

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Навчально-науковий центр заочної форми навчання
(повна назва)

Кафедра Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв
(повна назва)

АТЕСТАЦІЙНА РОБОТА

Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)

на тему: «Дослідження плівкових сонячних перетворювачів»
(тема)

Виконав:

студент 2 курсу, групи ЕППЗм-19-1

Руденко О.В. _____

(прізвище, ініціали)

Спеціальність 171 «Електроніка»

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма «Електронні прилади та пристрої»

Керівник доц. Галат О.Б.

(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри

(підпис)

Бондаренко І.М.

(прізвище, ініціали)

2020 р.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____
- 4.1. Огляд типів та характеристики тонкоплівкових сонячних елементів _____ ;
- 4.2. Порівняльний аналіз тонкоплівкових сонячних елементів та вимоги до них;
- 4.3. Розрахувати вольтамперну характеристику фотоперетворювача _____ ;
- 4.4. Розрахунок основних параметрів фотоперетворювача з параметрами $d_l=62$ нм, $d_l=125$ нм, $d_l=250$ нм, $d_l=500$ нм, $d_l=1000$ нм, $d_l=2000$ нм;
5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри) презентація. _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1.	Аналіз завдання на атестаційну роботу	26.10.19	
2.	Аналітичний огляд методів та конструкцій	30.10.19	
3.	Порівняння напрямків розвитку нових видів сонячних елементів	05.11.19	
4.	Аналіз конструктивних відмінностей тонкоплівкових панелей	17.11.19	
5.	Розрахунки параметрів фотоперетворювача	23.11.19	
6.	Оформлення пояснювальної записки	30.11.19	
7.	Підготовка презентації	06.12.19	
8.	Подання роботи до захисту	09.12.19	

Дата видачі завдання 26 жовтня 2020 року

Студент _____

(підпис)

Керівник роботи _____ доцент Галат О.Б.

(підпис)

(посада, прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка складається з: 96 с., 31 рис., 8 табл., 28 джерел.

ГЕЛІОБАТАРЕЯ, ОСВІТЛЮВАЧ, СКЛЯНА ПІДКЛАДКА, СПЕКТР,
ФОТОЕЛЕКТРИЧНІ ЕЛЕМЕНТИ, ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧ,
ХАРАКТЕРИСТИКА, СТРУКТУРА.

Об'єкт дослідження – плівкові сонячні перетворювачі.

Мета роботи – порівняльний аналіз конструкцій та структур сонячних елементів, знайдення перспективних конструкцій тонкоплівкових сонячних елементів, розрахунок їх характеристик та параметрів.

Метод дослідження – аналітичний метод порівняння характеристик різних сонячних перетворювачів, їх вибір за основними характеристиками: ефективність, термін експлуатації, екологічність, ціновий діапазон.

Моделювання характеристик за допомогою наявних програмних засобів.

Розглянуто декілька типів тонкоплівкових сонячних елементів, виявлено три нові ефективні сонячні технології: двосторонні сонячні панелі, перовскітові матеріали та квантові технології.

Результати роботи можуть використовуватися для вибору та проектування для освітлення як власного житла, так і підприємств.

ABSTRACT

Explanatory note consists of: 96 p., 31 fig., 8 tables, 28 sources.

HELIOBATTERY, LIGHT, GLASS LINING, SPECTRUM,
PHOTOELECTRIC ELEMENTS, PHOTOCERVERATOR,
CHARACTERISTICS, STRUCTURE.

The object of research is film solar converters.

The purpose of the work is a comparative analysis of structures and structures of solar cells, finding promising structures of thin-film solar cells, calculation of their characteristics and parameters.

The research method is an analytical method of comparing the characteristics of different solar converters, their choice according to the main characteristics: efficiency, service life, environmental friendliness, price range.

Modeling of characteristics by means of available software.

Several types of thin-film solar cells have been considered, and three new effective solar technologies have been identified: double-sided solar panels, perovskite materials, and quantum technologies.

The results of the work can be used to select and design lighting for both their own homes and businesses.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	9
ВСТУП	10
1 ОГЛЯД ТЕХНОЛОГІЙ СОНЯЧНИХ БАТАРЕЙ	12
1.1 Розвиток альтернативних джерел енергії	12
1.2 Розподіл енергії сонячного випромінювання та її перетворення	21
1.3 Різновиди сонячних елементів	23
1.4 Фотоефект	28
1.5 Плівкові батареї на основі телуриду кадмію CdTe	30
1.6 Батареї на основі селеніду міді-індію	32
1.7 Полімерні сонячні панелі	33
1.8 Сонячні модулі	34
1.9 Продукція та характеристики полікристалічних та монокристалічних сонячних модулів європейських корпорацій	35
1.10 Технології тонко плівкових сонячних елементів на основі аморфного гідрогенозованого і мікрокристалічного кремнію	44
1.11 Вартість сонячних батарей в Україні, їх раціональність, використання та утилізація	47
1.12 Напрямки розвитку нових видів сонячних елементів	50
1.13 Особливості, переваги та недоліки сонячних елементів	51
1.14 Перспективи розвитку сонячних панелей	57
2 ТОНКОПЛІВКОВІ БАТАРЕЇ	62
2.1 Рулонна технологія виготовлення модулів SE	62
2.2 Виготовлення модулів SE на скляній підкладці	64
2.3 Гнучкі сонячні елементи	67
2.4 Сонячні батареї у вигляді тонкої і прозорої плівки	72

2.5 Конструктивні відмінності тонкоплівкових геліопанелей	74
2.6 Ціни гнучких сонячних панелей	76
2.7 Три нові ефективні сонячні технології	77
2.8 Перспективи провідних компаній-виробників	80
2.9 Основні напрямки підвищення ефективності сонячних елементів	83
3 ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧІВ	85
3.1 Загальні засоби оцінки характеристик фотоперетворювачів	85
3.2 Моделювання структури та характеристик плівкового фотоперетворювача	87
3.3 Результати розрахунків вихідних характеристик фотоперетворювача	89
ВИСНОВКИ	93
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	94
Додаток А Відомість атестаційної роботи	97
Додаток Б Презентація	98

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ВАХ – вольт-амперна характеристика

Втп – пікова потужність у ватах

ЕРС – електрорушійна сила

КЗ – коротке замикання

ККД – коефіцієнт корисної дії

ПХО – плазмохімічне осаджування

СЕ – сонячний елемент

СВ – сонячне випромінювання

СМ – сонячний модуль

СЕС – сонячна електрична станція

ТСО – група стандартів добровільної сертифікації на ергономічність і безпеку електронного обладнання

ФЕ – фотоелектричні елементи

ФЕП – фотоелектричний перетворювач

DSC – третє покоління фотоелектричних джерел струму

DSC – Dye Solar Cell – сонячні елементи з барвником

Sphelar – елементи з кремнієвих сферичних осередків діаметром 1 мм

ТОК – Tokyo Ohka Kogyo

ВСТУП

Людству необхідно все більше й більше енергії, отримати яку за рахунок невідновлюваних джерел у недалекому майбутньому буде важко чи взагалі неможливо. Дійсно, за різними оцінками, розвіданого органічного палива вистачить на 30-50 років. Якщо врахувати так звані геологічні запаси, які будуть своєчасно розвідані, а експлуатація їх не затримується, то, з урахуванням все зростаючого рівня витрат енергії, органічного палива може вистачити ще років на 100-150. Причому тільки вугілля ще довгий час може зберігати своє місце в енергетичному балансі. Проте використання його супроводжується високим рівнем забруднення атмосфери Землі. Ядерна енергетика, яка на сьогодні має значно більше сировинних ресурсів ніж органічне паливо, динамічно розвивалась у світі протягом останніх 20-30 років.

Але сьогодні, на думку багатьох фахівців, вона вже не може вважатися перспективним видом енергії через високий ризик радіоактивного забруднення навколишнього середовища, що проявилось в серії техногенних аварій та катастроф, особливо під час сумно відомої Чорнобильської катастрофи.

Тому у світі все більше звертають увагу на використання так званих відновлюваних джерел енергії - тепла Землі, енергії вітру, припливів та відпливів, біогазу, сонячного випромінювання, тощо. Практично всі ці джерела енергії повністю зумовлені прямою дією Сонця. Серед зазначених джерел одним із найбільш перспективних є пряме перетворення сонячного випромінювання в електрику в напівпровідникових сонячних елементах.

Енергія випромінювання Сонця - є основним джерелом енергії атмосферних процесів; вона вимірюється кількістю тепла і виражається в мегаджоулях на 1м^2 . Промениста енергія Сонця досягає земної поверхні,

проникаючи через шари атмосфери, що частково поглинає, відбиває і розсіює сонячну радіацію.

Оскільки її запаси практично невичерпні (астрономи підраховали, що Сонце буде «горіти» ще кілька мільйонів років), її відносять до поновлюваних енергоресурсів.

Тепловий потік сонячного випромінювання, який сягає Землі, дуже великий. Він більш як у 5000 разів перевищує сумарне використання всіх видів паливно-енергетичних ресурсів у світі.

В наш час перспективними стають тонкоплівкові елементи, тому що вони мають малу товщину, незначні затрати матеріалів та ефективність у використанні [1].

Метою атестаційної роботи є порівняльний аналіз конструкцій та структур сонячних елементів, знайдення перспективних конструкцій тонкоплівкових сонячних елементів, розрахунок їх характеристик та параметрів.

1 ОГЛЯД ТЕХНОЛОГІЙ СОНЯЧНИХ БАТАРЕЙ

1.1 Розвиток альтернативних джерел енергії

Ще в давнину люди замислювалися про можливість вживання сонячної енергії. Перші сонячні батареї, здатні перетворювати сонячну енергію в механічну, були побудовані у Франції. В кінці XIX століття на Всесвітній виставці в Парижі винахідник О. Мушо демонстрував інсолятор – апарат, який за допомогою дзеркала фокусував проміння на паровому казані. Казан приводив в дію друкарську машину, що друкувала по 500 відтиснень газети в годину. Через декілька років в США побудували схожий апарат з потужністю в 15 кінських сил.

Вперше натяк на зв'язок електрики і світла прозвучав у працях шотландця Джеймса Клерка Максвела. Експериментально цей зв'язок був доведений в дослідях Генріха Герца, який в 1886–1889 роках показав, що електромагнітні хвилі поводяться точно так, як і світлові, – так само прямолінійно розповсюджуються, утворюючи тіні. Йому вдалося навіть зробити гігантську призму з двох тонн асфальту, яка заломлювала електромагнітні хвилі, як скляна призма – світлові. Але ще десятьма роками раніше Герц несподівано для себе помітив, що розряд між двома електродами, відбувається набагато легше, якщо ці електроди освітити ультрафіолетовим світлом [1].

Ці досліді зацікавили професора фізики Московського університету Олександра Григоровича Столетова. В лютому 1888 року він приступив до дослідів, направлених на вивчення «таємного явища». Вирішальний досвід, що доводить наявність фотоефекту – виникнення електричного струму під впливом світла, – був проведений 26 лютого. В експериментальній установці Столетова потік електричний струм, народжений світловим промінням.

Фактично запрацював перший фотоелемент, який згодом знайшов численні вживання в самих різних областях техніки.

На початку ХХ століття Альберт Ейнштейн створив теорію фотоелементу, і в руках дослідників з'явилися, здавалося б, всі інструменти для оволодіння цим джерелом енергії. Були створені фотоелементи на основі селену, потім – талієві. Але вони мали дуже малий коефіцієнт корисної дії і знайшли вживання тільки в пристроях управління, подібних звичним турнікетам в метро, в яких промінь світла загороджує дорогу людям без квитків.

Наступний крок було зроблено, коли вченими були детально вивчені відкриті ще в 70–х роках минулого століття фотоелектричні властивості напівпровідників. Виявилось, що напівпровідники набагато ефективніше за метали перетворюють сонячне світло в електричну енергію.

Сьогодні сонячними панелями, розташованими на даху будинку, вже нікого не здивуєш. Сонячна енергетика отримала інтенсивний розвиток в Україні після прийняття закону про Зелений тариф. Це дало можливість не тільки юридичним особам будувати сонячні електростанції з метою продажу отриманої електроенергії за вигідним тарифом. Навіть фізичні особи, маючи ділянку в приватному секторі, можуть встановлювати сонячні панелі і підключати їх до Зеленого тарифу або використовувати електрику для своїх потреб, забезпечивши собі повну енергонезалежність від загальної мережі. Вважається, що розробка першого прототипу сонячної батареї була надбанням італійського фотохіміка. Однак офіційно датою створення цих пристроїв вважається 25 квітня 1954 року. Саме в цей день американська компанія Bell Laboratories офіційно повідомила про вдалу розробку сонячних панелей. Отже, першість в цьому сегменті енергетики визнано за американцями. Починаючи з того часу, сонячні батареї вдосконалювалися і набували поширення у всьому світі. Вони використовувалися тільки як резервні джерела живлення або в тих випадках, коли не було умов отримання електрики іншими способами. Це було обумовлено низьким ККД такого

способу перетворення енергії. ККД сонячних батарей - це таке ж значення, як і в двигунах внутрішнього згорання. Інакше, коефіцієнт корисної дії сонячних батарей визначається в процентному змісті, в залежності від кількості сонячної енергії, що перетворюється в електрику. Перші панелі мали ККД всього 1%. Природно, про їх ефективне використання не могло бути й мови. Тільки після того, як з'явилися батареї з ККД 10-15%, такий спосіб вироблення електроенергії став розвиватися в усьому світі. Сьогодні сонячні батареї стали доступними широкій аудиторії покупців, тому що маючи ККД 15-25%, вони можуть швидко окупити себе, і при цьому відрізняються високою енергоефективністю. Варто зазначити, що високою енергоефективність сонячних електростанцій є не завжди, так як їх робота сильно залежить від зовнішніх факторів. Зокрема, ця енергія не перетворюється в нічний час, а під час сутінків або в похмуру погоду знижується вихідна потужність панелей. Звідси можна зробити висновок, що в літній час сонячні електростанції працюють з самою високою енергоефективністю, за умов наявності прямих сонячних променів. Нагріваючись, фотоелементи працюють ефективно, але і в зимовий час цей фактор теж залежить від погодних умов.

Можливості таких пристроїв визначаються їхньою максимальною потужністю. Відомо, що потужність сонячного випромінювання дорівнює 1000 Вт на 1 м^2 площі. Таким чином, якщо ККД сонячної панелі дорівнює 15%, то 1 м^2 її площі буде виробляти 150 Вт електроенергії. При сході чи заході, а також наявності хмар в небі, цей показник знижується приблизно на 40%, так як сонячні промені потрапляють на поверхню панелі під кутом 30 градусів, а частина енергії поглинається хмарами. Отже, знаючи, скільки сонячної енергії приймають батареї в ясну погоду, можна розрахувати їх кількість, необхідну для забезпечення будинку електрикою. При цьому сумарна площа панелей повинна бути на 40% більше, щоб забезпечити достатню потужність в похмуру погоду або на сході з заходом. Отже, якщо

щоденна споживана потужність будинку становить 6 кВт, то необхідно мінімум 40м² сонячних панелей, щоб забезпечити його електрикою [2].

Станом на січень 2015 року, в Україні діяло 98 СЕС, загальною встановленою потужністю 819 МВт, якими у 2014 році вироблено 485 млн кВт*год електричної енергії. Тобто, Україна має великі перспективи у видобуванні енергії з альтернативних джерел. Адже усе, що необхідно - сонячні промені, які у нашій країні є у будь-яку пору року. Крім того, що сонце є невичерпним джерелом енергії, одним з найголовніших переваг сонячних батарей є їх екологічна чистота. Екологи вважають, що деякі технологічні процеси при виготовленні сонячних панелей дійсно супроводжуються незначними викидом парникових газів (трифториду азоту та гексафториду сірки), що не дозволяє назвати цей вид енергії на 100% чистим. «Однак для перетворення сонячної енергії в електрику зовсім не потрібні традиційні джерела енергії. Що природно істотно знижує рівень шкідливих викидів в атмосферу і не призводить до серйозних забруднень навколишнього середовища», - зазначає співголова Асоціації зелених України, еколог Ярослав Задесенець. Ціна на заваді. Слід також зазначити, що Україна є одним із найбільших у Європі виробників сонячних батарей та компонентів до них. Щоправда, вони є дорожчими за імпорتنі аналоги. Втім, експерти наголошують, що варто заплатити високу ціну один раз та заощаджувати в майбутньому, адже сонячні батареї мають багато переваг і окупляться досить швидко. Та, незважаючи на те, що за останнє десятиріччя ціни на сонячні панелі впали на 85%, українці не поспішають встановлювати у своїх будівлях сонячні батареї. І головна причина цьому якраз ціна. Щороку вона змінюється, адже вартість сонячних батарей оцінюють в доларах. Відтак, 1 кВт сонячної енергії коштуватиме близько 3,5 долара. Якщо ж встановлювати колектори для отримання «зеленого» тарифу, то вартувати вони можуть понад 15 000 доларів. Особливо, враховуючи те, що найчастіше батареї замовляють у Китаї.

Тим більше, що своєрідний «фундамент» у розвиток альтернативних джерел енергії вже закладений Верховною Радою. На початку 2009 року був підписаний Закон про стимулювання використання альтернативних джерел енергії. Закон встановлює спеціальний коефіцієнт «зеленого» тарифу для електроенергії з використанням різних альтернативних джерел енергії, на який множиться звичайний тариф для споживачів другого класу напруги. У випадку енергії сонячного випромінювання, відповідно до закону, коефіцієнт має три можливих значення: для наземних об'єктів електроенергетики — 4,8, установлених на дахах будинків, будинків і споруд із величиною встановленої потужності понад 100 кВт — 4,6, а менш 100 кВт, а також установлених на фасадах будь-якої потужності — 4,4. Закон установлює «зелений» тариф на строк до 1 січня 2030 року [3].

Масовому використанню альтернативного виду енергії, який, на сьогоднішній момент, є найбільш дружнім до природи, на жаль, не сприяє цілий ряд факторів. Серед них - висока вартість. І, як наслідок, тривалий термін самоокупності. Крім того, неможливість використання сонячних батарей в похмурі дні, необхідність установки досить дорогого додаткового обладнання (акумуляторів, інверторів і т. д.), мала щільність потужності тощо. Все перелічене дозволяє використовувати енергію сонця тільки як допоміжний вид електроенергії. Втім, визначні економісти світу давно зрозуміли, що інвестиції у цю галузь дають багато переваг. По-перше, це заміна імпортованих енергоресурсів на місцеві та, зрештою, енергетична незалежність.

По-друге, виконання своїх зобов'язань та планів зі зменшення викидів парникових газів та забруднювачів. По-третє, це створення багатьох тисяч робочих місць: продаж, монтаж, сервіс сонячних станцій, який вимагає наявності спеціалізованих місцевих компаній. Незважаючи на те, що ціни на сонячні батареї в Україні та Європі суттєво не відрізняються, у країнах ЄС їх популярність зростає з кожним роком. Експерти кажуть, що ситуація

зумовлена тим, що за кордоном забезпеченням видобутку енергії з альтернативних джерел займається держава. Крім того, більшість країн світу створюють привабливі умови для інвесторів та простих громадян.

Найпопулярніший інструмент - це «зелений» тариф, він, до речі, діє і в Україні. Це гарантований тариф, за яким виробники сонячної енергії продають її державі.



Рисунок 1.1 – Переваги сонячних батарей

Такі умови зменшують період окупності сонячних станцій та забезпечують заробіток у майбутньому. Також у світі поширена практика надання пільгового кредитування, чого в Україні, на жаль, немає. Еколог Мирон Колодко вбачає головну проблему саме в неспроможності нашої держави забезпечити людей хоча б вигідними кредитами, не кажучи вже про компенсування витрат: «Потрібно, щоб держава сприяла видобутку

альтернативної енергії. Один зі способів надання низько відсоткових та довготривалих кредитів. Можна створити спеціальний орган, який би займався цим питанням. Тоді популярність сонячних батарей зростає в рази, а поки українці не мають грошей на встановлення колекторів». Найбільша перевага використання сонячної енергії - її доступність, бо навіть взимку на вулиці сяють сонячні промені, які зможуть виробити хоча б мінімальну кількість необхідної енергії. До того ж, дійсно великий термін експлуатації, внаслідок чого – бездоганна окупність. Якщо розділити вартість встановлення фотоелементів на кількість років, які вони можуть простояти, економія стає відчутною. Автономна сонячна батарея може виробляти достатню кількість енергії, аби задовольнити побутові потреби. Крім того, батарея забезпечує повну незалежність енергосистеми у майбутньому. Також встановлення колекторів не потребує ретельного догляду: лише періодична чистка. До того ж, не потрібно платити за рахунками, а вкладені гроші окупляться приблизно через 5 років [4].

