



УДК 620.91(477)

INCREASING THE EFFICIENCY OF SOLAR PANELS THROUGH THE USE OF MULTILAYER OXIDE COMPOUNDS

ПІДВИЩЕННЯ ККД ФЕПУ ЗА РАХУНОК ЗАСТОСУВАННЯ БАГАТОШАРОВИХ ОКСИДНИХ СПОЛУК

Habrinetz V. O. / Габрінець В.О.

д.т.н., проф.

ORCID: 0000-0002-6115-7162

Trubitsyn M.P. / Трубіцин М.П.

д.ф.-м.н., проф.

ORCID: 0000-0001-7993-7733

Diachenko A.O. / Дяченко А.О.

к.ф.-м.н., с.н.с.

ORCID: 0000-0003-4786-8897

Oles Honchar Dnipro National University /

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, м. Дніпро, пр. Науки 72, 49000

Анотація. В роботі розглядаються найбільш розповсюджені технології виготовлення сучасних фотоелектронних перетворювачів. Проаналізовано різні способи вдосконалення ефективності їх роботи. Розроблено нові варіанти структури гібридних сонячних елементів на основі кристалів складних оксидів $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$, PbMoO_4 та TeO_2 . Показано, що використання даних матеріалів дозволяє розширити спектральний відгук та підвищити коефіцієнт перетворення сонячного випромінювання на електричний струм.

Ключові слова: сонячна енергетики, фотоелектронний перетворювач, кристали $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$, PbMoO_4 та TeO_2 .

Вступ.

Сонячна енергетична галузь не тільки постійно розвивається в розмірі, але і якісно поліпшується. Кожен рік з'являються нові технологічні досягнення у галузі фотоелектричних напрямів розвитку різних (PV) технологій, які підвищують ефективність та рентабельність фотоелектронних перетворювачів (ФЕПів). Основні напрями діяльності світових фірм представлені на рисунку 1 [1]. Тут надано чотири основні напрями вдосконалення ФЕПів, результати підвищення ККД та назва фірм, котрі цим вдосконаленням займаються. Це наступні напрями:

- 1 – багатоперехідні (1, 2, 3, 4 переходів) комірки;
- 2 – кристалічні кремнієві комірки;
- 3 – тонкоплівкові технології;
- 4 – нові фотоелектричні елементи.

