

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кафедра електроніки і комп'ютерної техніки

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до дипломного проекту бакалавра

на тему:

**«Пристрій та модель оцінювання ефективності сонячної панелі на основі
поглинаючого шару NiO»**

Завідувач кафедри

Опанасюк А.С.

Керівник проекту

Доброжан О.А.

Розробив студент групи ЕС-71

Колмиков М.О.

Суми 2021

Сумський державний університет

Факультет ЕЛІТ

Кафедра електроніки і комп'ютерної техніки

Напрямок підготовки 6.050802 «Електронні пристрої та системи»

Затверджую:

зав. кафедри ЕКТ

Опанасюк А.С.

“ ____ ” _____ 2021 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проект бакалавра

студенту Колмикову Максиму Олександровичу

1. Тема проекту: «Пристрій та модель оцінювання ефективності сонячної панелі на основі поглинаючого шару NiO».

затверджена наказом по університету від “ ____ ” _____ 2021 р. № _____

2. Термін здачі студентом закінченого проекту: “ ____ ” _____ 2021 р.

3. Вхідні дані по проекту: _____

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки:

- огляд технічної літератури за вибраним напрямком проектування;
- розробка, обґрунтування алгоритму функціонування та структурної схеми пристрою;
- розробка функціональної та принципової схеми пристрою, що проектується.

5. Перелік графічного матеріалу:

- Креслення схеми алгоритму;
- креслення схеми електричної структурної;
- креслення схеми електричної функціональної;
- креслення схеми електричної принципової;

Дата видачі завдання: “ ____ ” _____ 2021 р.

Завдання прийняв до виконання: _____ Колмиков М.О.

Реферат

Пояснювальна записка містить: 52 сторінок , 21 рисунка , 4 таблиць , 32 джерел літератури .

Об'єктом дослідження роботи є сонячні елементи різних типів конструкцій, зокрема фотоелементи на основі гетеропереходу $n\text{-ZnS}/p\text{-NiO}$.

Метою роботи є огляд сучасних сонячних елементів з оцінюванням їх ефективності та розрахунок оптичних та рекомбінаційних втрат у сонячних елементів сформованих на основі поглинаючого шару NiO з використанням $n\text{-ZnS}$.

На сьогоднішній день питання розвитку альтернативних способів одержання електричної енергії надзвичайно актуальна. Традиційні джерела інтенсивно вичерпуються і вже приблизно через сто років можуть бути повністю вичерпані. Енергетичні ресурси мають достатньо високу вартість і у значній мірі впливають на економіку багатьох держав.

Однією із вигідних альтернатив слід вважати сонячні електростанції. Все більше і більше жителів встановлюють на дахах своїх будинків сонячні елементи. У зв'язку з інтенсивним використанням сонячних батарей серед населення, ціни на такі установки постійно зменшуються і стають все більш доступними. Враховуючи тривалий термін служби можна з упевненістю сказати, що дані установки на сьогоднішньому ринку займають гідне місце.

Вартість сонячної енергії разом з вартістю акумуляторів стрімко знижується, що сприяє широкому застосуванню таких комплексів у різноманітних галузях промисловості та індивідуальними споживачами. За досягнення мережевого паритету вартість даного типу електроенергії стане нижчою від енергії з традиційних невідновлювальних джерел.

Ключові слова: сонячні панелі, фотоелемент, рекомбінація, гетероперехід, оптичні та рекомбінаційні втрати.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД СУЧАСНИХ КОНСТРУКЦІЙ СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ.....	10
1.1 Загальні відомості про сонячні батареї.....	10
1.2 Принцип роботи сонячних елементів.....	11
1.3 Основні переваги та недоліки сонячних елементів.....	13
2 РІЗНОВИДИ СОНЯЧНИХ БАТАРЕЙ.....	15
2.1 Сонячні батареї на основі монокристалічного та полікристалічного кремнію.....	15
2.2 Тонкоплівкові батареї.....	17
2.3 Сонячні батареї із аморфного кремнію.....	21
2.4 Арсенід-галієві сонячні батареї.....	22
2.5 Сонячні батареї на основі телуриду кадмію.....	24
2.6 Сонячні батареї на основі CIGS.....	25
3 МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ.....	27
3.1 Сонячні панелі на основі квантових точок.....	27
3.2 Сонячні трекери.....	30
3.2.1 Спрощення конструкції системи орієнтації сонячних батарей.....	32
3.3 Двосторонні сонячні панелі. Структура і особливості конструкції.....	33
4 МЕТОДИКА МОДЕЛЮВАННЯ ОПТИЧНИХ ТА РЕКОМБІНАЦІЙНИХ ВТРАТ У ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧАХ НА ОСНОВІ ГП n-ZnS/p-NiO.....	35
4.1 Визначення оптичних втрат з врахуванням відбиття та поглинання сонячного спектру в сонячному елементі.....	37

					<i>ЕЛІТ 6.05080202.003 ПЗ</i>			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Колмиков М.О.			<i>Пристрій та модель оцінювання ефективності сонячної панелі на основі поглинаючого шару NiO. Пояснювальна записка.</i>	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.		Доброжан О.А					4	
Реценз.						<i>СумДУ, ЕС-71</i>		
Н. Контр.		Доброжан О.А						
Затверд.		Опанасюк А.С.						

4.2	Визначення рекомбінаційних втрат в ФЕП.....	45
4.3	Розрахунок впливу рекомбінаційних та оптичних втрат на максимальну ефективність сонячних елементів.....	48
	ВИСНОВКИ.....	49
	СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	51

					<i>ЕЛІТ 6.05080202.003 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		5

ВСТУП

У зв'язку з періодичними поломками та збоями на тепло або гідроелектростанціях, які є вже достатньо застарілими і відпрацьовують свої останні ресурси, зачасту постає питання стосовно актуалізації альтернативних джерел електроенергії, в особливості мова йде про сонячні панелі (СП). У відповідності до прогнозів науковців, сонячна енергія стане однією із передових на ринку електроенергетики, уже починаючи з XXI століття. Вона з кожним роком отримує дедалі більше секторів приватного житла та малого бізнесу за рахунок того, що «традиційна» не відновлювана енергія поступово відходить на задній план.

На момент 2019 року наша країна вцілому виробила 1,8 гВт так-званої «зеленої електроенергії». Порівняно з більшістю розвинених країн, це невеликі обсяги. Проте стабільне збільшення виробництва сонячної енергії оцінюється в 30-40% на рік. Це до 2030-35 року дасть змогу Україні стати однією з держав, які здатні забезпечити до 25 відсотків своїх енергетичних потреб за рахунок альтернативних джерел.

Популярність промислових та приватних сонячних електростанцій почала стрімко зростати в Україні після прийняття в 2015 році закону про "зелений тариф". Закон вимагав від держави купувати надлишки "зеленої" електроенергії, виробленої сонячними електростанціями, у виробників, які бажають її продати.

Вагомим питанням стосовно теми сонячної енергетики є її ефективність. За розрахунками Шоклі-Квайзера максимальна теоретична ефективність тонкоплівкових СЕ з поглинальним шаром CZTS складає близько 32-34 %. Проте ККД реальних ФЕП не перевищує 12 %. Різницю між теоретичними передбаченнями та реальними експериментальними значеннями ефективності приладів можна пояснити оптичними, електричними та рекомбінаційними втратами при перетворенні енергії сонця в електричну. Слід відмітити, що основні незворотні втрати енергії в фотоелектричних приладах пов'язані з:

- відображенням сонячного випромінювання від поверхні і гетерограніцями перетворювача;

					ЕЛІТ 6.05080202.003 ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- проходженням певної частки випромінювання через ФЕП без поглинання в ньому;
 - поглинанням частини світлового випромінювання в допоміжних шарах сонячних елементів;
 - розсіюванням на теплових коливаннях ґрат надлишкової енергії фотонів;
 - рекомбінацією пар електрон-дірка, які були утворені під дією світла на поверхні і в об'ємі ФЕП;
 - власний внутрішній опір перетворювача;
 - певними іншими фізичними процесами.
- Подальше збільшення ефективності сонячного елемента можливо лише за рахунок мінімізації зазначених втрат, що є результатом оптимізації їх конструкції і покращення властивостей окремих шарів.

