

Универзитет у Крагујевцу
Факултет инжењерских наука у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство
Ниво студија: Основне академске студије
Модул: Енергетика и процесна техника
Предмет: Пренос масе и топлоте
Број индекса: 55/2010

Немања З. Јозић
Фотонапонске ћелије
завршни рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Проф. Др. Небојша Лукић

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог завршног рада кандидат треба да

Оквирни садржај рада:

1. Увод
2. Историја
3. Принцип рада фотонапонских ћелија
4. Материјали
5. Ефикасност фотонапонских ћелија
6. Цена
7. Примена
8. Закључак
9. Литература

Препоручена литература:

- [1] Н. Лукић, М. Бабић, Соларна енергија, Машински факултет, 2008. Крагујевац

Крагујевац, датум

ментор:

др Небојша Лукић, ред. проф.

Резиме рада

Завршни рад је посвећен упознавању **фотонапонских ћелија** од којих се праве **соларни панели**, и њихове **ефикасности**, која се користе у искоришћавању соларне енергије. Постоје три основне врсте, **монокристалне, поликристалне и аморфне**.

Кључне речи: фотонапонске ћелије, соларни панели, ефикасност, монокристалне, поликристалне, аморфне

Abstract

The final study is dedicated to learning about the photovoltaic cells that make up the solar panels, and their efficiency, which is used in the exploitation of solar energy. There are three basic types of monocrystalline, polycrystalline and amorphous.

Keywords: photovoltaic cells, solar panel, efficiency, monocrystalline, polycrystalline, amorphous.

САДРЖАЈ

	Страна
1. Увод.....	5
2. Историја соларних ћелија.....	6
2.1. Производња прве ћелије.....	6
2.2. Берманове редукције цена.....	8
2.3. Навигацијско тржиште.....	9
2.4. Даља побољшања.....	9
2.5. Тренд раста употребе.....	10
3. Принцип рада фотонапонских ћелија.....	11
4. Материјали.....	15
4.1. Монокристалне фотонапонске ћелије.....	15
4.2. Поликристалне фотонапонске ћелије.....	17
4.3. Аморфне фотонапонске ћелије.....	18
5. Ефикасност фотонапонских ћелија.....	21
6. Цена.....	26
7. Примена.....	27
8. Уградња.....	30
9. Закључак.....	34
Литература.....	35

1. УВОД

Соларна ћелија (фотонапонска ћелија) је полупроводички уређај који претвара Сунчеву енергију директно у електричну помоћу фотоелектричног ефекта. Групе ћелија формирају соларне модуле, познате и као соларни панели или фотонапонска плоча. Енергија произведена соларним модулима је пример соларне енергије.

Ћелије се означавају као фотонапонске ћелије када извор светлости није нужно Сунчева светлост. Оне се користе за детекцију светлости или других облика електромагнетског зрачења близу видљивог спектра, на пример детектори инфрацрвеног светла, или мерење интензитета светлости. Ефикасност им је од 10% за јефтиније израде са аморфним силицијумом, до 25% за скупље израде. За сада су још увек економски нерентабилни, јер им је цена око велика. На слици 1 је приказана соларна ћелија израђена од плочице (вафера) монокристалног силицијума).



Слика 1. Соларна ћелија израђена од плочице (вафера) монокристалног силицијума

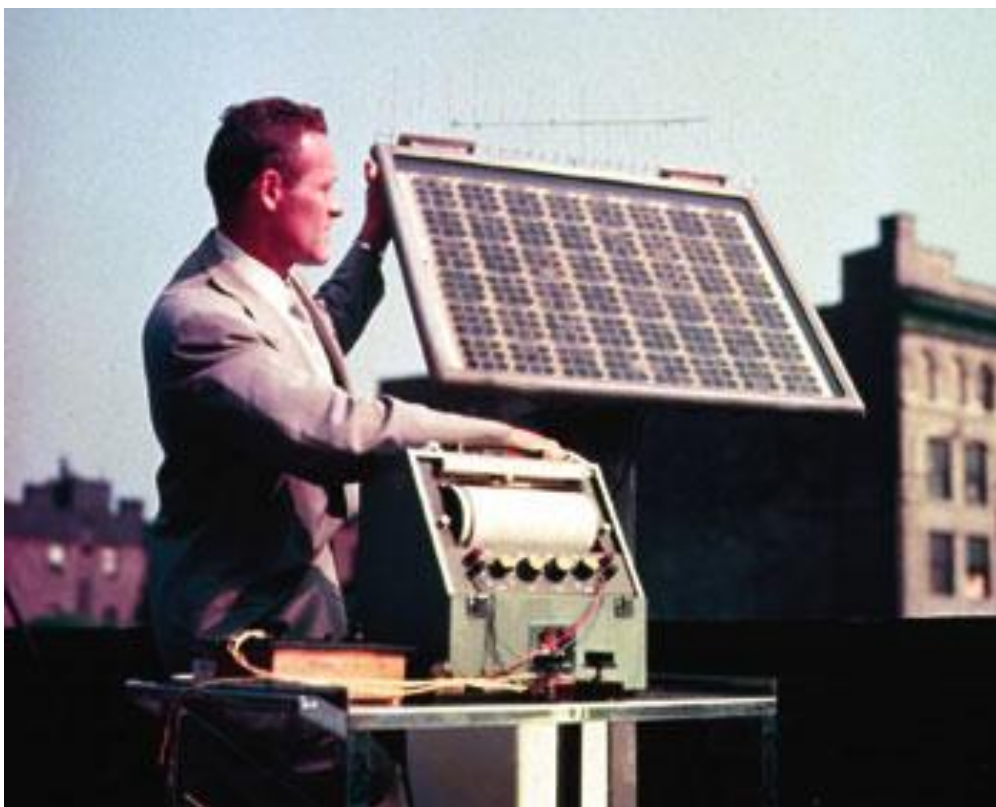
2. ИСТОРИЈА СОЛАРНИХ ЋЕЛИЈА

Појам „фотонапонско“ долази од грч. $\phi\omega\varsigma$ – $\rho h\acute{o}s$ са значењем светлост. Појам "фотонапонско" је у енглеском језику у употреби од 1849. године.

Фотоелектрични ефект је 1839. открио француски физичар А. Е. Беквел, али је тек 1883. израђена прва соларна ћелија. Израдио ју је *Charles Frits*, тако што је прекрио полупроводник селен изразито танким слојем злата да створи спојеве. Ефикасност уређаја била је само око 1%. Године 1888. руски физичар *Aleksandar Stoletov* израдио је прву фотоелектричну ћелију утемељену на спољном фотоелектричном ефекту који је открио *Најнрих Херц* 1887.г. Алберт Ајнштајн је 1905. објаснио фотоелектрични ефект због чега је добио и Нобелову награду за физику 1921. године. *Rasel Ohl* је 1946. патентирао модерну полупроводничку соларну ћелију, која је откривена током рада на унапређењима у изради транзистора.

2.1. Производња прве ћелије

Прва модерна фотонапонска ћелија произведена је 1954. од стране компаније Бел лабораторије (енгл. *Bell Laboratories*). Приказ тестирања те ћелије приказан је на слици 2. Високо ефикасну соларну ћелију први су произвели *Daril Čapin*, *Kalvin Sater Fuller* и *Džerald Pearson* 1954. користећи дифузни силицијумски р-п спој. Ћелије су испрва рађене за играчке и остале ситне потребе, јер је цена струје коју су производиле била врло висока – у релативним појмовима, ћелија која је производила 1 W електричне снаге по јаким Сунцу коштала је 250\$/W, у поређењу са 2-3\$/W та струју из електране на угаљ.



Слика 2. Тестирање соларне батерије 1954

Први тест соларне батерије у америци био је 1955. године, приказан је на слици 3.



Слика 3. Први тест соларне батерије у Америци 1955. године

Соларне ћелије су спашене од заборавља предлогом да се уграде у сателит Vanguard 1 1958. године. Према оригиналним плановима, сателит би се напајао само батеријама и трајао кратко време док се не истроше. Додавши ћелије споља на труп, време мисије се могло продужити без већих измена на свемирској летилици или њеним електричним водовима. Испрва је постојао скептицизам, али соларне ћелије су се у пракси показале великим успехом, и убрзо су додате на многе нове сателите, посебно Белов властити Телстар.

У идуће две деценије напредак је био спор, једина раширена употреба била је у свемирским применама, где је њихов однос снаге према маси био већи од било које конкурентске технологије. Међутим тај успех је уједно био и разлог спором напретку. „Свемирски“ корисници су били спремни да плате било коју цену за најбоље могуће ћелије, тако да није било разлога за инвестирање у јефтинија решења. Уместо тога, цена ћелија била је одређена углавном од стране индустрије полупроводника. Прелазак на интегрисана кола у 1960-има довео је до доступности већих комада кристала по релативно нижим ценама. Како је њихова цена падала, тако је падала и цена ћелија. Ипак, ти ефекти су били ограничени све до 1971. године, кад су трошкови ћелија процењени на око 100\$ по вату.

