

ЕНЕРГИЕН ФОРУМ 2024

ИНОВАТИВНИ ЕФЕКТИВНИ РЕШЕНИЯ ЗА PV КЛЕТКИ И PV МОДУЛИ

Антон Адамов

Abstract. In the last 3÷4 years, there has been an emphasis on ultra cheap solar power production. Projects like “Solar 30,30,30” have been receiving more funding. There has been a development in the perovskite-silicium cells, as well as a new TOPCon technology. Some researchers also found alternatives and developed cells which use (CdTe) and (FeSi₂). However, a big breakthrough was made with triple junction all-perovskite cells, which managed to score 26.24% efficiency. Perovskite-perovskite-silicon triple junction solar cells also have the potential to reach 44.3% efficiency.

ВЪВЕДЕНИЕ

Преминаването към n-тип технология е основна тенденция във фотоволтаичното развитие на клетки и модули след 2022г. Това е продиктувано както от фактори, свързани с мощността и техническите характеристики на PV елементите, така и със цената им. Технологиите от n-тип като хетеропреход (HJT), отдавна са демонстрирали превъзходни енергийни добиви и ефективност на преобразуване, докато технологиите от p-тип- пасивиран емитер заден контакт (PERC), успяха да постигнат висока производителност на доста по-ниска цена. Теоретичната граница на ефективност на PERCоп клетките е 24,5%, поради което много производители се обръщат към TOPCon технологиите (тунелен оксиден пасивиран контакт), а други възприемат HJT технологията за n-тип пластини. При тези подходи, ако потреблението на сребро за метализацията на клетките бъде намалено, ще се получи много добър финансов ефект. През август 2021г., китайския производител Haysun, използващ технологията HJT, обяви че е изравнил световния рекорд за ефективност на клетката от 25,26% във формат M6 (166 mm) [2]. Тази ефективност надминава възможностите, които p-тип PERC клетката може да постигне.

Hausun използва микрокристални и нанокристални слоеве на база аморфен силиций, който абсорбира голямо количество светлина. Това е основната причина ефективността на HJT в настоящия момент да е равна на ефективността на TOPCon. През юни 2022г. китайския гигант на монокристални слитъци и пластини Longi, надмина HJT рекорда на Hausun, достигайки ефективност 26,5% за пластина M6. [2] Въпреки тези рекорди клетките с хетеро-преход HJT, производствените обеми на тези клетки в световен мащаб, са далеч под обемите на TOPCon технологиите. В авангарда е китайската Jinko Solar, която разполага с около 16 GW модулен капацитет TOPCon с тенденция да достигне 20 GW [3]. Модулът Tiger Neo на Jinko има ефективност 21,82%, с мощности до 625 W във формат 78 пълни клетки. Canadian Solar произвежда клетки M10 (182 mm) и G12 (210 mm) и има за цел да постигне 25% ефективност на производствените линии TOPCon. Китайската Trina през август 2022г. постигна ефективност 24,24% за клетка TOPCon, тип N на пластина G12 [3], като фирмата за 2022г. нарупа близо 20 GW капацитет на тази технология.

ИЗЛОЖЕНИЕ

В последните 3÷4 години в развитието на PV технологиите се утвърди идеята за т.н. ултра евтина слънчева енергия (ULCS), която се лансира в най-силна степен от Австралийската агенция за възобновяема енергия (ARENA), осигурила финансиране от близо 30 млн. \$ през 2022г. [1]. Основната цел на финансирането е да се подкрепят проекти по формулата “Solar 30,30,30”, за постигане на 30% ефективност на модулите, цена 30 цента за инсталиран ват с хоризонт до 2030г. Финансирането се състои от два потока и е предоставено на изследователски екипи от Университета на Нов Южен Уелс (UNSW), Университета на Сидни (USYD) и Австралийския национален университет (ANU). Първия поток от около 20 млн.\$ е предназначен за иновации в клетките и модулите, а втория в обем от около 10 млн. \$ е посветен на изследвания върху баланса на PV системите, операции и поддръжка (BOS).