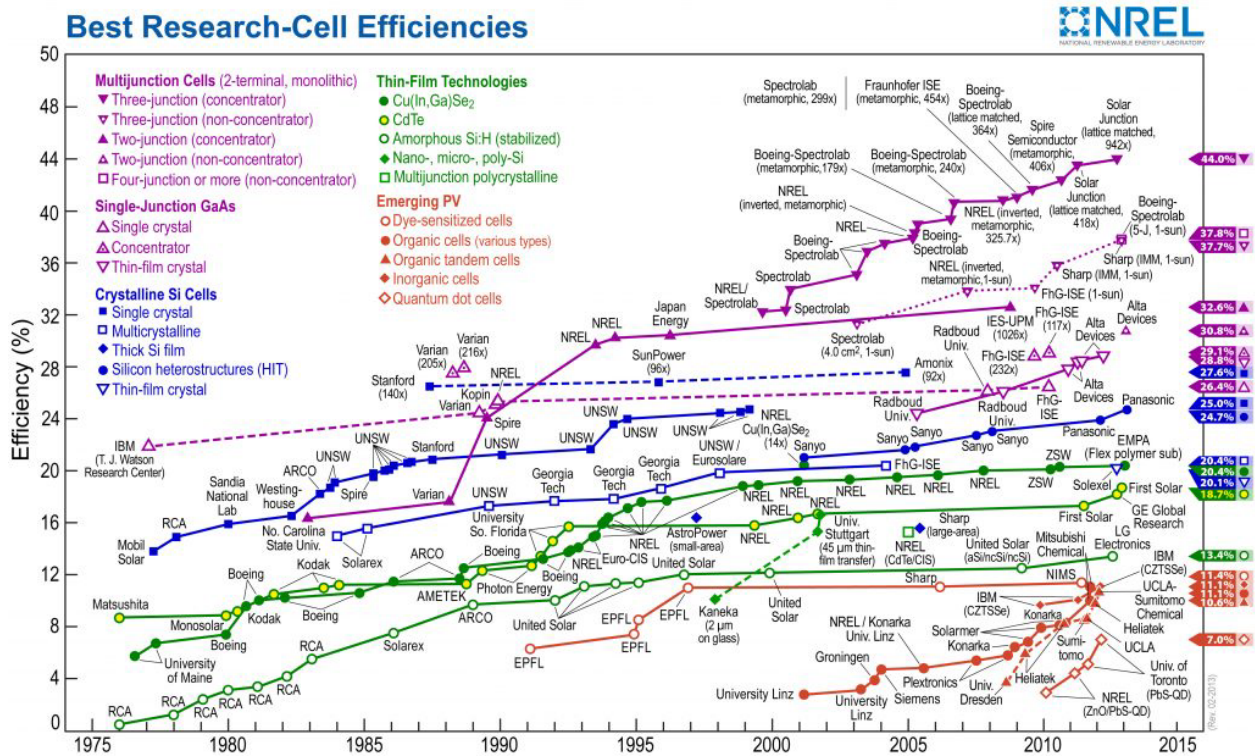


Рисунок 1 – Найкращі результати дослідження ефективності роботи комірок ФЕПів [1]

Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Багатоперехідні комірки мають ще назву гетероперехідні. Перший та найбільш поширений напрям розвитку ФЕПів є напрям, який пов'язано з каскадуванням шарів ФЕПів. Це складання шарів ФЕПів з різною шириною забороненої зони, які будуть перекривати своїми забороненими зонами увесь найбільш енергетичний діапазон сонячного випромінювання від ультрафіолетового до інфрачервоного. Такий метод називають створенням гетероперехідних ФЕПів. В цьому випадку зусилля спрямовані на більш повне використання всього спектра сонячного випромінювання і повної енергії фотонів за принципом: кожен фотон повинен поглинатися в напівпровіднику із забороненою зоною, ширина якої відповідає енергії цього фотона. Це дозволить значно знизити втрати у ФЕПах. Вони можуть мати змінну ширину забороненої зони з домішковими енергетичними рівнями. У каскадних ФЕПах може бути досягнуто суттєве збільшення ККД до 25-27% та до значень близько 30-35% при концентрованому опроміненні [4-6, 9].



Другий напрям пов'язаний з удосконаленням структури напівпровідникових матеріалів з високим ступенем чистоти, строго заданим рівнем легування та оптимальною шириною забороненої зони. При цьому за рахунок оптимального легування можна отримати не тільки задану ширину забороненої зони, але і вбудувати відповідне електричне поле (напівпровідник), що забезпечує оптимальний поділ носіїв струму через $p - n$ перехід [6-8].

Третій напрям присвячений тонкоплівковим ФЕПам. Це відносно новий тип ФЕПів, який використовує тонкі шари фотоелектричних матеріалів для перетворення сонячної енергії в електричну. Комерційні тонкоплівкові сонячні елементи виготовляються на основі гідрогенізованого аморфного кремнію ($a\text{-Si:H}$), телуриду кадмію (CdTe) та на основі селеніду міді індію галію (CIGS) і мають ефективність для лабораторних зразків 14.0%, 22.6% та 23.6%, відповідно [6-7]. На відміну від традиційних кристалічних кремнієвих сонячних панелей, тонкоплівкові панелі створюються шляхом нанесення фотоелектричного матеріалу тонкими шарами на підкладку. Тонкоплівкові сонячні панелі, як випливає з назви, характеризуються своєю тонкою та легкою конструкцією порівняно з традиційними кристалічними кремнієвими ФЕПами. Ця технологія має свої переваги, такі як легка вага, краща продуктивність в умовах слабого освітлення, економічна ефективність.

Четвертий напрям досліджень пов'язаний з новими ФЕПами. Такими ФЕПами зараз є органічні. Органічні ФЕПи – це ФЕПи, в яких використовується органічна електроніка. Їх виробництво почалося в 1992 році. Органічні матеріали мають слабо пов'язані молекули, які можуть уловлювати електрони і сповільнювати вироблення електрики. Дослідники спробували обійти це – вони об'єднали різні шари матеріалу в так званому підході тандемних комірок. Кожен із шарів може поглинати світло різних довжин хвиль – це означає, що сонячне світло використовується більш ефективно і збільшується генерація електрики [11, 12].

В рамках чотирьох напрямів створені різні технології, які суттєво підвищують ефективність ФЕПів. Головними з них є: технологія PERC,



технологія TOPCon, технологія гетеропереходів (HJT), технологія HPBC [3].