2.2. Берманове редукције цена

У касним 1960-има, Елиот Берман је истраживао нов метод за производњу силицијумске сировине у тракастом процесу (енгл. ribbon process). Наишао је на слаб интерес за пројект и није могао наћи новчана средства за његов развој. Касније је, игром случаја, представљен тиму у компаније Ексон (енгл. Exxon), који је тражио пројекте за наредних 30 година. Група је закључила да ће електрична енергија бити много скупља до 2000-те године, и претпоставили су да ће то повећање цене учинити нове алтернативне изворе енергије, међу којима су најзанимљивији соларни, атрактивнијима. Берман се 1969. прикључио лабораторији Ексона у Линдену у Њу Џерзију званом Соларна снага корпорација (енгл. Solar Power Corporation, SPC).

Његово прво веће настојање било је да се истражи потенцијално тржиште како би се видело који су могући начини употребе новог производа. Убрзо су открили да постоји значајна потражња, уколико долари по вату падну са тадашњих 100\$/W на отприлике 20\$/W. Знајући да би се његов концепт траке развијао годинама, тим је почео тражити начине за постизање границе 20\$/W употребом постојећих материјала.

Први напредак било је запажање да су постојеће ћелије базиране на стандардном процесу производње полупроводника, иако то није било оптимално. Поступак је почињао с комадом кристала, који се резао на дискове зване вафери (плочице), који се затим полирају и потом, за употребу у ћелијама, превлаче антирефлексијским слојем. Берман је приметио да грубо изрезани вафери већ имају савршено одговарајућу антирефлексијску предњу површину. Штампанем електрода директно на ту површину, два значајна корака у производњи ћелија тиме су отклоњена. Тиме је такође истражио начине за побољшање уградње ћелија у низове, отклањајући скупе материјале и ручно ожичење коришћене у свемирским применама уз помоћ штампане плочице на полеђини, акрилне пластике спреда те лепкова базираног на силицијуму између, које затвара ћелије. Међутим највеће достигнуће у покушају постизања ниже цене било је Берманово схватање да је постојећи силицијум ефективно био "предобар" за употребу у соларним ћелијама; ситне несавршености које би упропастиле цели комад кристала (или појединачни вафер) за електронику, имале би безначајан утицај у соларној примени.

Уводећи све ове промене у праксу, компанија је отпочела куповати "одбачен" силицијум од постојећих произвођача по врло ниским ценама. Користећи највеће доступне вафере, према томе умањујући количину ожичења за дату површину панела, и њиховим паковањем у панеле употребом властите нове методе. До 1973. године SPC је производио панеле по 10\$ и продавао их по 20\$ – петоструко снижење цене у две године.

2.3. Навигацијско тржиште

SPC је приступио компанијама које производе пловеће светионике као свом природном тржишту, међутим наишао је на занимљиву ситуацију. Водећа компанија у том послу била је Аутоматска Снага (енгл. Automatic Power), произвођач батерија. Схвативши да би им соларне ћелије могле одузети део профита од батерија, Аутоматик је откупио права на ранији дизајн ћелија и потиснуо их. Видевши да ту нема интереса, SPC се окренуо Тиделанд сигналу, другом произвођачу батерија основаном од стране бивших менаџера Аутоматика. Тиделанд је ускоро представио светионик напајан соларном енергијом и тиме нарушио Аутоматиково пословање.

Избор момента није могао бити погоднији. Стрмоглаво повећање броја нафтних платформи на мору и постројења за утовар створило је велико тржиште међу нафтним компанијама. Како је богатство Тиделанда повећано, компанија Аутоматска Снага је почела да тражи властитог снабдевача соларних панела. Нашли су Била Јеркса из компаније Соларна снага интернационал (енгл. Solar Power International SPI) у Калифорнији, који је тражио тржиште. SPI је ускоро купљен од стране једног од својих највећих клијената, нафтног гиганта ARCO-а, створивши ARCO Солар. Компанија АРЦО Солар у Камарилу у Калифорнији била је прва намењена искључиво производњи соларних панела, и у непрекидном је погону од куповине 1977. до данашњег дана.

Ово је тржиште, заједно с нафтном кризом 1973., довело до занимљиве ситуације. Нафтне компаније су сада имале пуно новца због великих профита током кризе, а биле су такође свесне да им будући успех зависи од неког другог облика енергије. Током идућих неколико година, веће нафтне компаније су покренуле низ соларних компанија, те су током више деценија биле највећи произвођачи соларних панела. Еххон, ARCO, Shell, Амосо (касније купљен од стране BP-а), Mobil, све су имале значајне соларне одеље током 1970.-их и 80.-их. Технолошке компаније су такође имале одређена улагања, укључујући General Electric, Motorola, IBM, Тусо и RCA.

2.4. Даља побољшања

Побољшања од времена Бермановог рада су снизила трошкове производње на испод 1/\$W, с veleпродајном ценом реда 2\$. Трошкови остатка уређаја (трошкови система) су сада постали већи од трошкова самих ћелија; у великим комерцијалним пољима панела у погону су износили око 5\$/W у 2010. години.

Како је индустрија полупроводника ишла на све веће и веће комаде кристала, старија опрема је постала доступна по распродајним ценама. Ћелије су доступношћу те опреме такође расле у величини. ARCO Соларови оригинални панели су користили ћелије од 5 до 10cm у пречнику. Панели у 1990.-има и раним 2000.-има углавном користили 12,5 cm велике вафере, а од 2008. готово сви нови панели користе 15cm ћелије. Још једна велика промена био је прелазак на поликристални силицијум. Тај материјал има мањи учинак, али је јефтинији за масовну производњу. Свеобухватно увођење телевизора с равним екраном у касним 1990.-има и раним 2000.-има довело је до широке доступности великих плоча висококвалитетног стакла, коришћених на предњој страни панела.

Друге технологије су такође дошле на тржиште. Компанија Први солар (енгл. First Solar) је нарастао у највећег произвођача панела у погледу годишње произведене снаге, кориштењем ћелије од танког филма између два слоја стакла. То је био први производ који је срушио трошкове производње испод 1\$/W. Од тада је изобиље поликристалног силицијума потиснуло цене конвенционалних панела на исту сразмеру.

2.5. Тренд раста употребе

У Европској унији тренутно је 40% годишњи раст инсталиране снаге фотонапонских ћелија. То се наизглед чини као велики раст, али ту ипак ради о врло малим количинама, па раст од 40% не утиче посебно на укупну заступљеност таквих извора енергије.

У 2000. години у Европској унији било је инсталирано 183.5 MWp, а то је 43,6 % повећања у односу на 1999. И у том подручју Немачка је са 113.8 MWp (укључујући 100 MWp прикључених на електричну мрежу) водећа држава у Европи. Тако велики удео може се захвалити немачком закону о обновљивим изворима енергије. По том закону откупна цена енергије из фотонапонских ћелија је 0.5 евра по kWh за првих 350 MWp.

План Европске уније био је инсталирање 3000 MWp до 2010. године, али се испоставило да је до тада инсталирано 1780 MWp.

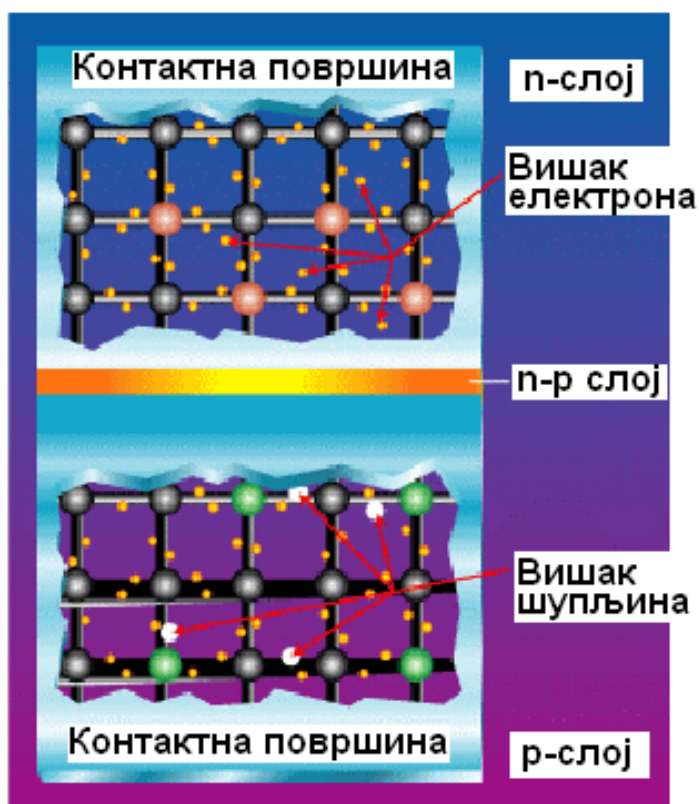
Државе Европске уније задале су себи амбициозан циљ да повећају удео обновљивих извора енергије са 8,5 % у 2005. години на 20% целокупне потрошње енергије у европској унији до 2020. године. Ово повећање удела обновљивих извора енергије је нужни допринос у борби са глобалним климатским променама и велики искорак према већој енергетској независности Уније, што је такође врло важан дугорочни циљ држава чланица Европске уније. Боља контрола енергетске зависности све је важнија због високе цене сирове нафте и нестабилне политичке и економске ситуације у Украјини, а та ситуација увек може резултовати смањењем снабдевања Уније природним гасом из Русије.