USYD и техния търговски партньор Sun Drive застъпват тезата за изключително перспективно развитие на тандемните клетки “перовскит - силиций”. Те прогнозираат, че ефективността, която може да бъде постигната от тандем перовскит - силиций в

лабораторни условия за момента е над 30%, докато максимума на самостоятелна силициева клетка е под 27% в лаборатория и около 23% при търговско приложение. Счита се, че теоретичната граница за силиция е само 30%, докато за тандем перовскит - силиций е 40%.

UNSW разработва проект, който комбинира перовскит (PERC) и TOPCon клетки в нова технология, наречена Rear-Junction p-type PERC/TOPCon хибридни слънчеви клетки (RY-PERP) [1].

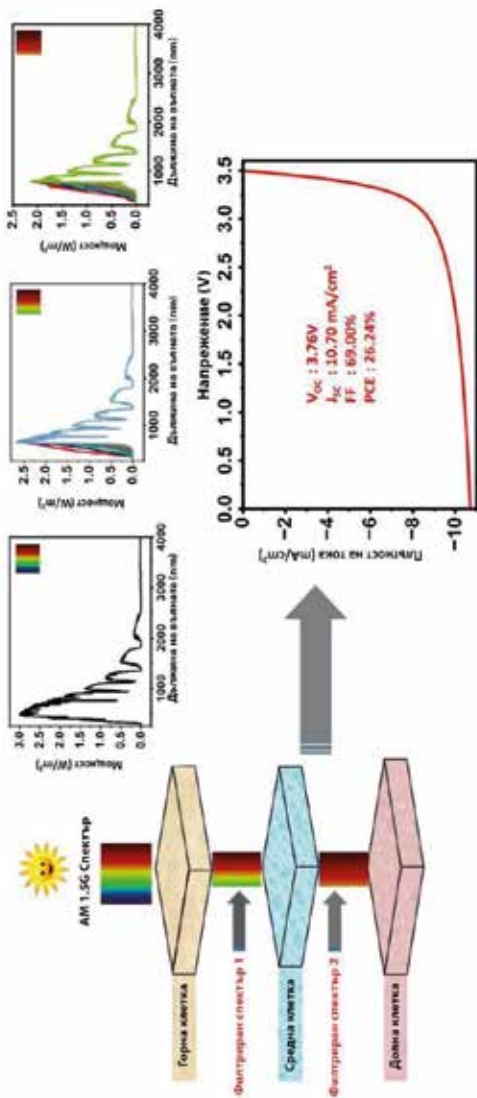
ANU ще усвоява проект на стойност около 4 млн.\$, целящ развитието на монокристална силициева - перовскитна тандемна (SPT) технология чрез разработване на под-клетка, която е толкова ефективна и стабилна, колкото и перовскитната под-клетка, използвана в SPT [1].

В потока BOS се разработват проекти свързани с автоматизиране и индустриализиране на процесите по изграждане на PV комплекси, а също така за оптимизиране на търговските системи за мониторинг на фотоволтаични инсталации и за усъвършенстване на методите за дневна инспекция и алгоритмите за обучение на персонала [1].

Фирма Aiko постигна модулна ефективност от 24,27% на клетките PERC по концепцията TOPCon от n-тип и технологията за заден контакт. При тези технологии, както беше отбелязано, проводници се поставят отзад (заднен контакт), с което активната част на клетката се увеличава с 4%. Термина TOPCon означава, че контактите на гърба на клетката са изцяло "пасивирани", което позволява да се намалят загубите. Друго предимство на тази т.н. "ABC" технология, е че за производството на модулите не се използва сребро и че е увеличен добива на производствената линия благодарение на по-малко реализирани отпадъци. Фирмата е постигнала 4 евроцента за kWh на електроенергия за 20 годишен период. Иновациите във фирмата се постигат от 3000 служители, което е една четвърт от персонала [4].

Група изследователи, ръководени от Технологичния университет в Читкара (Индия), са проектирали изцяло перовскитна тандемна слънчева клетка с три връзки (3J-APTSC), която според тях може да постигне ефективност на преобразуване

на енергията от 26,24% [6]. Изцяло перовскитните фотоволтаични устройства имат предимство, изразяващо се в ефективното използване на слънчевата светлина в широк диапазон от дължини на вълните.