Згідно з прогнозами науковців вже з середини ХХІ століття сонячна енергетика може стати переважним джерелом енергії людства [1]. Одним із найбільш перспективних методів використання сонячної енергії є її перетворення в електричну за рахунок фотоелектричних перетворювачів (ФЕП). На сьогоднішній день найпоширенішими є сонячні елементи, які базуються на кремнієвих технологіях, проте останнім часом почали більш широко використовуватися тонкоплівкові ФЕП на основі гетеропереходів (ГП), наприклад таких як *n*-CdS/*p*-CdTe із фронтальним струмознімальним шаром *n*-ІТО (In₂O₃ (90 %) + SnO₂ (10 %)) [2-4]. Проте такі недоліки як токсичність Cd, висока вартість та мала поширеність у природі In, Te дають поштовх до пошуку більш альтернативних матеріалів для функціональних шарів і конструкцій ФЕП. У наш час перспективою заміни традиційних поглинальних шарів CdTe тонкоплівкових СЕ розглядається чотирикомпонентна сполука Cu₂ZnSnS₄ (CZTS), що має оптимальну для перетворення сонячної енергії ширину забороненої зони (ЗЗ) ($E_g^{CZTS} = 1,0-1,5$ еВ), *p*-тип провідності та високі значення коефіцієнту поглинання ($\alpha \sim 10^4-10^5$ см⁻¹) [5, 6]. У якості віконного матеріалу у такому сонячному елементі як правило виступає CdS, а фронтальним контактом ІТО [5, 6]. Альтернативою існуючим ФЕП може розглядатися конструкція з вікном з матеріалу ZnSe або ж

					ЕЛІТ 6.05080202.003 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ZnS та струмознімальним шаром ZnO (легованим Al) [7, 8]. До складу такої конструкції входять поширені у природі та нетоксичні елементи. Сполуки ZnS, ZnO, ZnSe ($E_g^{ZnS} = 3,68$ eВ, $E_g^{ZnO} = 3,37$ eВ, $E_g^{ZnSe} = 2,67$ eВ) є широкозонними, що дозволяє підвищити кількість фотонів, які надходять до поглинального шару.

На даний час досліджено оптичні та рекомбінаційні втрати у СЕ на основі ГП n -CdS/ p -Cu(In,Ga)Se₂, n -CdS/ p -CdTe, n -ZnS/ p -CdTe, та шарів перовскітів. Проте є майже відсутніми роботи, які присвячені дослідженню таких втрат в СЕ на основі шарів NiO.

Також залишається не дослідженою можливість застосування таких перспективних струмопровідних шарів як ZnO та віконних – ZnSe та ZnS, які крім того ж не містять кадмію та індію. Вище зазначене і обумовило мету даної роботи, яка полягає у визначенні та оптичних і рекомбінаційних втрат у ФЕП на основі ГП n - ZnS/ p -NiO.

Тонкоплівкові сонячні елементи (СЕ) на основі гетеропереходу (ГП) n -ZnS/ p -NiO, при масовому виробництві розглядаються як альтернатива фотоперетворювачам, які базуються на кремнієвих технологіях. Фактично це перша технологія, що дозволяє отримувати сонячну енергію за ціною нижчою ніж \$ 1/Вт. Згідно теоретичних оцінок ефективність плівкових сонячних елементів з поглинаючим шаром NiO складає близько 30%. Однак реальний ККД таких фотоперетворювачів є значно нижчим. Так для СЕ на основі ГП n -CdS/ p -CdTe в наш час отримано ККД, який складає 17,3%, ефективність сонячних модулів великої площі не перевищує 11,6% [9-11].

Оптимізації конструкції СЕ n -CdS / p -CdTe та зменшенню втрат енергії у їх фотоактивних шарах присвячено багато наукових праць, проте у більшості з них розглядаються лише втрати, які пов'язані з рекомбінацією генерованих під дією світла електронно-діркових пар. Слід зазначити, що останнім часом ряд авторів почали звертати увагу на необхідність врахування та мінімізації оптичних втрат світла у фотоперетворювачах, що пов'язані з його відбиттям та поглинанням у склі, віконних та допоміжних шарах.

В технології виробництва тонкоплівкових сонячних елементів вкрай

					ЕЛІТ 6.05080202.003 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

важливу роль відіграє обрання віконного шару. На сьогоднішній деньу цій якості широко використовується CdS ($E_g = 2,42$ eV). Альтернативою цим плівкам можуть бути тонкі шари ZnS, які і були розглянуті нами у роботі. Сульфід цинку має значно більшу у порівнянні з сульфід кадмію ширину забороненої зони ($E_g = 3,68$ eV), що в свою чергу дозволяє збільшити діапазон фоточутливості відповідних СЕ та підвищити їх струми короткого замикання. До переваг також слід віднести його не токсичність, що досягається завдяки відсутності у складі важких металів. Шар ZnS також може грати роль антивідбивного покриття сонячного елемента, що підвищує кількість фотонів, які поглинуті фотоперетворювачем та відповідно його ККД [13]. Але вплив заміни матеріалу віконного та струмознімального шару іншими на оптичні характеристики сонячних елементів з поглинальним шаром CdTe на даний момент не є повністю дослідженими.

Замінивши оптичної вікна CdS на тонкі шари ZnS вдається досягти підвищення теоретичного значення ефективності сонячного перетворення та отримати можливість поглинання енергії фотонів у ультрафіолетовій області сонячного спектру, а також зменшити вартість конструкції сонячного елемента.

					ЕЛІТ 6.05080202.003 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД СУЧАСНИХ КОНСТРУКЦІЙ СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

1.1 Загальні відомості про сонячні батареї

Застосування сонячних батарей є другою спробою людства приборкати безмежну енергію сонця та змусити її працювати собі на користь. Одними із перших були отримані сонячні колектори (так-звані сонячні термальні електростанції), де електричну енергію утворює нагріта до температури кипіння під сфокусованими сонячними променями вода.

Історія винайдення сонячних батарей бере свій початок ще в ХІХ столітті, а технологія їх виробництва розвивалася напрочуд швидко. Д 1839 році науковець Антуан-Сезар Беккерель анонсував розроблену ним хімічну батарею, яка за рахунок сонячного впливу виробляла електрику. Одна із перших сонячних батарей мала ККД не більше 1% . Це значить, що лише 1 відсоток сонячного світла перетворювався в електричну енергію. Вже у 1873 р. Віллоубі Сміт зафіксував чутливість матеріалу селену до світла, а вже у 1877 році вчені Адамс та Дей відмітили, що Se під впливом світла утворює електричний струм. Чарльз Фрітц в 1880 р. застосував покритий шаром Au селен при виробництві першого сонячного елемента, що теж мав ефективність не більше одного відсотка. Однак, Фрітц дійсно вважав отримані ним сонячні елементи революційними. Він передбачав використання безкоштовної сонячної енергії в якості засобу диверсифікації поставок енергії, припускаючи, що сонячні батареї згодом замінять існуючі електростанції. З тлумаченням у 1905 році Альбертом Ейнштейном явища фотоефекту з'явилися сподівання на розробку сонячних батарей вже з більш високим значенням ККД, але нажаль прогрес виявився незначним.

В середині ХХ століття наукові дослідження у області діодів та транзисторів надали вкрай потрібні для вчених знання. У 1954 р. група дослідників Гордон Пірсон, Дерріл Чапін та Кел Фуллер створили кремнієвий сонячний елемент, який вперше мав ККД близько 4%. В подальшому значення

						Арк.
					ЕЛІТ 6.05080202.003 ПЗ	10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ефективності осередку була збільшення до 15%. Так сонячні батареї вперше були використані у сільських районах та віддалених містах у якості альтернативного джерела живлення у системах телефонного зв'язку, де вони цілком успішно використовувалися протягом десятків років. На даний час розроблені сонячні батареї поки не можуть у повній мірі задовольнити потреби в енергії, проте вони вже стали одним із основних джерел енергії по забезпеченню штучних супутників Землі. Існуючі у ті часи паливні системи і акумуляторні батареї мали дуже велику вагу.

Сонячні батареї мають значно більший коефіцієнт значення співвідношення виробленої енергії до ваги, аніж усі інші більш традиційні джерела енергії та є більш ефективними з точки зору економічності [12]. Зараз кількість встановлених великомасштабних енергетичних фотоелектричних систем є невеликою. Значна частина зусиль направлена на забезпечення з їх допомогою електроенергією віддалених та важкодоступних місць. Сонячні батареї можуть забезпечити лише до 1% усієї виробленої в наш час електроенергії. Дослідження в області сонячної енергетики дають підстави стверджувати, що кількість сонячного випромінювання, яке досягає поверхні Землі кожний рік, могло б з легкістю задовольнити потреби у енергії в кілька разів.

