФН ћелија за различите густине прашине и брзине ветра, резултати су приказани на графику (слика 33) [28].



Слика 33. Утицај густине прашине на излазну снагу ФН ћелије [28]

Да би се утврдио утицај прашине и ветра на различите ФН модуле спроведен је експеримент у лабораторији, где се користио соларни симулатор и генератор прашине. Експеримент се вршио на три различита ФН модула и то на монокристалном, поликристалном и аморфном силицијуму. Утицај густине на смањење ефикасности је приказан на графику (слика 34).



Слика 34. Утицај густине прашине на смањење ефикасности ФН ћелије [28]

Дошло се до закључка да прашина у ваздуху смањује струју кратког кола и утиче на ефикасност ФН модула, ефикасност опада линеарно са порастом густине прашине. Резултати овог испитивања такође показују да загађење прашином има значајан утицај на излазну снагу ФН модула.

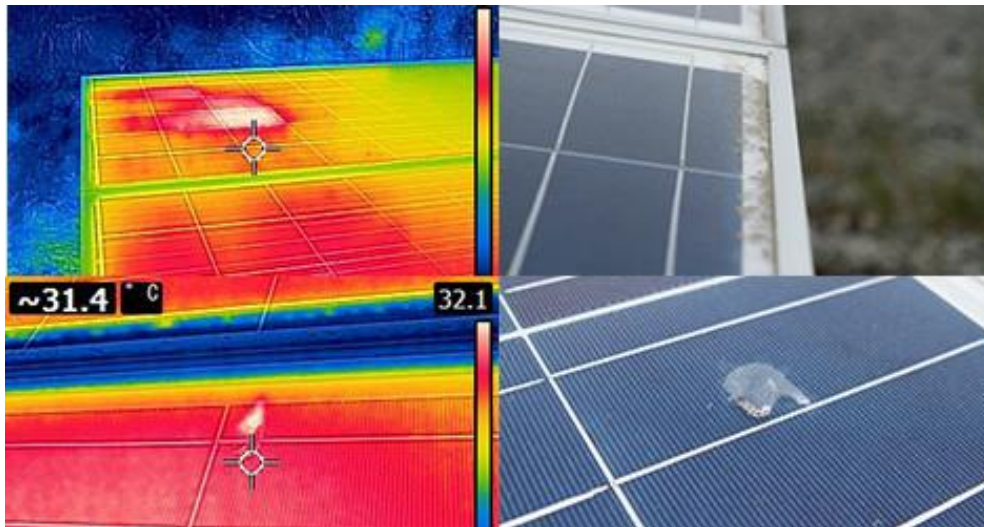
Талог прашине који се повећао од 0 до 22 g/m² има утицај на повећање редукције ефикасности до 26 % [28]. Редукција ефикасности ФН модула има линеаран однос са густином наталожене прашине, а разлика за другачије типове ФН модула није очигледна.

Узимајући у обзир да се у реалним условима физичка својства прашине разликују у зависности од места, спроведено је експериментално истраживање о утицају прашине на ефикасност.

Експеримент је спроведен у лабораторијским условима коришћењем соларног симулатора као извора светла и коришћењем неколико различитих састава прашине. У експерименту је употребљено пет типова прашине са различитим физичким својствима, од којих су три врсте кречњачког камена, цемент и угљеникове честице. Резултат експеримента је то да fine честице прашине имају већи утицај на перформансе ФН модула од крупнијих честица. Fine честице грађевинских материјала, као што је нпр. цемент и сл., које су присутне у урбаним срединама, значајно умањују ефикасност ФН модула, уколико дође до стварања наслага на површини ћелија.

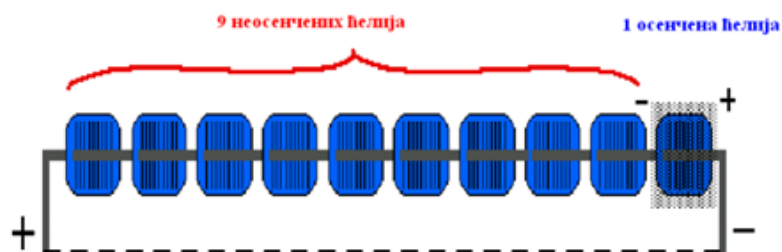
4.3 Утицај врућих тачака - Hot Spots

Вруће тачке (**Hot Spots**) су одређене, релативно мале површине, на соларним панелима на којима се јавља повишена температура. Овакве појаве су изузетно штетне по ефикасност и сам модул, јер могу довести до трајног оштећења. Повишена температура је последица расипања снаге унутар соларног модула, осенчена соларна ћелија се противи протоку струје и то место се загрева [32].



Слика 35. Изглед вруће тачке на соларном панелу [32]

У нормалним условима рада при Сунчевом зрачењу соларне ћелије, унутар соларног модула, производе електричну енергију. Када је део соларног модула осенчен услед неког разлога (прљавштина, угао упадања светлости, заклоњеност, итд.), због полупроводничких карактеристика, заклоњеној соларној ћелији расте температура. Струја произведена из других ћелија пролази кроз осенчену ћелију која се понаша као отпорник и сходно томе њена температура расте. Ове температуре могу бити јако високе, такође могу довести до топљења дела панела, а самим тим и до трајних оштећења.



Слика 36. Шематски приказ соларног модула и ефекта засенчености [33]

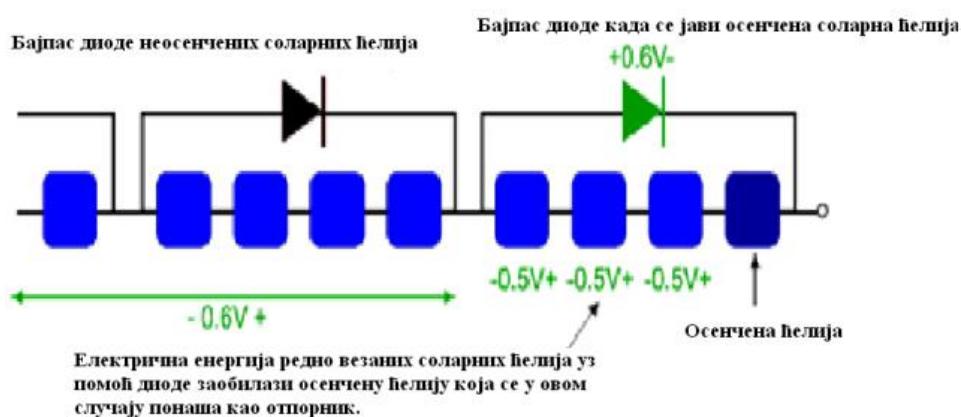
Вруће тачке се најчешће јављају у урбаним срединама, где су панели изложени већој количини прашине тј. већој шанси да дође до осенчења неке соларне ћелије. Узимајући у обзир да приликом рада соларни панели генеришу високе температуре, често се дешава да инсекти буду спржени на њиховим површинама, чиме се стварају погодни услови за појаву врућих тачака. Ова појава доводи до таквих оштећења материјала које некада могу да резултују и самим паљењем модула, пуцањем стакла и топљењем соларне ћелије.



Слика 37. Изглед оштећења услед вруће тачке

Узимајући у обзир основне законе физике, да струја увек иде линијом нижег отпора, дошло се до једноставног и ефикасног решења овог проблема применом премосне (Bypass) диоде [33]. Када је соларна ћелија осенчена ове премосне диоде преузимају улогу проводника унутар кола, струја не пролази кроз осенчену ћелију већ преко диоде иде ка излазу.

У пракси је, међутим, премосна диода једне ћелије прескупа варијанта, па се уместо тога праве премосне групе диода соларних ћелија. На неколико соларних ћелија иде по једна премосна диода. Напон затамњене или делимично затамњене соларне ћелије једнак је преднапону соларних ћелија које деле исте бајпас диоде као што је приказано на слици 38 [33].