Ще одна перевага сонячних систем у тому, що вони є легко масштабованими. Тобто, можна придбати невеличку установку з декількома панелями, а вже згодом докупити ще. Тому, при обмеженості бюджету, перехід на сонячну енергію, хоч і частковий, але можливий. «Якихось негативних моментів, пов'язаних з використанням сонячних батарей у приватних будинках, практично не відзначається», - зазначає Ярослав Задесенець. Та є і ряд недоліків. Зокрема, при використанні сонячної станції для автономного живлення, доведеться ретельно подумати, наприклад, про акумулятори. Потрібно або економити, ставити звичайні кадмієві батареї, які доведеться міняти відносно скоро, або вкладатися у літій-іонні, і отримати довгий термін експлуатації. Також слід зазначити, що на ефективність роботи фотоелементів впливає велика кількість опадів, зокрема, снігу. Фотоенергетичне обладнання може достатньо ефективно експлуатуватися протягом всього року, але максимально ефективним є протягом 7 місяців на

рік (з квітня по жовтень). Наприклад, нікель-кадмієві акумулятори негативно реагують на перепади температур. Охолодження акумулятора більше ніж до 0 С призводить до втрати потужності. Крім того, слід мати на увазі, що енергія виробляється лише протягом світлового дня, тому для ефективного використання сонячних батарей необхідно подбати про засоби перетворення та накопичення струму. Перспектива є Попри все, експерти вбачають великі перспективи у розвитку альтернативних джерел видобутку енергії серед українців. Дійсно, на сьогодні, в Україні сонячні батареї встановлюють не дуже багато людей. Адже, здебільшого, схожі установки вигідні на великих площах: дахах будинків, дачах або ж новобудовах. «Міні сонячні системи можуть використовуватися як джерело резервного освітлення та для зарядки гаджетів. Ними можна забезпечувати роботу системи опалення у будинку, коли раптово не стає світла. Думаю, що енергетична безпека сім'ї може бути сильним аргументом для більшості людей. Знову ж, в Україні діє «зелений» тариф для фізичних осіб. Він буде діяти щонайменше до 2030 року. Тому можна не тільки економити на рахунках за електроенергію, а й заробляти привабливі суми на сонячній енергії», - визначає експерт з відновлювальної енергетики Національного екологічного центру Максим Бабаєв. Таким чином, експерти вважають, що, за розумної політики держави, плідної комунікації з українцями і просуванням ідеї використання альтернативних джерел енергії, вже через декілька років кількість людей, які встановлять у своїх домівках колектори значно збільшиться. А через п'ять років Україна зможе скоротити споживання газу в 4-5 разів [4].

До переваг використання сонячних батарей можна віднести:

- 1) автономність;
- 2) висока надійність;
- 3) зниження витрат на гаряче водопостачання і опалювання до 85% (сонячна енергія безкоштовна);
- 4) економія органічних видів палива (мазуту, нафти, газу);

- 5) скорочення викидів двоокису вуглецю;
- 6) загальнодоступність і невичерпність джерела;
- 7) відсутність проміжних фаз перетворення енергії.

Напівпровідникові сонячні батареї мають дуже важливу перевагу – довговічність. При тому, що догляд за ними не вимагає від персоналу особливо великих знань і мінімального обслуговування.

Теоретично, повна безпека для навколишнього середовища (екологічно чисте джерело енергії) і людини (технічна безпека відповідає всім світовим стандартам).

Розповсюдження сонячних установок серед населення і промисловості позитивно впливає на енергетичну безпеку України.

Недоліками сонячних батарей є перманентна залежність потужності від місцевих умов, часу доби і року, відносна дорожнеча, маленький коефіцієнт корисної дії і чутливість до механічних пошкоджень.

Останнім часом вчені у сфері конструювання матеріалів для напівпровідникових фотоелементів провели ряд робіт, що дозволили наблизити час створення сонячних електростанцій. Коефіцієнт корисної дії сонячних батарей з нових структур напівпровідникових матеріалів досягає вже 30%, а теоретично він може скласти і 90%.

Вживання таких фотоелементів дозволить в десятки разів скоротити площі панелей майбутніх сонячних електростанцій. Їх можна скоротити ще в сотні разів, якщо сонячний потік заздалегідь зібрати з великої площі, сконцентрувати і тільки потім подати на сонячну батарею. Отже в XXI столітті сонячні електростанції з фотоелементами можуть стати звичайним джерелом енергії. Та і в наші дні вже має сенс одержувати енергію від сонячних батарей в тих місцях, де інших джерел енергії немає [5].

1.2 Розподіл енергії сонячного випромінювання та її перетворення

Сьогодні в результаті великої кількості досліджень достовірно відомо, що джерелом сонячної енергії є реакція перетворення 4-х атомів водню в ядро гелію. В результаті цього процесу виділяється значна кількість енергії. Наприклад, енергія, що виділяється при перетворенні 1 гр. водню порівняна з енергією, яка виділяється при згоранні 15 т. бензину.

Енергію, яку ми отримуємо від Сонця, необхідно перетворити в якийсь інший вид. Необхідність цього виникає з огляду на те, що людство досі не має таких приладів, які б могли споживати сонячну енергію в чистому її вигляді. Тому були розроблені такі джерела енергії, як сонячний колектор і сонячні батареї. Якщо перший використовується для отримання теплової енергії, то інший продукує безпосередньо електрику.

Існує декілька способів перетворення енергії сонця :

- 1) фотовольтаїка;
- 2) термоповітряна енергетика;
- 3) геліотермальна енергетика;
- 4) з використанням сонячних аеростатних електростанцій.

Найбільш поширеним методом вважається фотовольтаїка. Принцип цього перетворення полягає у використанні фотоелектричних сонячних панелей або як їх ще називають сонячних батарей, за допомогою яких і відбувається перетворення сонячної енергії в електричну. Як правило, виготовляють такі панелі з кремнію, а товщина їх робочої поверхні складає всього декілька десятків міліметра. Розмістити їх можна скрізь, існує лише одна умова – наявність великої кількості сонячного світла.

Окрім розглянутих фотопластин для перетворення енергії сонячного випромінювання використовують тонкоплівкові панелі. Відрізняються вони ще меншою товщиною, що дозволяє встановити їх де завгодно, але значний недолік таких панелей – це низький ККД. Саме з цієї причини їх монтаж буде

виправданий тільки при великих площах розміщення. Заради експерименту тонкоплівкову панель можна розмістити навіть на корпусі ноутбука або на дамській сумочці.

У термоповітряній енергетиці сонячна енергія перетворюється в енергію потоку повітря, яке потім направляють на турбогенератор. А ось у разі використання сонячних аеростатних електростанцій усередині аеростатного балона відбувається генерація водяної пари. Досягається цей ефект за рахунок нагріву сонячним світлом поверхні аеростата, на яку нанесено селективно-поглинаюче покриття [9].

Головна перевага цього методу полягає в достатньому запасі пари, якої вистачає для продовження роботи електростанції в погану погоду і вночі.

Принцип геліотермальної енергетики полягає в нагріванні поверхні, яка поглинає сонячні промені і фокусує їх з метою подальшого використання отриманого тепла. Найпростіший приклад – це нагрівання води, яку потім можна використовуватися для побутових потреб, наприклад, для подання в каналізацію або батареї, економлячи при цьому газ або інше паливо. У промислових масштабах енергія сонячного випромінювання, що отримується цим способом, перетвориться в електричну енергію за допомогою теплових машин.

Будівництво таких комбінованих електростанцій може тривати понад 20 років, але темп розвитку сонячної енергетики не знижується, а навпаки, неухильно росте.

Використовувати сонячну енергію можна в абсолютно різних областях – від хімічної промисловості до автомобілебудування, від приготування їжі до опалювання приміщень. Наприклад, використання сонячних батарей в автомобільній галузі почалося ще в 1955 році. Саме цей рік ознаменувався випуском першого автомобіля, який працював на сонячних батареях. Сьогодні ж випуском подібних автомашин займаються BMW, Toyota і інші найбільші компанії.

У побуті сонячна енергія використовується для обігріву приміщень, для освітлення і навіть для приготування їжі. Приміром, сонячні печі з фольги і картону за ініціативою ООН активно використовують біженці, які були вимушені покинути свої рідні місця із-за важкої політичної ситуації. Складніші по конструкції сонячні печі використовуються для термообробки і плавки металів. Одна з найбільших таких печей знаходиться на території Узбекистану[9].

Найцікавішими втіленнями використання сонячної енергії можна вважати:

- Захисний чохол для телефону з фотоелементом, що одночасно є і зарядкою.
- Рюкзак з прикріпленою на ньому сонячною панеллю. Він дозволить вам зарядити не лише телефон, але й планшет чи, навіть, камеру, загалом, будь-що.
- Сонячні Bluetooth- навушники.
- А найбільш креативна задумка – це одяг, зшитий із спеціальної тканини. Піджак, краватка і навіть купальник – усе це може стати не лише предметом вашого гардеробу, але і зарядним пристроєм.

1.3 Різновиди сонячних елементів

Сонячні елементи можна розділити на елементи без концентрації сонячного випромінювання та з концентрацією випромінювання на малій площі з допомогою оптичних систем. Застосування високоефективних сонячних елементів малої площі з оптичними концентраторами у вигляді різних розсіювачів і відбивачів великої площі є альтернативним шляхом розвитку сонячних елементів для зниження їх вартості. У системах з концентраторами дорогі сонячні елементи замінюються на відносно дешеві

оптичні системи. Додаткові витрати на систему стеження за сонцем і охолодження повинні компенсуватися підвищенням ККД.

За принципом, що використовується для перетворення сонячної енергії в електричну, сонячні елементи можна розділити на елементи діодного типу, елементи, в яких використовується сенсibiliзація органічними барвниками (так звані фотоелектричні клітинки) і термофотовольтаїчні перетворювачі.

Термофотовольтаїчне виробництво електроенергії — це перетворення довгохвильового (теплого) випромінювання, яке після розігріву матеріалу емітера (радіатора) до високої температури (за допомогою концентрованого сонячного випромінювання, спалювання природного газу, пропану, бензину, водню та ін.), перетворюється в електрику фотоелементом. В даний час ККД подібних систем не високий і не перевищує 5 %, але вони можуть працювати цілодобово, в той час як наземні сонячні елементи працюють зазвичай менше 40 % часу.

– Для виготовлення сонячного елемента діодного типу застосовується цілий ряд матеріалів:

- елементарні напівпровідники (Si, Ge)
- напівпровідники типу АІІВV (наприклад, GaAs);
- напівпровідники типу АІІВVI (наприклад, CdS);
- органічні матеріали.

В залежності від структури використовуваного напівпровідника сонячні елементи поділяються на сонячні елементи на основі кристалічних, полікристалічних, мікрокристалічних, аморфних матеріалів.

В даний час на ринку можна знайти п'ять типів сонячних батарей в яких застосовуються різні матеріали і фотоелементи. Найбільшу популярність отримали сонячні батареї з полікристалічних фотоелементів. Ефективність таких панелей в середньому становить 12–14%.

На рис. 1.2 представлена класифікація сонячних елементів у залежності від застосовуваного матеріалу.

Основним матеріалом для виготовлення сонячних елементів в даний час є кристалічний кремній. На ринку фотовольтаїки частка сонячних елементів і модулів, вироблених на основі кристалічного кремнію, зараз перевищує 90 %, з яких приблизно 2/3 припадає на полікристалічний кремній і 1/3 — на монокристалічний. Настільки широке застосування кристалічного кремнію в фотовольтаїці обумовлено розвиненою кремнієвою технологією взагалі і можливістю виготовлення на його основі сонячних елементів наземного використання із найбільш прийнятним співвідношенням ефективність–вартість. Інша частина ринку фотовольтаїки припадає на плівкові елементи на основі інших матеріалів, в тому числі більше 5 % складають СЕ на основі тонких плівок аморфного гідрогенізованого кремнію.

Фотовольтаїчний ефект (перетворення енергії світла в електроенергію) був відкритий в 1839 році молодим французьким фізиком Едмондом Беккерелем. Перший же діючий фотоелемент через півстоліття створив російський вчений Олександр Столетов. А вже в двадцятому столітті фотоелектричний ефект кількісно описав Альберт Ейнштейн [6].



Рисунок 1.2 – Класифікація сонячних елементів залежно від вживаного матеріалу

Основою для сонячних панелей є тонкі зрізи кремнієвих кристалів (рис.1.3). Чим тонше шар – тим менше собівартість. Паралельно також підвищується ефективність. У 2003 році в середньому в індустрії фотовольтаїки товщина шару в найбільш якісних елементах становила 0,32 мм, а до 2008 року зменшилася до 0,17 мм. А ефективність підвищилася з 14% до 16%. У цьому році планується досягти показників 0,15 мм при ефективності 16,5%.

Для отримання електроенергії від сонячної батареї необхідно здійснити фотоефект. Цей процес пов'язаний з фізичним явищем р–п переходу. Конструктивно фотоелемент складається з двох пластин кремнію.

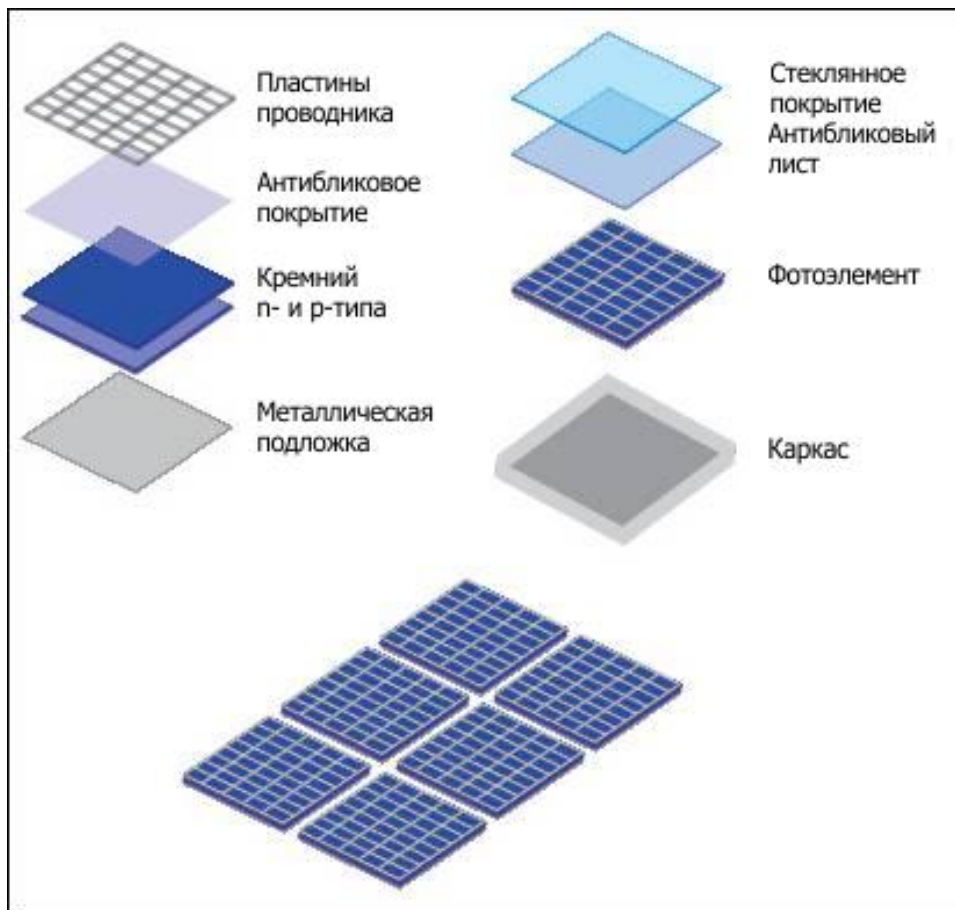


Рисунок 1.3 – Тонкі зрізи кремнієвих фотоприймальних кристалів

Одна із цих пластин містить атоми бору, а друга атоми миш'яку. При цьому верхній шар характеризується надлишком електронів (область електронів), а нижня – їх нестачею (так звана діркова область). На кордоні цих пластин виникає електронно–дірковий перехід (p–n перехід).

В результаті попадання на фотоелемент сонячних променів (фотонів) відбувається освітлення пластин і обидва шари взаємодіють як електроди звичайної батареї – виникає ЕРС.

Сонячний промінь збуджує електрони, що починають переміщатися з однієї пластини до іншої (рис. 1.4).

Для зняття електричної енергії на обидві поверхні напоюють тонкі шари провідника і підключають до навантаження. Вироблення цієї енергії не пов'язано з хімічними реакціями, тому така сонячна батарея може прослужити досить довгий термін [7].

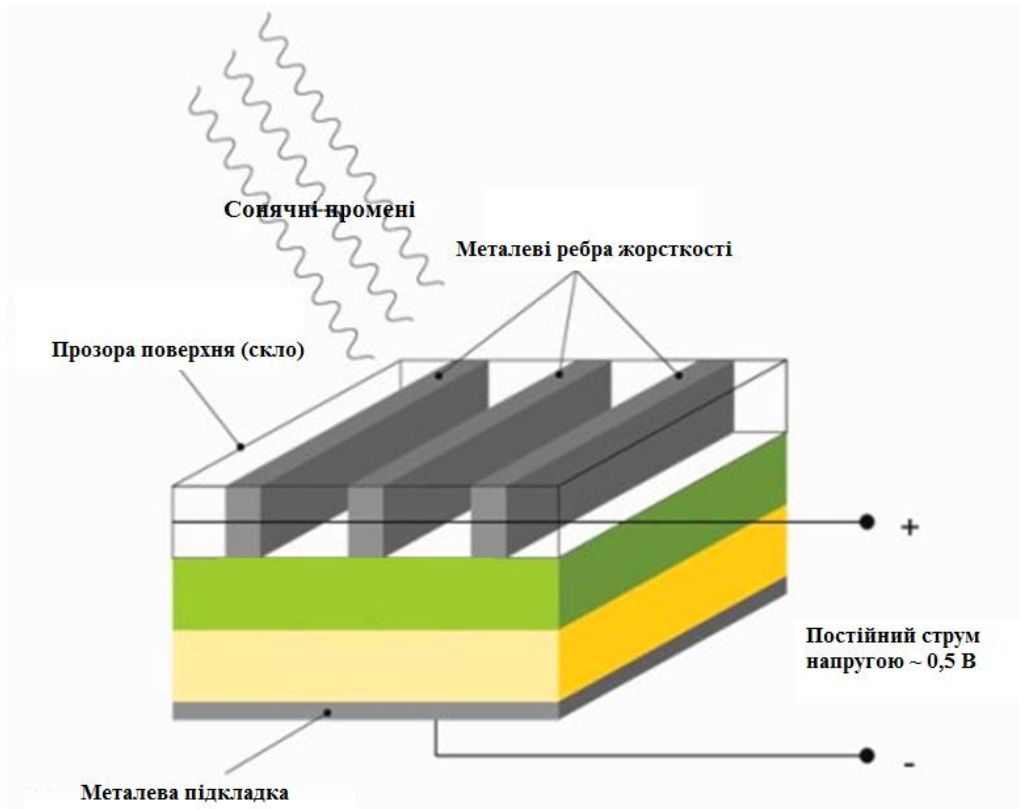


Рисунок 1.4 – Конструкція сонячної батареї

1.4 Фотоефект

У 1887 році Герц спостерігав явище, яке пізніше стало поштовхом у розвитку квантових уявлень про природу світла. Під час опромінення ультрафіолетовим світлом негативно зарядженої пластинки відбувався сильніший електричний розряд, ніж за відсутності такого опромінення. Як з'ясувалося пізніше, це було проявом явища фотоефекту – виходу електронів з тіла в інше середовище або вакуум під дією електромагнітного випромінювання. Цей вид фотоефекту називають зовнішнім, або фотоелектронною емісією (рис. 1.5).

Фотоефект є слідством трьох послідовних процесів: поглинання фотона, внаслідок чого енергія одного електрона стає більшою за середню; руху цього електрона до поверхні тіла; виходу його за межі тіла в інше середовище через поверхню поділу [9].