Технологія PERC (Абревіатура PERC (з англ. Passivated Emitter and Rear Cell) дослівно перекладається як «пасивований випромінювач і задній осередок». Сенса цієї технології полягає в наявності додаткового діелектричного шару на задній стороні панелі. Завдяки цьому сонячні промені, що пройшли через верхній шар, відбиваються і повертаються назад до внутрішнього шару кремнію. Цей шар ефективно знижує рекомбінаційні втрати та підвищує ефективність сонячної панелі.

TOPCon (Tunnel Oxide Passivated Contact) ґрунтується на застосуванні пасивованих контактів з тунельним оксидом. Тунельний оксид (Tunnel Oxide) — це шар оксиду, який служить для покращення рекомбінації електронів та дірок в сонячному елементі [3, 4]. Пасивуючий контакт (Passivated Contact) – пасивація контактів забезпечує зниження втрат енергії при передачі електричного струму, що підвищує ефективність сонячного елементу. У класичних кремнієвих сонячних елементах задній контакт може втрачати частину енергії через рекомбінацію електронів, що знижує їх ефективність. Технологія TOPCon вирішує цю проблему за рахунок створення додаткового шару з оксиду кремнію товщиною в кілька нанометрів. Основні елементи сонячного осередку TOPCon включають: тонкий шар оксиду кремнію, який забезпечує ізоляцію між напівпровідником та металом, полікристалічний кремній, який створює односторонній контакт для електронів, що мінімізує енергетичні втрати.

Технологія гетеропереходів (HJT) – Heterojunction Technology означає гетероперехід з внутрішнім тонким шаром. Це тип технології сонячних батарей, який передбачає поєднання двох різних типів напівпровідників – аморфного кремнію і кристалічного кремнію. Ця конструкція створює гетероперехід – тип напівпровідникового інтерфейсу, що складається з гетерогенних матеріалів. Саме в гетеропереході сонячний елемент генерує електричний струм із сонячного світла двома шарами, запобігаючи рекомбінації носіїв заряду, що генеруються.

Технологія HPBC (Hybrid Passivated Back Contact) – це вдосконалена технологія сонячних елементів, розроблена компанією Longi Green Energy [5].



Вона відрізняється тим, що всі контакти зміщені на задню поверхню осередку, що дозволяє уникнути затінення, підвищити ефективність перетворення сонячного світла на електричний струм та покращити роботу при високих температурах як наслідок, підвищити ефективність перетворення сонячного світла на електрику. Характеристики та місце цих технологій в світовому ринку надані в таблиці 1.

Таблиця 1 – Основні технології підвищення ефективності ФЕПів

Технологія осередку	Максимальна ефективність	Температурний коефіцієнт	Фактор біфаціальності	Доля ринку
TOPCon	26,10%	<0,3%/°C	85%	8% (2020p.)
PERC	24,50%	<0,4%/°C	70%	75% (2021p.)
HJT	26,56%	0,21%/°C	92%	2,5% (2022p.)

Мета та задачі дослідження.

В науково-дослідному інституті енергоефективних технологій і матеріалознавства ДНУ вирощують та досліджують кристали активних діелектриків, які є перспективними в якості компонентів багат шарових гетероструктурних ФЕПів [13-17]. Це кристали молібдату свинця PbMoO_4 , силікосиленіти $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$, а також парателурити TeO_2 . Ці оксидні сполуки можна застосовувати для підвищення ефективності сучасних та майбутніх ФЕПів. Властивості цих сполук надані в таблиці 2.

PbMoO_4 (PMO) можна комбінувати з напівпровідниками, що утворюють p-n переходи або гетероструктури, щоб покращити поділ зарядів. В таких ФЕПах PMO буде також виконувати функцію сцинтилятора. Сцинтиляторами називаються хімічні речовини – люмінофори, які здатні випромінювати видиме світло при впливі на них іонізуючого випромінювання. Воно може складатися з α , β , γ -променів, електронів та ін. Таким чином в ФЕПах збільшується світловий



потік і зростає виробництво електричного струму. РМО можна поєднувати з іншими сцинтиляторами для підвищення світловиходу, часу життя сигналу або поліпшення спектрального відгуку.