1.2 Принцип роботи сонячних елементів

Сонячні панелі як правило складаються з фотоелектричних комірок, які запаковані в загальну рамку. Як зазначалося раніше, першим в історії фотоелектричним матеріалом є Se. Саме за його допомоги вироблялися фотоелементи в кінці XIX століття. При попаданні сонячних променів на поверхню фотоелементу у ньому відбувається генерація нерівноважних електронно-діркових пар. Надлишкові електрони та дірки частково переносяться через *p-n*-перехід з одного шару напівпровідника у інший. Результатом цього є утворення у зовнішньому ланцюгу відбувається напруги. За даних умов на контакті *p*-шару утворюється позитивний полюс джерела струму, а на *n*-шару – негативний (рис. 1.1).

					ЕЛІТ 6.05080202.003 ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

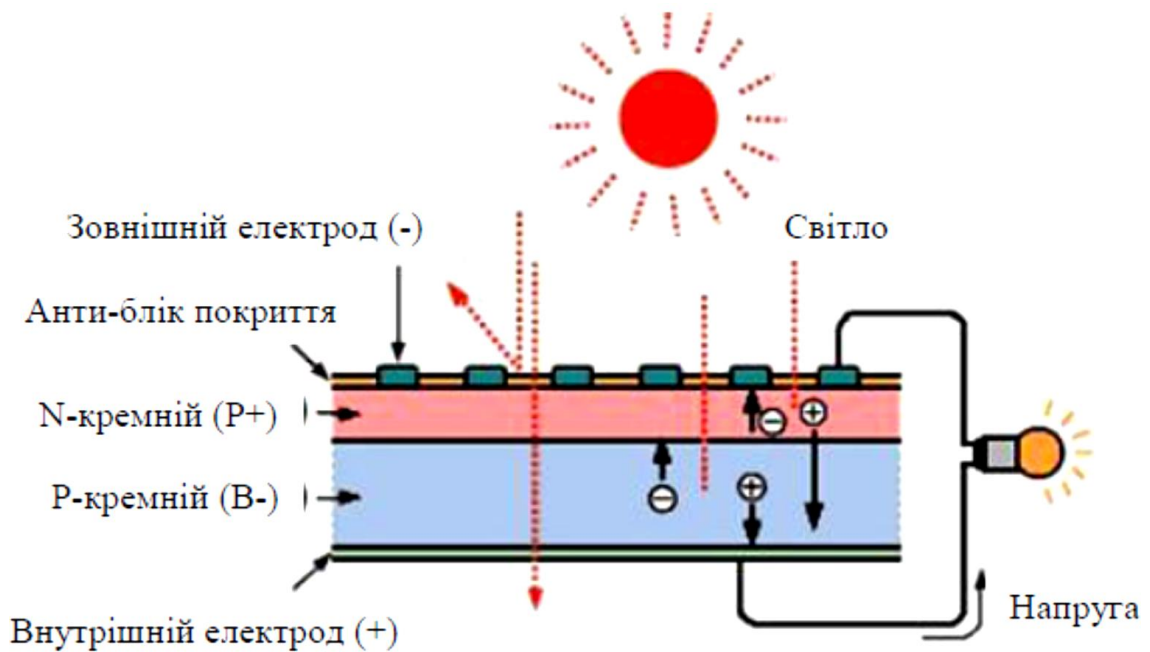


Рисунок 1.1 – Загальний принцип роботи сонячної батареї

Підключені до зовнішнього навантаження у вигляді акумулятора фотоелементи утворюють з ним замкнуте коло, після чого сонячна панель починає працює за принципом генератора, а акумуляторна батарея при цьому починає поступово набирати заряд. Звичайні кремнієві фотоелектричні перетворювачі (ФЕП) за своїм принципом є одноперехідними елементами. Перетікання у них електронів реалізується лише через один *p-n*-перехід, що обмежений по енергетиці фотонів зоною цього ж переходу. Це значить, що кожен з таких фотоелементів може генерувати електроенергію лише від вузького спектра сонячного випромінювання. Це і пояснює відносно низьку ефективність у ФЕП. Для підвищення ККД сонячних елементів, кремнієві напівпровідникові елементи для них в останні роки виробляються багатоперехідними (або каскадними) [13].

У сучасних фотоелектричних перетворювачах переходів вже декілька. При цьому кожен з них у цьому каскаді розрахований на індивідуальний спектр сонячних променів, де значення сумарної ефективності перетворення фотонів у електричний струм у таких фотоелементах в результаті зростає. Але і їх ціна є значно вищою. Під час роботи фотоелемент і батарея поступово нагріваються.

Вся енергія, що не була витрачена на генерацію електричного струму трансформується у тепло. Зачасту температура на поверхні геліопанелі зростає, і чим вона є вищою, тим менш ефективно буде працювати фотогальванічний елемент. У результаті чого одий і той же тип сонячної батареї в спеку генерує струму менше, аніж у мороз. Максимальні значення ККД фотоелементи демонструють в ясний зимовий день. Визначну роль у даному випадку відіграють два фактори – багато сонячного освітлення і природне охолодження. Слід зазначити, що якщо при цьому на сонячний елемент буде падати сніг, то електроенергію він генерувати все рівно продовжить.

1.3 Основні переваги та недоліки сонячних елементів

Головною перевагою сонячних елементів є їх гранична конструктивна простота та цілковита відсутність рухомих деталей. Сонячні батареї не мають потреби у будь-яких додаткових паливах та здатні працювати лише на внутрішніх ресурсах. Користувачу не потрібно займатися збереженням приладу та постійно підтримувати його. Сонячні батареї майже повністю стійкі до механічного зносу і майже не потребують додаткового обслуговування.

До переваг також слід віднести: незначну питому вагу, невибагливість, достатньо простий монтаж та мінімальні вимоги, що висуваються до обслуговування у процесі експлуатації (зазвичай достатньо буде лише прибирання бруду з робочої поверхні елементу). Такі пристрої можуть пропрацювати не менше тридцяти років. Застосовувані в даному випадку технології та матеріали повністю задовольняють найвищим екологічним стандартам, сонячні батареї при цьому не виробляють викидів шкідливих та отруйних речовин у навколишнє середовище та є цілком безпечними.

Одержання енергії з використанням сонячних елементів дозволяє заощадити значні фінансові кошти. У порівнянні з традиційними джерелами енергії, цей тип ресурсів є практично невичерпним.

До одного з основних недоліків сонячних елементів слід в першу чергу віднести невисоке значення ККД, оскільки вони перетворюють енергію

					<i>ЕЛІТ 6.05080202.003 ПЗ</i>	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вибірково, тобто для робочого збудження атомів необхідні певні значення енергії фотонів (частоти випромінювання), отже в одних смугах частот перетворення протікає достатньо ефективно, в той час як інші частотні діапазони для них не приносять ніякої користі. Окрім того, енергія зловлених ними фотонів застосовується квантово, тобто її «надлишки», які перевищують необхідний рівень, використовуються на шкідливе у конкретному випадку нагрівання матеріалу фотоперетворювача. Багато в чому саме цим і можна пояснити їх невисоке значення ККД. Слід зазначити, що невдало обраний матеріал захисного скла може значно знизити ефективність роботи батареї. Слід враховувати той факт, що просте скло досить добре може поглинати високоенергетичну ультрафіолетову частину спектру, оскільки для деяких типів фотоелементів саме на часі саме цей діапазон, - енергія інфрачервоних фотонів для них є занадто малою.

Ще одним недоліком є чутливість до забруднень. Навіть достатньо тонкий шар пилу, який присутній на поверхні фотоелементів чи захисного скла може поглинати істотну частину сонячного світла, а також помітно знизити вироблення енергії. Вирішенням даної проблеми є постійне очищення поверхонь сонячних батарей, які встановлені горизонтально або ж похило. Дана процедура є необхідною як, наприклад, після кожного снігопаду або ж після пилової бурі.