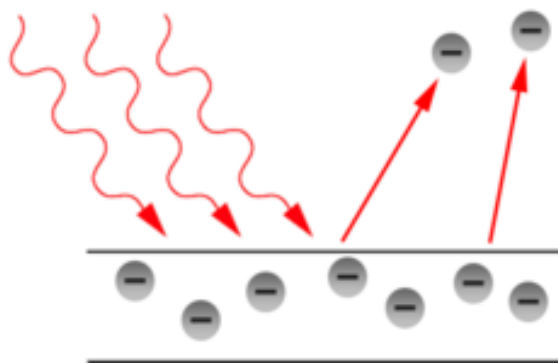


Рисунок 1.5 – Вибивання фотоелектронів із металевої пластини.

Вивчивши за допомогою установки залежність сили струму від частоти хвилі світла, його інтенсивності, інших характеристик випромінювання, Столетов установив три закони фотоефекту:

1) число електронів, що вилітають із поверхні тіла під дією електромагнітного випромінювання, пропорційне його інтенсивності. У 1888 р. німецький фізик В.Гальвакс встановив, що під дією світла металева пластинка заряджається позитивно;

2) для кожної речовини залежно від її температури і стану поверхні існує мінімальна частота світла ν_0 , за якої ще можливий зовнішній фотоефект;

3) максимальна кінетична енергія фотоелектронів залежить від частоти опромінення і не залежить від його інтенсивності.

При поясненні цих висновків на основі хвильової теорії виникли протиріччя між її положеннями й одержаними результатами[10]. Це змусило вчених шукати інше тлумачення механізму поглинання світлового випромінювання. З цією метою Ейнштейн застосував квантові уявлення про природу світла і на їх основі вивів рівняння фотоефекту

$$h\nu = \frac{mv^2}{2} + A,$$

де ν — частота світла;

h — стала Планка;

m — маса електрона;

v — його швидкість;

A — робота виходу.

Це співвідношення називають рівнянням Ейнштейна для зовнішнього фотоефекту. За пояснення законів зовнішнього фотоефекту Ейнштейн у 1922 році був удостоєний Нобелівської премії.

Як відомо, для того щоб електрон покинув тверде тіло або рідину, він має виконати роботу виходу A_0 , тобто подолати енергетичний бар'єр

взаємодії з атомами і молекулами, які утримують його всередині тіла. За квантовою теорією поглинання світла, це передавання фотоном усієї своєї енергії мікрочастинкам речовини. Отже, фотоефект може відбутися лише за умови, що фотон має енергію більшу за роботу виходу ($h\nu > A_0$); якщо ж $h\nu < A_0$, то фотоефект неможливий. Якщо енергія фотона, передана електрону внаслідок поглинання світла, більша за роботу виходу, то електрон набуває кінетичної енергії.

Мінімальну частоту ν_0 (або максимальну довжину хвилі λ_0) випромінювання, яке ще викликає зовнішній фотоефект, називають червоною межею фотоефекту.

Фотоелектрони – це електрони, вибиті з поверхні тіла внаслідок фотоефекту

Фізичний зміст роботи виходу в металів полягає в тому, що це мінімальна енергія, яка потрібна для виходу електрона з тіла у вакуум. Тому, крім хімічної природи металу, вона істотно залежить від стану поверхні тіла.

1.5 Плівкові батареї на основі телуриду кадмію CdTe.

Плівкові панелі – це наступний крок розвитку джерел живлення на сонячній енергії, який необхідний в першу чергу для зниження цін на виробництво батарей і прагненням до підвищення енергоефективності.

Розробка плівкових батарей обумовлена:

- потребами в зниженні вартості сонячних батарей;
- необхідністю поліпшення продуктивності і технічних характеристик.

Телурид кадмію – це матеріал, який володіє високим рівнем світлопоглинання, відкритий для сонячних батарей в 70-х роках минулого століття. На сьогодні, цей матеріал застосовується вже не тільки в космосі, а й активно використовується в якості матеріалу для сонячних панелей звичайного, побутового користування [8].

Телурид кадмію (CdTe) – ще один перспективний матеріал для фотовольтаїки. У нього майже ідеальна ширина забороненої зони (1,44 еВ) і дуже висока здатність до поглинання випромінювання. Плівки CdTe досить дешеві у виготовленні. Крім того, технологічно нескладно отримувати різноманітні сплави CdTe з Zn, Hg та іншими елементами для створення шарів із заданими властивостями. Подібно CuInSe₂, найкращі елементи на основі CdTe включають гетеропереход з CdS в якості віконного шару. Оксид олова використовується як прозорий контакт і просвітлююче покриття. Серйозна проблема на шляху застосування CdTe – високий опір шару p-CdTe, що призводить до великих внутрішніх втрат. Але вона вирішена в p-i-n-структурі з гетеропереходом CdTe/ZnTe, яка зображена на рис. 1.6.

Найбільш відповідальніший етап формування СЕ на основі CdS/CdTe – осадження поглинаючого шару CdTe завтовшки 1,5–6 мкм. Для цього використовують різні способи: сублімацію/конденсацію, електрохімічне осадження, трафаретний друк, хімічне осадження з газової фази і розпорошення.

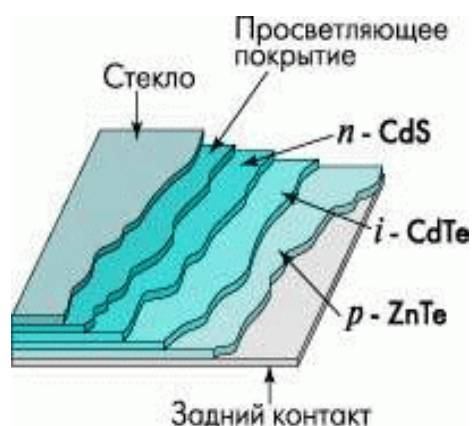


Рисунок 1.6 – p-i-n-структура з гетеропереходом CdTe/ZnTe

Найголовнішою проблемою у використанні такого матеріалу є його отруйність. Однак дослідження говорять про те, що рівень кадмію, який йде в

атмосферу, занадто малий, щоб завдавати шкоди здоров'ю людини. Також, незважаючи на низький ККД в районі 10%, одиниця потужності в таких батареях коштує менше, ніж у аналогів.

Вартість вата потужності таких батарей на 20–30% менше, ніж у кремнієвих.

1.6 Батареї на основі селеніду міді–індію

Даний матеріал сонячних батарей є твердим розчином, що складається з таких елементів, як мідь, індій, селен, і має властивості напівпровідника.

Індій – це основний, дуже необхідний матеріал, який використовується у виробництві рідкокристалічних моніторів. Тому, залишаючи такий матеріал для цих потреб, часто використовують галій, який заміщає індій за своїми функціями. ККД тут вище, ніж у батарей з телуриду кадмію – близько 20%.

Плівкові сонячні батареї на основі селеніду міді–індію мають ККД рівний 15–20%. При використанні індію замість галію ефективність сонячних батарей зростає приблизно на 14%.

У селеніду міді і індія (CuInSe_2) висока здатність до поглинання сонячного випромінювання, у першому мікрон цього матеріалу (ширина забороненої зони – 1,0 еВ) поглинається 99 % світла, тому CuGaSe_2 також дуже цікавий як тонкоплівковий елемент сонячних батарей. Завдяки забороненій зоні шириною 1,68 еВ він використовується як верхній елемент тандемної сонячної батареї з нижнім елементом з CuInSe_2 . Шари CuGaSe_2 формують шляхом послідовного осадження термічним випаровуванням тонких шарів Ga, Se і Cu на поверхню скляної підкладки, покритої шаром молібдену товщиною 1 мкм, як це зображено на рис. 1.7. Далі з отриманої структури в установці швидкого термічного відпалу протягом п'яти хвилин при температурі 550°C отримують з'єднання CuGaSe_2 [8].

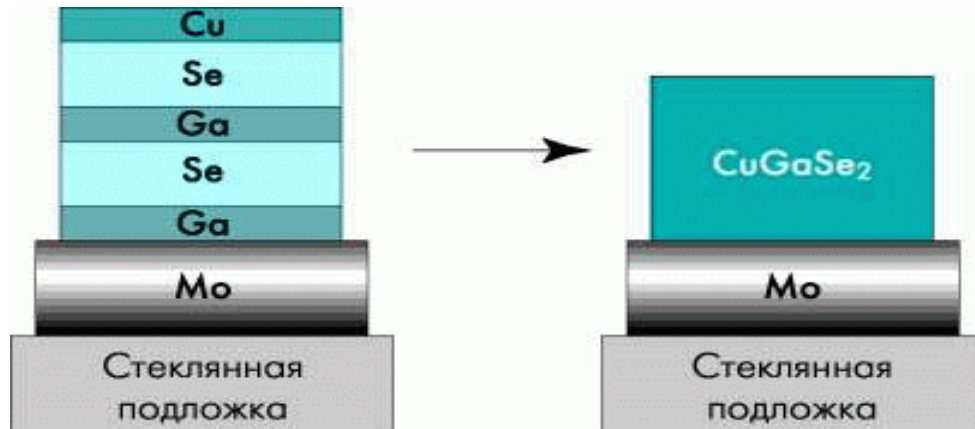


Рисунок 1.7 – Формування шарів CuGaSe_2

1.7 Полімерні сонячні панелі

Полімерні сонячні панелі – це вид сонячних батарей, який не так давно був винайдений і почав проводитися. Тут провідниками виступають поліфенілен, фуриллени, фталоціанин міді. При цьому така плівка дуже тонка – близько 100 нм. Незважаючи на низький рівень ККД, все ж можна виділити причини, чому варто обирати цей тип сонячних батарей: Доступність матеріалів, дешевизна, відсутність шкідливих викидів в атмосферу. Так що такі батареї відмінно підходять споживачам, адже мають відмінну еластичність і екологічність.



Рисунок 1.8 – Зовнішній вигляд сонячних батарей на основі полімерів

Полімерні сонячні батареї (рис.1.8) мають на сьогоднішній день ККД всього 5–6%. Але їх головними перевагами вважаються:

- низька вартість виробництва;
- легкість і доступність;
- відсутність шкідливого впливу на навколишнє середовище.

1.8 Сонячні модулі

Сонячний модуль – це батарея взаємозв'язаних сонячних елементів, які укладені під скляною кришкою. Фотоелектричну систему можна довести до будь-яких розмірів. Власник такої системи може збільшити або зменшити її, якщо зміниться його потреба в електроенергії. У міру зростання енергоспоживання і фінансових можливостей, домовласник може додавати модулі. Чим інтенсивніше світло, падаюче на фотоелементи і чим більше їх

площа, тим більше виробляється електрики і тим більше сила струму. Модулі класифікуються по піковій потужності у ватах (Втп).

Ват – одиниця вимірювання потужності. Один піковий ват – це технічна характеристика, яка вказує на значення потужності установки в певних умовах, тобто, коли сонячне випромінювання в 1 кВт/м^2 падає на елемент при температурі 25°C . Така інтенсивність досягається за хороших погодних умов і Сонця в зеніті. Щоб виробити один піковий ват, потрібен один елемент розміром $10 \times 10 \text{ см}$. Крупніші модулі, площею $1 \text{ м} \times 40 \text{ см}$, виробляють близько 40–50 Втп. Проте сонячна освітленість дуже рідко досягає величини 1 кВт/м^2 . Більш того, на сонці модуль нагрівається значно вище за номінальну температуру. Обидва ці чинники знижують продуктивність модуля. В типових умовах середня продуктивність складає близько $6 \text{ Вт}\cdot\text{ч}$ в день і $2000 \text{ Вт}\cdot\text{ч}$ в рік на 1 Втп . 5 ват–година – це кількість енергії, споживана лампочкою 50 Вт протягом 6 хвилин ($50 \text{ Вт} \times 0,1 \text{ ч} = 5 \text{ Вт}\cdot\text{ч}$) або портативним радіоприймачем протягом години ($5 \text{ Вт} \times 1 \text{ ч} = 5 \text{ Вт}\cdot\text{ч}$).

Хоча якість продукції не завжди однакова, більшість міжнародних компаній проводить достатньо надійні фотоелектричні модулі з терміном експлуатації до 20 років. На сьогоднішній день виробники модулів гарантують вказану потужність на період до 10 років.

1.9 Продукція та характеристики полікристалічних та монокристалічних сонячних модулів європейських корпорацій

Європейська корпорація ABi-Solar випускає обладнання для сонячних електростанцій з 2013 року. Серед її продукції є фотоелектричні перетворювачі струму і модулі, контролери, шафи захисту. Продукція реалізується переважно в східно-європейському регіоні. Зараз компанія активно освоює ринок України. Протягом останніх двох років монокристалічні і полікристалічні сонячні панелі ABi-Solar роблять виключно

на заводах топового списку, що складається фінансово-аналітичним агентством "Блумберг".

За рівнем довіри серед вітчизняних інсталяторів фотоелектричного обладнання "АВІ-Солар", згідно з поточним аналізом, займає провідні позиції. Головна перевага її продукції - висока якість при помірній ціні. У полікристалічних сонячних батареях АВІ-Solar один з кращих показників ККД в галузі - 16%. У фотомодулів гарантовано позитивний 3-відсотковий толеранс (допуск по потужності). Це фіксують flash-тести, проведені над кожним пристроєм.

Характеристики полікристалічних сонячних модулів АВІ-Solar повністю відповідають кліматичним умовам нашого регіону. Вони найбільш продуктивні в умовах помірної інсоляції - менш як 1200 кВт-год / м² в рік. Потужність пристроїв варіює від 140 до 340 Вт. У серії РНС використана передова технологія половинчастих фотоелементів (Half Cell). Діє гарантія на продуктивність: 95% початкової потужності протягом 10 років, 90% за 12 років, 85% за 18 років, 80% за 25 років [10].



Рисунок 1.9 - Фотоелектрична панель АВІ-Solar CL-P72295, 295 Вт,
Poly ABCL-P72295

Електрогенеруючий пристрій на основі монокристалічного кремнію призначений для побутових, комерційних і промислових фотоелектричних систем будь-якої потужності. Завдяки невисокій вартості і відмінним експлуатаційним характеристикам ідеально підходить для будівництва сонячних електростанцій під "Зелений" тариф. Вибір фотомодулів "Алтек" дозволяє заробити на продажах чистої електроенергії з мінімальним вкладенням грошей, дає можливість швидко повернути інвестиції. Сонячна панель ALM72-6-365P утворена 72-ма фотоелементами з п'ятьма струмознімальними доріжками (технологія 5BB) в кожному осередку. З фронтального боку модуля знаходиться загартоване світлопоглинаюче скло, з тилу - металізована пластикова підкладка. Для міцності і герметичності конструкцію обрамляє легкий, корозійностійких алюмінієвий профіль.

Технічні характеристики сонячної батареї:

- номінальна потужність - 365 Вт;
- допустиме відхилення потужності - $\pm 3\%$;
- номінальна напруга - 39,60 В;
- номінальний струм - 9,35 А;
- напруга при розімкненому контурі - 48,15 В;
- струм короткого замикання - 9,90 А;
- максимальний ККД - 19,1%;
- коефіцієнт втрати потужності в залежності від нагрівання - $-0,39\% / ^\circ\text{C}$;
- тип роз'єму - MC-4;
- робочі параметри навколишнього середовища - $-40 \dots + 85 ^\circ\text{C}$.

Фотоелектричні модулі Altek відрізняються компактністю і малою вагою. На даховому розміщенні вони не перевантажують кроквяну конструкцію, дозволяють раціональніше використовувати обмежену корисну покрівельну площу. На земельній ділянці можуть встановлюватися як на статичній металоконструкції (фермі), так і на динамічних установках (трекерах). Останній варіант дозволяє збирати на 15-40% більше

електроенергії. Поряд з сонячними модулями, компанія-виробник пропонує й інше фотоелектричне обладнання [10].

Таблиця 1 – Характеристики монокристалічних сонячних панелей

Основні	
Виробник	Altek
Країна виробник	Китай
Тип панелі	Монокристалічна
Матеріал виготовлення модуля	Чистий кремній
Матеріал рамки	Алюміній
Напруга	24 В
Потужність	365 Вт
Струм при максимальній потужності	9.35 А
Напруга при максимальній потужності	39.6 (В)
Струм короткого замикання	9.9 А
Напруга холостого ходу	48.15 В
Кількість елементів	72 шт.
Мінімальна робоча температура	-40 град.
Максимальна робоча температура	85 град.
Ступінь захисту IP	67
ККД, не менше	19.1 %
Гарантійний термін	120 міс
Габаритні розміри	
Вага	22.0 кг
Довжина	1956 мм
Ширина	992 мм
Товщина	40 мм
Температурні коефіцієнти	
Температурний коефіцієнт потужності	-0.39 %/°C

Altek - торгова марка дніпропетровської компанії "Аліста", що веде свою діяльність з 2006 року. Фірма є офіційним дилером світових виробників промислового устаткування, найбільшим імпортером метизної продукції. З 2007 року займається відновлювальними джерелами енергії, ввозить в Україну сонячні інвертори, панелі, колектори, вітрогенератори, теплові насоси, твердопаливні котли.

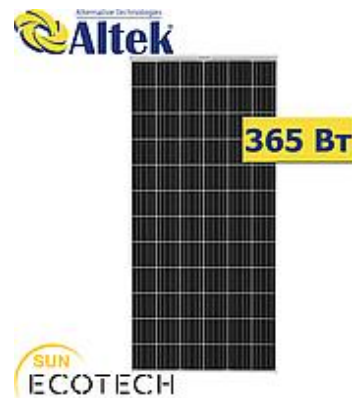


Рисунок 1.10 - Фотоелектрична панель ALTEK ALM72-6-365P

Полікристалічні сонячні батареї Altek відрізняються гідною якістю при невисокій ціні. До завдань пристроїв входить перетворення сонячної енергії в постійний електричний струм. Панелі серії ALM складаються з шістдесяти фотоелементів. Виготовлені з чистого полікремнію. Від впливу негативних факторів навколишнього середовища пластини захищені подвійним ламінатом і загартованим трьохміліметровим склом з 92% світлопропускання. Конструкція розміщена в рамі з анодованого алюмінію.

Залежно від потужності і кількості струмопровідних шин ККД полікристалічних сонячних модулів Altek досягає 14,4-16%. Перед надходженням в продаж пристрою обов'язково проходять кваліфікаційні випробування на механічну стійкість і удар крижаної кулі, витривалість до перегріву, підвищеної вологості, ультрафіолету. В ході перевірки батареї проходять 200 термічних циклів від -40 до + 85 ° С. Відповідають

міжнародному стандарту IEC61215. Полікристалічні сонячні панелі Altek зроблені в Китаї, служать не менше 20 років [10].



Рисунок 1.11 - Фотоелектрична панель ALTEK ALM72-6-385P

Технічні характеристики ALM144-6-335P HC:

- номінальна потужність - 335 Вт;
- допустиме відхилення потужності - $\pm 3\%$;
- номінальна напруга - 38,6 В;
- номінальний струм - 8,7 А;
- напруга при розімкненому контурі - 46,1 В;
- струм короткого замикання - 9,3 А;
- максимальний ККД - 16,8%;
- коефіцієнт втрати потужності в залежності від нагрівання - $-0,39\% / ^\circ\text{C}$;
- тип роз'єму - MC-4;
- робочі параметри навколишнього середовища - $-40 \dots + 85 ^\circ\text{C}$.

Таблиця 2 – Характеристики полікристалічних сонячних панелей

Основні	
Виробник	Altek
Країна виробник	Китай
Тип панелі	Полікристалічна
Матеріал виготовлення модуля	Чистий кремній
Матеріал рамки	Алюміній
Напруга	24.0 (В)
Потужність	335.0 (Вт)
Струм при максимальній потужності	8.7 (А)
Напруга при максимальній потужності	38.6 (В)
Струм короткого замикання	9.3 (А)
Напруга холостого ходу	46.1 (В)
Кількість елементів	144.0 (шт.)
Мінімальна робоча температура	-40.0 (град.)
Максимальна робоча температура	85.0 (град.)
Ступінь захисту IP	67
ККД, не менше	16.8 (%)
Гарантійний термін	120 (міс)
Габаритні розміри	
Вага	23.0 (кг)
Довжина	2010 мм
Ширина	992.0 (мм)
Товщина	40.0 (мм)
Температурні коефіцієнти	
Температурний коефіцієнт потужності	-0.39 (%/° C)

Порівняння монокристалічних і полікристалічних сонячних панелей наведено в таблиці 3.