Слика 38. Уградња премосне диоде [33]

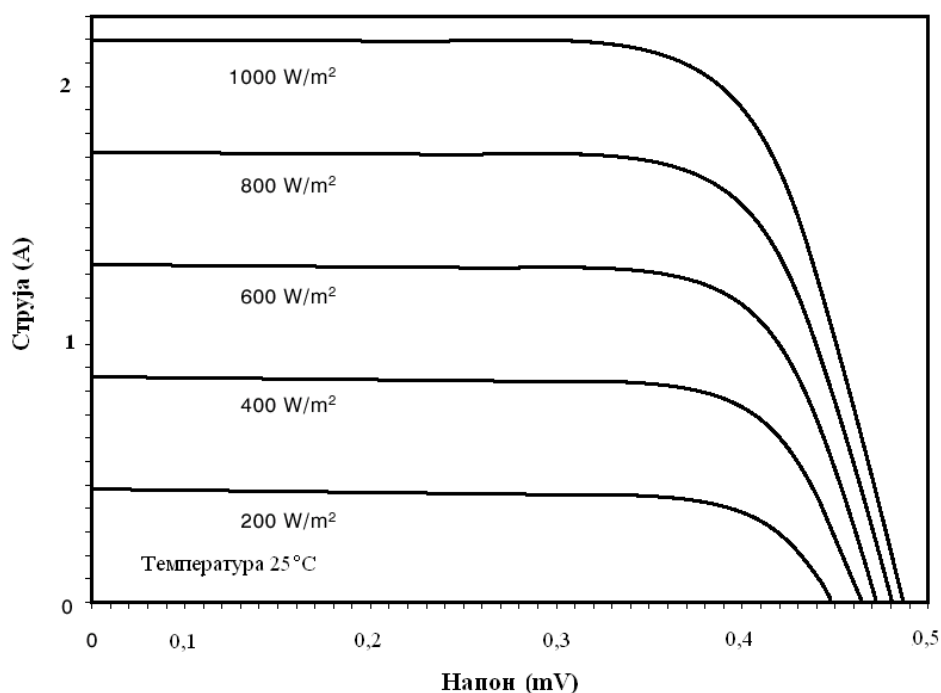
Напон који се јавља у соларним ћелијама зависи од степена затамњења на соларној ћелији. На пример, ако је ћелија потпуно осенчена, онда ће друге соларне ћелије бити везане у кратком споју и напон ће бити 0.6 V. Ако је затамњена ћелија само делимично у сенци нека струја из редно везаних соларних ћелија може да пролази кроз њу, док ће се остатак струје преко обилазница прослеђивати преко затамњене соларне ћелије и на тај ће начин стварати мање губитке [33].

4.4 Утицај соларног зрачења на ефикасност ФН ћелије

Са повећањем соларног зрачења, повећава се и ефикасност ФН модула услед све већег броја фотона који падају на модул. Услед повећања соларног зрачења долази до формирања великог броја електронских парова, што резултује стварањем електричне енергије.

Приликом испитивања различитих ФН модула дошло се до сличног закључка, интензитет Сунчевог зрачења значајно утиче само на излазну струју ФН модула. Напон ФН модула при различитим интензитетима Сунчевог зрачења се мења у врло малим вредностима. Када се ове промене узму у обзир, ово постаје најутицајнији и најважнији фактор који утиче на излазну снагу модула, тј. на његову ефикасност.

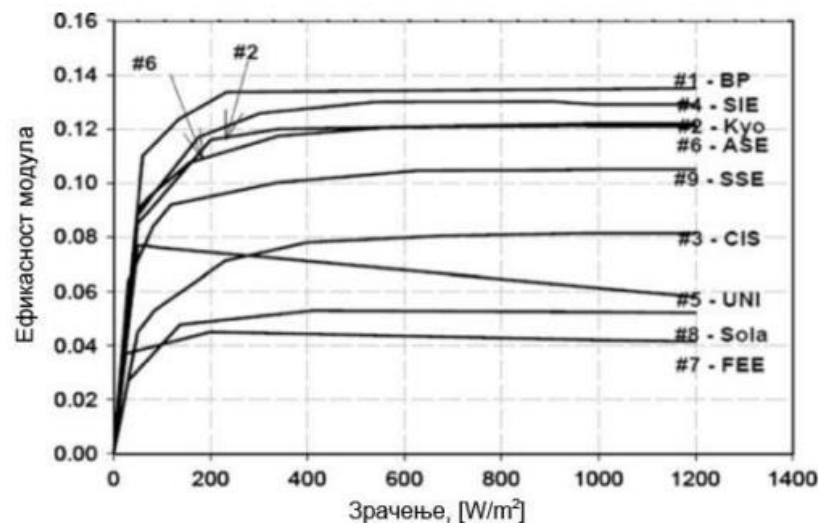
На Слици 39 су приказани резултати испитивања монокристалног силицијума у лабораторијским условима, при температура од 25 °C и интензитетима зрачења од 200 до 1000 W. За извор Сунчеве светлости се користио соларни симулатор.



Слика 39. Напон ФН модула у зависности од интензитета Сунчевог зрачења [30]

Да би се добили што прецизнији резултати утицаја Сунчевог зрачења изведен је експеримент над девет различитих ФН модула. 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 од аморфног силицијума показали су јаку деградацију за максималне STC (*standard test conditions*), (*Siemens* и *BPSolarex*) нису показали деградацију, мултикристални *Kyocera* и *Shell Solar Energy* модули су имали мале промене, а промене ASE модула су биле занемарљиве [28].

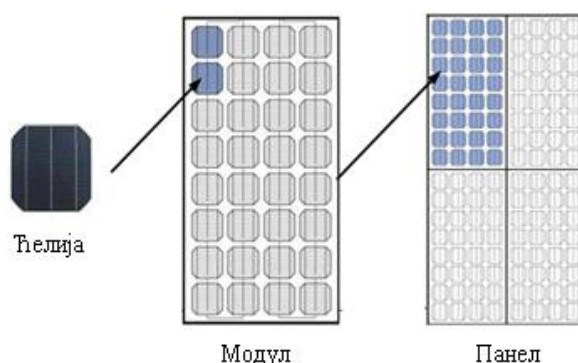
Тест карактеристике свих ФН модула дате су на слици. Дошло се до закључка да су карактеристике ФН модула направљених технологијом танког филма боље у условима слабијег интензитета зрачења.



Слика 40. Испитивање ефикасности различитих ФН модула [28]

5. ПОВЕЗИВАЊЕ ФОТОНАПОНСКИХ ЋЕЛИЈА – ФОТОНАПОНСКИ МОДУЛ И ПАНЕЛ

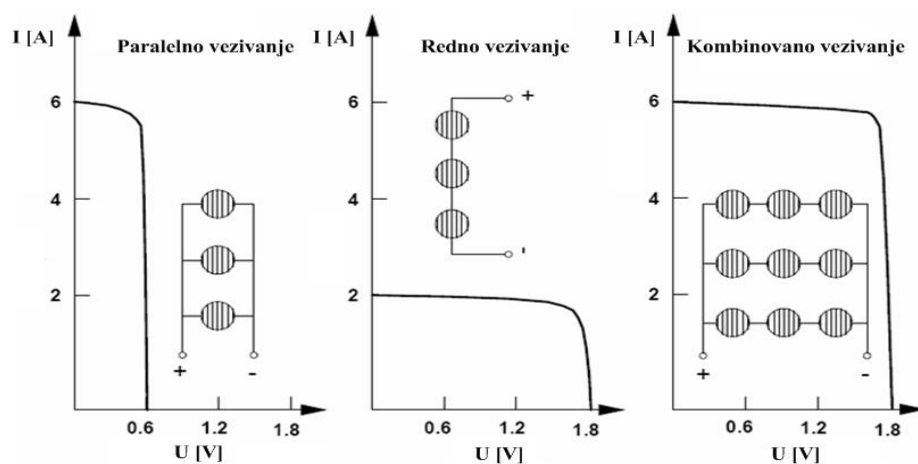
Једна фотонапонска ћелија производи напон од свега 0.6V. Са обзиром на чињеницу да је снага коју производи једна фотонапонска ћелија релативно мала, у пракси се више ћелија повезује (редно, паралелно и комбиновано) и спаја у блокове који се називају фотонапонски модули. На овај начин се постижу струја, напон и снага већег интензитета. У циљу добијања још већих снага, модули се по истом принципу везују у фотонапонске панеле, чије снаге иду и до реда MW.



Слика 41. Фотонапонска ћелија, модул и панел

У зависности од начина повезивања фотонапонских ћелија може се управљати излазним карактеристикама фотонапонског модула. Паралелним повезивањем се утиче на јачину струје, редним повезивањем на напон. Предност првог начина повезивања је та што у случају да се цео један ред искључи, панел и даље може да настави да ради са истим напонам и смањеном струјом. Најчешће у пракси срећемо комбиновано редно и паралелно повезивање.