Зменшення ефективності роботи протягом усього терміну служби також відносять до недоліків конструкцій сонячних елементів. Напівпровідникові пластини, з яких у більшості випадків формуються сонячні батареї, з часом починають деградувати та втрачати свої властивості, в результаті чого і без того не сильно високе значення ККД сонячних батарей стає ще меншим. Тривалий вплив високих температур значно прискорює цей процес.

Слід відмітити, що сучасні фотоперетворювачі можуть зберігати свою ефективність на протязі багатьох років. Прийнято вважати, що у середньому за 30 років ККД сонячної батареї приблизно зменшується на 10-12%.

					ЕЛІТ 6.05080202.003 ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Використання сонячних батарей є неможливим у більшості районів нашої країни через погодні умови та малу кількість сонячних днів. Одним із недоліків є чутливість до високих температур, з підвищенням якої ефективність роботи сонячних батарей стрімко знижується. При температурах вище 110..160 ° С вони можуть на певний час стати непрацездатними, а подальший нагрів може спричинити до повного пошкодження акумулятора. Отже необхідно вживати усіх заходів задля зниження нагрівання, яке є неминучим під палючими прямими сонячними променями. Також ситуація додатково ускладнюється тим, що чутлива поверхня занадто «тендітних» фотоелементів часто закривається шаром захисного скла або прозорого пластика. Так утворюється своєрідний так званий «парник», який збільшує перегрів. Однак, збільшення відстані між захисним склом і поверхнею фотоелемента та з'єднання зверху та знизу цієї порожнини з атмосферою, може призвести до організації конвекційного потоку повітря, природним шляхом охолоджуючи фотоелементи. Слід відмітити, що на яскравому сонці та за високої температури зовнішнього повітря дана процедура може виявитися не цілком ефективною, а сама сонячна батарея навіть не сильно великих розмірів може потребувати індивідуальної системи охолодження.

Слід зауважити, що подібні системи, як правило легко автоматизуються, а привід вентилятора чи помпи споживає незначну частку енергії, яка виробляється. За відсутності яскравого сонця даного нагрівання немає та охолодження взагалі може бути не потрібним, так що енергія, що зекономлена на приводі системи охолодження використовується для інших задач.

2 РІЗНОВИДИ СОНЯЧНИХ БАТАРЕЙ

2.1 Сонячні батареї на основі монокристалічного та полікристалічного кремнію

Сонячні панелі з монокристалічного кремнію зазвичай отримують шляхом «лиття» кристалів кремнію надвисокої чистоти, при якому розплав твердіє при контакті до запалу кристала. В процесі охолодження кремній поступово загусає у

					ЕЛІТ 6.05080202.003 ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

виливці циліндричної форми монокристалу діаметром від 12 см до 21 см, довжина якого досягає 2 м. Отриманий таким способом злиток надрізається листами товщиною 250-300 мкм. Дані елементи мають значно вищу ефективність у порівнянні з елементами, які виготовлені іншими способами. Їх ККД згідно роботи [14] досягає 20-22%, завдяки особливій орієнтації атомів монокристалу, що і сприяє зростанню рухливості електронів. Поверхню кремнію пронизує сітка із металевих електродів. Зазвичай монокристалічні модулі закріплені в алюмінієву рамку та закриті «протиударним» склом. Колір монокристалічних фотоелементів може бути темно-синім або ж чорним. Сонячні батареї є надійними, довговічними (термін їх служби досягає 60 років) та прості в установці, оскільки не містять у своєму складі рухомих частин. Отже, сонячні батареї можливо використовувати у місцях де погано реалізовано звичайне енергопостачання та достатньо велика кількість сонячних днів. Прикладами використання сонячних батарей можуть бути: дахи будинків для отримання електричної енергії, вуличні та садові ліхтарі освітлення, зарядка акумуляторів, забезпечення електричним струмом обладнання на судах, рацій, насосів, сигналізації тощо. Сонячні панелі із монокристалічних фотоелектричних елементів є більш ефективними, але і є дорогими у перерахунку на Вт потужності. Як правило їх ККД знаходиться в діапазоні від 18% до 23%. Зачасту монокристалічні елементи виконані у формі багатокутників, якими вкрай важко заповнити усю поверхню панелі без залишку. У результаті цього питома потужність сонячної батареї є трохи нижчою чим питома потужність окремо взятого її елемента (рисунок 2.1).



Рисунок 2.1 – Сонячна батарея з монокристалічного кремнію

					ЕЛІТ 6.05080202.003 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

Альтернативою монокристалічному кремнію виступає полікристалічний кремній (рисунок 2.2), однак у нього є більш низькою власна собівартість.



Рисунок 2.2 – Сонячна батарея з полікристалічного кремнію

Кристали у ньому знаходяться ще в агрегатному стані, проте мають різну форму та орієнтацію. Такий матеріал у порівнянні з «темними» монокристалами відрізняється яскраво синім кольором. Процес вдосконалення виробництва даного типу елементів дозволяє вже сьогодні одержувати компоненти з характеристиками, які лише малою часткою поступаються за електричними показниками монокристалів.

2.2 Тонкоплівкові батареї

Дані прилади розділяються на різноманітні класи та типи у залежності від того, якими є цілі їх використання. Існують малопотужні сонячні батареї, що слугують для зарядки мобільних телефонів, КПК або ж інших подібних гаджетів. Такі фотопластинки мають малу площу, проте і є досить дорогими. Універсальні сонячні батареї призначені для живлення широкого кола споживачів у польових умовах. Є варіанти як імпортих так і наших виробників. При цьому ціна і якість у них досить різна. Вони вважаються найбільш прийнятними для використання туристами. Все більший інтерес викликають панелі сонячних елементів – фотопластинки, які закріплені на підкладці. Вона представляє собою заготовку для побудови пристрою, який в свою чергу і забезпечить електроенергією

					ЕЛІТ 6.05080202.003 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

необхідне приміщення. За типом виготовлення їх розділяють на: тонкоплівкові, монокристалічні та полікристалічні сонячні батареї [15].

Основною перевагою тонкоплівкових технологій є порівняно низька собівартість, саме за даної причини вона претендує на те, щоб стати однією із передових вже у найближчі роки. Модулі сформовані на новій базі можуть створювати сонячні батареї гнучкими в прямому сенсі даного слова. Створені модулі є легкими та еластичними, що робить можливим розміщення таких батарей буквально на любых поверхнях, наприклад, поверхні одягу.

В основі будови гнучких сонячних елементів лежать полімерні плівки; аморфний кремній, алюміній, телурид кадмію або ж інші напівпровідники, що вже зараз успішно використовуються під час виробництва портативних зарядних пристроїв для мобільних телефонів, ноутбуків, планшетів, відеокамер та інших гаджетів, виконані у вигляді складних сонячних батарей з невеликим розміром (рисунок 2.3).



Рисунок 2.3 – Тонкоплівкова сонячна батарея

Одні з найперших зразків тонкоплівкових сонячних елементів були виготовлені із застосуванням осадження на підкладку аморфного кремнію, проте ККД лежить в межах 4-5%, а термін їх роботи не є достатньо довгим. Наступним етапом цієї ж технології було підвищення ККД до 8% і подовження терміну служби (рисунок 2.4).

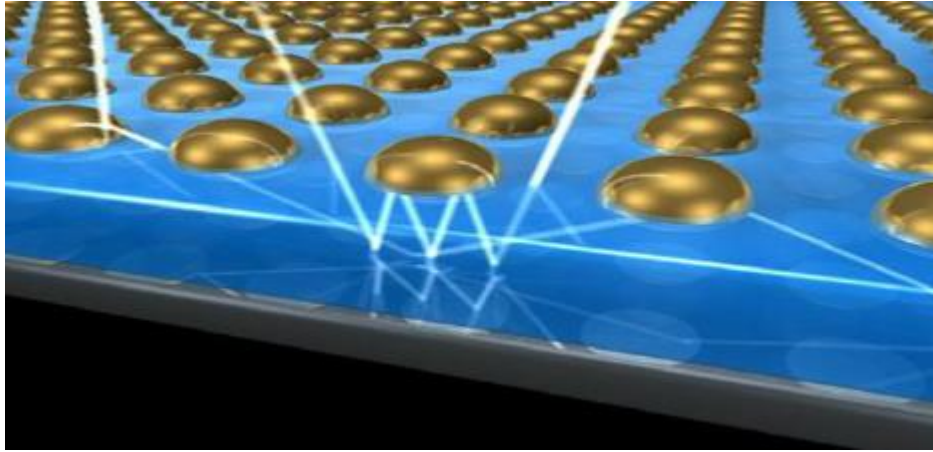


Рисунок 2.4 – Загальна структура тонкоплівкової батареї

Застосовані у даному випадку селенід міді-індію та телурид кадмію, забезпечили розроблення гнучких сонячних батарей та портативних зарядних пристроїв з ККД до 11%, що є значним досягненням, враховуючи, що фізики ведуть «боротьбу» за кожний послідуочий відсоток ККД. Слід зупинитися більш детально на виготовленні тонкоплівкових батарей.