Таблиця 3 – Порівняльна таблиця монокристалічних і полікристалічних сонячних панелей

Фактор	Монокристали	Полікристали
Різниця в структурі	Кристали спрямовані в одну сторону, зерна паралельні	Кристали спрямовані в різні боки, не паралельні
Стабільність роботи	Висока	Менше
Вартість	Дорогі батареї	Також дорогі, але дешевше
Окупність	2 роки	до 3х років
ККД	до 22%	до 18%
Технологія виробництва	Досконаліше, складніше, точніше	Простіше, звідси і низька вартість

Таблиця 4 – Основні відмінності між моно- і полікристалічними сонячними елементами.

Показник	Монокристалічні елементи	Полікристалічні елементи
Кристалічна структура	Зерна кристала паралельні Кристали орієнтовані в одну сторону	Зерна кристала не паралельні Кристали орієнтовані в різні боки
Температура виробництва	1400 °С	800-1000 °С
Колір	Чорний	Темно-синій
Стабільність	Висока	Висока, але менше, ніж у моно
Ціна	Висока	Висока, але менше, ніж у моно
Період окупності	2 роки	2-3 роки

Таблиця 5 – Коефіцієнт корисної дії різних видів сонячних батарей

Тип сонячних елементів, що випускаються в виробничих масштабах	ККД, %
Моно	17-22
Полі	12-18
Аморфні	5-6
На основі телуриду кадмію	10-12
На основі селеніду міді-індію	15-20
На основі полімерів	5-6

Переходячи на альтернативні, зокрема, сонячні джерела енергії, людство не тільки знижує свої витрати на споживані енергоресурси, але і робить відчутний внесок в чистоту навколишнього середовища.

1.10 Технології тонкоплівкових сонячних елементів на основі аморфного гідрогенізованого і мікрокристалічного кремнію

Для масового застосування сонячного випромінювання необхідно забезпечити його ефективне використання і значно поліпшити економічні характеристики сонячних елементів. Перспективним підходом до вирішення проблеми виготовлення дешевих перетворювачів сонячної енергії є розробка технології тонкоплівкових сонячних елементів на основі аморфного гідрогенізованого і мікрокристалічного кремнію.

Так як ціна виробленої електроенергії визначається вартістю матеріалу, з якого виготовлений сонячний елемент, і витратами технологічного процесу

Таблиця 6 – Максимальні значення ефективності фотоелементів і модулів, досягнуті в лабораторних умовах[10]

Тип	Коефіцієнт фотоелектричного перетворення, %
кремнієві	
Si (кристалічні)	24,7
Si (полікристалічні)	20,3
Si (тонкоплівкові)	16,6
Si (тонко плівкові субмодулі)	10,4
III-V	
GaAs (кристалічні)	25,1
GaAs (тонкоплівкові)	24,5
GaAs (полікристалічні)	18,2
InP (кристалічні)	21,9
Тонкі плівки халькогенідів	
CIGS (елемент)	19,9
CIGS (субмодуль)	16,6
CdTe (елемент)	16,5
Аморфний/Нанокристалічний кремній	
Si (аморфний)	9,5
Si (нанокристалічний)	10,1
Фотохімічні	
На базі органічних барвників	10,4
На базі органічних барвників (субмодуль)	7,9
Органічні	
Органічні полімери	5,15
Багатошарові	
GaInP/GaAs/Ge	32,0
GaInP/GaAs	30,3
GaAs/CIS (тонкоплівкові)	25,8
a-Si/mc-Si (тонкий субмодуль)	11,7

виробництва, основним матеріалом для виготовлення сонячних елементів в даний час є кристалічний кремній, так як він є основним матеріалом всієї твердотільної електроніки, і його виробництво налагоджено.

Основним недоліком сонячних елементів на основі кристалічного кремнію є їх висока вартість, так як 50 % від загальної вартості цих елементів становить вартість кремнієвої підкладки (Si-підкладки). Проте виготовлення елементів даного виду є вельми енергоємним, великі і загальні втрати кремнію в результаті його обробки і різання. У зв'язку з тим, що монокристалічний і полікристалічний кремній непрямозонні напівпровідники і їх коефіцієнт поглинання невисокий, для ефективного поглинання сонячного світла товщина виготовлених з них ФЕПів повинна становити сотні мікрон. Це призводить до значних витрат кремнію і високої вартості сонячних елементів.

Таким чином, перспективним видається створення тонкоплівкових сонячних елементів на основі аморфного гідрогенізованого і мікрокристалічного кремнію замість дорогого кристалічного кремнію. Тонкоплівкова технологія має великі потенційні можливості для зниження вартості сонячних модулів. Темпи зниження вартості виробництва тонкоплівкових сонячних модулів значно вище, ніж модулів на основі кристалічного кремнію.

Крім того, тонкоплівкова технологія має ряд специфічних застосувань, неможливих або ускладнених при використанні кристалічних напівпровідників (гнучкі модулі, напівпрозорі модулі тощо). Одним з достоїнств тонкоплівкової технології є отримання шарів аморфного гідрогенізованого і мікрокристалічного кремнію при низьких температурах. Це дає можливість створювати напівпровідникові структури на гнучких підкладках. Сонячні елементи на гнучкій основі мають малу вагу, монтуються на будь-якій поверхні і можуть використовуватися для виготовлення сумок, чохлів, вбудовуватися в одяг і т. д. Напівпрозорі модулі різного кольору

знаходять застосування, наприклад, для прикраси будівель, істотним достоїнством тонкоплівкової технології є можливість створення приладових структур на дуже великих площах.

При тонкоплівкової технології на основі матеріалів з високим коефіцієнтом поглинання, таких як CdTe, Cu (In, Ga) Se₂, які застосовуються у вигляді полікристалічних плівок, аморфний гідрогенізований кремній (a-Si:H) дозволяє значно знизити витрати і вартість використовуваного матеріалу. Подібна технологія є високоефективною при використанні таких матеріалів, менш енергозатратною і дешевою.

Також достоїнствами тонкоплівкових фотоелектричних перетворювачів на основі a-Si:H є більш висока відпрацьованість технології, відсутність екологічних проблем. Крім того, фотоелектричні перетворювачі на основі a-Si:H завдяки характеристикам аморфного кремнію (температурний коефіцієнт і спектральна залежність коефіцієнта поглинання) забезпечують більш високу ефективність перетворення сонячної енергії при температурі 40–60°C і в умовах хмарності.

До недоліків таких сонячних елементів можна віднести низький ККД і стабільність параметрів.

Сонячні енергетичні системи можуть виробляти екологічно чисту енергію протягом мільйонів років, вони безшумні, не споживають паливо, працюють в автоматичному режимі і витрати на їх обслуговування так само незначні, як витрати на обслуговування електричних трансформаторних підстанцій [11].

Розробляються технологічні процеси виробництва компонентів сонячних електростанцій, в яких екологічно неприйнятні хімічні процеси травлення і переробки замінюють вакуумні, плазмохімічні, електронно-променеві та лазерні процеси. Серйозна увага приділяється утилізації відходів виробництва, а також переробки компонентів сонячних електростанцій після закінчення терміну служби.

1.11 Вартість сонячних батарей в Україні, їх раціональність, використання та утилізація

Щорічно вартість сонячних батарей знижується. Це обумовлено збільшенням обсягу виробництва даних виробів. Уже сьогодні такі панелі в Україні можна купити за ціною від 80 американських центів за 1 Ват електрики, що виробляється. Отже, ціна буде залежати від вихідної потужності сонячної електростанції. Але крім панелей необхідно купувати допоміжне обладнання, таке як мережевий інвертор або гібридний інвертор і акумуляторні батареї. У першому випадку він необхідний для того, щоб перетворювати енергію сонця в електрику і відправляти її в загальну мережу за вигідним «Зеленим» тарифом. У другому випадку акумулятор накопичує перетворену електрику для використання її в побуті з настанням сутінків.

До вартості сонячних панелей і допоміжного обладнання слід додати ціну на послуги фахівців, що виконують монтажні роботи. Як правило, їх вартість коливається в межах 10-20% від ціни самих панелей. Все це виливається в досить велику суму, а тому використання сонячних електростанцій для особистих потреб не завжди раціонально. Набагато вигідніше купити сонячні панелі з мережевим інвертором і підключити його до Зеленого тарифу. Продаючи вироблену електроенергію за Зеленим тарифом, можна швидко окупити сонячну електростанцію - протягом приблизно п'яти років. Завдяки створенню таких умов в Україні, сонячна енергетика почала активніше розвиватися в останні роки.

Інсоляція - міра того, скільки сонячної радіації впаде на землю в тій чи іншій області в певний період часу. Це зазвичай вимірюється в кВт / м.кв. / дні, і вона покаже вам, скільки сонячного світла буде доступно для ваших сонячних батарей, щоб перетворитися в електрику.

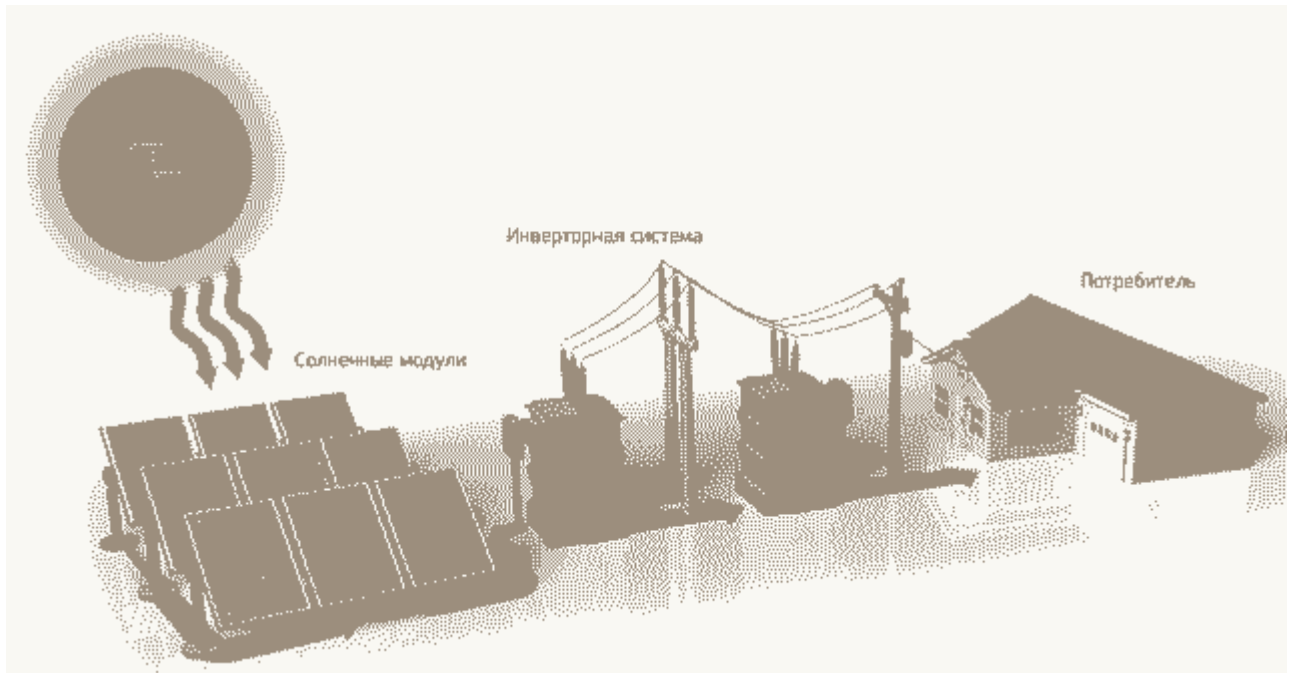


Рисунок 1.12 – Раціональність використання сонячних батарей

Чим вище значення інсоляції в вашому регіоні, тим більше електроенергії кожна з ваших панелей зможе генерувати. Високе значення інсоляції означає, що ви можете отримати більше енергії з менших панелей. Низьке значення інсоляції означає, що ви могли б у кінцевому підсумку витратити більше для досягнення тієї ж вихідної потужності [12].

Термін служби сонячних панелей 40-50 років, контролера і інвертера 15-20 років, акумуляторів в залежності від типу і характеру використання - 4-10 років.

Хоча питання утилізації сонячних панелей залишається відкритим, тільки 30% всіх виробників приймають назад їх назад для переробки.

Але тим не менше попит на відпрацьовані сонячні панелі з кожним роком зростає. Так як видобуток рідкісних металів стає все більш дорогим задоволенням, то переробка панелей призведе до повторного їх використання.

Крім того: існує вторинний ринок фотоустановок, на якому вже відпрацьоване обладнання може знаходити подальше застосування.

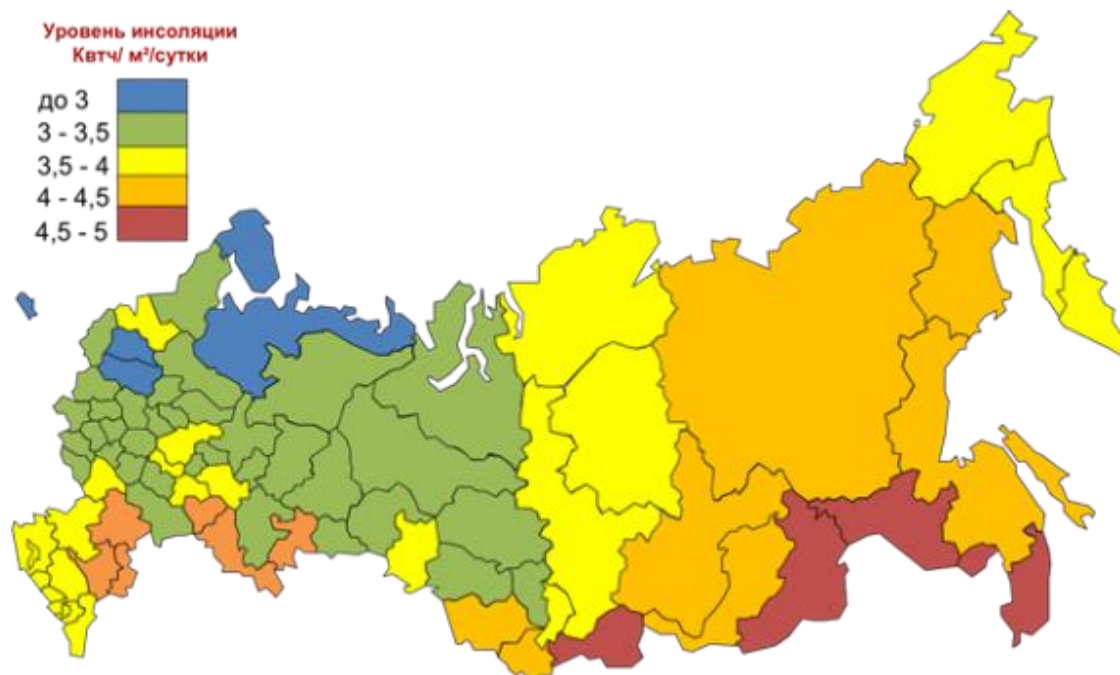


Рисунок 1.13 – Рівень інсоляції

У країнах з перехідною економікою можна використовувати вже використовувані сонячні модулі. Завдяки більш інтенсивному сонячному випромінюванню, ці модулі можуть виробляти більше електроенергії.

Прикладом торгівлі може служити проект SecondSol - онлайн-майданчик, на якій проводиться купівля-продаж відпрацьованих модулів [13].

Зростання попиту на сонячні батареї підштовхує компанії рухатися в напрямку збільшення ефективності сонячних батарей. За останні роки галузь помітно просунулася в цьому напрямку.

До таких досягнень можна віднести, наприклад, багатошарові сонячні елементи. Тепер же інженери запропонували змінити форму елемента.

Традиційні батареї з плоскими сонячними елементами необхідно постійно направляти на сонці. Новий підхід запропонувала японська компанія Kyosemi, розташована в Кіото. Її елементи "Sphelar" складаються з кремнієвих сферичних осередків діаметром 1 мм. Завдяки такій конструкції сонячні

промені можуть впливати на клітинки під будь-яким кутом. Крім цього, підвищується віддача від відбитих і непрямих променів, що в кінцевому підсумку дає 20% зростання ефективності [14].



Рисунок 1.14 – Утилізація відпрацьованих модулів

1.12 Напрями розвитку нових видів сонячних елементів

Серед інших переваг даної конструкції необхідно відзначити можливість побудови тонких, еластичних і досить практичних батарей. Такі батареї можна навіть вбудовувати в скла будівель або покривати ними масивні конструкції, знижуючи тим самим вартість утримання будівлі.

Новаторством останнього часу є сонячні елементи з барвником (DSC – Dye Solar Cell). Ці нові елементи можна використовувати на вертикальних поверхнях, всередині приміщень або в затінених місцях [14].

DSC представляють собою третє покоління фотоелектричних джерел струму, засноване на принципі штучного фотосинтезу і використовує

нанотехнологію і молекулярний дизайн. Такі елементи особливо добре підходять для локального енергозабезпечення військових об'єктів, так як вони менш чутливі до змін в освітленості і куті падіння світла і володіють вищою ефективністю при малому освітленні.

Фотоелектричні (ФЕ) елементи третього покоління, DSC, можна виготовляти на підкладках зі скла або металу. Вони виготовляються методом трафаретного друку, який дозволяє безперервно наносити шари на рухому стрічку-підкладку. Висока площа поверхні наноконструкцій оксиду титану дозволяє цим елементам працювати при високій хмарності або в затуманеній атмосфері, а не тільки при пекучому сонці, як це має місце в ФЕ системах попередніх поколінь.

1.13 Особливості, переваги та недоліки сонячних елементів

Високими темпами альтернативна енергетика, у тому числі і сонячна, розвивається не лише в США, Європі або Індії, але і в країнах СНД, до їх числа входить Росія, Казахстан, а особливо Україна. Наприклад, найбільша електростанція на сонячній енергії на території країн колишнього Радянського Союзу була побудована в Криму. Її будівництво завершилося в 2011 році. Ця електростанція стала третім новаторським проектом австрійської компанії Activ Solar. Її пікова потужність складає близько 100 МВт.

В жовтні 2011 року компанією Activ Solar була запущена ще одна сонячна електростанція "Охотнікове", також на території Криму. Її потужність склала 80 МВт. Вона також отримала статус найбільшої, але вже на території Центральної і Східної Європи. Можна сказати, що альтернативна енергетика в Україні зробила величезний крок на зустріч безпечній і невичерпній енергії.



Рисунок 1.15 – Сонячна електростанція

У Казахстані ж ситуація виглядає трохи інакше. В основному, розвиток альтернативної енергетики в цій країні відбувається лише в теорії. Потенціал у республіки величезний, але розкрити його повністю доки не виходить. Звичайно, уряд займається цим питанням, і навіть був розроблений план по розвитку альтернативної енергетики в Казахстані, ось тільки частка енергії, що отримується від поновлюваних джерел, зокрема від сонця, складатиме не більше 1 % в загальному енергобалансі країни.

В 2020 році запуск всього 4 сонячних електростанцій, загальна потужність яких складатиме 77 МВт.

Альтернативна енергетика в Росії також розвивається чималими темпами. Але, як заявив заступник міністра енергетики, акцент в цій галузі робиться в основному на далекосхідні регіони. Наприклад, в Якутії сумарне виробництво 4 сонячних електростанцій, що працюють в найвіддаленіших північних селищах, склало більше 50 тис. кВт/год. Це дозволило заощадити більше 14 тон дорогого дизельного палива. Ще одним прикладом

використання сонячної енергії служить багатoproфільний авіаційний комплекс, що будується в Липецькій області. Електроенергію для його роботи вироблятиме перша СЕС, побудована також на території Липецької області.

Усе це дозволяє зробити наступний висновок: сьогодні усі країни, навіть не найрозвиненіші, прагнуть максимально наблизитися до заповітної мети: використання альтернативних джерел енергії. Адже споживання електроенергії росте з кожним днем, з кожним днем збільшується кількість шкідливих викидів в оточуюче середовище. І багато хто вже розуміє, що наше майбутнє і майбутнє нашої планети залежить тільки нас [15].

Особливості будови фотоелементів викликають зниження продуктивності панелей з ростом температур.

Часткове затемнення панелі викликає падіння вихідної напруги за рахунок втрат в неосвітленому елементі, який починає виступати в ролі паразитного навантаження. Від даного недоліку можна позбутися шляхом установки байпаса на кожен фотоелемент панелі. У хмарну погоду при відсутності прямих сонячних променів вкрай неефективними стають панелі, в яких використовуються лінзи для концентрування випромінювання, так як зникає ефект лінзи.