Фиг.1. Принципна схема и параметри на слънчевата клетка

Учените са използвали софтуера за изследване на слънчеви клетки SCAPS-1D, разработен от университета в Гент, за да симулират новата конфигурация на клетката. Този симулатор на устройства е известен със своята надеждност при моделирането на независими и тандемни слънчеви клетки на две нива (слоя). Досега обаче нямаше метод за симулиране на тандемни слънчеви клетки с три нива, използвайки SCAPS-1D. Така че разработката запълва тази празнина.

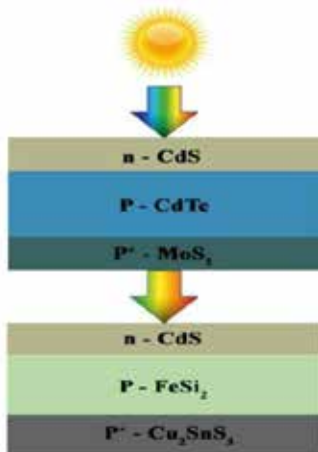
Слънчевата клетка е структурирана от горна клетка с дебелина 287 nm, състояща се от електронен транспортен слой (ETL) на базата на калаен оксид (SnO_2) и бъкминстерфулерен (C_{60}), активен перовскитен слой с честотна лента 1,99 eV и слой за транспортиране на дупки (HTL), изработен от метил-заместен с карбазол (Me-4PACz)- фиг.1.

Междинната клетка с дебелина 500 nm представлява перовскитен абсорбиращ слой с честотна лента от 1,6 eV. Горните и долните подклетки са свързани помежду си чрез слой от индиево-калаен оксид (ITO), който улеснява ефективното транспортиране на светлината между слоевете. Долната клетка с дебелина 670 nm представлява перовскитен абсорбер с честотна лента от 1,20 eV. Работата на клетката е симулирана при стандартни условия на осветление и според учените тя достига забележителни фотоволтаични параметри. Постигната е ефективност $\text{PCE} = 26,24\%$, напрежение на отворена верига $V_{\text{oc}} = 3,76\text{V}$, плътност на тока на късо съединение $I_{\text{sc}} = 10,70 \text{ mA/cm}^2$ и коефициент на запълване $\text{FF} = 69\%$. [6].

Изследователи от университета Радшахи (Бангладеш) са симулирали тандемна слънчева клетка, базирана на две фотоволтаични устройства, които са реализирани върху абсорбери на кадмиев телурид (CdTe) и железен дисицилид (FeSi_2).[5]. Неорганичните слънчеви клетки, базирани на FeSi_2 предлагат превъзходна термична стабилности и добри оптоелектронни свойства в сравнение с конвенционалните слънчеви клетки, още повече, че Fe и Si, използвани за образуване на FeSi_2 , са в изобилие в природата.

Тандемната клетка се възползва от предимствата на комбинацията от по-високата честотна лента CdTe и по-ниската честотна лента FeSi_2 (фиг.2.). Горната клетка трансформира

високоенергийните фотони ефективно, като същевременно минимизира загубите от термизация и предава слънчевия спектър в светлина от близката инфрачервена област към долната клетка: “За да се подобри поглъщането на светлината от решаващо значение е да се намалят нежеланите загуби от повърхностното отражение на Френел”, което е постигнато.



Фиг.2. Структура на тандемната слънчева клетка

Учените са използвали софтуера SCAPS-1D, за да симулират новата конфигурация на клетката. Горната клетка е конструирана с прозоречен слой от кадмиев сулфид (CdS), абсорбатор CdTe и поле на задната повърхност (BSF) на база на молибденов дисулфид (MoS₂). Долната клетка е проектирана с прозоречен слой от n-тип CdS, абсорбатор FeSi₂ и медно-калаен сулфид (Cu₂SnS₃) BSF (фиг.2.). CdTe има честотна лента от 1,5 eV и електронен афинитет от 4,28 eV, докато честотната лента и електронният афинитет на FeSi₂ са съответно 0,87 eV и 4,16 eV. Численият анализ показва, че горната CdTe клетка може да постигне ефективност на преобразуване на енергията PCE = 26,13%, докато долната клетка FeSi₂ може да достигне до 35,25%. Показано е също, че тандемното устройство може да постигне обща ефективност от 43,91%, напрежение на отворена верига V_{OC} = 1,928 V, ток на късо съединение I_{SC} = 25,338 mA/cm² и коефициент на запълване FF = 88,88%. Тези резултати предполагат практическата осъществимост на производството на

високопроизводителни тандемни слънчеви клетки CdTe-FeSi₂ с двойна структура за ефективно преобразуване на слънчевата енергия. [5].