Стосовно телуриду кадмію, то у якості світлопоглинаючого матеріалу він почав досліджуватися ще на початку 70-х років, коли необхідним був підбір кращого варіанту для використання у космосі. І до сьогоднішнього дня саме телурид кадмію залишається найбільш перспективним при розробці сонячних батарей. Проте питання відносно токсичності кадмію залишається все ще актуальним. У результаті досліджень було показано, що небезпека токсичності є мінімальною, при цьому рівень кадмію, що вивільняється у атмосферу не є небезпечним. ККД при цьому, згідно [15], складає близько 12%, при цьому вартість за 1 Вт є на третину нижчою, аніж у кремнієвих аналогів.

Відносно селеніду міді-індію слід відмітити, що значна частина індію сьогодні застосовується при створенні «плоских» моніторів, тому й індій все частіше заміщують на галій, який володіє подібними властивостями для сонячної енергетики. Розроблені плівкові батареї на цій основі мають ККД що досягає 21%. Не так давно почали виготовлятися полімерні панелі. Тут у якості світлопоглинаючого матеріалу виступають органічні напівпровідники, а саме: вуглецеві фулерени, фталоціанін міді і т.д. Товщина сонячного елемента складає

					ЕЛІТ 6.05080202.003 ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

близько 100 нм, однак значення ККД лежить в межах 5-6%. Слід відмітити, що вартість виробництва при цьому є досить низькою, плівки доступними, легкими та повністю задовольняють екологічним нормам. За даної причини полімерні панелі розповсюджені там, де вкрай важливою є екологічність при утилізації і механічна еластичність.

В першу чергу варто звернути увагу на високу продуктивність модулів навіть за розсіяного світла, що в свою чергу дає до 15-17% більше потужності впродовж року у порівнянні з кристалічними аналогами. Однією із переваг є вартість виробництва. В потужних системах (від 10 кВт та вище) саме тонкоплівкові модулі володіють великою ефективністю, однак площа поверхні необхідна у 2,5 рази більша.

Виходячи з вищесказаного, можна відмітити умови, за яких тонкоплівкові модулі набувають виправданої переваги. В регіонах, де переважною є похмура погода саме тонкоплівкові батареї працюють найбільш ефективно (розсіяне світло). У випадку регіонів з жарким кліматом тонкі плівки є більш ефективними (за високої температури вони так само ефективно працюють, як і за невисокої). Ще у 2008 р. американська компанія «Solyndra» запропонувала мотедіку розміщення тонкоплівкових батарей на циліндрах, у випадку коли шар фотоелемента осаджується на скляну трубку, яка розміщена усередині іншої трубки, яка оснащена електричними контактами. При цьому застосовуються такі матеріали як: мідь, селен, галій та індій.

Циліндричне виконання забезпечує поглинання більшої кількості світла, а набір із 40 циліндрів розміщується на панелі розміром 1×2 м. Перевагою є те, що білий колір покриття даху сприяє більш високій ефективності даного рішення, оскільки у даному випадку відбиті промені також працюють, додаючи ще 20% енергії. Циліндричні набори є стійкими навіть до сильного вітру з поривами до 60 м/с. Значна частина сонячних елементів, що виготовляються у наш час, містять лише один *p-n* перехід та фотони із енергією меншою ніж ширина забороненої зони, просто не приймають участі у генерації. Вченими запропонована методика подолання даного обмеження, що полягає у розробленні каскадних елементів

					ЕЛІТ 6.05080202.003 ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

багатошарової структури, де кожний шар має свою власну ширину забороненої зони, тобто кожен шар має індивідуальний $p-n$ перехід із індивідуальним значенням енергії поглинання фотонів.

Верхній шар формується із сплаву на основі гідрогенизованного аморфного кремнію, другий – аналогічний сплав із додаванням Ge (від 10% до 15%), третій – із додаванням від 40% до 50% Ge. Отже, кожний наступний шар вже має заборонену зону, таку як у попереднього шару, і не поглинені фотони у верхніх шарах поглинаються шарами плівки, що лежать нижче. За такого підхода вартість енергії, яка генерується знижується у два рази у порівнянні із традиційними кристалічними кремнієвими елементами. Це сприяло досягненню значення ККД до 32%.

Швейцарськими вченими було отримано на полімерній основі ККД 20,5%, а у якості напівпровідників були застосовані такі матеріали як: індій, мідь, селен та галій. На сьогодні це є найвищим показником серед елементів на тонкій полімерній плівці.

В Японії аналогічним чином було досягнуто (за використання індію, селену та міді) 19,9% ККД. Напівпровідники при цьому були отримані методом напилення. Також в Японії виготовляють сонячні тканини (тканинні сонячні панелі), що розроблені із застосуванням циліндричних елементів діаметром приблизно 1,2 мм, що прикріплені до тканини.

2.3 Сонячні батареї із аморфного кремнію

Кремнієві сонячні батареї, в основу яких покладено аморфний кремній, є результатом технологічного удосконалення методик виготовлення сонячних елементів. Це, як правило, тонкоплівкові моделі. Порівнявши їх із «класичними» на основі кристалів, технології їх виготовлення включають в себе суттєві відмінності. Аморфному кремнію можна надавати довільну форму. Його гарячі пари утримуються на підкладці, а утворення звичайних кристалів не відбувається. Це значно забезпечує різке зниження на виробничі витрати.

					ЕЛІТ 6.05080202.003 ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Аморфні сонячні панелі мають істотні відмінності від моно- або полікристалічних. Це полягає у тому, що прямий потік світла, який надходить від Сонця даним батареям не потрібний. Завдяки гнучкості на них із легкістю наносяться сучасні напівпровідникові елементи (рисунок 2.5).

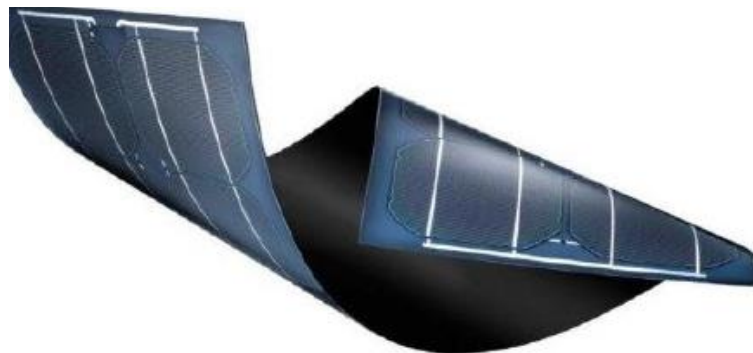


Рисунок 2.5 – Сонячна батарея із використанням аморфного кремнію

Аморфні сонячні батареї мають дивовижну здатність до поглинання неяскавого та розсіяного світлового потоку. Вони активно використовуються у тих регіонах, в яких переважною є прохолодна та похмура погода. За високих температур вони не відбувається зниження рівня своєї продуктивності. Однак панелі із арсеніду галію і на сьогоднішній день все ще мають перевагу.

Отже, кремнієві сонячні батареї із унікальною властивістю аморфності згідно [16] мають такі перспективні переваги:

- менший нагрів за високих температур. Це значить, що вони не втрачають продуктивності, переробляючи більшу кількість електроенергії. Ефективність кристалічних модулів за значного нагрівання, як відомо, різко знижується, що супроводжується значними втратами потужності;

- вироблення більшої кількості енергії при слабкому рівні світла. Кристалічні сонячні батареї за умов розсіяного світлового потоку вже можуть цілком перестати працювати. Аморфні модулі в умовах дощу та хмарності накопичують від 10% до 20% більше енергії;

- практично повна непомітність на будівлях. Їх розмір мінімальний, а зовнішній вигляд, схожий на плівку або тонке скло, з легкістю можна приховати чи замаскувати;

					Е/ІТ 6.05080202.003 ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- мінімальний відсоток браку за рахунок простоти виробництва. Кристалічні модулі з'єднуються між собою методом пайки, що є їх слабким місцем. Вони значно краще переносять тимчасове або часткове затінення та втрачають при цьому значно менше своєї потужності.