З робочої характеристики фотоелектричної панелі видно, що для досягнення найбільшої ефективності потрібно правильний підбір опору навантаження. Для цього фотоелектричні панелі не підключають безпосередньо до навантаження, а використовують контролер управління фотоелектричними системами, що забезпечує оптимальний режим роботи панелей.

Недоліки сонячної електроенергетики:

- необхідність використання великих площ;
- сонячна електростанція не працює вночі і недостатньо ефективно працює в вечірніх сутінках, в той час як пік електроспоживання припадає саме на вечірні години;

– незважаючи на екологічну чистоту отримуваної енергії, самі фотоелементи містять отруйні речовини, наприклад, свинець, кадмій, галій, миш'як і т. п.

Сонячні електростанції піддаються критиці через високі витрати. Через свою низьку ефективність, яка в кращому випадку досягає 20 відсотків, сонячні батареї сильно нагріваються. Решта 80 відсотків енергії сонячного світла нагрівають сонячні батареї до середньої температури близько 55°C. Зі збільшенням температури фотогальванічного елемента на 1°C, його ефективність падає на 0,5%. Ця залежність не лінійна і підвищення температури елемента на 10 призводить до зниження ефективності майже в два рази [16].

Активні елементи систем охолодження (вентилятори або насоси) перекачують холодоагент, споживають значну кількість енергії, вимагають періодичного обслуговування і знижують надійність всієї системи. Пасивні системи охолодження мають дуже низьку продуктивність і не можуть впоратися із завданням охолодження сонячних батарей.

Китайська компанія Risen Energy - провідний світовий виробник фотоелектричного обладнання. Фірма заснована в 1986 році. Експортує продукцію в більш ніж 30 країн Європи, Америки, Південної Африки і Південно-Східної Азії. Добре відома на українському ринку. Виробничі потужності зосереджені в провінції Чжецзян. "Райзен Енерджі" регулярно входить в список лідируючих виробників сонячних панелей за версією фінансово-аналітичного агентства "Блумберг". Асортимент компанії величезний, але ми розглянемо п'ятірку кращих сонячних батарей Risen, на думку покупців [17].



Рисунок 1.16 – Асортимент полікристалічних сонячних панелей

Полікристалічна сонячна панель RSM60-6-280P стандартного типу складається з 60 фотоелементів з п'ятьма струмопровідними шинами в кожному осередку (технологія 5BB). Номінальна потужність пристрою - 280 Вт. Ефективність перетворення світлової енергії в електричну (ККД) - 17,1%. Модуль займає площу 1,64 кв. м. Важить 18 кг. Температурний коефіцієнт (показник втрат потужності в результаті перегріву) - 0,39% / ° С. Термін служби - 25 років. Ціна - від 2700 гривень.

Стандартний фотоелектричний модуль RSM72-6-335P на основі полікремнію утворений 72-ма осередками. Зроблений за технологією 5 Bus Bar. ККД пристрою досягає 17,3%. Потужність, заявлена виробником, - 335 Вт. Температурний коефіцієнт - 0,39% / ° С. Сонячна батарея "Райзен" розрахована на експлуатацію протягом 25 років. Важить 22 кг. Займає площу 1,94 кв. м. Ціна - від 3300 гривень.

Сонячна панель RSM60-6-310M PERC потужністю 310 Вт виготовлена по PERC-технології з монокристалічного кремнію. Як результат, має

підвищену продуктивність (до 18,9%). Модуль складається з шістдесяти п'ятишинних фотоелементів. Займає площу 1,64 кв. м і важить 18 кг. Коефіцієнт втрати потужності при перегріванні - 0,39% / ° С. Ціна - від 3500 гривень. (рис.1.16)

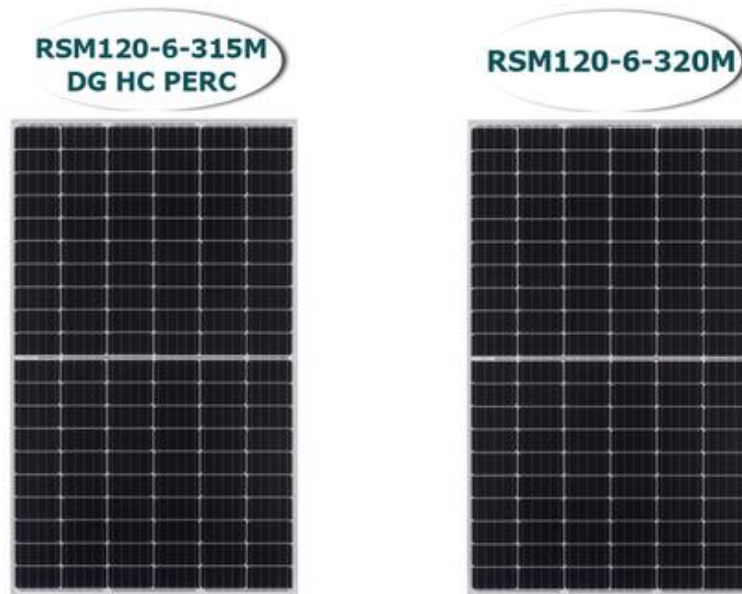


Рисунок 1.17 – Інновації сонячних батарей

Відразу три інновації в одній сонячній батареї! Панель RSM120-6-315M DG HC PERC потужністю 315 Вт складається з 120 половинчастих фотоелементів з п'ятьма укороченими струмопровідними шинами в кожному осередку (технологія Half-Cell). Не тільки з лицьового, а й з тильного боку захищена загартованим світлопоглинаючим склом (технологія Dual Glass). Є перфорований шар діелектрика (PERC). Пристрій перетворює енергію з ефективністю 18,7%. Температурний коефіцієнт, як і у попередніх моделей, знижений до 0,39% на кожен градус. Термін служби - від 30 років. Займає площу 1,69 кв. м, важить 22 кг. Ціна - від 3600 гривень.

Схожа за характеристиками модель RSM120-6-320M PERC, але зі звичною пластиковою, а не зі скляною тильною стороною. До особливостей

сонячної батареї потужністю 320 Вт можна віднести підвищений ККД - 19,1%. Важить 19 кг, займає площу 1,67 кв. м. Служить не менше 25 років. Ціна - від 3700 гривень.

Таблиця 7 – Порівняння сонячних панелей «Райзен» [17]

СРАВНЕНИЕ СОЛНЕЧНЫХ ПАНЕЛЕЙ RISEN									
Модель	Количество фотоэлементов, штук	Площадь, кв. м	Вес, кг	Мощность, Вт	Максимальный КПД, %	Температурный коэффициент, %/°C	Срок службы, лет	Используемые технологии	Цена за штуку, грн
RSM60-6-280P	60	1,64	18	280	17,1	-0,39	25	5BB	2700
RSM72-6-335P	72	1,94	22	335	17,3	-0,39	25	5BB	3300
RSM60-6-310M PERC	60	1,64	18	310	18,9	-0,39	25	5BB, PERC	3500
RSM120-6-315M DG HC PERC	120	1,69	22	315	18,7	-0,39	30	5BB, PERC, Dual Glass, Half-Cell	3600
RSM120-6-320M PERC	120	1,67	19	320	19,1	-0,39	25	5BB, PERC, Half-Cell	3700

Отже, з позиції ціни за кожен ват потужності, як бачимо з таблиці 7, вигідно купувати RSM60-6-280P. Якщо виходити з показників врожайності квадратного метра пристрою, краще вибирати монокристалічні PERC панелі "Райзен". Дана технологія дозволила помітно підвищити продуктивність без подорожчання вартості виробництва. Як результат, такі сонячні батареї швидше окупаються.

1.14 Перспективи розвитку сонячних панелей

До 2022 року на ринку сонячної енергетики з'являться доступні за ціною дахові сонячні панелі з рекордним рівнем перетворення сонячного світла в електрику – до 29%. Такий показник ефективності буде досягнуто за рахунок прийшовших з космічної галузі матеріалу і концентруючих сонячне світло лінз. Швейцарська компанія Insolight вже працює над комерційною реалізацією з мінімізацій виробничих витрат нової технології двовимірного

оптичного мікротрекінга. Два роки тому Insolight встановила рекорд конверсії сонячного світла в електрику в сонячних панелях, домігшись у лабораторних умовах ККД 36%. При стандартизації для масового виробництва цей показник довелося знизити до 29%, але це значно більш висока продуктивність у порівнянні з 17–19%, яку пропонують конкуренти, що випускають стандартні кремнієві сонячні панелі. Очікується, що різниця між лабораторною і комерційної продуктивністю буде вирішена пізніше, якщо панелі з ККД у 29% вийде випускати з планової низькою собівартістю [17].

Космічні сонячні панелі, взяті за основу компанією Insolight, мають багатоперехідну структуру, в якій поєднані кілька шарів арсеніду галію (більш стійкого до космічної радіації), фосфіду індію, галію та германію. Така комбінація дозволяє зібрати більше енергії сонячного спектра з одиниці площі.

У космосі сонячні панелі майже на 100% покриті прямокутними фотоелементами для оптимального збору сонячної енергії. У земних стандартних панелях фотоелементи покривають близько 90% поверхні, а в панелях Insolight і того менше, але вони працюють більш ефективно завдяки лінзам, які концентрують широкий спектр світла на невеликих елементах.

Завдяки оптичній концентрації менше 0,5% всієї поверхні необхідно покрити осередками для досягнення оптимальної продуктивності. Це дозволяє використовувати технології високоефективних космічних сонячних елементів для масового ринку. Insolight пояснює, що захисне скло панелі містить сітку з лінз, які концентрують світло в кілька сотень разів.



Рисунок 1.18 – Сонячні батареї

Це досягнення і так є досить багатообіцяючим – без подальшої модернізації. Але в Insolight також розробили масив фотоелементів, здатний щодня переміщатися по горизонталі на кілька міліметрів для відстеження сонця. Система з мікротрекінгом поміщена в тонкий модуль, схожий на стандартні сонячні панелі, який захищає механічні частини.

Модулі Insolight вже були випробувані в реальних умовах протягом цілого року на пілотній установці в Швейцарському технологічному інституті в Лозанні (EPFL) і успішно витримали теплові перепади, зимові морози і шторми [17].

«За останні два роки наша команда перенесла продукт з лабораторного прототипу на повнорозмірну сонячну панель, підключену до мережі і контрольовану 24/7. Наша система була ретельно протестована, і зараз ми готуємо стратегію індустріалізації для великомасштабного виробництва», – говорить Мат'є Аккерманн, технічний директор Insolight [17].

Щоб прискорити вихід на ринок, Insolight зараз обговорює з декількома виробниками сонячних батарей питання ліцензування своєї технології. У минулому році компанія оголосила про успішне раунді початкового

фінансування за рахунок інвестицій від *investiere.ch*, Zürcher Kantonal Bank і групи приватних бізнес-ангелів. А найперше вона фінансувалася FIT (Fondation pour l'Innovation Technologique) та бізнес-інкубатором ESA (ESA VCS, Швейцарія).

Фахівці IHS Markit підраховали, що в 2019 році потужність всіх фотоелектричних установок досягла 123 ГВт і показала 18-відсотковий приріст. Дві третини ринку змістилися за межі Китаю, а ситуація з надлишковими виробничими потужностями покращилась, незважаючи на подану раніше аналітику TrendForce.

В даний час Китай займає близько половини всієї світової сонячної індустрії. Але на думку Едурн Зоко, наукового директора IHS Markit, його частка скоротиться до однієї третини, а інша частина ринку опиниться в інших країнах. Вона прогнозує поживлення існуючих ринків або появу нових в Аргентині, Єгипті, Південній Африці, Іспанії та В'єтнамі. У 2019 році їх частка залишилась в 7 відсотках, або 7 ГВт.

Друге місце на ринку сонячної енергетики займають Сполучені Штати і в наступному році кількість сонячних установок в цій країні зросте на 28%. Справа в тому, що компанії якомога швидше запуснуть свої проекти, щоб до кінця грудня отримати 30% інвестиційний податковий кредит. Хоча більш всього лише почнуть відвантаження модулів, але і це дозволить виконати мінімальні вимоги для отримання пільг (закупівля мінімум 5 відсотків усіх компонентів.)

З весни 2018 року в Китаї відбулася різка зміна виробничої політики, що призвело до деякого обмеження доступних потужностей на складах постачальників. Тепер увагу планується робити на підвищення динаміки товарообігу, що добре позначиться на ситуації з можливим перевиробництвом.

У другій половині минулого року стався обвал цін, але попит за межами Китаю, особливо в Мексиці, В'єтнамі та Іспанії, як і раніше залишається

високим. Завдяки цьому, в першому півріччі 2019 року зниження ціни сповільнилось [17].

«Багато міжнародних компаній стали активніше робити закупівлі, побоюючись, що нова політика Китаю щодо сонячної енергії може обмежити їх доступ до модулів на міжнародному ринку», – зазначає Зоко.

Дженні Чий, експерт з компанії BloombergNEF, стверджує, що середні світові ціни на сонячні панелі в даний час складають близько 23–26 центів за один ват. «Ми очікуємо, що до кінця 2020 року падіння складе 10–15% через надлишкової пропозиції і зниження ціни. Середня ціна, яку платять компанії комунального масштабу, становить близько 23 центів», – прогнозує він.

2 ТОНКОПЛІВКОВІ БАТАРЕЇ

2.1 Рулонна технологія виготовлення модулів СЕ

При переході від науково-дослідних і дослідно-конструкторських робіт до великомасштабного потокового виробництва ключовими моментами стає однорідність осадження на великих площах, швидкість осадження, використовувані гази, вихід придатних, відтворюваність, можливість автоматизації. Прикладом поточного виробництва СЕ на підкладці з нержавіючої сталі є рулонна технологія, розроблена в Energy Conversion Devices, Inc. (ECD). Суть технології полягає в тому, що формування СЕ здійснюється на сталевий лист, який до початку процесу згорнутий в рулон, під час процесів поступово розгортається на вході в установку, а після закінчення, згортається на виході з неї. Сталевий лист має товщину 125 мкм, ширину 0,35 м і довжину 750 м. Виробництво можна розділити на дві частини: осадження та збирання. Осадження, в свою чергу, складається з чотирьох етапів, в кожному з яких задіяні рулонні установки:

- 1) очищення підкладки;
- 2) осадження заднього відбиваючого шару;
- 3) осадження $a\text{-Si:H}$ і $\mu\text{-Si:H}$;
- 4) осадження верхнього шару ІТО.

Установка для очищення включає модуль для ультразвукового відмивання в спеціальних миючих розчинах, обробку щітками, ванни з дейонізованою водою, камеру для інфрачервоного сушіння.

Очищений сталевий лист скручують на виході разом із захисним листом. Далі сталевий лист простягається через кілька модулів з магнетронами при постійному струмі для осадження Al або Ag шарів як відбивач і ZnO в якості буферного шару. Осадження здійснюється на нагріту

підкладку, що забезпечує формування текстурованих шарів для посилення відображення 133 кольорів.



Рисунок 2.1 – Кристалічний сонячний модуль

Далі рулон подається в установку для ВЧ ПХО (осадження дев'яти шарів) для формування структури $n-i-p / n-i-p / n-i-p$ (температура осадження $250-300 \text{ }^\circ \text{C}$), а також буферних шарів з обох сторін шару $a\text{-SiGe:H}$. Осадження всіх шарів проводиться послідовно, але за один прохід рулону. Для зменшення дефектів у плівці за рахунок попадання частинок нанесення шарів здійснюється знизу. Швидкість подачі сталевого листа складає $\sim 30 \text{ см / хв}$.

Камери ізолюються одна від одної динамічно за допомогою газового затвора для запобігання забруднення, однак при цьому сталевий лист безперервно рухається. Після осадження напівпровідникової структури рулон завантажується в установку для нанесення шару ТСО. Використовується або реактивне випаровування індію в атмосфері кисню, або розпорошення мішені оксид індію-оксид олова в атмосфері Ar . Друга частина виробництва – збірка, включає наступні етапи [18].

Спочатку рулон зі сформованої структурою сонячного елемента розрізається на окремі листи необхідного розміру. Далі по периметру листа наноситься трав'яча паста, яка активується в конвеєрній печі для видалення ІТО. Вибрані зразки проходять контроль якості. Потім СЕ надходять на операцію усунення шунтів. Для цієї мети в електроліті виробляють окислення ТСО до діелектрика в галузі освіти шунта. Виготовлення СЕ завершується формуванням провідної сітки за допомогою вуглецевої пасту або мідного дроту, покритого вуглецевою пастою.

Окремі сонячні елементи з'єднуються між собою, виготовляють модулі, які покривають прозорим герметизуючим шаром етілвенілетілена і встановлюють на несучі конструкції. Рулонне виробництво є великомасштабним і при цьому простим та гнучким. Сталевий лист зі сформованої структурою СЕ може бути розрізаний на будь-які розміри від малих, необхідних, наприклад, для зарядних пристроїв, до великих, призначених для установки на дахах будівель.

Стабілізований ККД модулів, отриманих за цією технологією, становить 8%. Замість сталевих листів може використовуватися гнучка каптонова підкладка. Важливим аспектом виробництва сонячних батарей на основі а-Si:H є дотримання техніки безпеки. Незважаючи на те, що в кінцевому продукті немає токсичних речовин, у виробничому процесі використовуються токсичні, вогнебезпечні та вибухонебезпечні гази - моногерман, фосфін, тріметілбор, моносилан, водень і т.п.

2.2 Виготовлення модулів СЕ на скляній підкладці

Для промислового виробництва модулів з СЕ на основі аморфних напівпровідників можуть використовуватися скляні підкладки (товщина 3 мм, ширина 0,5 м, довжина 1 м), на які наноситься текстурований шар ТСО (SnO_2) за допомогою хімічного осадження з газової фази при атмосферному

тиску. Після цього шар ТСО скрайбірується на смуги шириною близько 9 мм, і підкладки завантажуються в установку плазмохімічного осадження для нанесення шарів напівпровідників (шість шарів для формування структури p-i-n / p-i-n в разі тандемного сонячного елемента a-Si:H /a-SiGe:H). Далі осідає буферний шар ZnO і проводиться наступне лазерне скрайбірування поблизу ліній першого скрайбування. При цьому потужність лазера підбирається таким чином, щоб віддалялися шари ZnO і напівпровідників, але залишався шар SnO₂. Далі осідає Al в якості заднього відображаючого і контактного шару і проводиться третє скрайбування поблизу другого, завершаючи послідовне з'єднання сусідніх елементів на підкладці, яке дозволяє знизити втрати на опорі за рахунок збільшення вихідної напруги і зменшення струму СЕ [18].

Формування з'єднання окремих елементів простіше виготовити на скляній підкладці, ніж на сталевій. Четверте лазерне скрайбірування по периметру ізолює активну область від країв підкладки. Формування панелі закінчується спайкою з іншою скляною пластиною за допомогою етілвенілетілена (ЕВЕ). Цікавим, з практичної точки зору, є формування фотоелектричних перетворювачів на гнучкій основі. Такі СЕ мають суттєво меншу вагу, ніж звичайні, і легко монтуються фактично на будь-якій поверхні. Вони можуть повторювати поверхню будівель і дахів, а завдяки малій вазі, відпадає необхідність посилення несучих конструкцій. Подібна технологія може знайти застосування при створенні спеціальної тканини зі сформованим фотоелектричним перетворювачем, яка може бути використана при виготовленні вітрил, одягу. З такого матеріалу можна виготовляти сумки і чохли, наприклад, для стільникових телефонів, плеєрів і т. д. Великий інтерес до подібної технології виявляють представники військової промисловості.

В даний час розробляється технологія, яка передбачає використання в якості основи пластикової підкладки, а в якості робочого шару - аморфного напівпровідника. На обидві сторони гнучкої пластикової підкладки

наносяться шари металів, один з яких - металевий електрод, а інший - задній електрод. Ці шари запобігають газовиділення з підкладки і зберігають шари напівпровідників від деградації. Шари на основі a-Si:H осідають на металевий електрод, після чого наноситься шар прозорого провідячого електроду на основі оксидів індію та олова. У сформованих СЕ є два типи отворів: одні забезпечують електричний контакт між прозорим провідячим електродом і заднім електродом, а інші - між металевим і заднім електродами. ІТО має відносно високий питомий опір, що призводить до збільшення послідовного опору СЕ. Перший тип отворів дозволяє знизити цей опір і збільшити ефективність збору носіїв. Лазерне скрайбірування по обидва боки підкладки дає можливість сформувати окремі елементи, послідовно з'єднані між собою.