Ако је јачина струје једне ћелије I_1 , а број ћелија n , онда је, у идеалном случају, укупна струја паралелно везаних ћелија $I_{uk}=n \cdot I_1$. Слично важи и за напон. Ако од одабраног броја ћелија, желимо добити што већи могући напон, онда дате ћелије треба везати редно. Ако је напон једне ћелије U_1 , а број ћелија n , онда је укупни напон, редно везаних ћелија $U_{uk}=n \cdot U_1$. Све ово важи и у случају везивања већег броја модула [29].



Слика 42. Зависност јачине струје и напона од повезивања соларних ћелија [29]

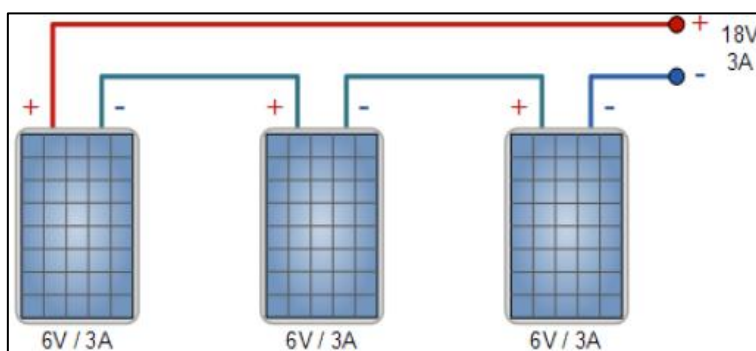
Да би се повећао напон више модула се везује на ред, а да би се повећала јачина струје више модула се везује у паралелу. Имајући у виду да је снага производ напона и струје, важно је пронаћи оптималну спрегу редно-паралелних веза модула у циљу добијања жељених вредности напона и струја на прикључцима. Таква веза фотонапонских модула се назива фотонапонски панел.

Фотонапонски панели се исто тако могу везивати редно, паралелно и комбиновано у зависности од тражене јачине струје и напона. Приликом повезивања фотонапонских панела треба водити рачуна о захтеву потрошача, да би фотонапонски систем био што ефикаснији.

У зависности од карактеристика фотонапонских панела може бити неколико могућих начина повезивања [34] :

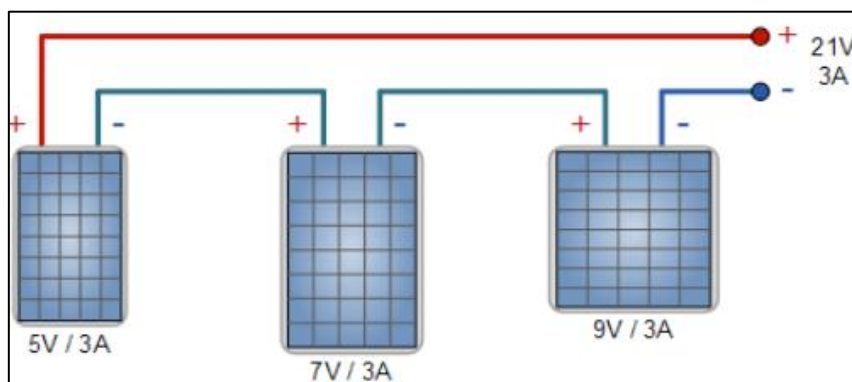
- 1) Редна веза ФН панела истих карактеристика
- 2) Редна веза ФН панела различитих напона, а истих струја
- 3) Редна веза ФН панела различитих карактеристика
- 4) Паралалена веза ФН панела истих карактеристика
- 5) Паралелна веза ФН панела различитих карактеристика

1) Код редне везе ФН панела истих карактеристика важи исто правило као и код повезивања фотонапонских ћелија и модула, напони се сабирају, а струја је једнака појединачној излазној струји ФН панела.



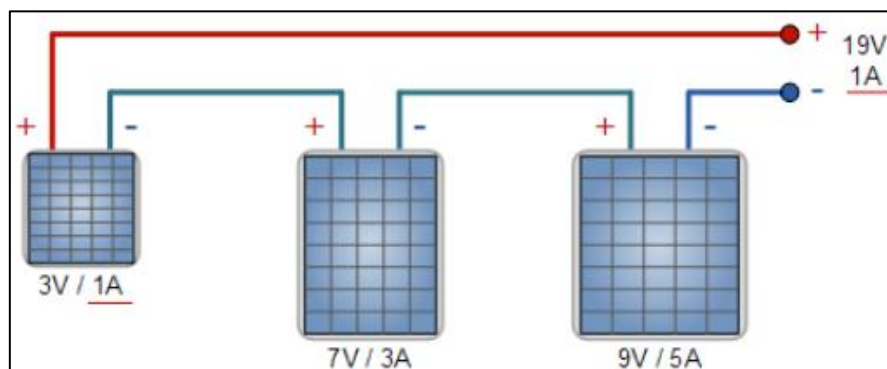
Слика 43. Редна веза ФН панела истих карактеристика [34]

2) Код редне везе ФН панела различитих напона, а истих струја важи да им се напони сабирају док је јачина струје једнака излазној јачини струје појединачног ФН панела.



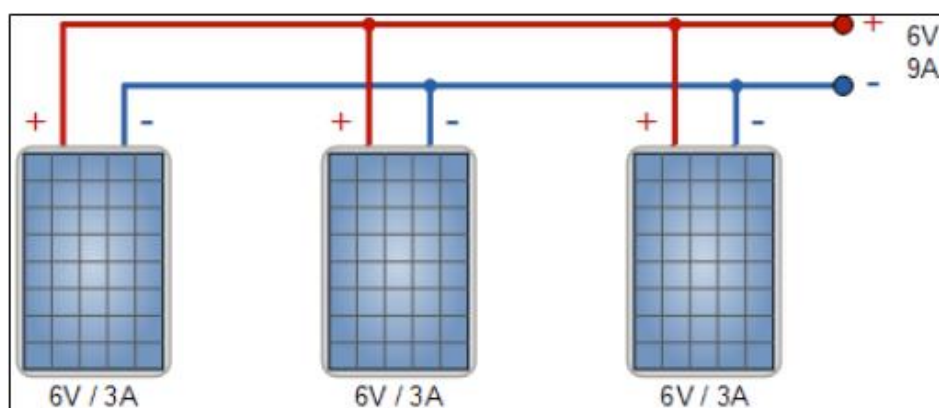
Слика 44. Редна веза ФН панела различитих напона [34]

3) Код редне веза ФН панела различитих карактеристика, напони се сабирају као у претходним случајевима, са тим што је јачина струје лимитирана најнижом јачином излазне струје ФН панела.



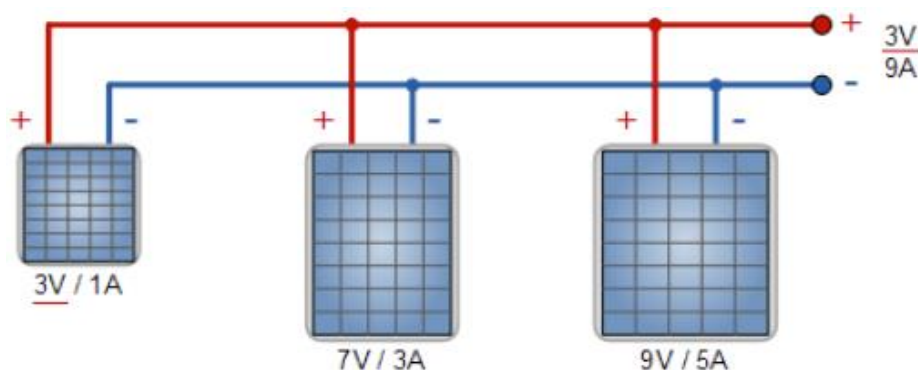
Слика 45. Редна веза ФН панела различитих карактеристика [34]

4) У случају паралелног повезивања ФН панела истих карактеристика имамо напон једнак појединачном напону ФН панела, док се јачине струја сабирају.



Слика 46. Паралелна веза ФН панела истих карактеристика [34]

5) У случају паралелне везе ФН панела различитих карактеристика напон је лимитиран најнижим напonom ФН панела у вези, док се јачине струје сабирају. Приликом повезивања мора се водити рачуна о волтажи ФН панела, јер један ФН панел може знатно редуковати ефикасност читавог низа панела.