2.4 Арсенід-галієві сонячні батареї

Арсенід-галієві сонячні батареї створювалися з використанням матеріалу арсеніду галію (рисунок 2.6). Для того, щоб одержати матеріал, необхідно сполучити миш'як та галій, що розроблені як альтернативний варіант традиційних елементів із використанням кремнію. Арсенід галію, що входить в будову сонячних батарей, представляє собою напівпровідник. Він володіє такими ж властивостями як і кремній. Головна його перевага в покращених «робочих» якостях. За таких переваг сонячна батарея із арсеніду галію має набагато більший ККД.

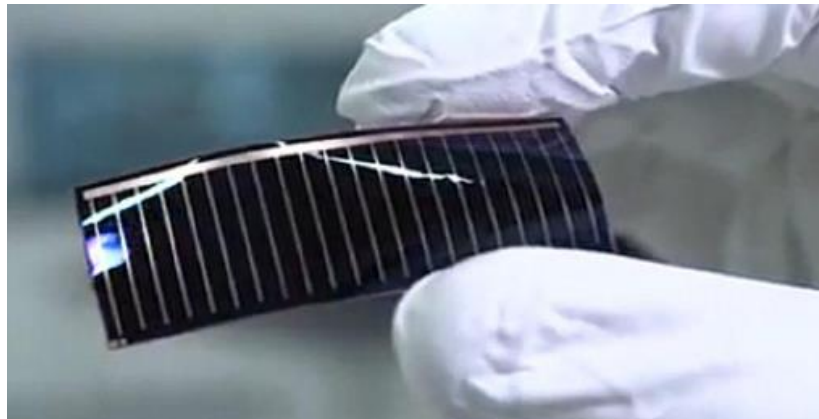


Рисунок 2.6 – Сонячна батарея із арсеніду-галію

Фотоелементи у арсенід-галієвих сонячних панелях мають ряд деяких значних переваги. Напівпровідника арсеніду галію достатньо шару товщиною всього декілька мікронів для досягнення ефективних результатів, оскільки він має високий рівень поглинання енергії. Тонке покриття сприяє можливості зменшення розміру фото комірки без впливу на кінцевий результат.

Сонячна батарея виготовлена з арсеніду галію володіє високою стійкістю до радіації. Вони задовольняють потреби з використання їх у багатьох напрямках,

					ЕЛІТ 6.05080202.003 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

проте з огляду на високу вартість виробництва, застосовуються вони вкрай рідко. Панелі на основі арсеніду галію гарно протидіють процесам нагрівання. Пристрої можуть працювати навіть за умов високих температур та навіть перегріву [17]. Це свідчить про те, що вони не потребують значного охолодження.

Існують розробки із поліпшення процесу виготовлення панелей на основі арсенід галію, що полягають у додаванні різного типу домішок. Такий процес дозволяє чітко коригувати процеси виробництва, а також розширювати сонячні осередки відповідно до змінених параметрів. В деяких випадках є можливість отримувати багатошарові осередки та змінювати склад їх шарів. Під час цього процесу вдається одержати більш точне керування генерацією носіїв заряду. У кремнієвих батареях така можливість відсутня.

На сьогоднішній день є можливість створювати структуру, яка складається із трьох шарів, кожен з яких може поглинати тільки певні сонячні промені. Відмічається, що кількість спожитих променів є значно більшою, аніж у інших конструкціях. Поглинання багатьох видів сонячних променів є неможливим для одношарових батарей, а виготовлення таких структур має дуже високу вартість.

2.5 Сонячні батареї на основі телуриду кадмію

Сонячні панелі із телуриду кадмію (надалі CdTe) розроблені на основі плівкової технології і детально описані в роботі [18]. Напівпровідниковий шар наноситься у вигляді тонкої плівки в декілька сотень мікрометрів. Ефективність елементів виготовлених із телуриду кадмію є невеликою і складає ККД близько 10-11%. Проте за останніми дослідженнями компанії «First Solar» було встановлено, що розроблені ними елементи можуть швидко перевершити показники кремнієві. Під час польових випробувань елементи із телуриду кадмію показали 18% продуктивності, що може зрівнятися з показниками кремнієвих панелей. В останні десятиліття, коли завдяки виробництву фабрик Китаю ціни на сонячні елементи поступово знижуються, компанія First Solar інвестувала кошти в складні та дорогі технології. Компанія витратила приблизно 5% від своєї виручки на дослідження та розробки, що десь приблизно в два рази перевищує середню по

					ЕЛІТ 6.05080202.003 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

типу сонячних батарей, проте значно більш ефективні фотоелектричні перетворювачі (ФЕП) займають набагато менше місця, а значить для їх розміщення необхідна менша площа. Для прикладу: якщо для отримання 1 кВт електроенергії необхідно приблизно 8,5 м² поверхні сонячного елемента на основі монокристалічного кремнію, то панелі із аморфного кремнію займатимуть площу близько 21 м².

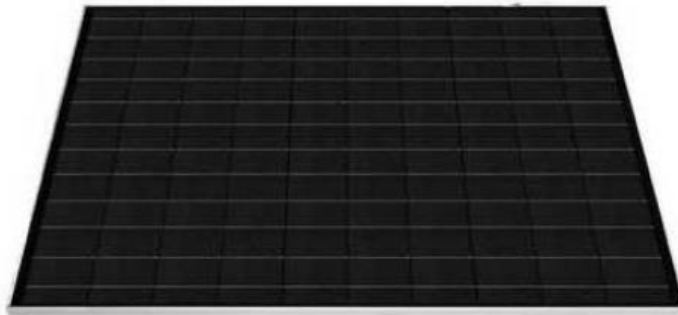


Рисунок 2.8 – Сонячна батарея на основі напівпровідника CIGS

Представлений випадок звичайно ж не є абсолютним. На одержання електроенергії фотоелектричними перетворювачами (ФЕП) впливає не лише загальна площа сонячних панелей. Електричні параметри довільної сонячної батареї визначаються в так званих стандартних умовах тестування, а конкретно при інтенсивності сонячного випромінювання в 1000 Вт/м² та робочій температурі панелі близько 300 К.

В країнах Центральної і Східної Європи інтенсивність сонячного випромінювання рідко може досягти номінального значення, тому навіть у сонячні дні ФЕП працюють із «недовантаженням». Може здатися, що і температура в 300 К також зустрічається не часто, однак слід розуміти, що у даному випадку мова про температуру сонячної панелі, а не про температуру навколишнього повітря.

В межах загальної тенденції зниження потужності із ростом робочої температури, кожен тип сонячного елемента поводить по-різному. Так у випадку кремнієвих елементів номінальна потужність падає із кожним

					ЕЛІТ 6.05080202.003 ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

градусом перевищення номінальної температури від 0,40% до 0,45%. Елементи з CdTe втрачають лише 0,24%.

3 МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ Я ПРОДУКТИВНОСТІ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ

3.1 Сонячні панелі на основі квантових точок

Розробка сонячних осередків на квантових точках є черговою спробою відкрити ще більш ефективні методи у перетворенні сонячного світла в електрику. За своєю природою колоїдні квантові точки являються напівпровідниковими нанокристалами. Їх розміри найчастіше лежать в межах 4-20 нм (рисунок 3.1). Вони викликають інтерес вчених через їх особливі оптичні властивості.