За такою технологією були сформовані модулі на гнучкій підкладці розміром 40×80 см² на основі тандемних СЕ з і-шарами з a-Si:H [17].

Вихідна напруга модуля склала 200 В, ККД - 10,5%. Формування подібних СЕ можливе з використанням рулонної технології. Оригінальна технологія виготовлення гнучких фотоелектричних перетворювачів запропонована канадською компанією «Spheral Solar» (Cambridge, Ontario). Основу таких сонячних елементів складає безліч кремнієвих намистин, розташованих між двома тонкими плівками алюмінію 136-вої фольги, запечатуваних в пластик. Кожна окрема намистинка є крихітним СЕ, який поглинає сонячне світло і перетворює його в електрику. Шари алюмінієвої фольги надають всій структурі необхідну міцність і служать електричними контактами. Для виготовлення намистин використовується кремній з відходів електронної промисловості. Його розплавляють і кристалізують в сфери, діаметром приблизно один міліметр. Далі кремнієві сфери легуються бором для отримання р-типу провідності, а в приповерхневий шар проводиться дифузія фосфору, в результаті чого формується р-n-перехід. Виготовлені таким чином кремнієві кульки поміщаються на перфорований лист алюмінію, який створює контакт з

поверхнею, що має n-тип провідності. Далі деяка частина поверхні сфери стравлюється до ядра р-типу провідності. Другий шар алюмінієвої фольги створює контакт до ядра р-типу. Після цього вся структура герметизується за допомогою пластику. Нерівна поверхня сфери дає змогу збільшити площу, яка поглинає світло. Для фотоелектричного перетворювача з подібною структурою отримано значення ККД = 11%, що рівняється з ефективністю перетворення звичайних СЕ і значно перевершує ККД виготовлених в даний час сонячних елементів на гнучкій основі. Такий матеріал можна розміщувати на поверхні будь-якої форми і покривати будь-які будови і конструкції.

2.3 Гнучкі сонячні елементи

В основі гнучких сонячних елементів - полімерні плівки, аморфний кремній, алюміній, телурид кадмію та інші напівпровідники, які вже застосовуються у виробництві портативних зарядних пристроїв для сотових телефонів, ноутбуків, планшетів, відеокамер та інших пристроїв, у складі сонячних батарей невеликого розміру. Якщо потрібно більше енергії, то і площа модуля повинна бути більшою.

Самі перші зразки тонкоплівкових сонячних елементів вироблялись із застосуванням нанесеного на підложку аморфного кремнію, а ККД отримувався від 4 до 5%, і строк служби не був довгим.

Наступним кроком всіх тих технологій стало підвищення КПД до 8% та поширення дії роботи, він став рівним із кристалічними попередниками. А третє покоління тонкоплівкових модулів уже володіє ККД у 12%, що вже є значним просуванням і конкурентоспроможністю [19].

Застосовані тут селенід міді-індію та телурид кадмію, дозволили створити гнучкі сонячні батареї та портативні зарядні пристрої з ККД до 10%, що вже є значним досягненням, якщо брати до уваги, що фізики ведуть боротьбу за кожен додатковий відсоток ККД.

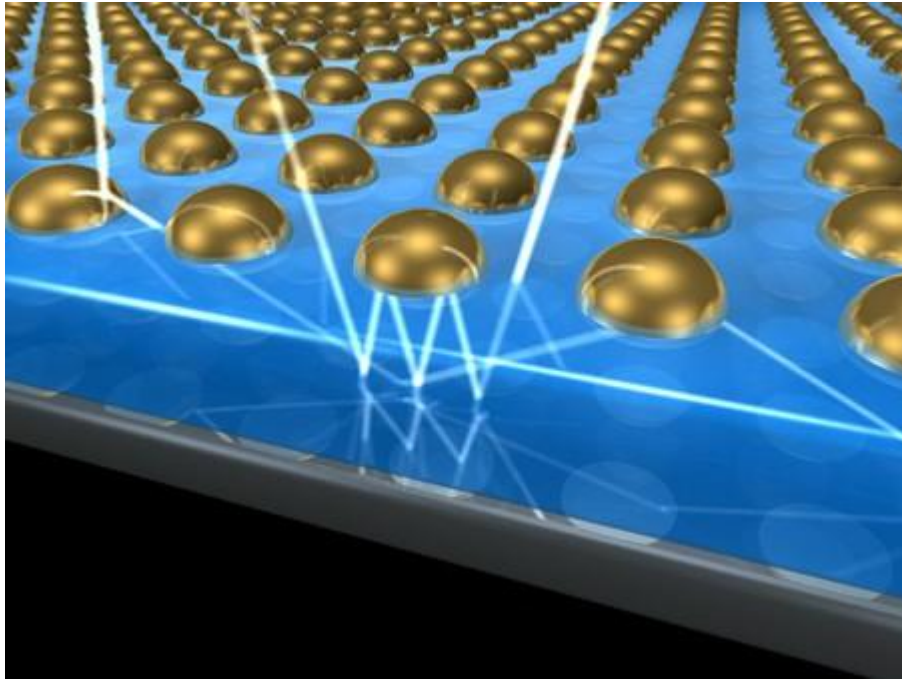


Рисунок 2.2 – Принцип дії гнучкого сонячного елемента

Що стосується телурида кадмію, то у якості світлопоглинаючого матеріалу його почали досліджувати ще в 70-і роки, коли потрібно було підібрати найкращий варіант для використання в космосі. І по сей день саме телурид кадмію залишається найбільш перспективним для сонячних батарей. Однак питання про токсичність кадмію залишається деякий час відкритим.

У результаті досліджень було показано, що небезпека мінімальна, рівень кадмію, вивільненого в атмосферу небезпечний. ККД склав 11%, при цьому ціна одна ватта стала на третину нижче, ніж в кремнієвих аналогах [19].

Тепер про селенід міді-індію. Значуща частина індію сьогодні входить до створення плоских моніторів, тому індій замінюють на галій, що володіє такими ж властивостями для сонячної енергетики. Плівкові батареї на цій основі досягають ККД у 20%.



Рисунок 2.3 – Гнучкий сонячний елемент

Нещодавно почали розробляти полімерні панелі. Тут світлопоглинаючими матеріалами служать органічні напівпровідники: вуглеродні фуллерени, поліфенілен, фталоціанін міді та інші. Товщину сонячного елемента отримують 100 нм, однак ККД становить від 5 до 6%. При цьому вартість виробництва достатньо низька, плівки доступні, легкі та повністю екологічні. За цією причиною полімерні панелі популярні там, де важлива екологічність при використанні та механічна еластичність.

Отже, ККД тонкоплівкових сонячних елементів, отриманих сьогодні:

- Монокристал - від 17 до 22%;
- Полікристал - від 12 до 18%;
- Аморфний кремній - від 5 до 6%;
- Телурид кадмію - від 10 до 12%;
- Селенід міді-індію - від 15 до 20%;
- Органічні полімери - від 5 до 6% [18].

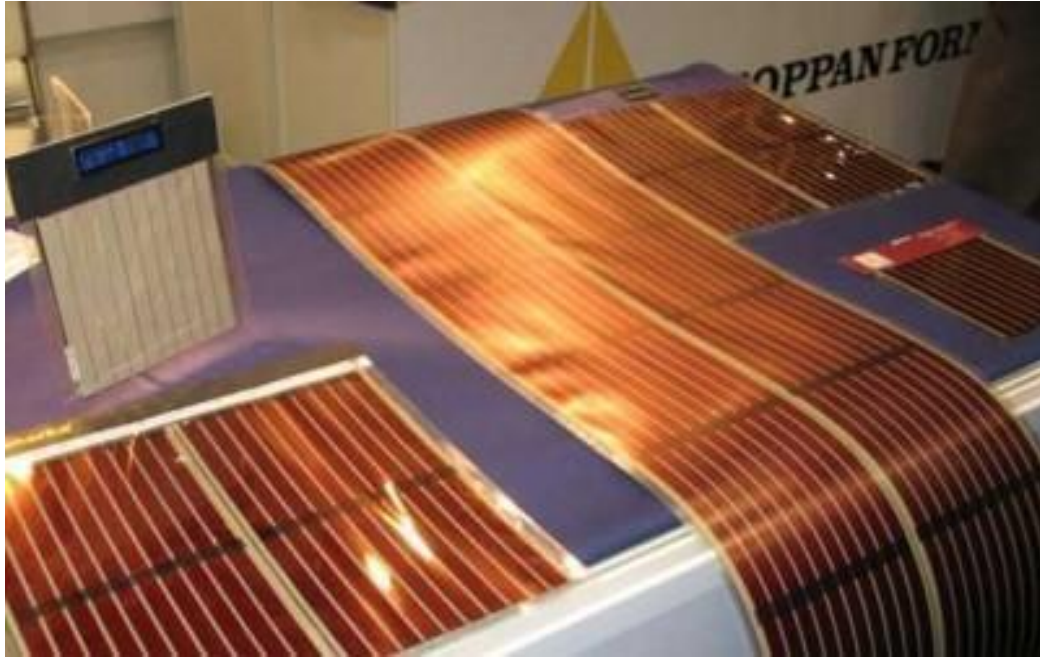


Рисунок 2.4 – Тонкоплівковий модуль

У чому ж особливості тонкоплівкових батарей? У першу чергу слід відзначити високу продуктивність модулів навіть при розсіяному світлі, що становить до 15% більшої потужності протягом року за порівнянням із кристалічними аналогами. Далі йде перевага в вартості виробництва. У потужних системах, від 10 кВт, саме тонкоплівкові модулі показують більшу ефективність, хоча площа вимагає бути в 2,5 рази більше.

Таким чином, можна назвати умови, коли тонкоплівкові модулі набувають виправдану перевагу. У регіонах, з переважно пасмурною погодою, саме тонкоплівкові батареї будуть ефективно працювати (розсіяне світло). Для регіонів з жарким кліматом, тонкі плівки виявляються більш ефективними (при високій температурі вони так ефективно працюють, як і при невисокій). Можливість використання в якості декоративних дизайнерських рішень при оздобленні фасадів будівель. Можлива прозорість до 20%, що дає знову широку змогу дизайнерам.

Між тим, ще в 2008 році американська компанія Solyndra запропонувала розмістити тонкоплівкові батареї на циліндрах, коли шар фотоелементу наноситься на скляну трубку, яка розміщується в середині іншої трубки, забезпеченої електричними контактами. Застосовані матеріали - мідь, селен, галій, індій.



Рисунок 2.5 – Тонкоплівковий модуль на скляній трубці

Циліндричне виконання дозволяє поглинати більше світла та набір із 40 циліндрів вміщується на панелях розміром метр на два. Перевага тут в тому, що біле покриття даху забезпечує високу ефективність таких рішень, тоді як відбиті промені теж працюють, додаючи свої 20% енергії. До того ж циліндричні набори стійкі навіть до сильного вітру з поривами до 55 м / с.

Більшість сонячних елементів, вироблених сьогодні, містять всього один р-п перехід, і фотони з енергією меншою, ніж ширина забороненої зони, просто не беруть участі в генерації. Тоді вчені придумали шлях подолання цього обмеження, були розроблені каскадні елементи багат шарової

структури, де кожен шар має свою ширину забороненої зони, тобто кожен шар має індивідуальний р-п перехід з індивідуальним значенням енергії поглинаючих фотонів [20].

Верхній шар формують зі сплаву на основі гідрогенизованого аморфного кремнію, другий - аналогічний сплав з додаванням германію (10-15%), третій - з додаванням від 40 до 50% германію. Таким чином, кожен наступний шар має заборонену зону вужче, ніж у попереднього шару, і не поглинені фотони в верхніх шарах, поглинаються нижче лежачими шарами плівки. При такому підході вартість енергії, що генерується, знижується вдвічі в порівнянні з традиційними кристалічними кремнієвими елементами. Внаслідок досягнуто ККД 31% на трьохперехідній плівці, а п'ятиперехідна обіцяє всі 43%.

Не так давно фахівці розробили сонячні батареї рулонного типу на основі полімеру, нанесеного на підкладку з гнучкого органічного матеріалу. ККД вийшов всього 4%, зате працювати такі батареї можуть навіть при + 80°C протягом 10000 годин. Ці дослідження ще не завершені. Швейцарські вчені досягли на полімерній підложці ККД 20,4%, а в якості напівпровідників використовували індій, мідь, селен і галій. Сьогодні це рекорд для елементів на тонкій полімерній плівці. В Японії досягли аналогічним чином (індій, селен, мідь) 19,7% ККД, наносили напівпровідники методом напилення. А ще в Японії зайнялися виготовленням сонячної тканини, тканинні сонячні панелі розробили, застосувавши циліндричні елементи діаметром близько 1,2 міліметра, прикріплені до тканини [20].

Судячи з усього, саме тонкоплівкові сонячні батареї стануть нарешті загальнодоступними для населення в найближчому майбутньому. Не дарма ж з метою зниження собівартості ведеться стільки досліджень по всьому світу.

2.4 Сонячні батареї у вигляді тонкої і прозорої плівки

Нові сонячні батареї - це тонка і прозора плівка, вона ідеально підходить для перетворення будь-яких вікон в електричний генератор (рис. 2.6). Наприклад, в жаркий період такі сонячні батареї можуть з легкістю підживлювати кондиціонер. Таким чином, за роботу кондиціонера вже платити не потрібно. Крім того, плівка є хорошим ізоляційним матеріалом. Вчені дуже добре вирішили задачу балансу між трьома проблемами.



Рисунок 2.6 – Сонячні батареї у вигляді прозорої плівки

Дана плівка, крім того, що виробляє електроенергію, також відображає зайве тепло, щоб повітря в кімнаті не перегрівалося і при цьому пропускало достатню кількість сонячного світла, щоб кімната було освітлена. А також ця плівка захищає здоров'я людини. Вона поглинає шкідливе ультрафіолетове і інфрачервоне випромінювання, з якого і складається сонячне світло, і з якого

власне і виробляється електроенергія. І в той же самий час безперешкодно пропускає промені видимого спектру сонячного світла [20].

Звичайно, є ще невеликі проблеми. Наприклад, ефективність сонячних панелей на даху становить 20%, а ефективність віконної плівки поки що всього 7%. Але вчені працюють над цією проблемою.

Було підраховано, що якщо обклеїти всі вікна великого житлового будинку такою плівкою, то половину електроенергії мешканці цього будинку, вже сьогодні змогли б отримувати безкоштовно.

2.5 Конструктивні відмінності тонкоплівкових геліопанелей

Звичайні каркасні батареї мають в основі фотоелементи з кристалів кремнію. Ряди фотоелементів кріпляться на жорсткий каркас з склотекстоліту, зверху закриваються загартованим склом. Рамкові кремнієві модулі тендітні, масивні, досить важкі (близько 10 кг на кожні 150 Вт потужності).

Тонкоплівкові і гнучкі сонячні панелі є другим поколінням геліомодулей. Залежно від використовуваних у виробництві матеріалів їх виділяють в 3 умовні групи:

- модулі з аморфного кремнію (a-Si);
- панелі на основі телуриду-кадмію (CdTe);
- моделі з використанням індію діселеніда галію, міді (CIGS) [21].

Фізично тонкоплівкові модулі складаються з основи (скло, пластикова плівка або металізована фольга), двох шарів фотоелектричного напівпровідника (наносяться методом напилення). Зверху все покривають декількома шарами плівок (антиблікової, захисної і т.п.).

ККД перших гнучких сонячних батарей було всього 4-5%. Але з часом технології дозволили поліпшити показник. ККД сучасних моделей тонкоплівкових модулів залежить від виробничих процесів і коливається від

12% (гнучкі сонячні панелі з аморфного кремнію) до 18% (у телуриду-кадмієвих). У гнучких сонячних панелей і сонячних батарей ККД підвищується при використанні багат шарових напівпровідникових конструкцій. Така технологія дозволяє кілька разів переробити енергію сонця, в лабораторних умовах ККД при каскадній будові виростає до 20%.

Розглянемо переваги тонкоплівкових модулів. Панелі цього виду мають кілька відчутних плюсів в порівнянні з іншими представниками галузі.

1. Вага. Оскільки плівкові панелі набагато легше кремнієвих, встановлювати гнучкі сонячні батареї своїми руками набагато простіше;

2. Ціна. Завдяки виробничим процесам ціна на плівкові панелі нижче ніж на кремнієві;

3. Мобільність. Деякі види плівкових панелей можна згорнути в рулон, що значно спрощує транспортування, дає додаткові можливості використання в різних локаціях;

4. Міцність. Батареї стійко витримують негоду - їм не страшні снігопади, град, сильний дощ;

5. Найбільш ефективні в похмуру погоду. У порівнянні зі своїми кремнієвими аналогами тонкоплівкові панелі не так вимогливі до прямих променів сонця;

6. Напівпрозорість. Деякі моделі настільки тонкі, що можуть бути встановлені на вікнах, при цьому, додатково до генерації електроенергії, замінюючи роль штор [21].

Сфера застосування тонкоплівкових геліобатарей:

Тонкоплівкові варіанти використовують в електромобілях, яхтах і літаках. Вага є вирішальним фактором при виборі спорядження для альпіністів і походів в гори, тому гнучкі модулі - кращий варіант в такій ситуації. Пристрої володіють невеликою потужністю, але її вистачає, щоб зарядити ліхтарики, телефон або ноутбук. Їх можна встановити, як на наметі в

період відпочинку, так і закріпити на рюкзаку, заряджаючи гаджети прямо на ходу.

Гнучкі сонячні батареї отримали хороші відгуки від власників приватних домоволодінь, які встановили їх, покриваючи дах. Гнучкість дозволяє міцно зафіксувати модуль на шифері, черепиці та інших покриттях.

Напівпрозорими моделями можна тонувати шибки, таким чином затінюючи кімнату і отримуючи електроенергію від сонця.

2.6 Ціни гнучких сонячних панелей

Ціни на гнучкі сонячні батареї нижче, ніж у полікристалічних і монокристалічних модулів. Одна тонкоплівкова панель може обійтися від 30 до 200 доларів.

Щоб забезпечити високу продуктивність системи, для початку проводять розрахунок. Потрібно оглянути місце монтажу гнучких сонячних панелей, зробити виміри і тільки потім купувати комплект геліопанелей.

На вартість впливає і виробник. Так гнучкі сонячні батареї з Китаю досить дешеві, але при їх покупці потрібно бути обережним. Деякі виробники економлять на матеріалах, тому шанс отримати неякісний товар досить високий. Краще гнучкі плівкові сонячні батареї купити у перевірених компаній, таких як Trina Solar, Yingli і Suntech. Гнучкі сонячні батареї з України не поступаються за якістю хорошим китайським аналогам і мають аналогічну ціну. Фірма «Квазар» випускає всі види таких панелей. Цікавим є модельний ряд сонячних зарядних пристроїв без акумуляторів. У даних зарядок є ряд переваг:

- легка вага (відсутні скло, металева рамка);
- зручне транспортування (модулі можна скласти в 4-5 разів);
- зарядка працює в будь-яку погоду (в похмурий або зимовий день заряджати пристрої доведеться трохи довше).

Тонкоплівкові батареї з напиленням з телуриду кадмію пропонує компанія Green Tech Trade - офіційний представник First Solar в Україні. Додаткове напилення дозволяє краще працювати з розсіяним світлом, що значно збільшує ефективність всієї сонячної станції [21].

Підводячи підсумки по тонкоплівкових СЕ можна сказати, що в цій області потрібне:

1. Збільшення ККД модулів з сьогоднішніх 6-8 % до 14-15 %.
2. Подальше дослідження фундаментальних властивостей матеріалів, їх теоретичний аналіз, розробка нових конструкцій СЕ, дослідження меж розділу в них.
3. Розробка нових багатоперехідних структур.
4. Розробка дешевих, високоефективних ТСО матеріалів.
5. Використання альтернативних конструкцій модуля (нові підкладки і нові технології корпусування).
6. Збільшення терміну стабільної роботи модуля до 20-30 років зі зменшенням ефективності перетворення менш ніж на 10 %.
7. Розробка процесів і устаткування для забезпечення дешевого широкомасштабного виробництва з високим виходом придатних ФЕП.
8. Поліпшення однорідності властивостей плівок на великих площах.
9. Збільшення відтворюваності технологічних процесів.
10. Зниження окупності модуля до одного року і менш.
11. Адаптація нових вдалих технологічних рішень до умов промислового підприємства.