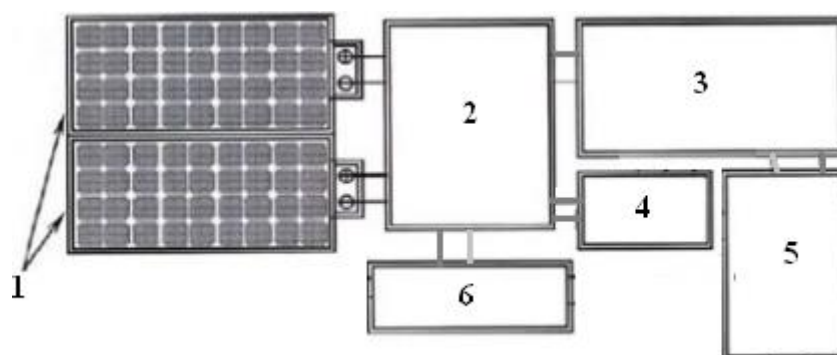
Слика 47. Паралелна веза ФН панела различитих карактеристика [34]

6. ФОТОНАПОНСКИ СИСТЕМИ

Под фотонапонским системима подразумевају се системи помоћу којих се се врши прозводња и акумулација електричне енергије добијена соларном конверзијом, са тим што акумулација електричне енергије није обавезна.

Основни саставни делови овог система су [2]:

- 1) Соларни пријемник
- 2) Регулатор пуњења
- 3) Инвертер
- 4) Акумулатор
- 5) Потрошачи наизменичне струје
- 6) Потрошачи једносмерне струје



Слика 48. Блок шема фотонапонског система са акумулацијом електричне енергије

6.1 Подела фотонапонских система

Соларни фотонапонски системи се генерално могу поделити на две основне групе:

- мрежно спојени ФН системи (ФН системи прикључени на јавну енергетску мрежу, тзв. On-Grid систем)
- самостални ФН системи (ФН системи који нису прикључени на јавну електроенергетску мрежу, тзв. Off-Grid систем)

Према начину уградње соларни ФН системи могу бити:

- самостални, издвојени од објекта
- као део соларне архитектуре
- као систем за уградњу на објекат

Самостални системи налазе се произвољно далеко од објекта и обично се користе за напајање сигнализације, телекомуникационе опреме, или су то комплетне соларне електране.

Соларна архитектура је термин новијег датума и подразумева осмишљен архитектонски изглед зграде уз интегрисане ФН ћелије, као део фасаде. То је естетски обликована и пре свега корисна фасада.

Системи за уградњу на објекту се постављају на жељено место на објекту, наравно, у складу са правилним постављањем за што боље искоришћење соларног зрачења. Најчешће је у питању кров објекта.

Према начину складиштења ФН системе можемо поделити:

- директне самосталне системе, без акумулирања електричне енергије
- батеријске самосталне системе
- умрежене системе, повезане и синхронизоване са јавним системом за производњу и дистрибуцију електричне енергије

Директни ФН системи су самостални, не акумулирају произведену енергију, већ одмах троше све што је произведено.

Батеријски ФН системи вишак произведене електричне енергије складиште у акумулаторе, а касније по потреби троше. То су независни системи од јавне електричне мреже.

Умрежени ФН системи, чије се инсталирање и највише подстиче, су повезани и потпуно синхронизовани са јавним дистрибутивним системом електричне енергије. Када се у ФН систему јави вишак произведене електричне енергије, објекат ради као електрана шаљући тај вишак енергије у систем. У случају мањка енергије у објекту, он се понаша као класичан потрошач и повлачи електричну енергију из система.

По величини ФН системи се могу делити на:

- Соларне апликације
- Енергетске системе
- Соларне електране

Соларне апликације су мали произвођачи и потрошачи електричне енергије, типа вентилатора или светиљки.

Енергетски ФН системи производе озбиљне количине електричне енергије за потребе издвојених стамбених објеката и већих потрошача.

Соларне електране се све више инсталирају широм света, заузимају огромне површине и служе искључиво за производњу огромних количина електричне енергије која се шаље у мрежни систем.

6.1.1 Мрежно спојени ФН системи (On-Grid)

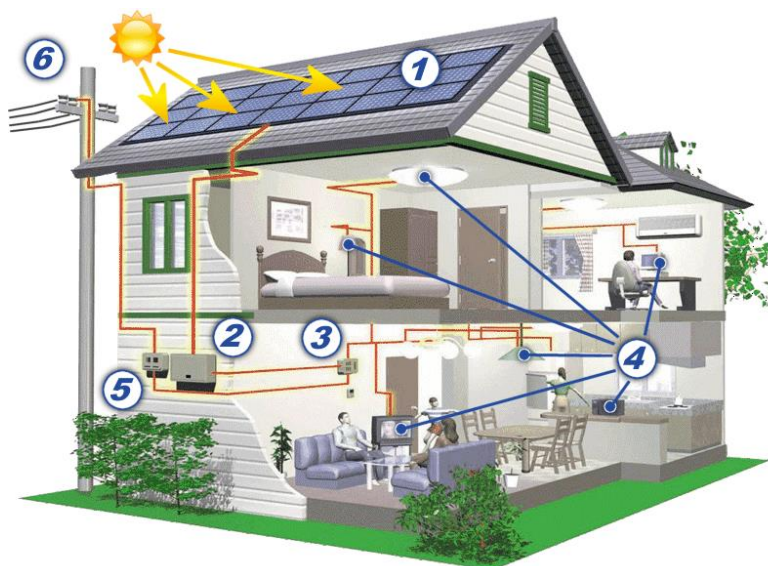
Соларни системи (On-Grid) су врло једноставни, ефикасни, обновљиви системи за генерисање електричне енергије који су прикључени на јавну електричну мрежу. Током дана, када има Сунца, систем генерише електричну енергију. Генерисана енергија се може одмах користити у домаћинству, складиштити у акумулатору за каснију употребу или слати у јавну електричну мрежу. На овај начин ће се уштедети на рачуну за струју или ће се вишак енергије вратити у јавну електричну мрежу. У овом случају регенерисана енергија се измери и касније обрачуна између домаћинства и електро дистрибуције.

Домаћинства најмање троше енергије у току дана, међутим, на нивоу државе је потрошња управо тада највећа и соларни системи могу помоћи да се та потражња за енергијом задовољи. Ако већ постоји довољан број соларних система у земљи, онда ти системи могу редуковати рад електрана који раде на традиционални начин (термоелектране, нуклеарне електране, итд.)

У току ноћи потрошња је далеко мања на нивоу државе и домаћинства троше електричну енергију из традиционалних извора електричне енергије, коју мери струјомер. Пошто у току ноћи соларни систем не производи електричну енергију, може се рећи да постоји регенерисана и потрошена количина енергије коју само треба обрачунати по временским периодима.

Основни делови ФН система су:

- фотонапонски модули, фотонапонски измењивач (инвертер), монтажна подконструкција, затим прикључно мерни ормар са заштитном и инсталираном опремом.



Слика 49. On-Grid ФН систем: 1) Соларни панели , 2) Инвертер/регулатор и противнапонска заштита, 3) Електрични разводни ормар са осигурачима, 4) Потрошачи у домаћинству, 5) Мерење произведене и потрошене електричне енергије [35]

Соларни панели стварају једносмерни напон и струју, а ниво напона зависи од врсте и броја соларних панела. Ово не задовољава потребе домаћинства, нити потребе On-Grid система напајања те се у његовом склопу додају регулатор пуњења и инвертори тј. фотонапонски исправљач.

Фотонапонски исправљач прилагођава произведену енергију из соларних панела у облик који се може предати јавној ел.ен. мрежи, складиштити у акумулатору или директно трошити. Фотонапонски исправљач (инвертер) се најчешће налази у згради у затвореном простору, а постоје и инвертери за спољно уграђивање, при чему треба пазити да нису директно изложени сунчевом зрачењу.

Мрежни инвертори раде као и сваки други инвертор, с том разликом да мрежни инвертори морају обезбедити да напон који испоручују буде у фази с мрежним напонам [36].

Када се изгради On-Grid соларни систем потребно је уградити неколико додатних уређаја. Непходан је прекидач и контролер система који ће услед нестанка струје систем укинути са мреже безбедно и по правилима. Тако се не угрожава живот радника на електричној мрежи. Потребни су акумулатори који ће премостити сате када нема сунчеве светлости. Потребан је много мањи број акумулатора него у систему који није прикључен на јавну мрежу. Након уградње оваквог система у домаћинство старо електрично бројило се замењује бројилом које мери долазну и одлазну количину електричне енергије, значи потрошену и произведену електричну енергију.