Таблиця 2 – Характеристики кристалів, які пропонується використовувати для створення багатошарових ФЕПів

Параметр	$\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ [13, 14, 17]	PbMoO_4 [15, 16, 17]	TeO_2 [17]
Ширина забороненої зони	$\sim 3,25$ еВ (~ 380 нм, УФ край)	$\sim 3,2\text{--}3,5$ еВ (теж УФ-синій)	3,5 еВ
Прозорість	370–750 нм	350–650 нм	350 -500 нм
Фотопровідність	Є (але не р-п структура)	Пасивний сцинтилятор	Є
Люмінесценція	Немає	Так (світиться при опроміненні)	Немає

$\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ (BSO) можна використовувати як активний світлочутливий шар у твердотільних ФЕПах. Там він поглинає УФ-синє світло, а потім утворює пари електрон-дірка. Заряди розділяються та збільшують загальну величину фотоструму. BSO можна застосовувати в гетероструктурі у комбінації з РМО, за умови, що РМО використовується, як сцинтилятор. РМО випромінює світло в діапазоні ($\sim 520\text{--}580$ нм), а BSO поглинає частину цього світла (в межах своєї чутливості). Далі має місце генерація та перенесення заряду. Переваги такого поєднання будуть наступні: хороша оптична прозорість і, як наслідок, мінімальні втрати сцинтиляції. Висока прозорість у видимому діапазоні, активний в УФ-синьому світлі (до 370 нм), фотопровідник та може безпосередньо перетворювати світло на струм, радіаційна стійкість (порівняно з кремнієм) – це додаткові переваги використання BSO у ФЕПах. Але відомо, що РМО та BSO добре працюють в УФ-синій області, але неефективні для червоного та ІЧ світла, де знаходиться більша частина сонячного спектру.



TeO_2 – це унікальний матеріал, що має низку оптичних та акустооптичних властивостей. Завдяки широкій забороненій зоні ($\sim 3,5$ eV) та прозорості в УФ-синьому діапазоні (350-500 нм), він може бути корисним у спеціалізованих ФЕПах, особливо в завданнях, де потрібно використовувати короткохвильове сонячне або УФ-випромінювання. TeO_2 у ФЕПах можна використовувати наступним чином:

1. як УФ-прозоре вікно / підкладка / оптичний інтерфейс TeO_2 – відмінний УФ-прозорий матеріал, що може використовуватися як вхідне вікно ФЕПу, пропускаючи випромінювання в діапазоні 350–500 нм до активного фотоперетворюючого елемента (наприклад, до BSO, РМО або р-п переходу інших фотогенеруючих матеріалів);

2. крім цього за рахунок високого показника заломлення (~ 2.26 на 400 нм) він може застосовуватись як антирефлексне покриття. Тому метою цього дослідження є розробка гібридного сонячного елемента із застосуванням BSO, РМО та TeO_2 для розширення спектрального відгуку та підвищення коефіцієнта перетворення сонячного випромінювання на електричний струм.

Результати досліджень.

В цій роботі пропонуються приклади створення гібридних сонячних елементів на основі кристалів BSO, РМО та TeO_2 із метою розширення застосування спектра сонячного випромінювання та підвищення коефіцієнта його перетворення в електричну енергію. Ця проблема може бути вирішена шляхом створення багатошарових ФЕПів. Перший шар це прозорий електрод. Прозорі провідні електроди (ППЕ) широко використовуються у фотоперетворювачах та інших оптоелектронних пристроях, таких як світлодіоди та рідкокристалічні дисплеї. Вони забезпечують електричний контакт з активним шаром пристрою, пропускаючи при цьому більшу частину світла, що падає. Найбільш поширеним матеріалом для ППЕ є оксид індія-олова (ІТО). ІТО має високу прозорість у видимому спектрі та хорошу електропровідність. Далі шар BSO. Це фотопровідник, але не формує сам собою р–п перехід. Його треба поєднувати з напівпровідниками n- або р-типу: зробити р-п гетероперехід BSO/n-



Si або BSO/CdS та використовувати гетеропереходи для поділу електронів та дірок. Можлива структура такого ФЕПу на основі BSO + PMO наведена в наступній схемі (рис. 2):