2.7 Три нові ефективні сонячні технології

Стан глобальної сонячної промисловості сьогодні орієнтується на міжнародні тарифи. Швидше за все, в короткостроковій перспективі це призведе до скорочення рентабельності галузі і підвищення важливості

технологічної переваги. Провідні виробники сонячних елементів і сонячних панелей випустили поліпшені продукти в 2018 і 2019 роках, що забезпечило перевагу як в ефективності, так і в економіці.

Деякі з найбільших досягнень в області технологій виробляють з поліпшених матеріалів, які краще підходять для перетворення сонячного світла в електрику. Сьогодні всі сонячні панелі покладаються або на кристалічні кремнієві матеріали (70% ринку), або на тонкоплівкові матеріали, такі як телурид кадмію (28% ринку). Обидва матеріали мають переваги і недоліки.

Жодна компанія не виробляє кремнієві сонячні елементи краще, ніж SunPower. Продукти X-серії компанії, які доступні сьогодні, мають 21,5% ефективності. Однак продукт буде використовуватися тільки для нішевих пропозицій. Дешевша P-серія компанії має більш широкі ринкові можливості і рейтинг ефективності 19% - вище верхньої межі діапазону для кремнієвих панелей масового ринку, який становить близько 17%.

First Solar є безперечним лідером технологій тонкоплівкових сонячних батарей. У той час як панелі Premium Series 6 дають близько 17% сонячної ефективності, вони компенсують це меншою ціною, ніж кремнієві панелі. Це дозволило продемонструвати вражаючу рентабельність в останні роки завдяки швидко розвивається сонячного ринку.

Але паралельно і ціна кремнієвих фотопанелей падає, а їх ефективність стає все вище. Крім того, ринок сонячної енергії може стати ще перспективніше завдяки впровадженню нових системних конструкцій і матеріалів.

Три нові ефективні сонячні технології:

- Двосторонні сонячні панелі. Двосторонні сонячні батареї - зручне рішення. Вони можуть досягти підвищення потужності на 25% і зниження витрат на ват на 20%. Canadian Solar вважає, що її ринкова перша двостороння

панель може підвищити ефективність з 18,3% до 23,8% при правильних умовах (рис.2.7).



Рисунок 2.7 – Двосторонні сонячні панелі.

- Перовскітові матеріали. Новий клас матеріалів, які називаються перовскітові, може в один прекрасний день забезпечити як дешеві фотопанелі, так і високий ККД. Дослідники вважають, що ефективність сонячної енергії в 30% є цілком досяжною метою. Якщо вони виявляться дешевими і простими у виготовленні, як очікувалося, то сонячні елементи третього покоління можуть привести до значного зниження вартості сонячної енергії (рис.2.8).

На жаль, перовскітові матеріали все ще складно зробити комерційною реальністю. Залишається одна серйозна перешкода: матеріали досить швидко руйнуються. Це може призвести до різких втрат потужності протягом короткого періоду часу для сонячного модуля, тим самим перекреслюючи інші переваги. Проте є способи обійти це, наприклад, поєднуючи перовскіт з кремнієм. Стартап під назвою Oxford PV недавно представив такий тандемний осередок з ефективністю 27,3%. Якщо він виявиться успішним і

комерційно життєздатним під час тестування, то сонячна енергія третього покоління може бути ближче до реальності, ніж припускають інвестори.

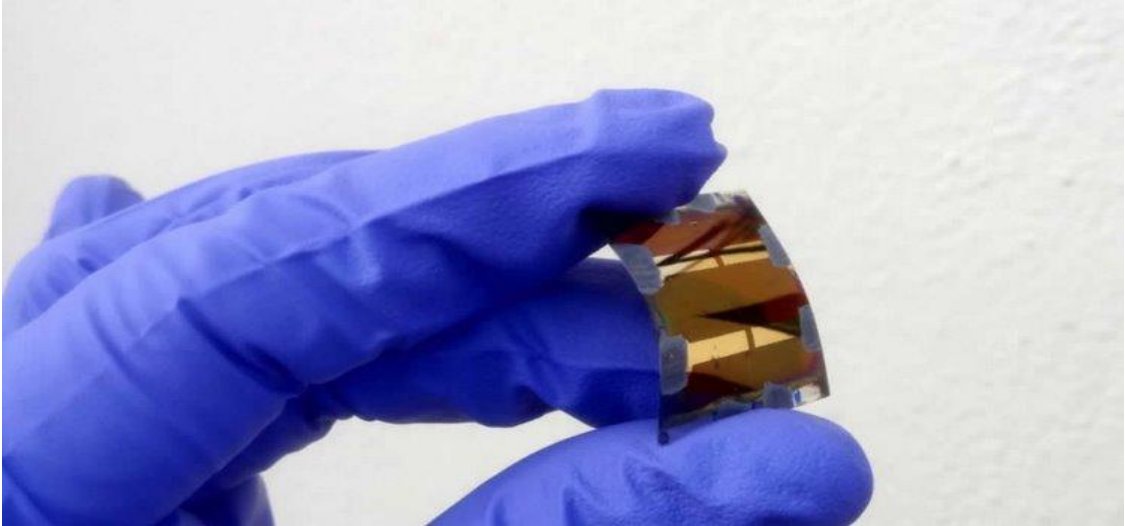


Рисунок 2.8 – Перовскітові сонячні елементи

- Квантові технології. Матеріали з використанням квантових точок набагато далі від комерціалізації, ніж перовскіту. Але обіцяють буквально революцію. Квантові точки - наночастинки напівпровідникових матеріалів, а напівпровідники - основа обчислювальної техніки і сонячних елементів. Вони крихітні - всього кілька нанометрів в діаметрі, що в тисячі разів менше товщини людської волосини.

Ці нано-напівпровідники досить малі, щоб їх можна було налаштувати відповідно до сонячного спектру. Це означає, що сонячні елементи з квантовими точками мають теоретичну межу ефективності в 70,4% в порівнянні з 32% для односкладних кремнієвих елементів.

Квантові точки пропонують унікальну перевагу: вони можуть генерувати електрику навіть вночі. Це пов'язано з тим, що вони можуть бути налаштовані на інфрачервоні довжини хвиль на додаток до видимих довжин хвиль світла, хоча виробництво електрики і невелике [20].

2.8 Перспективи провідних компаній-виробників

За словами IBM і японської компанії Токуо Ohka Kogyo (ТОК), результатом їхньої співпраці стане недорога технологія виробництва сонячних батарей, які будуть дешевше і простіше в установці, ніж ті, які серійно випускаються сьогодні.

ТОК і IBM мають намір спільно розробити процеси, матеріали та обладнання для випуску модулів сонячних батарей типу CIGS (Copper-Indium-Gallium-Selenide). В даний час, порівняно висока вартість електрики, що виробляється сонячними батареями, перешкоджає їх поширенню. Як стверджується, подолати цю перешкоду можна переходом на тонкоплівкову технологію, таку, як CIGS (плівка CIGS на порядки тонше кремнієвої пластини, що робить її дешевше і дозволяє наносити на криволінійні та гнучкі поверхні).

Фахівці IBM Research розробили новий виробничий процес формування плівок CIGS без застосування вакууму. Отримані батареї, за словами компанії, можуть мати ККД 15% і більше. Показники сучасних тонкоплівкових батарей лежать в межах 6-12%. Об'єднавши технологію IBM з досвідом ТОК в отриманні хімікатів високого ступеня очищення, накопиченим в ході багаторічної роботи в напівпровідникової галузі, компанії розраховують запропонувати ринку доступне масове виробництво тонкоплівкових сонячних батарей [21].

Завод «Стілсан» вироблятиме сонячні осередки і модулі по перспективній тонкоплівковій технології діселеніда галію-індію-міді (CIGS). Гнучкість, легкість і простота монтажу роблять цей вид сонячних модулів найбільш підходящим рішенням для інтеграції в покрівлі, фасадності будівель. Особливістю даної технології є енергоефективність сонячних модулів в умовах розсіяного світла і часткового затемнення. Середній ККД даних модулів становить близько 15%. Виробнича лінія виготовляється на

заводі Midsummer в Ерфелле поблизу Стокгольма і буде поставлена на завод «Стілсан» в Саранську до кінця 2020 року. Під нове підприємство зараз готується виробниче приміщення площею майже в 1000 кв. метрів на території технопарку Мордовії. Тут заново проводяться інженерні комунікації, облаштовуються чисті кімнати. Свою роботу завод планує почати роботу в 1 кварталі 2021 року. Обсяг виробництва заводу «Стілсан» складе 10 МВт в рік при виході на проектну потужність другої черги.

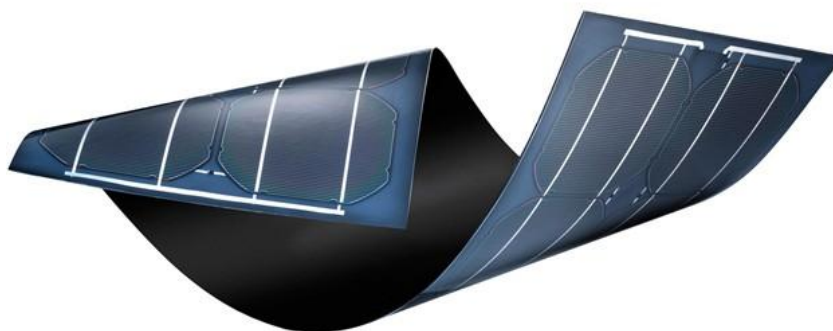


Рисунок 2.7 – Сонячний елемент заводу «Стілсан»

Управлятися підприємство буде Центром нанотехнологій і наноматеріалів Республіки Мордовія в партнерстві з компанією Solartek, яка з 2015 року просуває рішення сонячних дахів на базі тонкоплівкових фотоелектричних панелей. Основним ринком збуту планованої до виробництва продукції є сегмент комерційного будівництва і реконструкції Росії та інших країн Євразійського економічного союзу (Вірменії, Білорусі, Казахстану і Киргизстану) [22].

При цьому на світовій арені вже проявляють інтерес до просування осередків і модулів, що плануються до виробництва в Саранську. У світовій сонячній енергетиці сегмент гнучких вбудованих модулів є найбільш динамічно зростаючим. Найбільші світові виробники будівельних матеріалів

(полімери, скло, сталь) ведуть активність у створенні рішень з вбудованими сонячними елементами.

2.9 Основні напрямки підвищення ефективності сонячних елементів

В даний час використання сонячних елементів на основі aSi:H не сприйняло широкого поширення. Для поліпшення якості СЕ на основі a-Si:H необхідно забезпечити:

- підвищення ефективності перетворення сонячного випромінювання в електричну енергію;
- збільшення стабільності основних параметрів сонячних батарей до більш тривалої дії випромінювання.
- Рішення цих проблем пов'язано з розвитком методів отримання більш досконалих за властивостями аморфних матеріалів та з вдосконаленням структур СЕ на їх основі. Для успішного удосконалення технології формування СЕ необхідно провести дослідження по ряду напрямків:
- поліпшення оптоелектронних властивостей тонких плівок a-Si:H, a-SiGe:H і μ c-Si:H;
- вивчення структурно-релаксаційних процесів в матеріалах на основі a-Si:H під освітленням;
- оптимізація властивостей шарів р- і n-типів, поліпшення якості кордону розділу між легованими і власними шарами, дослідження можливості використання буферних шарів і прошарків зі змінною шириною забороненої зони по товщині;
- розробка фронтальних матеріалів для ТСО і оптимізація кордону розділу ТСО / шар р-типу;
- оптимізація технології формування «світлової пастки»;

- оптимізація морфології кордону розділу і збільшення ефективності відображення тильного контакту СЕ;
- збільшення швидкості осадження товстих поглинаючих шарів при збереженні їх якості.

Одним із шляхів підвищення ефективності сонячних елементів на основі a-Si:H є удосконалення технологічних процесів, спрямоване на поліпшення оптоелектронних властивостей і зменшення концентрації дефектів в нелегованому і особливо в легованому шарах аморфного гідрогенизованого кремнію.

Сонячні елементи з таким і-шаром мають більшу напругу холостого ходу $\mu\text{т}$. Це дозволяє при більшому значенні довжини дрейфу носіїв заряду збільшити коефіцієнт форми ВАХ і відповідно отримати більш високий ККД. Ведуться інтенсивні роботи по поліпшенню властивостей активного власного шару в сонячних батареях на основі a-Si:H і його сплавів. Одним з широко використовуваних методів є отримання і-шару в плазмі, розведеної воднем, що призводить до поліпшення оптоелектронних властивостей напівпровідника (зменшення щільності станів і збільшення параметра $\mu\text{т}$). Сонячні елементи з таким і-шаром мають більшу напругу холостого ходу. Однак осадження даного шару в плазмі, розведеної воднем, призводить до зниження швидкості росту. Шар р-типу в р-і-n-структурі сонячного елемента на основі a-Si:H і його сплавів поряд зі створенням вбудованого електричного поля в і-шарі також грає роль широкозонного фронтального вікна. Збільшення вбудованого електричного поля в і-шарі досягається підвищенням ступеня легування і провідності р- і n-шарів. Таким чином, для збільшення ефективності СЕ необхідно формувати шари р-типу одночасно з високою провідністю і мінімальним поглинанням світла в ньому [22].

Остання умова досягається за рахунок збільшення щілини рухливості аморфного напівпровідника. Збільшення оптичної щілини шару фронтального вікна р-типу викликає також зростання вбудованого електричного поля в

і-шарі. У той же час підвищення ступеня легування бором супроводжується зменшенням щільності рухливості і зростанням втрат, зумовлених поглинанням світла в цьому шарі. Збільшити щільності рухливості прозорого фронтального вікна можливо за рахунок застосування широкозонного сплаву α -SiC:Hr-типу.

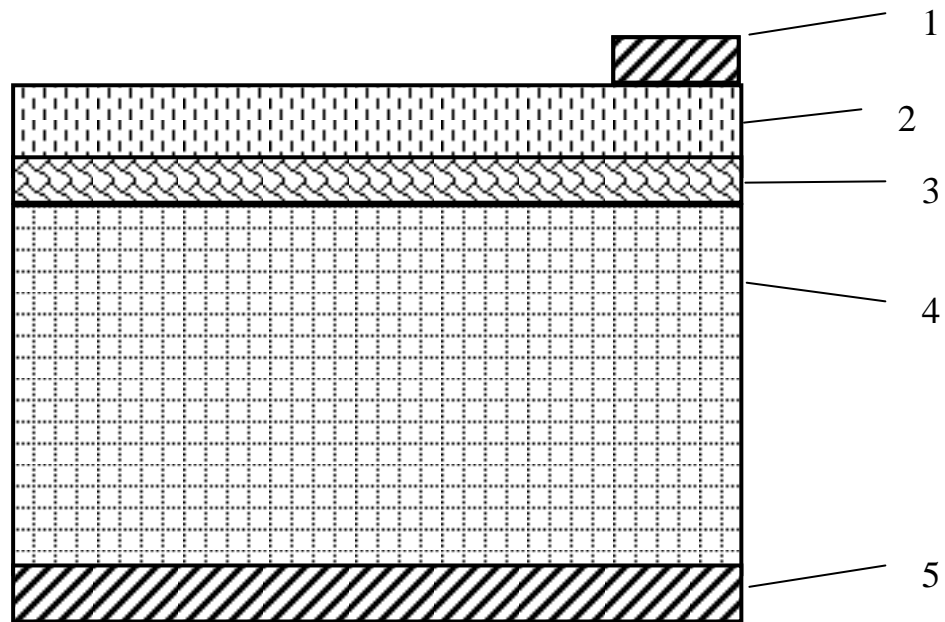
3 ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

3.1 Загальні засоби оцінки характеристик фотоперетворювачів

В даний час в масовому виробництві сонячних елементів використовують гетеропереходи на основах кристалічного кремнію (с-Si) і гідрогенізованого аморфного кремнію (а-Si :H), теллурида кадмію (CdTe), діселеніда індія (CuInSe₂ – CIS), діселеніда галію (CuGaSe₂ – CGS), а також твердих розчинів CuIn_{1-x}Ga_xSe₂ – CIGS і ін. Очевидна актуальність розробок ефективних чисельних і аналітичних моделей сонячних фотоперетворювачів, що використовують згадані гетеропереходи. [23]

Висока поглинаюча здатність по відношенню до сонячного випромінювання аморфного кремнію і, особливо, бінарних напівпровідникових сполучень, а також твердих розчинів на їх основі дозволяє істотно зменшити товщину сонячного елемента. Проте зниження товщини активних шарів фотоперетворювача приводить до зміни процесів струмопереносу, зокрема до зростання ролі тунельних ефектів.

Останні роки у вивченні сонячних елементів відзначені значним зростанням кількості експериментальних робіт, де представлені в основному результати оцінки ефективності сонячних фотоперетворювачів [24]. Зниження вартості виготовлення різних типів сонячних батарей призвело до зростання інтересу до пристроїв другого, третього і четвертого поколінь, в тому числі багат шарових, тандемних, зі складною структурою. Однак, для таких конфігурацій завдання оптимізації конструкції особливо важлива, а кількість параметрів, що визначають ефективність, багаторазово зростає.



1 – фронтальний контакт Al , 2 – ITO, 3 – шар (p) CdS, 4 – шар CIGS,
5 – тильний контакт

Рисунок 3.1 – Структура розрахункового сонячного фотоперетворювача

З іншого боку, значний прогрес в моделюванні характеристик сонячних перетворювачів втілюється в появі потужних програмних засобів, що дозволяють розраховувати оптичні та електричні параметри широкого діапазону конфігурацій таких структур. До них можна віднести програмні засоби AMPS-1D [25], SCAPS, gprvdm [26]. Це обумовлено тим, що експерименти в області формування структур фотоперетворювачів вимагають більш точної вказівки з приводу складу матеріалів, товщини активних верств, конструкції контактних майданчиків формуються структур [27].

У той же час програмні засоби, незважаючи на широкі можливості реалізації математичних моделей, мають свої обмеження. Ці обмеження виявляються при порівнянні з експериментальними даними, що також не завжди можна однозначно інтерпретувати. Необхідно враховувати різницю рівнів технології, умов формування активних верств сонячних елементів, якості матеріалів і засобів вимірювань параметрів і багато іншого. Також

оцінку адекватності моделювання можливо виконати шляхом порівняння результатів розрахунків за допомогою аналітичних і чисельних методів, реалізованих в різних програмних засобах.

Запропонована робота присвячена порівнянню різних підходів в моделюванні характеристик сонячних фотоперетворювачів з метою визначення адекватності того чи іншого методу у вирішенні задачі оптимізації структури і конфігурації багат шарових сонячних елементів.

Що ж стосується матеріалів сонячних елементів, то маємо ріст досліджень і розробок структур на основі перовскіту, хоча інтерес до твердих розчинів $\text{CuIn}_x\text{Ga}_{1-x}\text{Se}_2$ (GIGS), CdTe , [28]. Розробники домоглися значного збільшення ефективності, параметрів продуктивності. При цьому структури на основі перовскіту досить прості у виготовленні. В їх тандемній конфігурації з Si особливо важливою є структура і технологія шарів. Варіант з чотирма контактами фактично є двома окремими елементами, розташованими один над одним. Кожен елемент оптимізований в певному спектральному діапазоні, але для відводу струму необхідні проводячі шари, що призводять до збільшення кількості меж між шарами і, відповідно, зростання відбитого потоку випромінювання. Якщо використовувати мінімальну кількість контактів - 2, то кількість міжшарових меж і відображення буде мінімальним. При цьому необхідно точно розрахувати структуру активних шарів, щоб струм, що протікає через кожен шар, був однаковий. В іншому випадку неминучі втрати.

3.2 Моделювання структури та характеристик плівкового фотоперетворювача

В якості зразка для розрахунків був обраний фотоперетворювач на основі гетероструктури CdS / CIGS .

Моделювання роботи фотоперетворювача виконувалося з використанням універсальної програми `gprvdm`.