Снага On-Grid система креће се од неколико стотина W до неколико MW снаге. За домаћинства се најчешће изграђују системи од 3 до 8 kWh снаге. Са овим системима може се у потпуности задовољити употреба електричне енергије у домаћинствима. Малим и средњим фирмама, предузећима се препоручује On-Grid соларни систем од 10 до 50 kW снаге, а великим потрошачима, погонима, великим робним кућама соларни капацитети већи од 50 kW [36].

Једна од најважнијих ставки приликом пројектовања соларног система On-Grid јесте прилагођавање потрошњи електричне енергије на месечном или годишњем нивоу. Потрошња електричне енергије се најчешће и најлакше одређује из рачуна за електричну енергију.

На основу досадашњег искуства код On-Grid соларних система на подручју Србије и околних земаља, систем снаге 1 kWh годишње произведе од 1150 до 1250 kWh електричне енергије [36].

6.1.2 Самостални ФН системи (Off-Grid)

Off-Grid систем подразумева систем који ради самостално, независно, у поређењу са системом који мора бити прикључен на јавну електричну мрежу.

Off-Grid систем је погодан за напајање тамо где је немогуће или јако тешко допремити дистрибутивни систем, тј. не постоји јавна електрична мрежа. Пошто он обезбеђује потпуну самосталност експлоатације електричне енергије елиминисано је финансијско оптерећење корисника (изузев у времену отплате инвестиције оваквог система).

Фотонапонски систем пуни батеријску банку (редно или паралелно повезани акумулатори) у току дана, а ноћу се из ње црпи акумулирана енергија. Дању је могуће и директно повезивање на потрошаче како би се продужио век акумулатора електричне енергије. Исправљач се такође може користити, како би се обезбедила наизменична струја за потребе стандардних електричних апарата и уређаја. Додатно снабдевање може дати и прикључени генератор као опциони извор снаге.

Типичне фотонапонске инсталације се користе како би се омогућила доступност електричне енергије у удаљеним местима (планинска места, рурална подручја у развоју). Рурална електрификација подразумева малу кућну фотонапонску инсталацију која покрива основне потребе за електричном енергијом у домаћинству или већу фотонапонску инсталацију која обезбеђује довољно електричне енергије за неколико домаћинства.

Основне компоненте Off-Grid система су:

- фотонапонски панели,
- електроника за пуњење акумулатора,
- акумулатор,
- инвертор/исправљач.



Слика 50. Фотонапонски Off-Grid систем [37]

Произведена енергија се складишти путем електронике за пуњење акумулатора у акумулаторима. Из акумулатора се енергија може трошити на више начина. Ако су у питању мањи системи могуће је функционисање без регулатора, јер се ради о једноставном и малом потрошачу. Ако овакви системи раде на 12 или 24 V напона, онда једна боља електроника за пуњење преусмерава систем, штитећи потрошаче, самог себе као и акумулаторе од штетних оптерећења [37].

Ако се користе традиционалне утичнице за потрошњу, мора се обезбедити напон од 220V. За ово је већ потребан претварач/инвертер. Постоје јефтинији и скупљи апарати. При избору инвертера мора се узети у обзир потрошња. Многи електрични апарати

морају да добијају синусоидни напон, иначе може доћи до њиховог квара. Код јако јефтиних регулатора њихов знак често уопште није синусоидан, већ облик трапезе или знак тестере, који није увек погодан за снабдевање енергијом, па у том случају нпр. електрични мотори могу прегорети [37].

За коришћење самосталних система током целе године неопходно је инсталирати и додатни извор енергије - ветрогенератор или резервни агрегат. Соларни колектори (фотонапонски панели) у комбинацији са ветро-генераторима обезбеђују довољну сигурност напајања електричном енергијом на местима која немају могућност напајања из јавне мреже. Овакви системи се називају хибридним системима.

Пре свега је потребно знатно умањити инсталирану снагу нпр. у домаћинству, да би се успешно снабдевало електричном енергијом из ових система. На тзв. добрим локацијама инвестиција је исплатива релативно брзо, али такве локације су ретке. Поред наведеног агрегата могу да се користе системи са додатним генераторима, погоњеним мотором са унутрашњим сагоревањем [2].

Соларна електрична енергија може да допринесе енергетској понуди уз истовремену помоћ у спречавању глобалне промене климатских услова. Приближно 75% енергије која се користи у развијеном свету троши се у градовима, од чега се око 40% троши у зградама. ФН системи могу да се уграде у скоро сваку грађевинску структуру, од аутобуских станица до великих пословних зграда, па чак и у баште, паркове итд. Иако тачна прогноза фотонапонског учинка у зградама захтева пажљиву анализу фактора, као што су количина соларног зрачења које пада на зграду, електричне стабилности електро-дистрибутивне мреже итд., лако је схватити да оваква технологија има велике могућности и велики број карактеристика [38]:

- нивои соларних панела се најчешће накнадно уграђују у постојеће зграде, обично се монтирају на врху постојеће кровне конструкције или на постојећим зидовима,
- алтернативно, соларни панели могу бити смештени одвојено од објекта, али треба да буду повезани каблом за напајање зграде,
- више од 80% од 9.000 MW инсталираних соларних панела у Немачкој 2010., било је инсталирано на крововима зграда,
- од недавно се производе и црепови са интегрисаним ФН ћелијама.

Са архитектонског, техничког и финансијског аспекта, ФН системи интегрисани у грађевинске елементе имају следеће особине:

- не захтевају додатно земљиште и могу се користити у густо насељеним урбаним срединама, не захтевају додатне инфраструктурне инсталације,
- обезбеђују електричну енергију у току највеће потражње и на тај начин смањују оптерећење електричне мреже,
- могу да смање губитке током преноса и дистрибуције електричне енергије,
- могу у потпуности или делимично да обезбеде електричну енергију за одговарајућу зграду,
- могу да замене конвенционалне грађевинске материјале и на тај начин обезбеде двоструку улогу која може вишеструко да се исплати,
- пружају нове естетске могућности на иновативан начин,

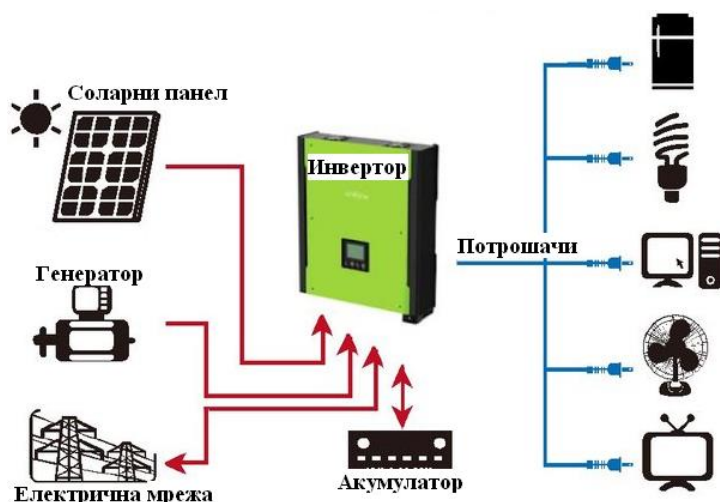
- могу се повезати са одржавањем, контролом и функционисањем других инсталација и система у згради,
- могу да обезбеде смањење планираних трошкова.

Пошто фасадни фотонапонски модули могу да замене класичне грађевинске материјале, разлика у цени између соларних елемената по јединици површине и материјала које могу да замене је од посебног значаја. Цена по јединици површине фасадног ФН система, који је повезан на ел.ен. дистрибутивну мрежу, је приближна цени најквалитетнијих фасадних материјала, попут мермера или украсног камена. Уколико се ово узме у обзир може се закључити да је фасада од ФН модула далеко исплативија, јер би се производњом електричне енергије у току времена инвестиција отплатила, а сва остала производња електричне енергије би била добит.

6.2 Хибридни системи

Понекада није довољно користити само један извор енергије за задовољење захтева за енергијом, у овом случају соларни ФН панел, па се додаје још неки систем за генерисање електричне енергије. Овај систем се може базирати на обновљивим и необновљивим изворима енергије и на овај начин се повећава сигурност снабдевања и самосталност система.