3. ПРИНЦИП РАДА ФОТОНАПОНСКИХ ЋЕЛИЈА

Рад соларне ћелије одвија се у три корака:

- Фотони из сунчеве светлости ударају у соларни панел и полупроводнички материјали попут силицијума их апсорбује.
- Електрони се потискују из атома и постају слободни, те могу да слободно теку материјалом, чиме се формира струја. Због посебне грађе соларних ћелија, електрони се могу кретати само у једном смеру.
- Поље соларних ћелија претвара енергију Сунца у употребљиву количину једносмерне струје.

Силицијум је најпознатији полупроводнички елемент и други хемијски елемент по распрострањености у природи. Атом Si садржи 14 електрона смештених у три орбите. Прве две су попуњене, док се у трећој налази 4 електрона уместо осам, који би је потпуно попунили. На тај начин силицијум формира кристалну структуру у којој су суседни атоми спојени заједничким електронима у трећој орбити. Уколико се у ову структуру убади елемент, као што је фосфор (P), који у последњој орбити има, на пример пет електрона (силицијум се "допингује"), један електрон ће остати ван чврсте међуатомске везе, везан слабом везом за сопствено језгро. Овај електрон се лако ослобађа те везе деловањем додатне енергије, каква је енергија фотона електромагнетног зрачења (светлости пре свега) и на тај начин постаје слободан. Овде се ради о n-типу полупроводника.



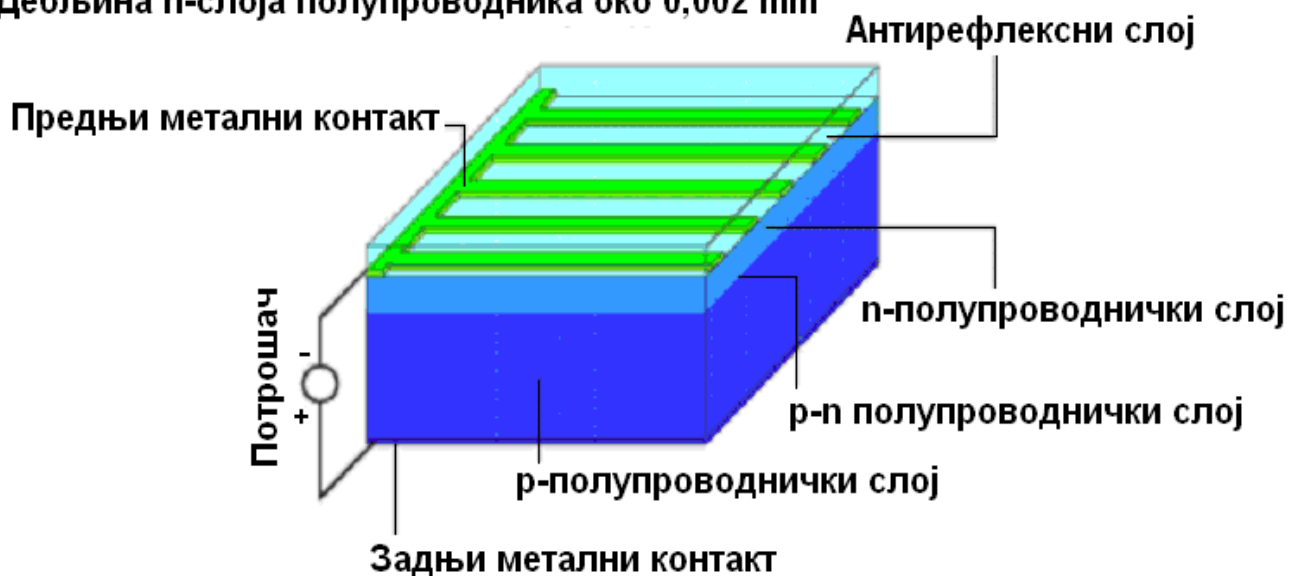
Слика 3. Полупроводнички n и p слојеви, раздвојени p-n слојем

С друге стране, уколико се силицијум допингује елементима који имају три електрона у последњој орбити, као што је бор на пример (В), везе између атома ће имати "шупљине", места непопуњена електронима. На овај начин добија се р-тип полупроводника. Комбинацијом ова два типа полупроводничког материјала, добија се практично и даље електрично неутралан материјал, јер слободни електрони налазе своје место у слободним шупљинама. Међутим, уколико се између п и р слоја постави неутралан раздвајајући слој (р-п слој), што је шематски приказано на слици 3 појавиће се разлика напона на спољним површинама овог полупроводничког "сендвича".

Ово је основни принцип функционисања фотонапонских ћелија (ФН). На слици 4 је приказана принципска шема једне ФН ћелије.

Дебљина соларне ћелије око 0,3 mm

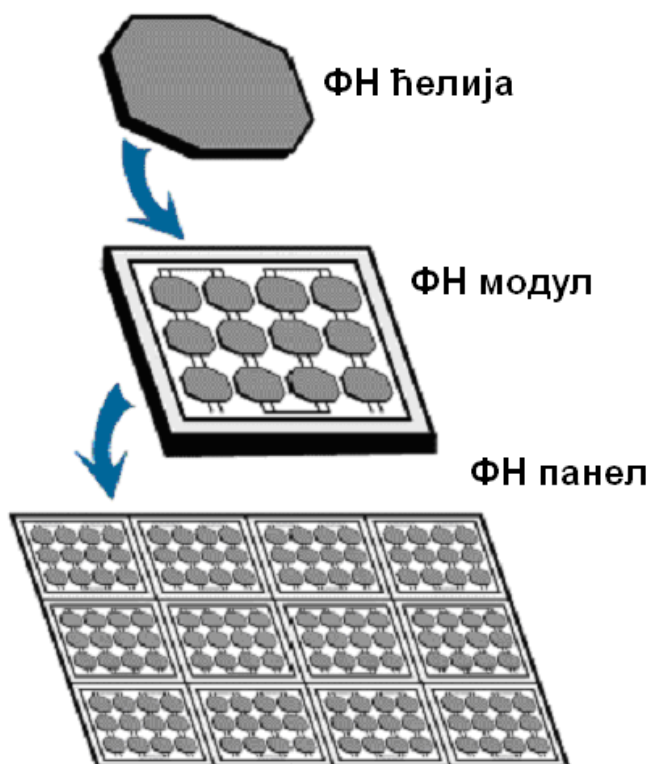
Дебљина п-слоја полупроводника око 0,002 mm



Слика 4. Принцип функционисања фотонапонске ћелије

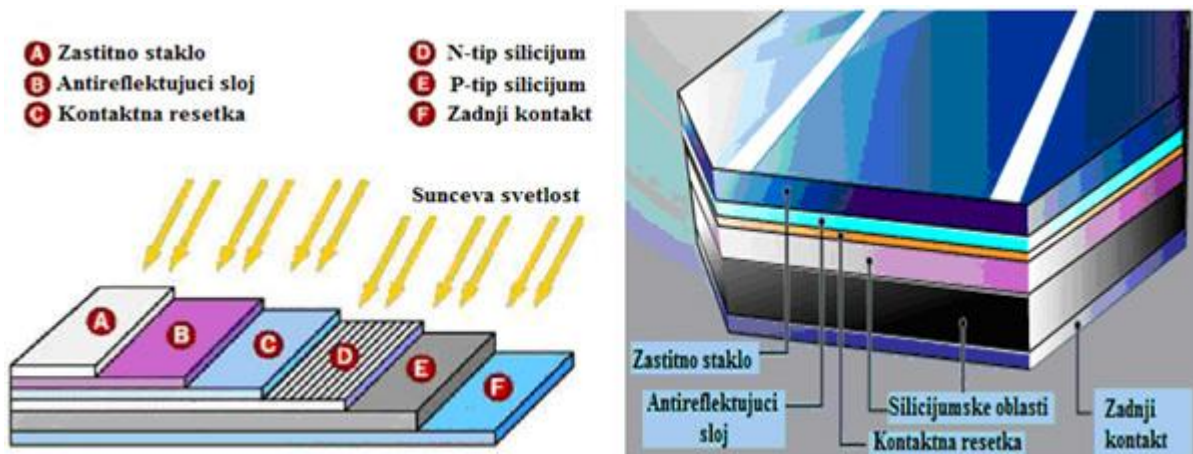
Поред дефинисаних п, р и р-п полупроводничких слојева, класична фотонапонска ћелија на врху поседује антирефлексни транспарентни слој, затим метални контакт (контактну мрежу) на п слоју, следе три описана полупроводничка слоја и рефлективна метална плоча-контакт са задње стране ћелије. ФН ћелија се прикључује на одговарајући потрошач и електрично коло је затворено.

Просечна дебљина класичне силицијумске ФН ћелије износи само 300 μm , а негативни n слој само 2 μm . Једна класична силицијумска ФН ћелија има димензије 10x10 cm (веома је ретко већа). Како се њен уобичајени радни напон креће око 0,5 V, прибегава се повезивању ових ћелија у соларне ФН модуле и веће панеле, где су ФН ћелије спојене редно, како би се добио уобичајени напон од 12 V (даље је могуће паралелно повезивање у панелу), што је приказано на слици 5. У суштини могуће су све комбинације серијског и паралелног повезивања ћелија. ФН ћелија прикључена на потрошача даје једносмерну струју (DC). Као што је речено у одељку о соларним системима, она се даље инвертером може превести у наизменичну струју одговарајућих карактеристика (AC).