Изследване, проведено от Китайския национален фотоволтаичен център за инспекция на качеството показва, че новите n-тип TOPCon модули, превъзхождат предишното поколение p-тип PERC продукти. Данните, събрани в продължение на шест месеца от фотоволтаична система с фиксиран наклон, показват, че модулите от n-тип произвеждат 3,69% повече енергия и също така претърпяват много по-ниски загуби на производителност [7].

Модулите n-тип на Jinko са сравнени с предишното поколение продукти на компанията, демонстрирайки подобрения в енергийния добив. Преминаването на фотоволтаичната индустрия към n-тип тунелно -оксидни пасивирани контактни клетки (TOPCon) е в ход, като сега се очаква предишното поколение p-тип PERC да излезне от пазара през следващите няколко години.

Националният фотоволтаичен център за инспекция на качеството в Китай е последният, който публикува резултати, илюстриращи производителността на n-тип модули в тази област. Центърът изследва 20 фотоволтаични модула - 10 n-тип TOPCon и 10 p-тип PERC - от китайския производител JinkoSolar и проведе тест, за да сравни тяхното представяне при идентични условия на инсталиране [7].

Всички двуслойни модели, състоящи се от 144 полуклетки, бяха измерени в лабораторията и след това инсталирани на фиксирани наклонени монтажни конструкции под ъгъл от 40 градуса на място в Инчуан, северозападен Китай.

Генерирането на енергия на модулите е наблюдавано с DC измервател на интервали от 1 минута от септември 2022г. до март 2023г. Използвайки данни както от лабораторни, така и от външни измервания се изчисли добива на енергия на ват за всяка технология, JinkoSolar (Група 1 - TOPCon, Група 2 - PERC).

След седем месеца изследване, резултатите показаха, че модулите от тип n (група 1 в табл.4 и табл.5) постигнаха 3,69% увеличение на добива на енергия в сравнение с продуктите PERC.

Модулите също бяха наблюдавани за разграждане, преминавайки през лабораторни тестове за характеризиране преди и след седеммесечния период на инсталиране. Тези изчисления, базирани на разделяне на първоначалната мощност минус мощността след инсталирането на първоначалната тестова мощност, показаха среден годишен процент на влошаване от 0,51% за продуктите TOPCon, в сравнение с 1,38% за продуктите PERC. В табл.4 и табл.5 са представени данни за изследваните седем основни параметри на опитната инсталация [7].

| | Isc(A) | Voc(V) | Imp(A) | Vmp(V) | Pmax(W) | FF(%) | Eff.(%) |
|---------|--------|--------|--------|--------|---------|-------|---------|
| Group 1 | 13.59 | 51.41 | 12.93 | 43.45 | 561.8 | 80.44 | 21.77 |
| Group 2 | 13.68 | 49.54 | 13.00 | 41.33 | 537.3 | 79.30 | 20.82 |

Табл.4 Първоначални резултати от данните от лабораторните изследвания (средно)