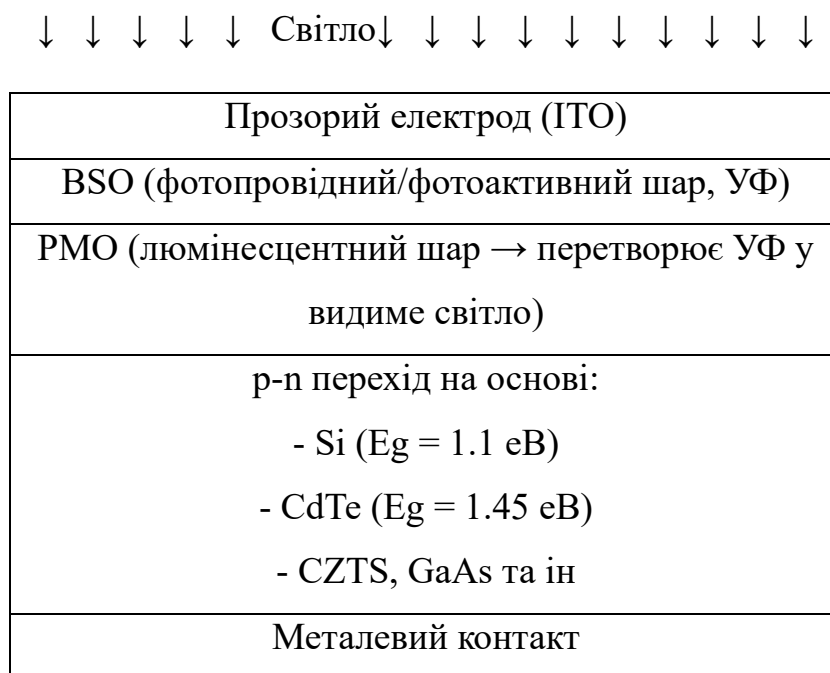


Рисунок 2 – Схема структури ФЕПу на основі кристалів BSO + PMO

PMO та BSO добре працюють в УФ-синій області, але неефективні для червоного та ІЧ світла, де знаходиться більша частина сонячного спектру. Для підвищення ефективності такого ФЕПу потрібно сформувати гетероструктуру з напівпровідниками малої забороненої зони ($E_g \sim 1.1\text{--}2$ eV), тобто, підключити матеріали, чутливі до видимого та ІЧ-світла. Це приклад багатошарової структури із застосуванням PMO та BSO, в якому ця ідея може бути реалізована (рис. 3).

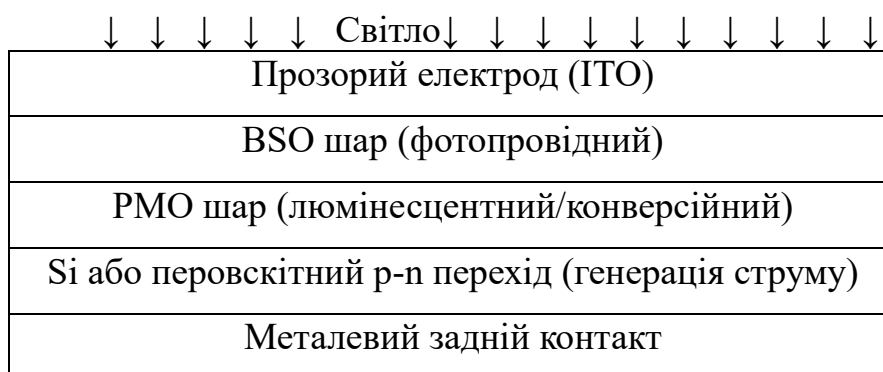


Рисунок 3 –Схема структури багатошарового ФЕПу на основі кристалів BSO і PMO



Створення гібридного сонячного елемента із застосуванням BSO і РМО, з метою розширення спектрального відгуку та підвищення коефіцієнта перетворення сонячного випромінювання в електричний струм має вирішуватися за допомогою гетероструктурного шаруватого ФЕПу. У ньому використовується сцинтиляційний світлоперетворювальний шар РМО для перетворення УФ на видиме світло. Потім використовуємо BSO як фотопровідний шар. І далі класичний р-п перехід, який перетворює світло на струм. Базова архітектура гібридного фотоелектричного перетворювача показана на рисунку 4:

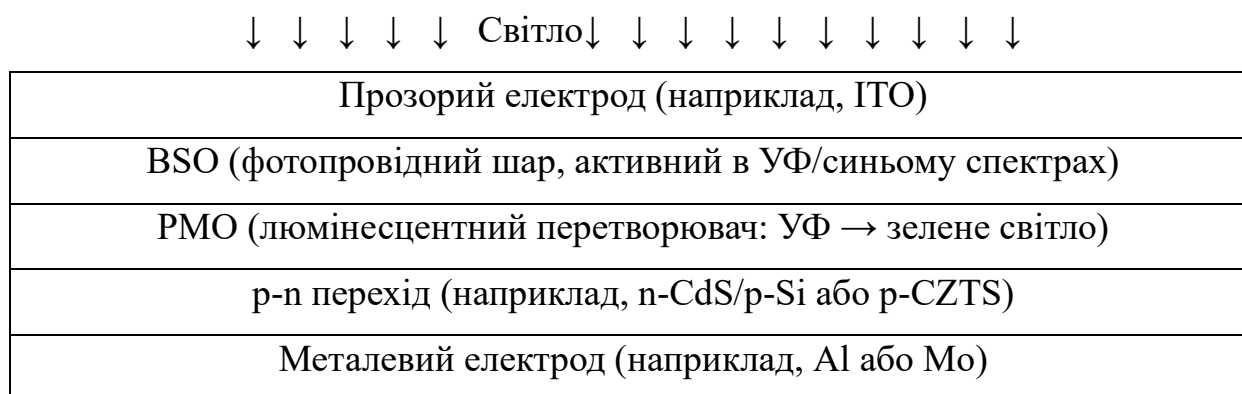


Рисунок 4 – Схема структури гетероструктурного шаруватого ФЕПу на основі кристалів BSO і РМО

Кристали парателуриту (TeO_2) — це унікальний матеріал, що має низку оптичних та акустооптичних властивостей. Завдяки широкій забороненій зоні (~ 3.5 eV) та прозорості в УФ-синьому діапазоні (350-500 нм), він може бути корисним у спеціалізованих фотоелектронних перетворювачах, особливо в завданнях, де потрібно використовувати короткохвильове сонячне або УФ-випромінювання. Використовувати TeO_2 у ФЕПах можна наступним чином:

1. як УФ-прозоре вікно / підкладка / оптичний інтерфейс TeO_2 — відмінний УФ-прозорий матеріал, що може використовуватися як вхідне вікно ФЕПу, пропускаючи випромінювання в діапазоні 350–500 нм до активного фотоперетворюючого елемента (наприклад, до BSO, РМО або р-п переходу інших фотогенеруючих матеріалів;

2. крім цього за рахунок високого показника заломлення (~ 2.26 на 400 нм) він може застосовуватись як антирефлексне покриття. TeO_2 не використовується



як самостійний генератор струму, але його висока прозорість в УФ/синьому, механічна стабільність, акустооптичні властивості роблять його ідеальним елементом для модифікації та напрямів випромінювання у складі ФЕП.

Обговорення результатів формування моделі впливу конструктивних особливостей побудови сонячних батарей на їх продуктивність.

Для одночасного застосування в ФЕПах кристалів РМО, BSO та TeO_2 з урахуванням їх унікальних оптичних та п'єзоелектричних властивостей пропонується структура гібридного ФЕПу, зображена на рисунку 5.

Принцип дії запропонованої структури: світло від зовнішнього джерела проходить через TeO_2 , де його напрям/інтенсивність може керуватися за допомогою акустичних хвиль. Далі він потрапляє у шар BSO, де збуджує носії струму (електрони та дірки). Під дією прикладеного електричного поля заряди збираються і сигнал посилюється. РМО додатково перетворює випромінювання, що залишилося, у фотони (якщо це рентген або УФ), підвищуючи ефективність генерації електронів. Зібраний струм направляється споживачу.