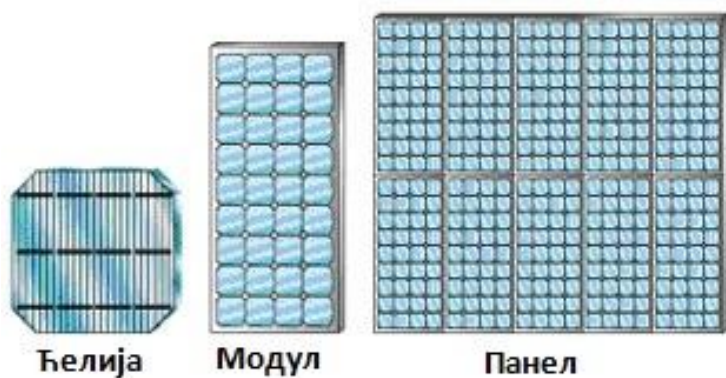
Слика 5. Повезивање ФН ћелија у модуле и панеле

Попречни пресек једне типичне соларне ћелије, ма ког типа била приказан је на слици 6 (узета је силицијумска соларна ћелија за пример). Први слој је заштитно стакло тј. SiO_2 , које штити ћелију од спољашњих утицаја. Испод је антирефлектујући који смањује рефлексију светлости и обезбеђује да што више енергије доспе до полупроводника (повећава се искоришћење ћелије). Затим се налази систем транспарентних електрода, TCO. Он контактира полупроводник са pn спојем у коме се врши захватање фотона Сунчеве светлости. Са доње стране је метализација-задњи контакт.



Слика 6. Попречни пресек соларне ћелије

Максимални излазни напон индивидуалне соларне ћелије износи око 500mV. Ћелије серијски повезују како би се добио жељени напон. Најчешће се око 36 ћелија серијски повезује стварајући модуле номиналног напона од 18V. Снага коју производи једна фотонапонска ћелија је релативно мала па се у пракси више ћелија повезују у групу чиме се формира фотонапонски модул. Према пројектованој снази модули се спајају редно и/или паралелно, чиме се формира фотонапонски панел који производи струју, напон и снагу знатно већег интензитета, слика 7.



Слика 7. Соларна ћелија, модул, соларни панел

4. МАТЕРИЈАЛИ

Различити материјали имају различиту ефикасност и цену. Материјали за ефикасне соларне ћелије морају имати карактеристике које се слажу са спектром доступног светла. Неке ћелије су направљене тако да ефикасно претварају таласне дужине Сунчевог светла које допире до Земљине површине. Постоје и ћелије које су оптимизоване за апсорпцију светла изван атмосфере. Материјали који апсорбују светлост често се могу користити у "вишеструким физичким конфигурацијама", како би се искористили различити механизми апсорпције светла и раздвајања наелектрисања.

Материјали тренутно коришћени за фотонапонске соларне ћелије укључују монокристални силицијум, поликристални силицијум, аморфни силицијум, кадмијум телурид и бакар индијум селенид/сулфид.

Многе тренутно доступне соларне ћелије израђене су од комада материјала резаног у плочице. Њихова дебљина је између 180 до 240 микрометара. Оне се обрађују попут осталих полупроводника.

Други материјали су направљени као слојеви танког филма, органских пигмента или органских полимера који се депонују на потпорне супstrate. Трећа група је направљена од нанокристала и коришћена као квантне тачке (ночестице са ограниченим електронима). Силицијум је и даље једини материјал који је добро истражен у облику "комада" и у облику "танког филма".

4.1. Монокристалне фотонапонске ћелије

У случају монокристалних ФН ћелија, које су приказане на слици 8, из истопљене масе силицијума се издваја потпуно чист силицијум који кристализује као монокристал, а потом се реже специјалним поступком у веома танке плоче. Оваква ФН ћелија је најквалитетнија и има највећу ефикасност.



Слика 8. Монокристалне фотонапонске ћелије

Ефикасност монокристалних панела се креће између 13% и 19% али је њихова цена највиша.

Они су најефикаснији и најскупљи из разлога што имају висок садржај силицијума. За инсталирање електране одређене величине потребан је мањи број ових панела него када би се за исту електрану користила нека друга врста панела. Монокристални панели су идеални за кровове и за сва остала места где простор представља ограничавајући фактор због високе ефикасности. Соларне ћелије су у облику квадрата са заобљеним ивицама тако да су панели лако препознатљиви.

Техничке карактеристике монокристалних панела:

- Максимална снага ових панела је између 185 W и 305 W
- V_{oc} (напон отвореног кола) = између 35V и 45V
- I_{sc} (струја кратког споја) = између 8A и 9A

Један пример уграђених монокристалних панела је приказан на слици 9.



Слика 9. Приказ уграђених монокристалних панела

4.2. Поликристалне фотонапонске ћелије

Поликристална структура ФН ћелије добија се јефтинијим поступком тако што се течни силицијум лије у калупе, где се кристализује у ситније неправилне кристале, а потом реже у танке плоче. Поликристалне фотонапонске ћелије су приказане на слици 10.



Слика 10. Поликристалне фотонапонске ћелије

Поликристални панели представљају алтернативу монокристалним иако се ради о различитој технологији. Ефикасност им је између 11% и 15% али су јефтинији од монокристалних.

Они имају нешто мању ефикасност због мањег садржаја силицијума и зато су јефтинији за производњу. Тамно плави су са шарама испресецане граничним линијама. Овај тип панела је најзаступљенији. Поликристални панели имају већу стабилност излаза и мању деградацију напона у односу на монокристалне панеле.

Техничке карактеристике поликристалних панела:

- Максимална снага ових панела је између 195 W и 295 W
- V_{oc} (напон отвореног кола) = између 35V и 45V
- I_{sc} (струја кратког споја) = између 8A и 9A

Један пример уграђених поликристалних панела је приказан на слици 11.



Слика 11. Приказ уграђених поликристалних панела

4.3. Аморфне фотонапонске ћелије

Уколико се силицијумски слој наноси у виду филма (дебљина и мања од $1\text{ }\mu\text{m}$) на стакло или неки други материјал-подлогу, добијају се ФН ћелије од аморфног силицијума, најјефтиније и најмање ефикасности, приказане су на слици 12.



Слика 12. Аморфне фотонапонске ћелије

Прву соларну ћелију од аморфног силицијума формирао је 1974. године D.E. Carlson у САД. Прва комеријална a -Si соларна ћелија се појавила 1980. године и имала је ефикасност 3%.

Предности аморфног силицијума за израду соларних ћелија у односу на монокристални силицијум су следеће:

- аморфни силицијум има већи коефицијент апсорције сунчевог зрачења од монокристалног силицијума.
- потребна је знатно мања количина материја у односу на монокристални силицијум.

Недостаци соларних ћелија од аморфног силицијума у односу на соларне ћелије од монокристалног и поликристалног силицијума су следеће:

- a -Si соларне ћелије имају мању ефикасност (5%-7%) у односу на ефикасност поликристалних и монокристалних Si соларних ћелија, неке имају ефикасност и до 8%.
- Приликом осветљења у дужем временском периоду долази до извесне деградације оптичких и електричних карактеристика a -Si соларних ћелија.

На слици 13 је приказан један пример уграђених аморфних панела.



Слика 13. Приказ уграђених аморфних панела

5. ЕФИКАСНОСТ ФОТОНАПОНСКИХ ЋЕЛИЈА

Ефикасност соларне ћелије се може поделити на ефикасност рефлексије, термодинамичку ефикасност, ефикасност одвајања носилаца наелектрисања и ефикасност проводљивости. Укупна ефикасност је производ свих наведених појединачних компоненти.

Због тешкоћа у директном мерењу тих параметара, уместо њих мере се: термодинамичка ефикасност, квантна ефикасност, интегрисана квантна ефикасност, однос V_{oc} , и фактор пуњења. Губици рефлексије су део "спољашње квантне ефикасности". Губици рекомбинације сачињавају део квантне ефикасности, односа V_{oc} , и фактора пуњења. Губици отпора су углавном сврстани под фактором пуњења, међутим такође чине мањи део квантне ефикасности и V_{oc} .

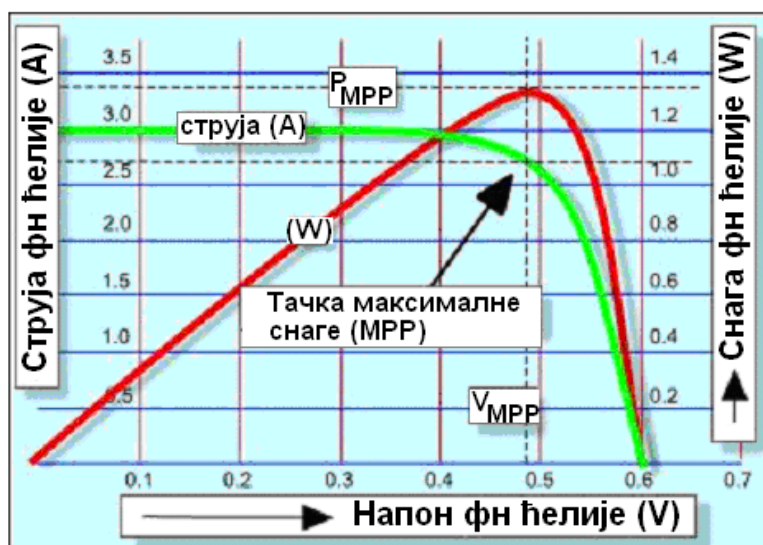
Уређаји од кристалног силицијума се приближавају теоријској граници ефикасности од 29%.