На рис.3.2 представлений інтерфейс програми grvdm

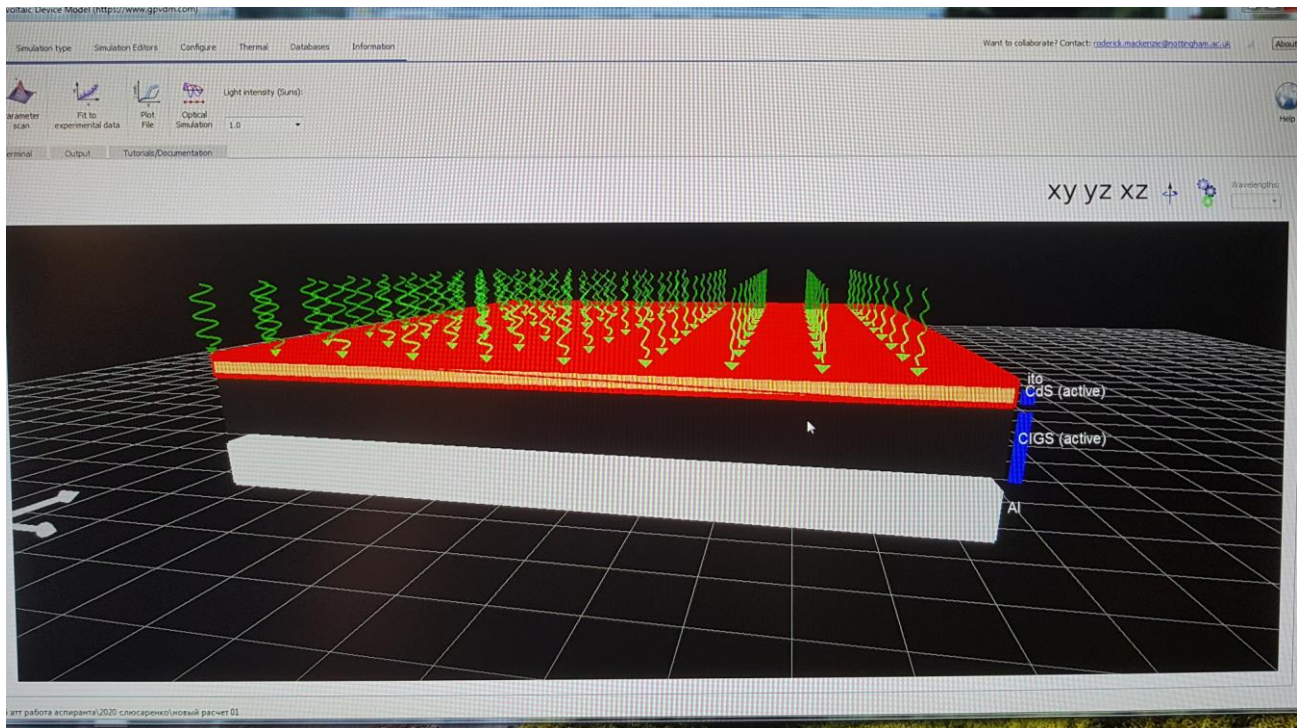


Рисунок 3.2 – Досліджувана структура фотоперетворювача у віконці програми grvdm

Програма grvdm це безкоштовний універсальний інструмент для моделювання оптоелектронних пристроїв. Спочатку він був написаний для моделювання органічних сонячних елементів, але тепер він став розширений для моделювання інших класів пристроїв, включаючи OLED, OFET і багато інших типів сонячних елементів 1-го, 2-го і 3-го поколінь.

Найбільш важливі параметри, що використовуються в розрахункових файлах вихідних даних програми grvdm:

FF(Fill factor) - фактор заповнення ВАХ, %;

η (Power conversion efficiency) - конверсійна ефективність, %;

P_{max} (Max power) - максимальна потужність, Вт;

V_{oc} - напруга зворотнього зв'язку, В;

$(p)_{ave}$ (Average carrier density at P_{max}) – середня питома щільність носіїв струму, m^{-3} ;

J_{sc} – щільність струму короткого замкнення, A/m^2 ;

J_{pmax} (J at max $power$) – щільність струму за максимальної потужності, A/m^2 ;

V_{pmax} (V at max $power$) – напруга за максимальної потужності, В;

3.3 Результати розрахунків вихідних характеристик фотоперетворювача

Вих. дані: Конт. верх Al-10нм, ZnO-20нм, CdS (d2) и CIGS(d1) змінюєм,
нижн Al-10нм

Товщина верхнього контактного шару Al –10нм,

Товщина шару просвітлюючого покриття – 10 нм,

Товщина шару CdS d2 - 50 нм,

Товщина шару CIGS d1 – 62...2000 нм,

Товщина нижнього контактного шару Al –10нм

Таблиця 8 – Результати розрахунку основних параметрів фотоперетворювача

Параметр	Варіант розрахунку					
	1	2	3	4	5	6
d1, нм	62	125	250	500	1000	2000
FF	0.051988	0.124946	0.616374	0.795168	0.617908	0.260506
η , %	0.016181	0.283891	1.532246	1.009523	0.855279	0.287788
P_{\max} , W/m ²	0.161812	2.838913	15.322462	10.095234	8.552794	2.877877
Voc, V	1.239383	1.192098	1.134410	1.034291	0.816699	0.594887
Rec t cnst at Voc,s	5.157872e+000	9.686094e-001	1.391559e-001	4.472177e-002	1.561369e-002	2.576603e-002
$n(p)_{\text{ave}}$, m ⁻³	6.150444e+022	3.266574e+022	7.361966e+021	1.038689e+021	6.434026e+020	3.712905e+020
Tr el at Voc,m ⁻³	4.894626e+019	3.687160e+019	2.237985e+019	1.194158e+019	6.887744e+018	3.465664e+018
Tr ho at Voc,m ⁻³	4.569362e+020	3.297286e+020	2.346036e+020	1.450669e+020	6.590492e+019	6.246820e+018
Jsc, A/m ²	- 2.511313e+000	- 1.905979e+001	- 2.191362e+001	- 1.227481e+001	- 1.694815e+001	- 1.857038e+001
(n+p)/2 at Voc,m ⁻³	7.431558e+022	5.294545e+022	3.051612e+022	1.445491e+022	5.336666e+021	2.020136e+021
Jpmax, A/m ²	-8.103744e-001	- 1.462218e+001	- 1.934010e+001	- 1.127341e+001	- 1.230480e+001	- 1.482920e+001
Vpmax, V	1.996759e-001	1.941511e-001	7.922640e-001	8.954906e-001	6.950781e-001	1.940683e-001

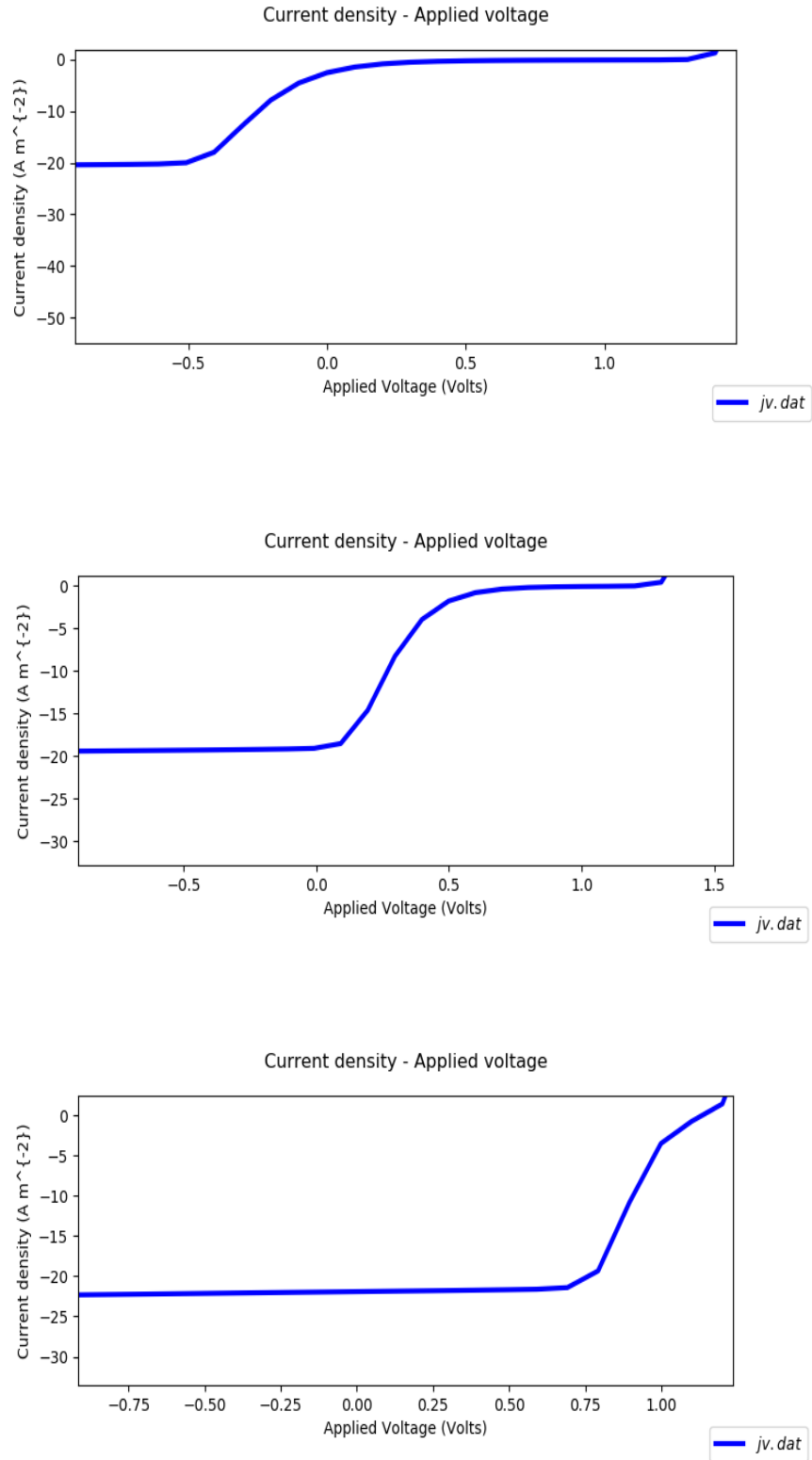


Рисунок 3.3 – Вольтамперна характеристика фотоперетворювача (згідно варіантів 1-3)

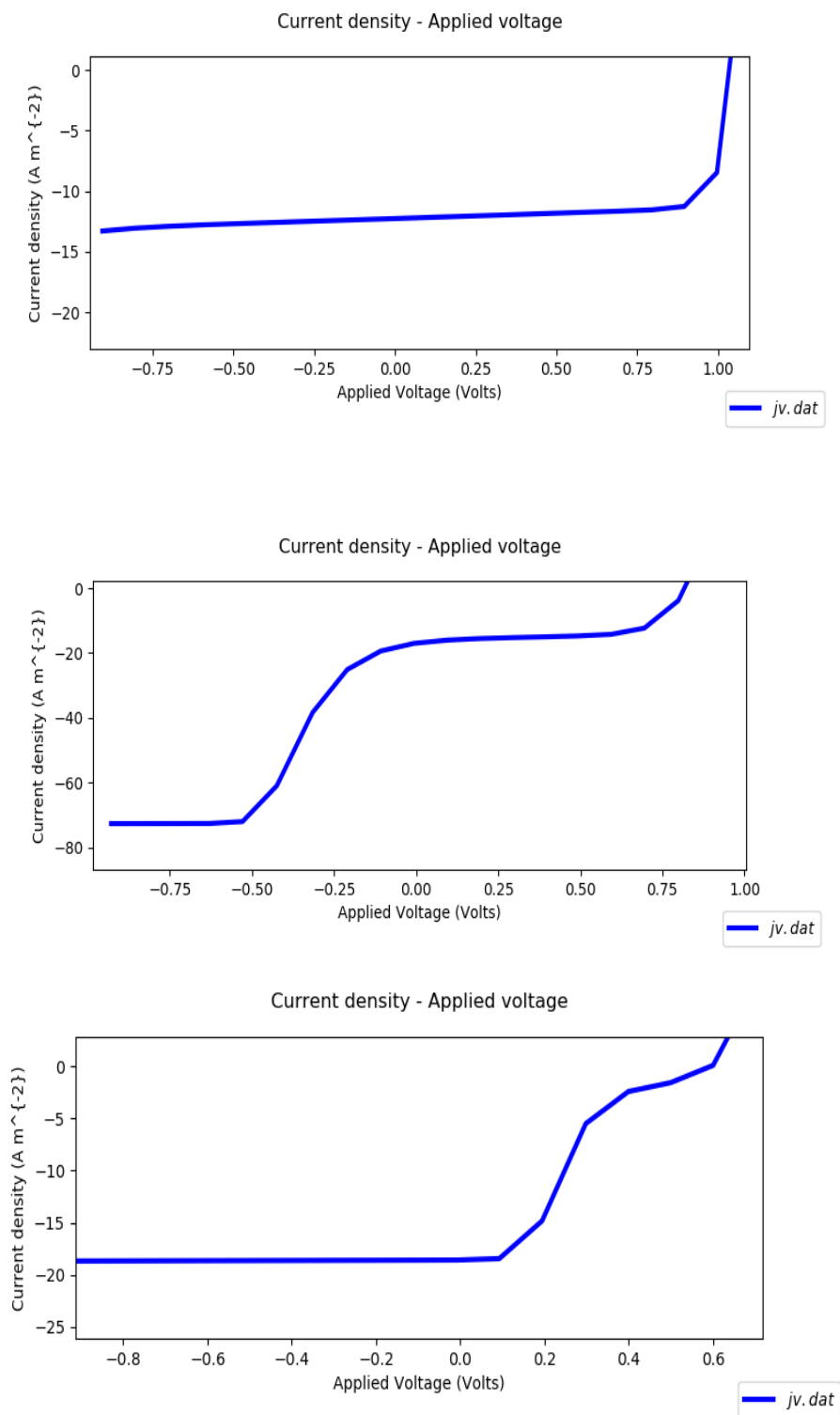


Рисунок 3.4 – Вольтамперна характеристика фотоперетворювача (згідно варіантів 4-6)

ВИСНОВКИ

Перспективність використання сонячних модулів і автономних енергоустановок на їх основі у сучасному світі ні в кого не викликає сумнівів. Як показують сучасні тенденції розвитку цього напрямку, широке впровадження в життя сонячної енергетики пов'язане не з рівнем розробки цієї проблеми, а в першу чергу, з економічною доцільністю і вартістю енергії, що отримується у такий спосіб. Спостережувані тенденції свідчать про те, що ціновий паритет з вартістю енергії, що отримується традиційним шляхом, буде досягнутий в найближче десятиліття, і це визначить народження великомасштабної сонячної енергетики.

В даній роботі розглянуто принцип роботи сонячних елементів, зроблено огляд тонкоплівкових сонячних елементів, виявлено їх переваги та недоліки. Проведено розрахунки тонкоплівкових перетворювачів. Освітлені основні напрямки підвищення ефективності сонячних елементів. Отримали результати розрахунків за їх характеристикою та параметрами.

В ході роботи виконано порівняльний аналіз різних типів сонячних батарей з точки зору їх ефективності, вартості виробництва електроенергії, екологічної безпеки. Розраховано характеристики плівкового фотоперетворювача на основі гетероструктури CdS / CIGS.

Тому немає сумнівів в тому, що активніше використання сонячної енергії - завдання вже сьогоднішнього, а не завтрашнього дня.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. <http://avdvca.gov.ua/avdiivka/enerhozberezhennia/1675-alternatyvni-dzherela-enerhii-soniachna-enerhiia.html> (дата звернення: 10.09.2020).
2. Solar Power Industry 2018. [https://www.reportlinker.com/market-report/Solar- Energy/6514/Solar-Power?](https://www.reportlinker.com/market-report/Solar-Energy/6514/Solar-Power?) (дата звернення: 13.09.2020)
3. https://24tv.ua/ru/vse_cho_nuzhno_znat_o_solnechnyh_batarejah_chooby_dejstvitelno_jekonomit_n702750 (дата звернення: 20.09.2020)
4. Виссарионов В.И. и др. Солнечная энергетика. Учебное пособие для вузов. Москва: МЭИ,2008. 276с
5. <https://www.unian.ua/ecology/trash/1109219-groshi-ne-pahnut-chi-zmoje-ukrajina-otrimuvati-pributki-zi-smittyu.html> (дата звернення: 28.09.2020).
6. science.howstuffworks.com (дата звернення: 05.10.2020).
7. <https://elektro.in.ua/62-vsjo-cho-nuzhno-znat-o-solnechnykh-batareyakh> (дата звернення: 12.10.2020).
8. Chopra K.L., Das S.R. Thin Film Solar Cells. – New York, Plenum Press, 1983. –607р.
9. <https://alternative-energy.com.ua/uk/soncze-yak-dzherelo-energi%D1%97/> (дата звернення: 18.10.2020).
10. <https://ecotech-sun.com.ua/p998951213-fotoelektricheskij-modul> (дата звернення: 19.10.2020).
11. Как выбрать солнечные батареи? Преимущества и недостатки URL: <https://www.ekosystem.lviv.ua/p-solar> (дата звернення: 21.10.2020)..
12. <https://alternative-energy.com.ua/uk/shho-take-insolyacziya> (дата звернення: 25.10.2020).
13. А. В. Макаров. Институт фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України, Київ. Нові розробки в напівпровідниковій

сонячній енергетиці як перспективна область інноваційного бізнесу. Наука та інновації. 2005. Т 1. № 6. С. 69–79.

14. Афанасьев В. П., Теруков Е. И., Шерченков А. А. А94 Тонкопленочные солнечные элементы на основе кремния. 2-е изд. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011. 168 с. (дата звернення: 01.11.2020).

15. <https://iknet.com.ua/uk/articles/useful-to-know/advantages-and-disadantages/> (дата звернення: 28.10.2020).

16. <https://ecotech-sun.com.ua/a388478-solnechnye-paneli-risen.html> (дата звернення: 20.10.2020)

17. <http://forum2018.cigre.org.ua/> (дата звернення: 05.11.2020).

18. <https://www.solar-battery.com.ua/plenochnyie-solnechnyie-batarei-dostupnyi-dlya-kazhdoy-kvartiryi/> (дата звернення: 08.11.2020).

19. <https://greentechtrade.com.ua/ru/gybkye-solnechnye-batarey/> (дата звернення: 11.11.2020).

20. <http://solarpanels.com.ua/news/top-3-solnechnye-tehnologii-budushchego/> (дата звернення: 14.11.2020).

21. <https://russianelectronics.ru/ibm-i-tokyo-ohka-kogyo-obeshhayut-sdelat-solnechnye-batarei-massovymi/> (дата звернення: 16.11.2020).

22. <https://www.elec.ru/news/2020/04/10/v-saranske-skoro-zapustyat-unikalnoe-dlya-rossii-p.html> (дата звернення: 20.11.2020).

23. Datta A., Chatterjee P. Computer Modeling of Heterojunction with Intrinsic Thin Layer “HIT” Solar Cells: Sensitivity Issues and Insights Gained . – Solar Cells – Thin-Film Technologies. Edited by Prof. Leonid A. Kosyachenko – InTech, 2011.- P.275-302.

24. 1 Y. Yorozu, M. Hirano, K. Oka, and Y. Tagawa, "Electron spectroscopy studies on magneto-optical media and plastic substrate interface," *IEEE Transl. J. Magn. Japan*, vol. 2, pp. 740–741, August 1987.

25. Novikov G F, Gapanovich M V "Third generation Cu-In-Ga-(S,-Se) based solar inverters", *Phys. Usp.*, 2017, 60, pp.161–178; Новиков Г Ф, Гапанович М В "Солнечные преобразователи третьего поколения на основе Cu-In-Ga-(S, Se)" *УФН*, 2017, 187, 173–191.

26.. R.C.I. MacKenzie, V. S. Balderrama, S. Schmeisser, R. Stoof, S. Greedy, J. Pallarès, L. F. Marsal, A. Chanaewa, E. von Hauff, "Loss mechanisms in high efficiency polymer solar cells", *Adv. Energ. Mat.*, 10.1002/aenm.201501742, 2015.

27. A.B. Galat Calculation of the absorbing capacity of a solar $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ photovoltaic converter // *Telecomm. Radio Eng.*, 2018, vol. 77, № 1, pp. 61-67

28. M. H. Elshorbagy, E. López-Fraguas, F. A. Chaudhry, J. M. Sánchez-Pena, R. Vergaz, B. García-Cámara "A monolithic nanostructured-perovskite/silicon tandem solar cell: feasibility of light management through geometry and materials selection" / *Scientific Reports*, 2020, 10, 2271.