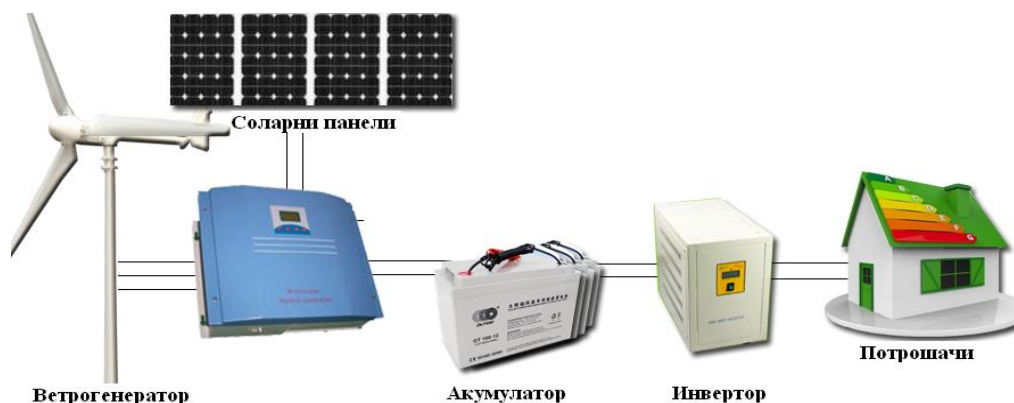
Када се соларни фотонапонски систем користи уз још неки вид енергије, нпр. уз ветрогенератор, генератор на гориво, когенерацију итд. назива се хибридни систем. Циљ хибридних система је максимално повећање поузданости напајања електричном енергијом, као и што већа независност система (ON-Grid систем), осим уколико се не ради о систему који није прикачен на јавну дистрибутивну мрежу (OFF-Grid систем).



Уколико не постоји могућност производње електричне енергије соларним панелима и ветрогенератором, сви потрошачи ће се напајати из батеријског система који преузима улогу главног извора електричне енергије. Када се потроши енергија из акумулаторских

батерија, прелази се на напајање путем генератора електричне енергије, који се погони углавном дизел и биодизел горивом.

Уколико систем нема генератор и прикључен је на јавни дистрибутивни систем прелази у режим рада класичног потрошача. У супротном случају, када систем није повезан на јавну дистрибутивну мрежу, се ради о самосталном хибридном систему.

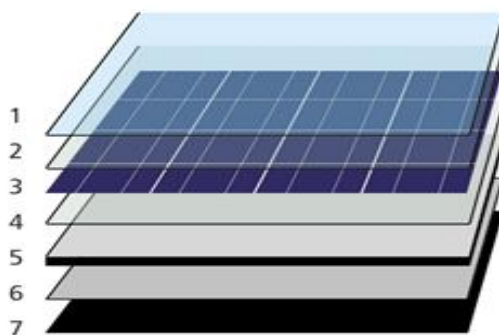


Слика 52. Самостални хибридни систем (OFF-Grid) [40]

6.3 Хибридни соларни пријемници

Интеграцијом термичког соларног колектора и фотонапонског панела у једну целину добијени су тзв. хибридни соларни пријемници који истовремено дају топлотну и електричну енергију, наравно у зависности од соларног зрачења. Електрична енергија се може складиштити унутар акумулаторских батерија, док се топлотна енергија најчешће складишти у соларним бојлерима.

ФН ћелије користе само мали део соларног зрачења да произведу електричну енергију око 15%, остатак енергије највећим делом одлази у отпадну топлоту унутар ћелија и субстрата подижући њихову температуру. Као резултат повећања температуре соларне ћелије њена ефикасност опада. Уместо одавања топлоте околини као код класичних ФН панела код хибридних се топлота одаје радном медијуму који може бити вода или ваздух. Оваквим хлађењем соларних ћелије се може одржати њихова висока ефикасност што је једна од предности оваквог соларног пријемника.



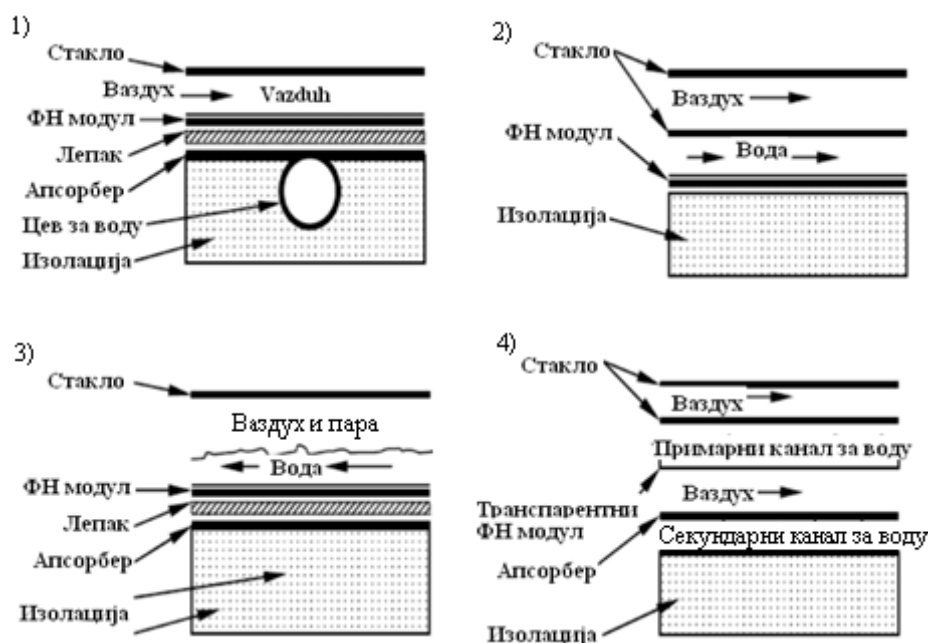
Слика 53. Хибридни соларни пријемник са грејањем воде : 1) Стакло, 2) EVA (Етиленвилацетат полимер), 3) ФН модул, 4) EVA, 5) Силикон, 6) Апсорбер, 7) Изолација [2]

Да би овакав пријемник функционисао јасно је да положај ФН панела мора бити испред апсорберске плоче, изложен директном Сунчевом зрачењу. Како апсорберска плоча и ФН панел имају различите коефицијенте термичког ширења, спајају се танким слојем флексибилног транспарентног материјала (EVA - Етиленвилацетат полимер) [2]. Пошто ФН модул (полупроводнички материјал) нема високе вредности топлотне проводљивости, апсорбери хибридних соларних пријемника су конструисани тако да радни флуид има што је могуће већи контакт са површином апсорбера и практично ФН модулом. Уместо система цеви користи се систем канала. Остали делови оваквог хибридног соларног пријемника су слични конструкцији класичног соларног колектора (застакљење, изолација, кутија).

Како ФН модул није конструисан да буде апсорбер, његове апсорберске карактеристике су лошије од класичних апсорбера, што смањује количину топлоте коју може да прихвати. Са друге стране непосредна близина апсорбера за ФН модул значи вишу температуру и мању ефикасност.

Из овога следи закључак да хибридни соларни пријемници имају примену само у случају функционисања при ниским радним температурама флуида. Из овог разлога се поред коришћења воде као радног флуида може користити и ваздух.

На слици су приказане шеме различитих конструкција хибридних соларних пријемника у зависности од радног флуида [28].



Слика 54. Различите конструкције хибридних соларних пријемника: 1) Радни флуид ваздух, 2) Радни флуиди су ваздух и вода, 3) Радни флуиди су ваздух, пара и вода, 4) Са двоструким каналима за радне флуиде (ваздух и воду) [28]

7. ОДРЖИВЕ ЗГРАДЕ, СОЛАРНА АРХИТЕКТУРА - ИМПЛЕМЕНТАЦИЈА ФН СИСТЕМА

Планирање и управљање енергијом је предуслов за њену рационалну производњу и потрошњу и захтева интегрално планирање, уз учешће тимова стручњака најразличитијих профила. За побољшање стања у планирању и управљању енергијом, као и очувању класичних енергетских ресурса, неопходно је поштовање принципа одрживог развоја, одрживе градње и одрживе архитектуре, у чему планери, урбанисти и архитекте имају значајну улогу.

Одрживост је знатно сложен и широк појам и данас се најчешће препознаје као концепт “3Е” (environment, есоному, equity), односно успостављање равнотеже еколошких, економских и социјалних фактора [41]. Такође је у релацији са појмом одрживо, појам енергетски ефикасно, што подразумева примену обновљиве енергије и то: енергије ветра, воде, сунца, биомасе и др. Треба имати у виду да примена одрживе изградње у различитим срединама није иста и то пре свега због другачијег економског, политичког, културног, географског и др. статуса државе.