Ефикасност фотонапонске ћелије, η_{pvc} представља однос снаге трансформисане у електричну енергију (снага ФН ћелије), P_{pvc} и снаге Сунчевог зрачења, I_p које пада на површину исте ћелије, A_{pvc} :

$$\eta_{pvc} = \frac{P_{pvc}}{I_p \cdot A_{pvc}}$$

Једначина 1.

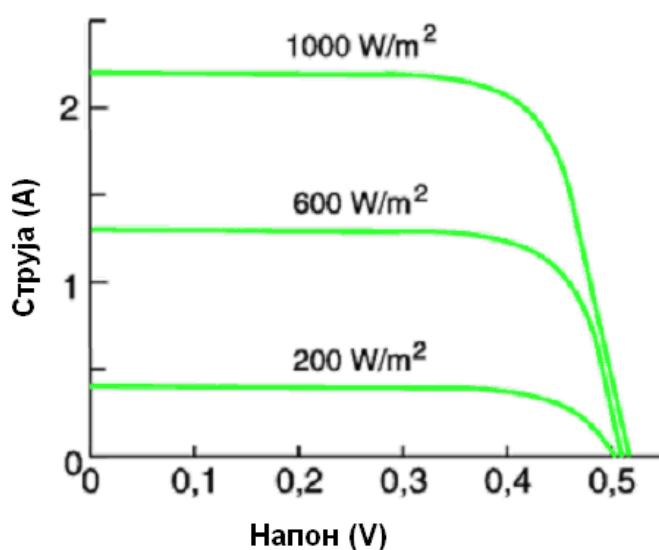
Када ФН ћелија није везана за потрошача добиће се на њеним крајевима напон отвореног кола V_{oc} , а када је ФН ћелија у електричном колу без отпора добиће се струја кратког споја, I_{sc} .



Слика 14. Дијаграм снаге класичне силицијумске ФН ћелије

На слици 14 је приказан дијаграм снаге класичне силицијумске ФН ћелије (10×10 cm) при стандардним условима ($I_p = 1000 \text{ W/m}^2$, температура ћелије $t_{pvc} = 25^\circ\text{C}$, стандардни спектар).

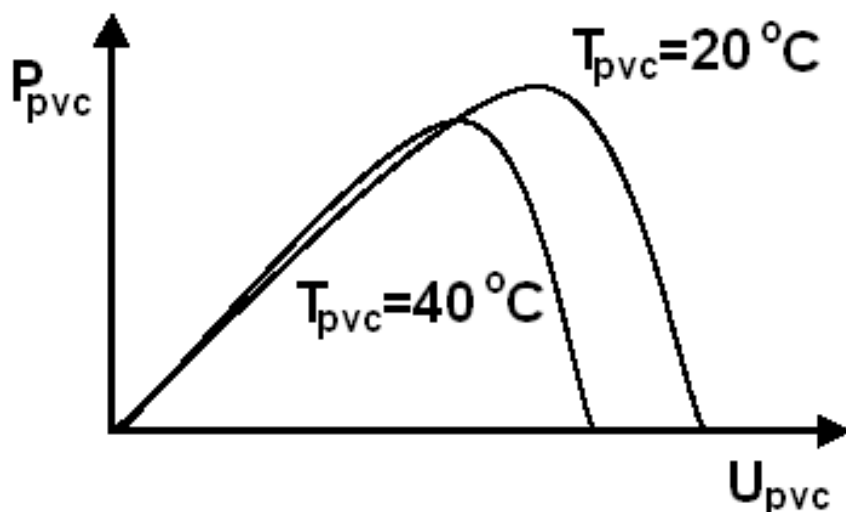
На слици 15 је приказана промена струје и снаге класичне силицијумске ФН ћелије, при различитим интензитетима Сунчевог зрачења.



Слика 15. Зависност снаге класичне силицијумске ФН ћелије од интензитета Сунчевог зрачења (W/m^2)

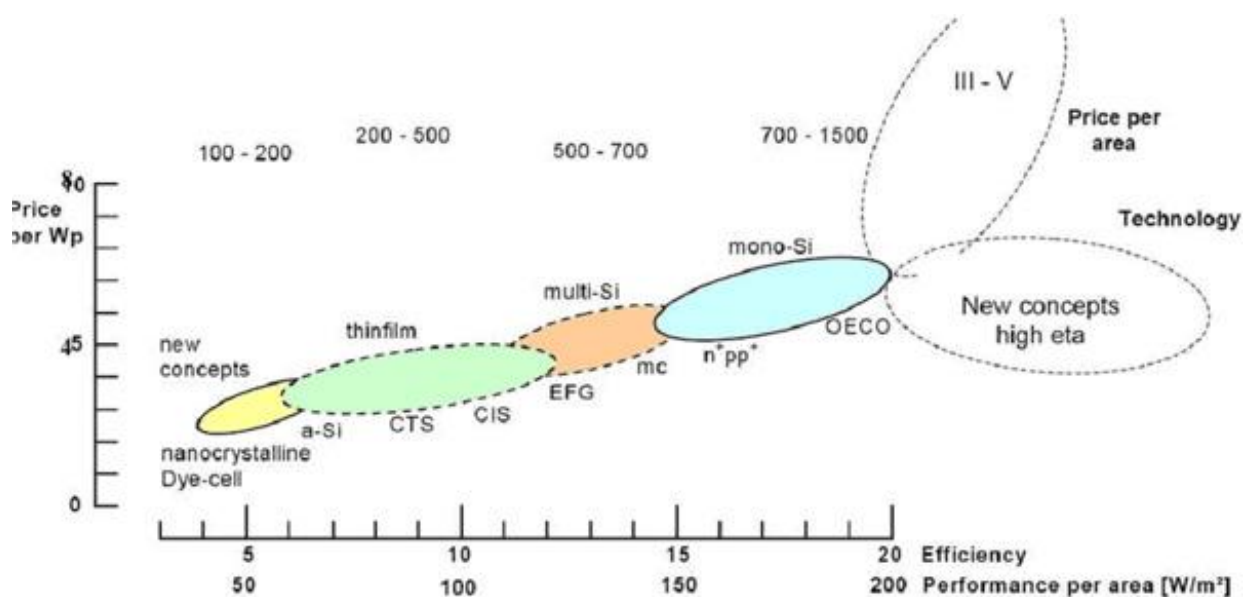
Може се приметити да напон ФН ћелије веома мало зависи од интензитета Сунчевог зрачења, али зато струја снажно зависи од истог фактора, а тиме и снага ФН ћелије.

Снага ФН ћелије опада са порастом њене температуре. Силицијумска ФН ћелија просечно губи 0,3 до 0,4% своје снаге са порастом температуре њене површине за 1 °C. На слици 16 приказана је принципска промена струје и снаге ФН ћелије у зависности од њене температуре.



Слика 16. Зависност снаге ФН ћелије од њене температуре

На слици 17 је дат приказ зависности ефикасности ћелије, цене по W_p и технологије израде. Иако је распон у цени велики сви типови се експлоатишу. Може се очекивати пад у цени снаге ($\$/W_p$). Силицијумске соларне ћелије су комерцијално најзаступљеније, деле се према кристалографској структури: монокристалне, поликристалне и аморфне. Монокристалне соларне ћелије су најскупље али зато је њихов коефицијент ефикасности до 18%, поликристалне до 15% и представљају алтернативу монокристалним (мада је технологија потпуно различита), док аморфне соларне ћелије имају најнижу ефикасност свега 8% али зато је њихова цена најмања. Аморфни силицијум је погодан за наношење на разне материјале тако да се производе и ћелије са променљивом планарношћу (наноси се на пластичне филмове).