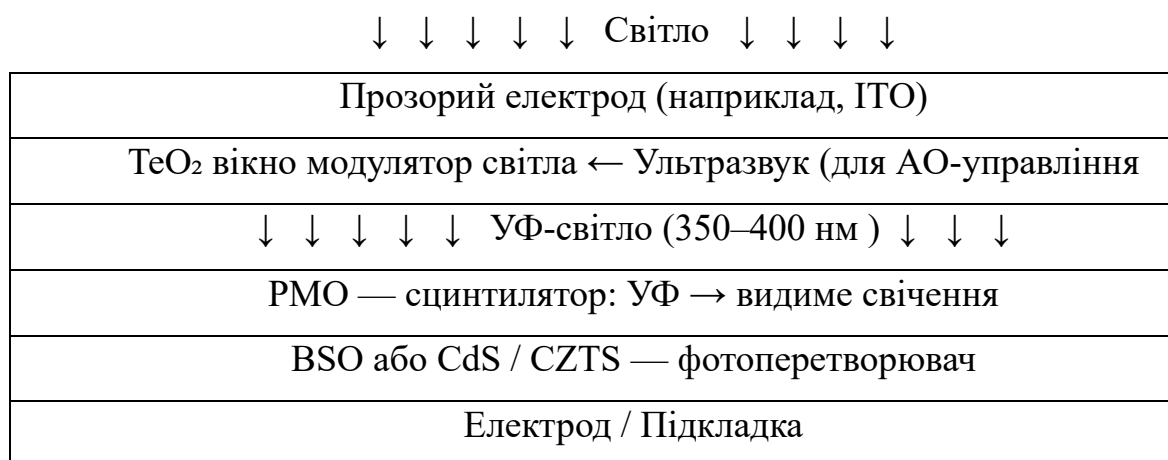


Рисунок 5 – Схема структури гібридного ФЕПу на основі кристалів РМО, BSO та TeO_2

Висновки.

1. В запропонованій конструкції ФЕПу застосовуються всі сполуки, які вирощуються та досліджуються в ДНУ з метою підвищення ефективності роботи ФЕПів. Вона дозволяє ефективно застосовувати особливості цих сполук для покращення роботи ФЕПу. Розглянемо ці особливості. Так TeO_2 може бути акустооптичним модулятором і напрямним пристроєм. Він прозорий у 350–500



нм. Це дозволяє керувати напрямом або інтенсивністю падаючого світла. TeO_2 має високу прозорість в УФ та видимій області (від 350 нм), має великий акустооптичний коефіцієнт. Тому він може використовуватися як просторовий модулятор світлового пучка.

2. Далі світло потрапляє в шар РМО. Це – сцинтилятор, а також перетворювач фотонів на електрони. Функція шару не тільки бути сцинтилятором, але й і бути фотоemisійним шаром, тобто перетворювати падаюче світло (особливо високоенергетичне) на фотони з подальшою генерацією електронів. Цей шар повинен мати наступні властивості: висока щільність, ефективна сцинтиляція в області УФ-видимого світлового діапазону, а також бути оптично прозорим матеріалом.

3. Далі шар BSO. Це фотопровідник з фоточутливістю та пам'яттю. Він детектує світло та формує основний заряд. Для цього він реагує на видиме та УФ світло. Він має добрі електрооптичні та фотопровідні властивості. В ньому збуджуються основні носії струму (електрони та дірки). Під дією прикладеного електричного поля заряди збираються і сигнал посилюється. РМО додатково перетворює випромінювання, що залишилося, у фотони (якщо це рентген або УФ), підвищуючи ефективність генерації електронів. Зібраний струм іде споживачу. Далі світло потрапляє у шар BSO, де збуджує нові носії струму (електрони та дірки). Під дією прикладеного електричного поля заряди збираються і потужність електрики посилюється. РМО додатково перетворює випромінювання, що залишилося, у електрони та дірки (якщо це рентген або УФ), підвищуючи ефективність генерації електронів. Зібраний таким чином струм направляється цілком споживачу.

Література:

1. Інтернет ресурс: <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>

2. Ahmadi M.H. Solar power technology for electricity generation: A critical review / M.H. Ahmadi, M. Ghazvini, M. Sadeghzadeh, M.A. Nazari, R. Kumar, A. Naeimi, T. Ming // Energy Science and Engineering, 2018. – Vol. 6 (5). – P. 340 – 361.



<https://doi.org/10.1002/ese3.239>

3. Интернет ресурс: <https://www.solarctrl.com/blog/intuitive-comparison-perc-topcon-hjt-bc-and-perovskite-cells>.

4. Интернет ресурс: https://remontpil.com/index.php?route=extension/extension/blog/article&article_id=115&srsId=AfmBOorGhyOVM8PgANwMVa5BIJbSG_80fmWxJMdz2bp3EW0Y7w_ffTGH

5. Интернет ресурс: <https://couleenergy.com/ru>

6. Neelam Rathore A comprehensive review of different types of solar photovoltaic cells and their applications / Neelam Rathore, Narayan Lal Panwar, Fatiha Yettou, Amor Gama // International Journal of Ambient Energy, 2021. – Vol. 42, iss.10. – P. 1200 – 1217. <https://doi.org/10.1080/01430750.2019.1592774>