Соларна архитектура је само један део модерне архитектуре који има за циљ да експлоатише чисту, бесплатну и обновљиву енергију Сунца. Овакав тип архитектуре укључује активно и пасивно коришћење соларне енергије користећи разне оптичке, термичке и електронске материјале.

Фотонапонски системи се користе као замена за конвенционалне грађевинске материјале у деловима омотача зграде. Они се углавном уграђују као саставни део фасадне и кровне структуре нових зграда, али и постојећи објекти могу бити обложени њима. Могу бити главни извор енергије, али у већини случајева се користи само као допунски извор електричне енергије. Модерни захтеви у грађевинарству су довели до тога да фасаде тј. омотачи зграда морају бити комплексни и мултифункционални елементи зграде [42].



Слика 55. Соларна архитектура – ФН систем [43]

Модерна технологија и константан напредак у науци дозвољава велике промене у самом дизајну и конструкцији фасаде или крова. Да би задовољили тражене захтеве пре свега системи који се данас имплементирају у омотач зграде мора да обезбеде термо и хидроизолацију, заштиту од сунца, буке и светлости, као и безбедност. Употреба ФН система у самом омотачу зграде је само један од додатних аспекта који се пројектују, водећи рачуна о осталим системима. Из овога следи да ФН системи мора да испуне читав низ критеријума, да би се постигле добре перформансе зграде.

ФН модули данас постоје у великом броју различитих облика и димензија који зависе од места уградње и захтева система. Овакве карактеристике дају огранан број могућности архитектама и пројектантима приликом изградње разноврсних објеката. Најчешћи примери примене ФН система у зградама су у склопу: кровне структуре, спољашњих зидова, полу-транспарентне фасаде, стакленог крова и засенчења.

7.1 Имплементација ФН систем на крову

Кров је горњи, завршни део грађевине, који је штити од атмосферских утицаја. Састоји се од кровне конструкције, која може бити од дрвета, опеке, камена, челика и армираног бетона, керамичког или бетонског црепа, плjosнатих камених плоча, пластичних прозирних плоча или купола, земље (зелени кров) и у данашње време од ФН панела [44].

Оно што кров чини погодним местом за постављање ФН панела јесте да углавном има велику површину која се не користи, а при том је изложена Сунчевом зрачењу у току целе године. ФН панели такође имају предност, у односу на конвенционалне кровове, у томе што продужавају век трајања крова услед заштите од штетног ултраљубичастог зрачења и воде. Још једна од ствари које се морају узети у обзир приликом пројектовања ФН система на крову јесте сама конструкција крова, који може бити раван или коси.

Једна од предности равних кровова јесте добра приступачност, једноставнија инсталација и могућност подешавања идеалног угла соларног панела за дату локацију. Приликом инсталирања система не сме се нарушити неки други слој крова или инсталације, који би нарушио и саму ефикасност објекта. Оно што је врло важно при пројектовању јесте и сама тежина ФН панела, као и могући утицај ветра на њихово померање или оштећење.



Слика 56. Соларни панели на равном крову [45]

Инсталирање ФН система на косим крововима је мало компликованије у односу на равне, мора се користити додатна опрема и додатне мере безбедности. Приликом пројектовања је један од најважнијих фактора сама тежина ФН панела, да се кров не би преоптеретио и урушио. У случајевима када се ради о крову који нема довољну носивост користе се танкослојни соларни панели, или сам цреп на крову у себи може имати соларне ћелије. Ово је један од модерних трендова који све више узима маха у развијеним земљама.



Слика 57. Соларни панели на косом крову [45]

Компанија TESLA је ове године отпочела масовну производњу соларних кровова по цени приближној класичним крововима у Сједињеним Америчким Државама. Ови кровови се тренутно производе у четири различита дизајна, да би се кров што више прилагодио тржишту [46].



Слика 58. Цреп са интегрисаним соларним модулом [46]

Предност оваквог крова јесте што нема додатне тежине или додатних елемената као што имају кровови са класичним ФН панелима, а оно што је најважније са естетске стране делују као обичан кров.



Слика 59. Кућа са кровом унутар кога су интегрисани ФН модули [46]



Слика 60. Фотонапонски модул интегрисан у цреп [46]

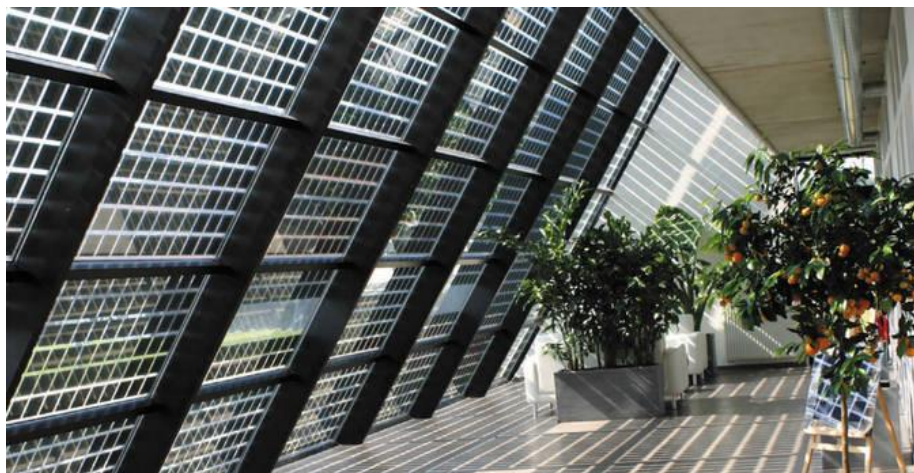
7.2 Полу-транспарентни соларни модули

Полу-транспарентни соларни модули се могу користити као замена за многе архитектонске елементе који су направљени од стакла или сличних материјала. Фотонапонски модули од ламелираног стакла, поред фасаде, могу се користити и на прозорима, формирајући полу-транспарентну фасаду. Оваква фасада би имала вишеструку улогу поред производње енергије би служила и као блокатор Сунчевих зрака као и извор дневног осветљења.



Слика 61. Полу транспаретни соларни модули [47]

Оваква конструкција транспаретних модула је могућа употребом танких и скоро прозирних соларних ћелија. Соларни модули су интегрисани у самом ламелираном стаклу и највећи део светлости који осветљава просторију продире између њих. Са обзиром да се Сунце креће, у току дана долази до појаве разних светлосних ефеката у виду разних шара сенки и боја светлости. Код фасада могуће је додавање разних слојева стакла у циљу постизања бољих звучних и термичких изолација. Овакве конструкције спадају у мултифункционалне елементе зграда.



Слика 62. Полу транспаретни соларни модули [48]

7.3 Стаклени кровови као ФН системи

Конструкције стаклених кровова су обично једно од најинтересантнијих места за примену фотонапонских система. Они пружају дифузију светла у згради, док обезбеђују ненаметљиву површину за инсталацију фотонапонских модула у ламелираном стаклу. Модули и начин примене су слични онима који се користе за полу-транспарентне фасаде. Структура која спектакуларно изгледа споља, унутра производи фасцинантне светлосне холове и ходнике и пружа стимулативан архитектонски доживљај светлости и сенке.



Слика 64. Стаклени кров са соларним модулима [49]

7.4 Употреба фотонапонских панела као засенчење

Још једна од могућих апликација ФН панела јесте њихова употреба као елемената засенчења. Употреба великих стаклених површина и зид завеса у архитектури довела је до растуће потребе за пажљиво дизајнираним засенчењима. У данашње време постоје ФН модули различитих облика и димензија те се врло лако могу употребити као елементи засене изнад прозора или као горњи део застакљене структуре. Пошто велики број зграда већ има неку врсту структуре за засену прозора, имплементација фотонапонских модула на њима не представља проблем.

Предност оваквог решења засене јесте та што повратак инвестиције може бити релативно брз, поготово у развијеним земљама где се дају посебне погодности за коришћење соларне енергије. Постоји могућност уградње соларних панела који би могли мењати свој угао, што би довело до бољег искоришћења соларног зрачења, као и различитог нивоа засене.

Један од најбољих примера за уградњу ФН панела јесте као покрив за паркинге већих површина. Двострука улога покрива јесте заштита аутомобила од спољних утицаја као и производња електричне енергије. Рутгерс универзитет у Америци је свој паркинг претворио у соларну електрану, капацитета 8 MW, што је довољно снаге да снабдева преко 1000 домаћинства [50].