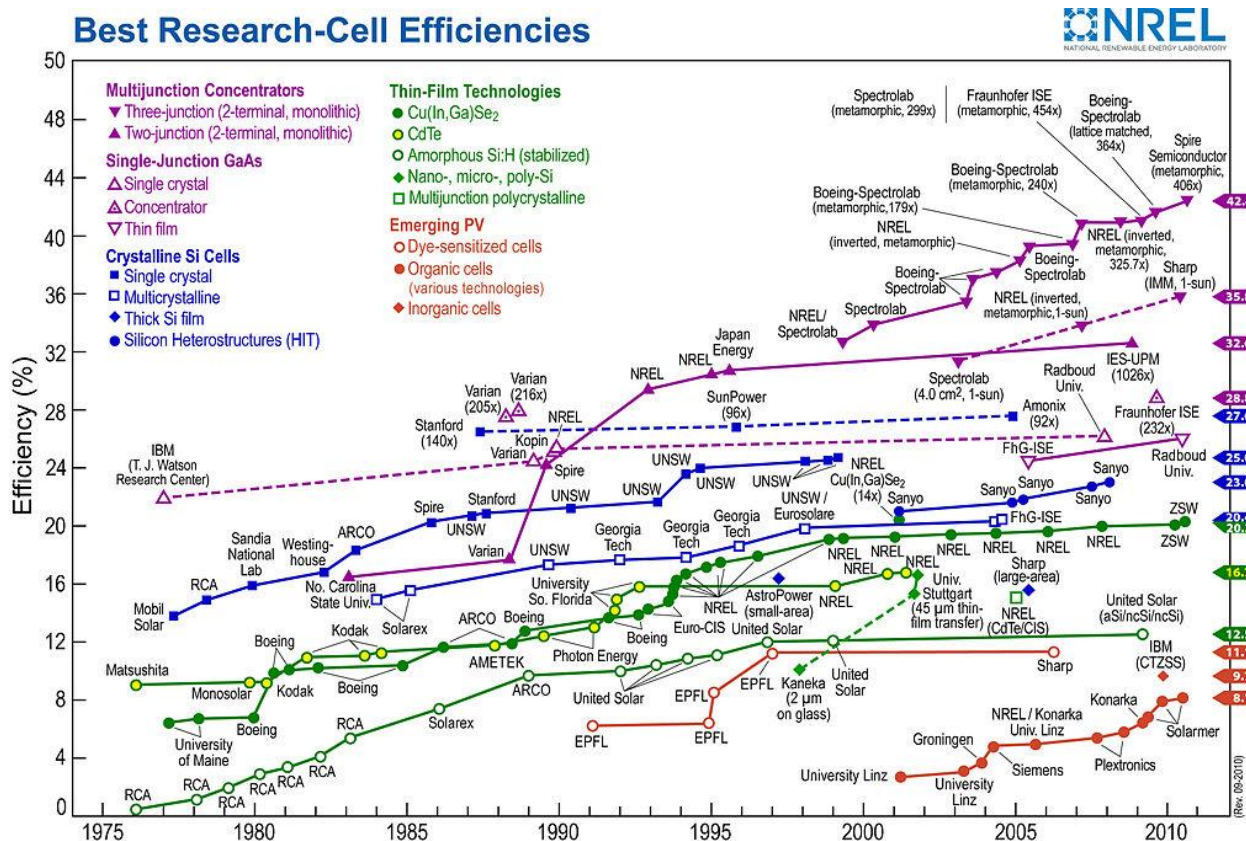
Слика 17. График ефикасности и цене соларних ћелија у функцији технологије

Основна предност соларне ћелија од монокристалног силицијума је њена велика ефикасност, (око 15 % је ефикасност комерцијалних монокристалних ћелија, а лабораторијских око 24%). Неки светски поризвођачи соларних ћелија данас производе ћелије од монокристалног силицијума и са ефикасношћу од 17%.

Комерцијалне соларне ћелије од поликристалног силицијума имају ефикасност 14%, а лабораторијске око 18%. Неки произвођачи соларних ћелија их производе са ефикасношћу од 17%.

Аморфне силицијумске соларне ћелије имају мању ефикасност (5%-7%) у односу на ефикасност поликристалних и монокристалних Si соларних ћелија, неке имају ефикасност и до 8%.

Ефикасности су приказане су на слици 18. Графикон приказује највише лабораторијске ефикасности добијене за разне материјале и технологије. Обично се мери на врло малим ћелијама, око 1 cm². Комерцијалне ефикасности су значајно ниже.



Слика 18. Приказ ефикасности за разне материјале и технологије

6. ЦЕНА

Цена соларне ћелије се даје по јединици максималне електричне снаге. Трошкови производње нужно укључују и цену енергије потребне за производњу. У свету тарифе за предају соларне енергије у мрежу варирају, чак и унутар исте земље. Такве тарифе могу бити веома ефикасне у подршци развоја пројеката соларне енергије.

Соларне ћелије високе ефикасности су од интереса у погледу смањења трошкова соларне енергије. Многи трошкови соларне електране су пропорционални површини електране; ћелије веће ефикасности могу умањити површину и цену електране, чак и ако су ћелије саме по себи скупље. Ефикасност самих ћелија, да би биле корисна у процењивању економичности соларне електране, се мора вредновати по реалним условима. Основни параметри су струја кратког споја и напон празног хода.

Јевтина фотонапонска ћелија је ћелија од танког филма намењена производњи електричне енергије по цени упоредивој са ценом традиционалних извора енергије (фосилна горива и нуклеарна енергија). То укључује фотонапонске ћелије друге и треће генерације, које су јефтиније од прве генерације (ћелије од кристалног силицијума, такође зване вафер или масовне ћелије).

Паритет мреже, тачка у којој је фотонапонска енергија једнака или јефтинија од цене енергије мреже, може се досегнути употребом јефтиних соларних ћелија. Најприје је остварен у подручјима с обиљем сунца и скупом електричном енергијом, попут Калифорније и Јапана. Паритет мреже је досегнут и на Хавајима и другим острвима која иначе користе дизел за производњу енергије. Џорџ В. Буш је поставио 2015. као годину паритета мреже у САД. У говору на конференцији 2007., главни инжењер Генерал Електрика је предвидео да ће се паритет мреже без субвенција постићи у сунчаним дијеловима САД-а око 2015. године.

Цена соларних панела је континуирано падала током задњих 40 година, до 2004. када су високе субвенције у Немачкој тамо драстично повећале потражњу, и значајно повећале цену пречишћеног силицијума (који се користи и у рачунарским чиповима). Једна истраживачка компанија предвиђа да ће нови производни капацитети, који су почели радити 2008.г. снизити цене за 70% до 2015. године. Други аналитичари упозоравају да би капацитети могли бити успорени због економских разлога, али да ће потражња пасти ради мањих субвенција. Остала потенцијална уска грла су капацитет индустрије израде полуга силицијума и њиховог резања на плочице, те снабдевање специјалним хемикалијама коришћеним за облагање ћелија.

7. ПРИМЕНА

Соларне ћелије се често електрично спајају и затварају у модуле. Фотонапонски модули углавном имају стаклену плочу спреда (према сунцу), пропуштајући светло и у исто време штитећи полупроводник од огреботина и утицаја ветром ношених честица, кише, града, итд. Соларне ћелије су такође често серијски спојене у модуле, стварајући збирни напон. Ако се споје паралелно, то формира већу струју. Модули се затим међусобно спајају, серијски или паралелно, или на оба начина, да би се створило поље са жељеним вршним вредностима истосмерног напона и струје.

Како би се практично искористила енергија добијена од сунца, електрицитет се најчешће предаје у електричну мрежу употребом инвертора, та је то фотонапонски систем спојен на мрежу. У самосталним системима за чување енергије која тренутно није потребна користе се батерије. Соларни панели се могу користити за погон или пуњење преносивих уређаја.

Примена ФН соларних ћелија данас је доста раширена и постаје све раширенија. ФН ћелије се могу видети као извори напајања паркиралишних аутомата, или на калкулатору као помоћни извор напајања. Користе се и као извори напајања на вештачким сателитима и свемирским станицама, слика 20. Користе се и у декоративне сврхе као нпр. у Задру (инсталацији Поздрав Сунцу). Такође се користе за производњу електричне енергије у соларним електранама као што је приказано на слици 19.



Слика 19. Фотонапонска соларна електрана Серпа у Португалу снаге 11 MW



Слика 20. Фотонапонске соларне ћелије напајају Међународну свемирску станицу електричном енергијом

Један од примера примене соларне енергије је и први на свету Јавни соларни пуњач за мобилне телефоне и друге преносиве уређаје Strawberry Tree. Овај уређај је изумела, пројектовала и направила група студената Београдског Универзитета, која је касније оформила и компанију Strawberry energu. За ову иновацију, Strawberry energu је освојио прво место на манифестацији "Недеља одрживе енергије 2011" у Бриселу у категорији смањења јавне потрошње. Тренутно је Strawberry energu постављено у следећим градовима: Обреновцу, слика 21, Београду (на општини Звездара, у Ташмајданском парку названо Strawberry Tree Black, новог дизајна од стране архитекте Милоша Миливојевића и на тргу Славија названо Strawberry Tree Flow, по дизајну Тамаре Швоње и Војина Стојадиновића, Новом Саду, Кикинди, Врању, Бору, Ваљево и два у Бијељини у Босни и Херцеговини. Strawberry energu је развио и мали преносиви соларни пуњач Strawberry Mini, који се може склапати, расклапати и превозити уз помоћ уграђених точкића. У Strawberry Mini је уграђен и екран осетљив на додир (енгл. Touch screen) са еко апликацијом где се корисници могу едуковати о обновљим изворима енергије. За потребе подручја без приступа електричној енергији, Strawberry energu осмислио је и други модел преносивог соларног пуњача Strawberry Mini SOS, који поред каблића за пуњење мобилних телефона има и две утичнице за друге уређаје

мање потрошње, SOS дугме за позив у случају хитних ситуација као и двоструко LED осветљење.