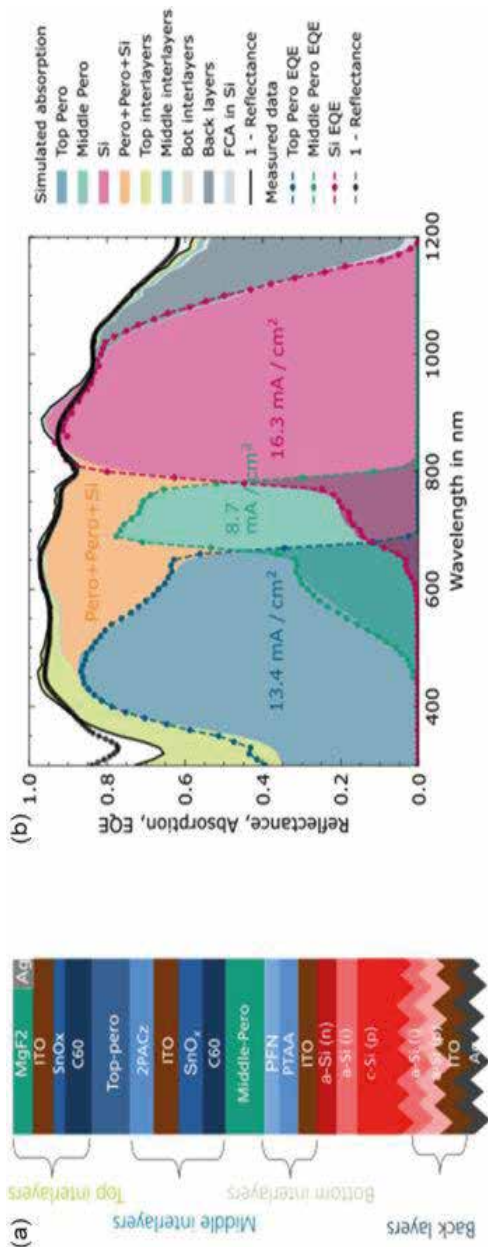
| | Isc(A) | Voc(V) | Imp(A) | Vmp(V) | Pmax(W) | FF(%) | Eff.(%) |
|---------|--------|--------|--------|--------|---------|-------|---------|
| Group 1 | 13.57 | 51.57 | 12.90 | 43.34 | 558.9 | 79.90 | 21.66 |
| Group 2 | 13.63 | 49.14 | 12.94 | 40.95 | 529.9 | 79.14 | 20.53 |

Табл.5 Резултати от лабораторни тестове за период (средно)

Група изследователи в Германия са разработили цялостен оптоелектричен симулационен модел за слънчеви клетки с тройно свързване, базиране на подклетки, изградени съответно на перовскит и кристален силиций [8]. Моделът има за цел да определи пътна карта за ефективност за подобряване на оптичните свойства на тези слънчеви клетки в реалистични гранични условия. Тя включва адаптиране на дебелините на перовскитния абсорбер, модифициране на лентовите участъци, използване на напълно текстурирана клетка и оптимизиране на дебелините на междинните слоеве между абсорберите. Изчислява се съответния фототок на всяка стъпка и се сравнява с теоретичната граница. За моделирането е избран Sentaurus TCAD, който е многоизмерен симулатор, способен да симулира

електрическите, термичните и оптичните характеристики на силициевите устройства. Използва се и за симулиране на оптоелектронните характеристики на полупроводникови устройства, като сензори за изображение и фотоволтаични клетки. Този инструмент вече демонстрира способността си да описва точно оптичните свойства на перовскитните тандемни слънчеви клетки, видно от предишни, подобни изследвания, които са проведени върху перовскитно-силициевите тандемни клетки. Прави се извод, че практическият потенциал за ефективност на преобразуване на мощността на перовскитно-силициевите тандемни устройства може да достигне до 39,5%. [8,9].

Изследователите първоначално са създали трислойна клетка, съставена от долна силициева хетеросъединителна клетка със слой от индиево-калаен оксид (ITO) и контакт със сребърен (Ag) метал, средна перовскитна клетка с енергийна лента от 1,57 eV и горна перовскитна клетка с честотна лента от 1,84 eV. В процеса на оптимизация усилията са насочени към увеличаване на фототока и на трите клетки. Променят се дебелините на трите абсорбера, а след това са регулирани перовскитните лентови сегменти. Освен това се използва текстурирана предна страна, за да се смекчат загубите от отражение и се използват по-тънки междинни слоеве. Адаптирането на дебелините на перовскитния абсорбер е доста просто, но има потенциал да се постигне по-добра съгласуваност между горната и средната клетка. По този начин токът може да бъде подобрен значително. [8].