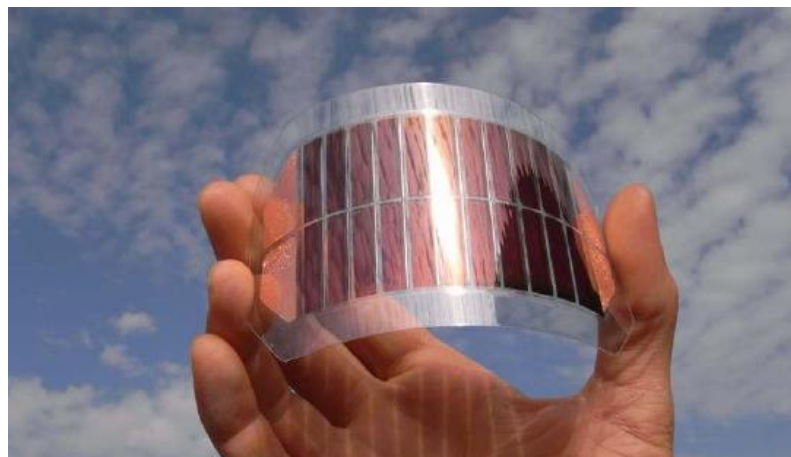


Рисунок 3.1 - Сонячний елемент на основі квантових точок

В науково-дослідному інституті NREL розроблена сонячна батарея на основі напівпровідникових кристалів в яких розміри не перевищують декількох нм, це і є так звані квантові точки. Зразок має показники зовнішньої та внутрішньої квантової ефективності 114% та 130% відповідно. Дані характеристики відображають значення відношення кількості пар електрон-дірка до кількості потрапляючих на зразок фотонів (зовнішня квантова ефективність) та

					ЕЛІТ 6.05080202.003 ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

відношення кількості згенерованих електронів до кількості спожитих фотонів (внутрішня квантова ефективність) для певної частоти (рисунк 3.2).

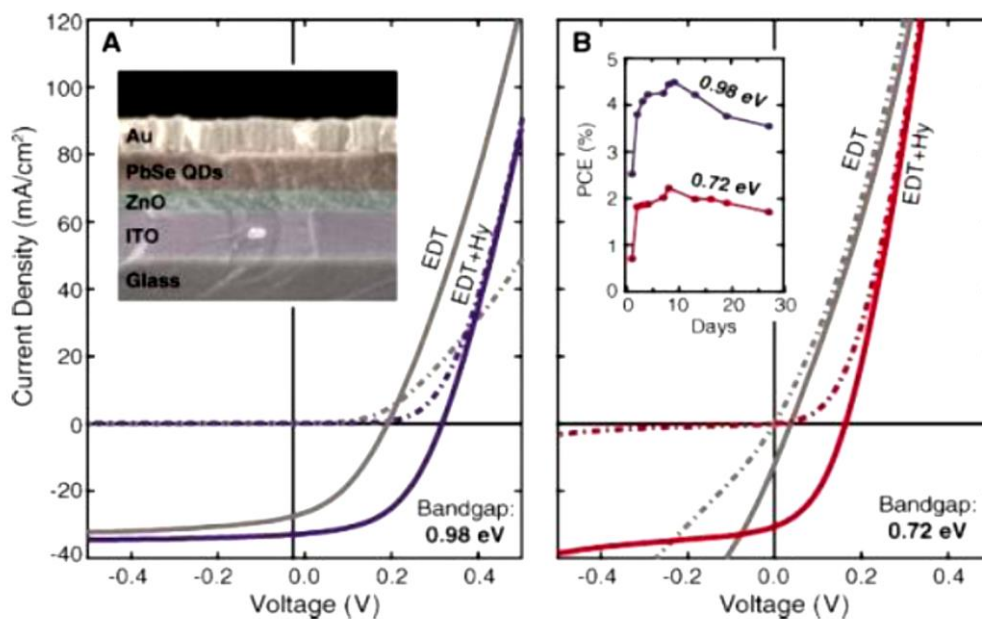


Рисунок 3.2 - Зовнішня і внутрішня квантова ефективність

Зовнішня квантова ефективність є меншою від внутрішньої, так як не всі поглинуті фотони беруть участь у генерації, а певна частина фотонів, які потрапляють на сонячну панель просто відбивається. Зразок сформований із наступних частин: скло з шаром покриття, шар прозорого провідника, наноструктуровані шари ZnO та квантові точки селеніду свинцю, етандітіол та гідразин. В якості верхнього електрода використовується тонкий шар Au. Сумарний ККД такого осередку, згідно роботи [20], складає приблизно 5%, однак цього цілком достатньо для експериментально отриманої досить високої квантової ефективності даного поєднання матеріалів.

Ні один із сонячних елементів не мав значення зовнішньої квантової ефективності вище 100%, в той час як унікальність цієї розробки NREL і полягає в тому, що кожен фотон, який потрапив на СЕ створює на виході більше ніж одна пара електрон-дірка (рисунк 3.3).

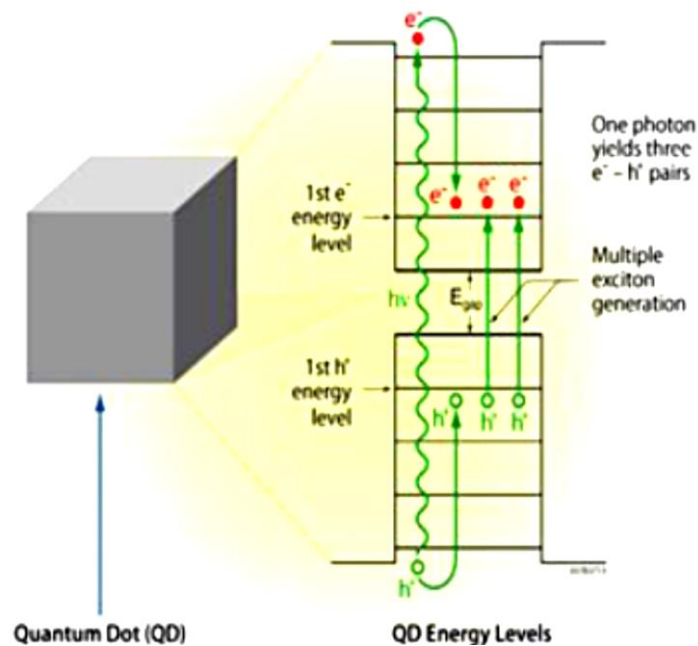


Рисунок 3.3 - Утворення електронних пар в сонячних панелях із квантовими точками

Причиною такої поведінки є MEG - ефект, що вперше був використаний для створення повноцінної сонячної батареї, яка здатна генерувати електричний струм. Інтенсивність ефекту пов'язана із параметрами матеріалу з шириною забороненої зони у напівпровіднику та з величиною енергії падаючого фотона. Вирішальне значення при цьому має розмір кристала, оскільки саме квантові точки обмежують носії заряду та можуть утримувати надлишкову енергію.

Один із нестандартних підходів у створенні сонячних елементів був запропонований Прашантом Каматом із університету Нотр-Дама. Групою вчених була розроблена фарба на основі квантових точок із діоксиду титану, які покриті сульфідом та селенідом кадмію у вигляді водно-спиртової суміші. Отримана паста наноситься на пластинку із скла з провідним шаром. В подальшому приводиться проведений випалювання в результаті чого і отримують фотогальванічну батарею. Підкладка, перетворена у фотоелектричну панель, потребує лише наявності електроду зверху. Після цього можна одержувати електричний струм розмістиши елемент на сонці.

3.2 Сонячні треки

Сонячний трекер (рисунк 3.8) - це система, яка призначена для орієнтації на Сонце робочих поверхонь систем генеруючих електроенергію або ж систем, які концентрують теплову енергію, встановлених на трекері. Точна орієнтація робочих поверхонь систем на Сонце потрібна для досягнення їхньої максимально ефективної продуктивності. Одним із основних завдань трекера є зменшення кута падіння променів сонця на робочу поверхню сонячних панелей (PV-модулів, CPV-концентрованих фотоелектричних модулів, CSP систем, параболічних відбивачів та ін.).