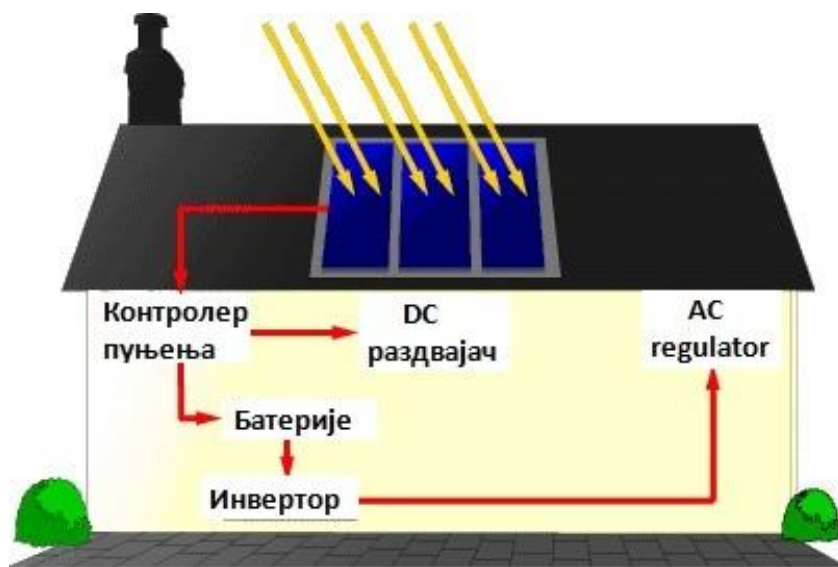
Слика 21. Јавни соларни пуњач мобилних телефона Strawberry Tree постављен у октобру 2010. године у Обреновцу

Заправо, једна од најчешћих примена ФН сунчаних ћелија је напајање електричном енергијом уређаја, индустријских објеката, домаћинстава на местима где нема електричне енергије, на локацијама које су удаљене од електроенергетског система или је јефтиније уградити фотонапонски систем него направити инсталације за напајање из електроенергетског система. Фотонапонски систем чине фотонапонске ћелије спојене са батеријама и потрошачем.

Постоје покушаји да се ФН ћелије користе у транспорту. У Аустралији се на пример сваке године одржава трка соларних електричних аутомобила (енгл. Australia World solar challenge). Деоница трке се протеже преко целог аустралијског континента.

8. УГРАДЊА

Како соларна електрана тако се данас све више користе соларни системи у домаћинствима, трговачким молловима, испитним станицама, итд. Тако се обезбеђује делимична или потпуна аутономност напајања. Чак се савремен дизајн објеката пројектује у складу што веће експлоатације Сунчеве енергије (директно или индиректно). На слици 22 је дат пример једног домаћинства у коме је инсталиран систем панела.

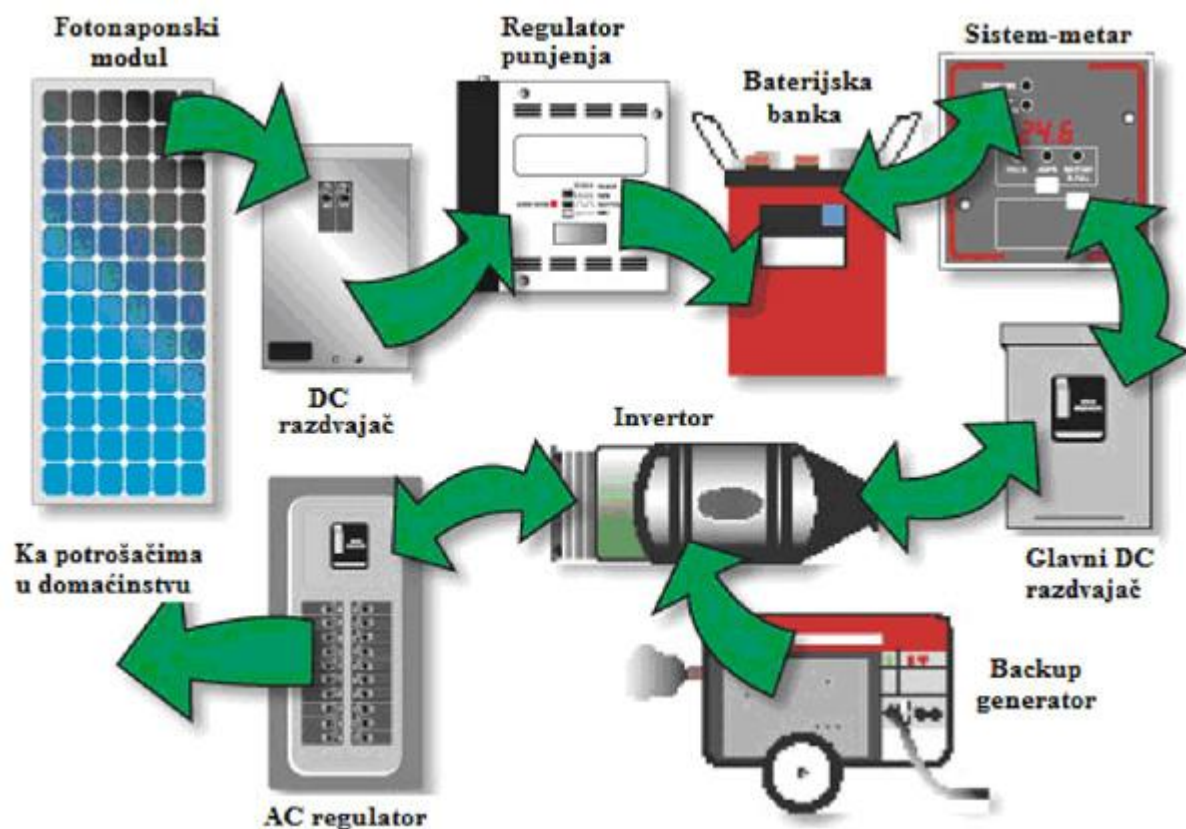


Слика 22. Блок шема соларног модуларног система у домаћинству

Битно је нагласити да се конверзијом соларне енергије у електричну добија DC (једносмерни) режим, при чему је за рад неких уређаја у кући потребно трансформисати у AC (наизменични). Код оваквих система развила су се два начина повезивања:

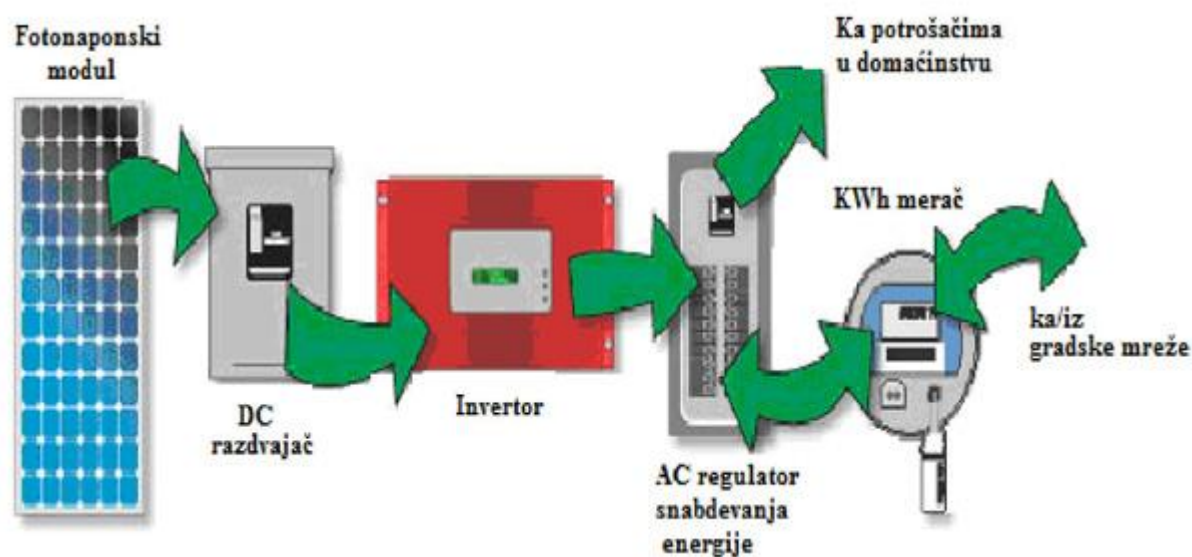
- Самостални извор енергије или "off-grid"
- Повезан извор на дистрибутивну мрежу или "on-grid"

Off-grid систем је погодан за напајање тамо где је немогуће или јако тешко допремити дистрибутивни систем. Мада како он обезбеђује потпуну самосталност експлоатације електричне енергије то је и елиминисано финансијско оптерећивање корисника (изузев у времену отплате). 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. Додатно снабдевање може дати и прикључени генератор као опциони извор снаге. Овакав систем је скупљи, бар за 30% јер батеријска банка доста кошта и њихов радни век износи 5-15год (зависи од начина експлоатације). На слици 23 виде се делови система и њихова међусобна повезаност.



Слика 23. Off grid PV соларни систем

„On-grid“ систем је фотонапонски систем повезан на дистрибутивну мрежу од које се допуњује до потребне снаге или се шаље вишак произведене снаге (нпр. принцип негативног бројила: када се шаље бројило одузима потрошену енергију и тако смањује рачун), слика 24. Обезбеђују нормално снабдевање електричне енергије независно од доба дана, годишњег доба и климатских услова. Овакав систем захтева додатне уговоре са агенцијом за дистрибуцију електричне енергије, и може у многоме убрзати период отплате целог фотонапонског система.



Слика 24. On grid соларни систем

Битна разлика јесте неопходност батеријске банке и додатног генератора чиме се укуна цена у многосте смањује и време повраћаја новца скраћује. Поред ових погодности, у многим земљама постоје субвенције (Feed-in tariff-е у Србији у) за домаћинства која желе да поставе фотонапонске системе и на тај начин растерете енергетски систем земље. Такав начин финансирања даје време отплате од 5-12 година зависно од цене струје и инсталиране снаге. Постоје системи где се комбинују ова два али њихова цена је највећа (мада се мало брже отплаћује него „off-grid“).