7. Egamberdiev B.E. Influence of doping with rare earth elements on the parameters of silicon photocells / B.E. Egamberdiev, Sh.B. Utamurodova, S.A. Tachilin // Applied Solar Energy, 2022. – Vol. 58 (4). – P. 490 – 496. [10.3103/s0003701x22040065](https://doi.org/10.3103/s0003701x22040065)

8. Kabulov R.R. Effect of solar radiation of different power on the internal amplification of the primary photocurrent in heterostructures based on cadmium telluride / R.R. Kabulov, S.Yu. Gerasimenko, F.A. Akbarov // Applied Solar Energy, 2023. – Vol. 59 (2). – P. 118 – 124. DOI:[10.3103/S0003701X22601065](https://doi.org/10.3103/S0003701X22601065)

9. Knysh L.I. Refinement of microstructure parameters of solar cells, based on gallium arsenide for a combined solar power plant / L.I. Knysh, V.A. Gabrinets // International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology, 2013. – V. 121 (3). – P. 66 – 71.

10. Knysh L.I. The assessment of efficiency PV/T – technology in combined solar power plants / L.I. Knysh, V.A. Gabrinets // Scientific Bulletin of National Mining University, 2013. – Vol. 2. – P. 74 – 78. https://www.researchgate.net/publication/287098519_Assessment_of_PVT-technology_efficiency_in_combined_solar_power_plants

11. Yussuf S.T. Photovoltaic efficiencies of microwave and Cu₂ZnSnS₄ (CZTS)



superstrate solar cells / S.T. Yussuf, K.C. Nwambaekwe, M.E. Ramoroka, E.I. Iwuoha // Materials Today Sustainability, 2023. – Vol. 21. – P. 100287. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2022.100287>

12. Ibn-Mohammed T. Perovskite solar cells: An integrated hybrid lifecycle assessment and review in comparison with other photovoltaic technologies / T. Ibn-Mohammed, S.C.L. Koh, I.M. Reaney, A. Acquaye, G. Schileo, K.B. Mustapha, R. Greenough // Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017. – Vol. 80. – P. 1321 – 1344. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.095>

13. Panchenko T. Thermally activated spectroscopy of optical absorption in $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ crystal / T. Panchenko, L. Karpova // Ukr. J. Phys. Opt, 2020. – Vol. 21, iss. 2. – P. 84 – 92. https://www.ifo.lviv.ua/journal/2020/2020_2_21_03.html

14. Panchenko T.V. Photoluminescence of $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ crystals / T.V. Panchenko, A.A. Dyachenko, O.V. Khmelenko // Ukr. J. Phys. Opt, 2016. – Vol. 17, iss. 1, – P. 39 – 45. https://www.ifo.lviv.ua/journal/2016/2016_1_17_06.html

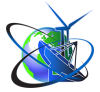
15. Bochkova T. M. Phenomena induced by UV irradiation in PbMoO_4 single crystal / T. M. Bochkova, M. P. Trubitsyn, M. D. Volnyanskii, D. S. Bondar, D. M. Volnyanskii // Molecular crystals and liquid crystals, 2020. – Vol. 699, № 1, P. 111–118 <https://doi.org/10.1080/15421406.2020.1732545>

16. Спосіб отримання кристалів PbMoO_4 : патент на корисну модель / Т.М. Бочкова, М.Д. Волнянський, Д.М. Волнянський, М.П. Трубіцин – Бюл. № 16; опубл. 17.04.2024.

17. Агарков К. В., Бочкова Т. М., Волнянский М. Д., Трубіцин М. П., Коптєв М. М. Монокристали активних діелектриків. Досвід вирощування. – Монографія, рекомендовано до друку Вченою радою ДНУ, прот. № 5 від 24.10.2019 р. – Дніпро: Вид-во «Акцент ПП». – 2020. – 132 с.

Abstract. The paper considers the most common technologies for manufacturing modern solar panels. Various ways to improve their efficiency are analyzed. New variants of the structure of hybrid solar cells based on crystals of complex oxides $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$, PbMoO_4 and TeO_2 are developed. It has been shown that the use of these materials allows to expand the spectral response and increase the conversion coefficient of solar radiation into electric current.

Key words: solar energy, technologies, solar panels, crystals $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$, PbMoO_4 , TeO_2 .



*Стаття підготовлена в рамках Проєкту «Кристали, склокераміка та стекла складних оксидів для техніки подвійного призначення», джерело фінансування –
МОН України, № держреєстрації 0123U101854*

Статтю надіслано: 27.08.2025 р.

© Габрінець В.О.