Слика 65. ФН панели уместо покрива за паркинг [50]

8. ЗАКЉУЧАК

На почетку рада, између осталог, дати су подаци о енергији Сунчевог зрачења која је доступна на површини Земље. Из њих можемо извући веома битан закључак да се ради о огромној количини енергије, за коју треба пронаћи адекватан начин за што боље искоришћење. Поред традиционалног начина производње електричне енергије, данас је све актуелније претварање енергије соларног зрачења у електричну, преко тзв. фотонапонских система који спадају у комплексне технолошке системе.

Основни део сваког фотонапонског система је фотонапонска ћелија, што је и главна тема овог рада. У раду је обрађен основни принцип функционисања фотонапонске ћелија, као и функционисање ћелија произведених различитим технологијама и материјалима. Свака од ћелија има своју потенцијалну примену на глобалном нивоу, али се тек само неколико врста производи масовно. Све соларне ћелије које су комерцијално доступне имају релативно ниске конверзијске ефикасности, без обзира на технологију и материјал и само подробним истраживањем и испитивањем се може доћи до њиховог побољшања. Напретком технологије и употребом модерних материјала се загарантовано може постићи велики напредак у овој области.

Неопходно је постићи што већу ефикасност уз што нижу цену, као и еколошки чисту и брзу производњу соларних ћелија. Узимајући у обзир да енергетска потражња расте из дана у дан, а да се велики део енергената заснива на необновљивим изворима енергије, ова грана технологије мора бити један од светских приоритета. Количина енергије која стигне од Сунца на површину земље у току само једног дана је много пута већа него годишња светска потрошња енергије. Овај податак даје информацију о томе колико се само мали део потенцијала Сунца, као извора енергије, тренутно користи, као и још колико далеко се може напредовати.

Недавни пораст производње фотонапонских система уз смањење њихове цене, отворио је велики број нових тржишта уз велики број различитих примена. Примене као што су осветљавање, телекомуникације, расхладни системи, пумпање воде, као и обезбеђивање електричне енергије за читава насеља (нарочито у удаљенима областима), показале су се као конкурентне и профитабилне у односу на већ постојеће технологије. Једна од потенцијалних могућности јесте имплементација у архитектури, на крововима, фасадама, као засенчења, уместо прозора, чиме би се искористила релативно неупотребљива површина за производњу електричне енергије. Ово би довело до повећања енергетске ефикасности објекта, као и до повратка инвестиција за саму градњу у току одређеног периода. Овакви системи би могли бити попутно независни од јавне мреже, или би могли продавати вишак енергије својој држави према утврђеним ценама.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] НАЦИОНАЛНИ АКЦИОНИ ПЛАН ЗА КОРИШЋЕЊЕ ОБНОВЉИВИХ ИЗВОРА ЕНЕРГИЈЕ РЕПУБЛИКЕ СРБИЈЕ, Београд 2013.
- [2] Лукић Небојша, Бабић Милун: Соларна енергија, Факултет инжењерских наука, Крагујевац 2008.
- [3] <https://wattsupwiththat.com/2015/12/04/elon-musk-a-robust-carbon-tax-would-speed-the-clean-energy-transition/>
- [4] <https://soho.nascom.nasa.gov/classroom/classroom.html>
- [5] Деспотовић М., Бојић М., Недић В.: Софтвер за прорачун оптималног угла постављања соларних колектора, Крагујевац 2015.
- [6] http://solarcellcentral.com/limits_page.html
- [7] Јасмина Д. Скерлић: ОПТИМИЗАЦИЈА ПОЛОЖАЈА ПРИЈЕМНИКА СОЛАРНЕ ЕНЕРГИЈЕ КОД КУЋА СА НЕТО-НУЛТОМ ПОТРОШЊОМ ЕНЕРГИЈЕ, Крагујевац 2015.
- [8] <http://www.solarnipaneli.org/2010/12/istorija-solarne-celije-i-deo/>
- [9] <https://en.wikipedia.org/wiki/Silicon>
- [10] <http://energyinformative.org/best-solar-panel-monocrystalline-polycrystalline-thin-film/>
- [11] https://global.kyocera.com/news/2014/0204_goka.html
- [12] Ламбић М. : Соларне технологије – топлотни и фотонапонски системи, Београд 2013
- [13] <https://www.flickr.com/photos/okinawa-soba/9070715878>
- [14] https://en.wikipedia.org/wiki/Staebler%E2%80%93Wronski_effect
- [15] A.R. Jha: Solar Cell Technology and Applications, 2010
- [16] <http://www.machinedesign.com/batteriespower-supplies/what-s-difference-between-solar-panels>
- [17] Т.М. Razykov, С.С. Ferekides, D. Morel, E. Stefanakos, H.S. Ullal, H.M. Upadhyaya: Solar photovoltaic electricity: Current status and future prospects, 2011.
- [18] Данијела Николић, Милорад Бојић, Јасмина Скерлић, Јасна Радуловић, Драган Тарановић: Преглед несилицијумских и нових фотонапонских технологија за генерисање електричне енергије, Факултет инжењерских наука, Крагујевац
- [19] http://www.cstf.kyushu-u.ac.jp/~adachilab/lab/?page_id=3927
- [20] https://en.wikipedia.org/wiki/Dye-sensitized_solar_cell
- [21] http://teachers.usd497.org/agleue/Gratzel_solar_cell%20assets/How%20does%20a%20Gratzel%20Solar%20Cell%20work.htm
- [22] Khalil Ebrahim Jasim: Quantum Dots Solar Cells, 2015
- [23] <http://www.rcast.u-tokyo.ac.jp/research/tanken/img/okada-02.jpg>
- [24] <https://www.intechopen.com/books/nanowires-implementations-and-applications/zno-nanowires-and-their-application-for-solar-cells>

- [25] L. El Chaar, L.A. lamont, N. El Zein: Review of photovoltaic technologies, Chicago 2011
- [26] Ashok K. Sood, Nibir Dhar: ZnO Nanostructures for Optoelectronic Applications, 2011
- [27] <https://www.intechopen.com/books/nanowires-implementations-and-applications/zno-nanowires-and-their-application-for-solar-cells>
- [28] V.V. Tyagi, Nurul A.A. Rahim, N.A. Rahim, Jeyraj A., L. Selvaraj: Progress in solar PV technology: Research and achievement, India, 2012.
- [29] Ива М. Бабић : Моделовање утицаја временског профила соларног зрачења на ефекте рада фотонапонских система у електроенергетском систему, Београд, 2016
- [30] http://www.simulation-research.com/help/userguide/greenenergy_solarcell.html
- [31] <https://sciencing.com/effects-temperature-solar-panel-power-production-19442.html>
- [32] <http://www.skyrobot.co.jp/en/skycombination.html>
- [33] <http://www.pveducation.org/pvcdrom/modules/hot-spot-heating>
- [34] <http://www.alternative-energy-tutorials.com/energy-articles/connecting-solar-panels-together.html>
- [35] <http://www.solarna-energija.rs/o-solarnim-sistemima/glavni-delovi-ob-grid-solarnih-sistema>
- [36] <http://www.solarna-energija.rs/o-solarnim-sistemima/on-grid-solarni-sistemi>
- [37] <http://www.solarna-energija.rs/o-solarnim-sistemima/off-grid-solarni-sistemi>
- [38] www.rpkns.com/images/stories/ekologija/solarna-energija.doc
- [39] <http://www.solarsystem.com.pk/hybrid-solar-system.php>
- [40] https://www.alibaba.com/product-detail/NEW-1kw-hybrid-wind-solar-system_60270493582.html
- [41] <https://www.ethree.com/>
- [42] https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_architecture
- [43] <https://inhabitat.com/brooksscarpa-design-a-passive-los-angeles-high-school-clad-with-650-solar-panels/>
- [44] <https://sr.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D1%80%D0%BE%D0%B2>
- [45] <https://understandsolar.com/can-you-put-solar-panels-on-a-flat-roof/>
- [46] <https://www.tesla.com/solarroof>
- [47] <https://juanbisquert.wordpress.com/2014/04/08/dye-solar-cell-facade-at-swisstech-covention-center-at-epfl-by-solaronix/>
- [48] <http://www.pluginindia.com/whyharnessenergysolarpanels.html>
- [49] <http://www.archiexpo.cn/prod/scheuten-solar/product-62617-1251599.html>
- [50] <https://www.ecowatch.com/3-reasons-universities-are-investing-renewable-energy-1881978003.html>