За пројектовање или куповину соларних панела потребно је познавати енергетске потребе домаћинства (ако је домаћинство у питању) на месечном плану за „on-grid“ систем и/или максималну могућу захтевану снагу домаћинства за „off-grid“ систем. То се постиже пописом снаге свих електричних уређаја и анализом њихове паралелне експлоатације. Пример једног таквог пописа је приказан на слици 25.

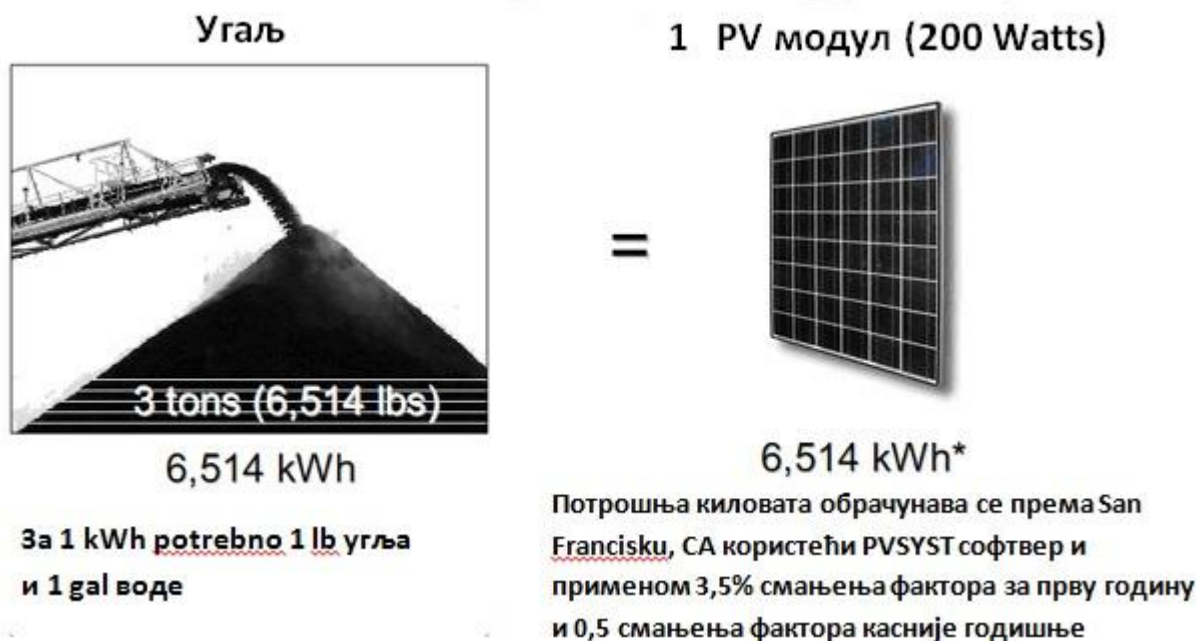
Уређај	Снага (W)
Фриџидер	130
TV	60-250
Radio	15-80
Pegla	1500
Telefon (elektonski)	10-20
Mašina za pranje veša	450-600
Mašina za pranje sudova	1500
Mikrotalasna peć	750
Peć	1200-1500
Toster	1200
Kompjuter i monitor	140-200
Fen za kosu	1000-1500
Usisiač	1200-2000

Слика 25. Попис снаге електричних уређаја

Поред тога битно је познавати и средњи број еквивалентних сати у дану за дати месец и дату географску локацију, али разумевање да је интензитет зрачења највећи у подне $\pm 3h$, као да и зависи од климатских промена у току дана. За пројектовање „off-grid“ система узима се најгори случај (зимски период) како би се обезбедло стално снабдевање електричном енергијом, док за „on-grid“ систем се узима средња вредност за све месеце (мада пројектовање соларног напонског система зависи од захтева потрошача). Еквивалентне сате сијања Сунца могуће је прочитати са соларних карти.

Поред економског аспекта јавља се и еколошки аспект који постаје доминантан услов за очување екосистема. Нарушавање природе данас је постало интензивно тако да се појава алтернативних извора енергије намеће као решење глобалног проблема. Емисија CO₂ повећава његову концентрацију у атмосфери док то доводи до акумулирања топлоте и пораста средње температуре планете (спречава се одвођење топлоте у космос-ефекат стаклене баште). Као главни узроци емисије угљендиоксида јесу сагоревачи фосилних горива. Зелена енергија а као њен највећи извор соларна енергија ублажавају настале последице и обезбеђују да се природа сама обнови. Соларна енергија је чиста енергија, без емисије штетних гасова, и испуштања отпадних вода. Зато се при пројектовању соларних електрана поред снаге и годишње

енергије коју произведе, увек ради прорачун у количини фосилних горива потребних за производњу исте електричне енергије и колико се тона угљендиоксида тиме избегне да се емитује у атмосферу. На слици 9. дат је пример колико тона угља је еквивалентно производњи енергије за један модул снаге 200W за специфицирану локацију на годину дана. Даље једна соларна електрана у Севиљи годишње произведе 23GWh електричне енергије чиме је избегнуто емитовање 16,000t угљендиоксида.



Слика 26. Поређење соларне енергије и енергије фосилног горива

9. ЗАКЉУЧАК

Фотонапонска ћелија је полупроводнички уређај који претвара Сунчеву енергију у електричну. Групе тих ћелија формирају соларне панеле.

Соларни панели се могу правити од различитих материјала, који имају различиту ефикасност и цену. Најчешће су монокристални, поликристални и аморфни.

Основна **предност** је то што је свуда присутна сунчева енергија, бесплатна је и у неограниченим количинама је. Додатно, нема испуштања CO₂ и других гасова на бази сумпор-диоксида као код електрана на фосилна горива. Присутна је и независност од увоза фосилних енергената, уз напомену да је, у случају фосилних горива. Код изградње постројења, реч је о једноставним грађевинско-електромонтажним радовима уз минималне трошкове за одржавање постројења. Раде без потребе за додатним флуидима – посебно водом и дуг им је радни век, 20-30 година

Основни **недостатак** је у томе што соларне енергије има само преко дана, практично око 6-7 сати дневно током целе године, чиме се отвара проблем складиштења енергије. Код постојећих соларних постројења проблем се решава на два начина:

- Уградњом акумулаторских батерија, које зависно од капацитета обезбеђују дужину аутономног рада соларног система.
- Прикључењем на постојећу електро-дистрибутивну мрежу као допунско напајање, када се енергија не производи у соларним постројењима. Овако конципирана постројења преко ноћи користе енергију из електро мреже.

Да би се добијена једносмерна струја претворила у наизменичну потребно је уградити инверторе који додатно оптерећују цену, kWh произведеног у соларним постројењима.

Недостатак је и у томе што соларне електране са фотонапонским ћелијама захватају велике површине које се мере квадратним километрима па њихова изградња може бити рентабилна само на земљишту које се неће користити за друге сврхе.

Што се тиче **исплативости**, енергија добијена из соларних постројења је 3-4 пута скупља од енергије произведене у електранама са фосилним горивима. Просечна тренутна цена kWh из соларних постројења износи 0,25-0,5 E/kWh, зависно од региона где је соларно постројење изграђено. Разлог је и у још увек релативно високој произведеној цени фотонапонских ћелија. У структури трошкова постројења, соларне ћелије учествују са око 50%. Тренутна цена соларних ћелија у малопродаји на европском тржишту износи 3-4 E/W. Утешно је да цене соларних ћелија падају, у просеку, 5% годишње. Цене у великопродаји за већа соларна постројења ниже су и износе око 1,8-2,5 E/W. Кинеске фирме које преузимају вођство у производњи фотонапонских ћелија у свету нуде соларне ћелије у малопродаји по цени од 1,5 E/W.

Тренд у већини европских држава и у Србији је да се, због ефекта стаклене баште, што више користе обновљиви извори енергије. Да би охрабрили инвеститоре и физичка лица да уграђују соларна постројења, већина европских држава, укључујући и Србију, уводе специјалну тарифу, која подразумева да власник соларног постројења, уколико испоручује соларну енергију произведену у соларном постројењу електро-дистрибутивном предузећу, наплаћује од електродистрибуције реалну цену произведене енергије, тј. 0,19-0,34 E/kW. У ноћним сатима, када користи енергију из мреже, плаћа је по 3-5 пута нижој цени, тј. локалној цени електричне енергије.

Група професора са токијског универзитета израдила је анализу градње врло великих фотонапонских соларних електрана у пустињама света. Прва реченица у студији гласи: „Да би се сачувала Земља, потребно је изградити велике фотонапонске соларне електране снаге 100 MW у просторима светских пустиња: Сахаре(Африка), Негева(Израел), Тара(Индија), Соноре(Мексико), Great Sandy(Аустралија) и Гоби(Кина). “

Литература

1. Н. Лукић, М. Бабић, Соларна енергија, Машински факултет, 2008. Крагујевац
2. http://sr.wikipedia.org/sr/Solarna_%C4%87elija
3. http://sr.wikipedia.org/wiki/solarna_energija
4. http://www.beatriceco.com/bti/porticus/bell/belllabs_photovoltaics.html
5. <http://www.solarnipaneli.org/>
6. <http://www.solarni-sistemi.co.rs/srpski/fotonaponski-sistemi/osnovni-elementi-sistema/solarni-paneli/>
7. http://www.logo.rs/solar_tipovi.htm
8. <http://www.planeta.rs/43/11%20energija.htm>