Фиг.3. Схема и енергийни характеристики на перовскитно-силициева слънчева клетка

Коригира се дебелината на антирефлексното покритие изградено, на базана на магнезиев флуорид (MgF_2), като се намалява дебелината му от 130 nm на 90 nm. Също така първоначално се увеличава дебелината на перовскитния абсорбер на средната клетка, което намалява абсорбцията на фотони в силициевата подклетка, но предлага подобрена абсорбция в горните и средните области, като по този начин се увеличава фототока на ниво клетка с тройно свързване. [8]. Симулацията показва, че най-добрата конфигурация на клетката може потенциално да постигне ефективност на преобразуване на мощността от 44,3% напрежение на отворена верига от 3480 mV, плътност на късо съединение $14,1 \text{ mA/cm}^2$, и коефициент на запълване от 90,1%. Това е постигнато със средна перовскитна клетка с енергийна честотна лента от 1,46 eV и горна перовскитна клетка bandgap от 1,97 eV (фиг.3).

Показано е, че диапазонът на честотната лента на горните клетки може да бъде избран между 1,8 и 2,0 eV, в зависимост от дебелината на горната клетка, варираща съответно между 200 и 800 nm. Повишена е осведомеността за избора на по-дебели перовскитни слоеве с по-висока честотна лента, за постигане на пълния потенциал на напрежението на отворената верига на горната клетка. [8].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развитието на технологиите в близкото бъдеще ще се осъществява постоянно, стъпка по стъпка, с използване на експериментални подходи и софтуерни продукти, предназначени да се симулира конфигурацията на PV клетките. За повишаване на ефективността им е необходимо да се усвоява слънчева светлина в широк диапазон от дължината на вълните. Това може да се постигне чрез конфигуриране на тандемни структури на многослойни фотоволтаични устройства. За целта трябва да се използват материали, притежаващи добри оптоелектронни свойства и повишена термична стабилност. При трислойните тандемни клетки, междинния слой е необходимо да притежава добри свойства за ефективно трансфериране на светлината между горния и долния слой. Използването на сребро се препоръчва да бъде сведено до минимум, а също така новите

технологии се очаква да бъдат безотпадъчни и загубите от терминация и то повърхностното отражение на Френел да се сведат до оптимални стойности. Потвърдено е окончателно, че клетките и модулите от n-тип превъзхождат тези от p-тип, както по отношение на ефективност, така и по отношение на разграждане и остатъчен ресурс. Тенденциите в световен аспект са да се отдава приоритет на технологията TOPCon пред технологията PERC, въпреки, че последната все още е малко поевтина. Освен това тандемните клетки ще се изграждат на базата на перовскит и силиций с многослойни връзки, гарантиращи най-висока ефективност, надхвърляща 40%, стабилност на PV преобразуването и ниска цена.

ЛИТЕРАТУРА

- [1]. Ultra-low-cost solar research projects receive \$41.5 million funding boost (pv-magazine-australia.com)
- [2]. 2022 review in trends: Modules (Part I)(pv-magazine.com)
- [3]. 2022 review in trends:Modules (Part II)(pv-magazine.com)
- [4]. Zellproduktion in Europa: „Man braucht einen Industriestrompreis von vier Cent pro Kilowattstunde über 20 Jahre“ (pv-magazine.de)
- [5]. Una célula solar en tándem basada en teluro de cadmio y disilicio de hierro promete una eficiencia del 43,9% (pv-magazine.es)
- [6]. Indian scientists design 26.24%-efficient triple-junction all perovskite solar cell (pv-magazine.com)
- [7]. Test shows higher yield, lower degradation for n-type solar modules (pv-magazine.com)
- [8]. Perovskite-perovskite-silicon triple-junction solar cells have technical potential to reach 44.3% efficiency (pv-magazine.com)
- [9]. Илиев, И., Обзор и критичен анализ на постиженията в областта на възобновяемите източници на енергия. стр.5 сборник част трета Енергиен форум НТСЕБ 22-25 юни 2016г., ISSN 2367-6728

АВТОР

инж. Антон Йорданов Адамов, Докторант МГУ “Св. Иван Рилски”,
e-mail: a.adamov@abv.bg