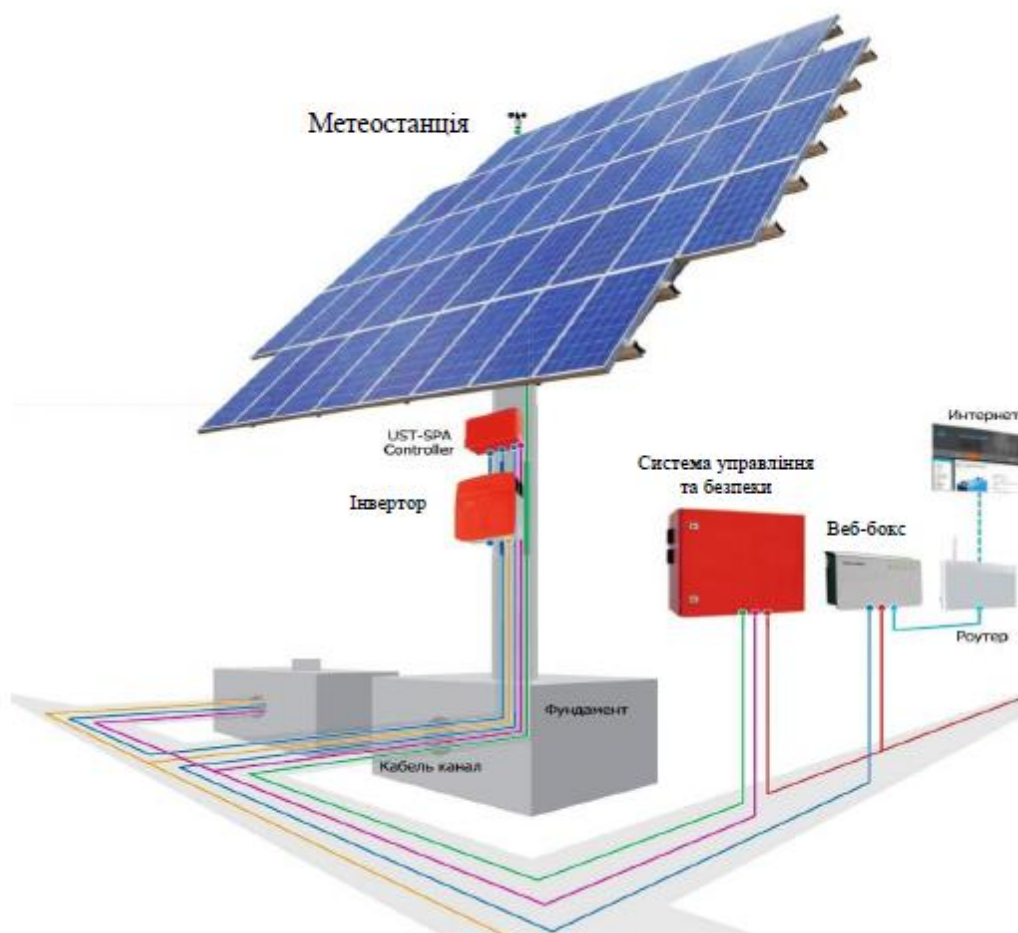


Рисунок 3.8 – Загальна будова сонячного трекера

Сонячний трекер у повній комплектації має у своєму складі [21]:

- а) несучу конструкцію, яка складається із фіксованої та рухомої частини, при чому рухома частина має одну чи дві осі обертання;

б) систему орієнтації (позиціонування) рухомої частини трекера, яка складається із актуаторів і пристроїв керування ними;

в) систему безпеки, яка включає в себе:

1) механізм захисту від блискавки,

2) захист від перевантажень,

3) метеостанцію, яка призначена для попередження системи про наближення урагану, граду, снігу, несприятливих погодних умов тощо. Аналізуючи отримані дані метеостанції, система переорієнтує трекер у положення, за якого несприятливі фактори будуть мінімізовані в період їхньої дії, а робочі поверхні є захищеними від руйнування або псування.

г) стабілізатори;

д) системи управління та інтерфейс, що призначені для налаштування, контролю та обслуговування енергосистеми;

е) системи віддаленого доступу призначені для віддаленого моніторингу та управління системою;

ж) систему навігації, яка слугує для визначення географічного положення системи, висоти над рівнем моря. Слід відмітити, що на стаціонарних трекерах навігація не обов'язкова. Установчі значення широти, довготи, висоти над рівнем моря місця, де встановлено трекер, вводяться постачальником під час монтажу системи.

з) інвертор – пристрій, що перетворює постійний струм, який надходить від корисного навантаження трекера (PV-модулів та ін.) у змінний 220 В (110 В) та передає його споживачеві або ж на приймаючу станцію одночасно. Кількість інверторів, що встановлені на трекері може бути від одного до трьох. Інвертори виконуються у захищеному варіанті (польовий) або ж в корпусі, який встановлюється в приміщенні. При цьому схеми підключення інверторів в системі можуть бути різними.

Необхідність повної комплектації трекера не завжди економічно доцільна, залежить від виду трекера, призначення, та інших факторів, тому в практиці часто багато зазначені вище складові елементи трекера відсутні.

					Е/ПТ 6.05080202.003 ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.2.1 Спрощення конструкції системи орієнтації сонячних батарей

Принцип спрощення конструкції системи орієнтації сонячних елементів, у відповідності з роботою [21], полягає у використанні готового блоку орієнтації супутниковою антеною (мотопідвіс) (рисунок 3.9)). Користувачу залишається лише закріпити блок сонячних елементів до мотопідвісів, і за рівнем сигналу, який знімається із датчиків сонячної батареї, блок електроніки зорієнтує антену точно на сонці.



Рисунок 3.9 - Структурна схема системи орієнтації сонячних елементів

Призначенням мотопідвісів є відстеження супутників, які знаходяться на геостационарній орбіті (при повороті він не тільки обертає батарею, але й нахилиє її) у результаті чого батарея буде орієнтована точно на сонці. Сигнал для повороту формується двома фотодіодами, які розташовані на сонячній батареї та орієнтованими на дугу із кутом між собою в 30°. Живлення схеми у початковий момент необхідно із резервного джерела живлення (рисунок 3.10).

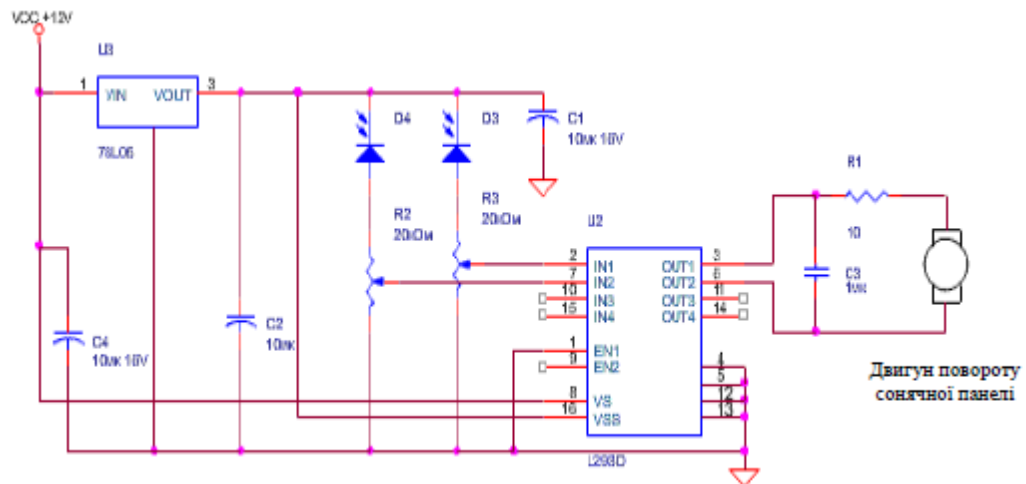


Рисунок 3.10 - Принципова схема системи орієнтації сонячної батареї

Припустимо, що батарея знаходиться у проміжному положенні між заходом та сходом. Зі сходом сонця на сході лівий фотодіод засвічується сильніше правого, в результаті чого на IN1 формується логічна одиниця та батарея повертається на схід до освітлення другого фотодіода та появи одиниці на IN2, після чого мотор мотопідвісу зупиняється. Потім, у міру просування сонця на захід правий фотодіод засвічується сильніше, що призводить до появи одиниці вже на IN2. При цьому мотор вмикається в іншому напрямку. Змінні резистори слугують для точного налаштування чутливості системи орієнтації. Резистор R1 слугує для обмеження струму колектора мотора під час його пуску. Керамічний конденсатор C3 служить для фільтрації перешкод утворених від іскріння щіток.

3.3 Двосторонні сонячні панелі. Структура і особливості конструкції

Двосторонні сонячні батареї - винахід сучасних розробників, який слугує для використання усього потенціалу альтернативних джерел енергії (рисунок 3.11). Особливо популярними вони стали у Китаї в останні роки. Так, двосторонні сонячні панелі дозволяють отримувати більше енергії від сонячних елементів стандартного розміру. Проте навіть використання обох сторін двосторонніх сонячних елементів поки що все ж не підвищує продуктивність до максимальних 100%. Проаналізувавши дослідження встановлено, що завдяки використанню обох сторін сонячного елемента може бути вироблено на 35% більше енергії.

						Арк.
					ЕЛІТ 6.05080202.003 ПЗ	33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

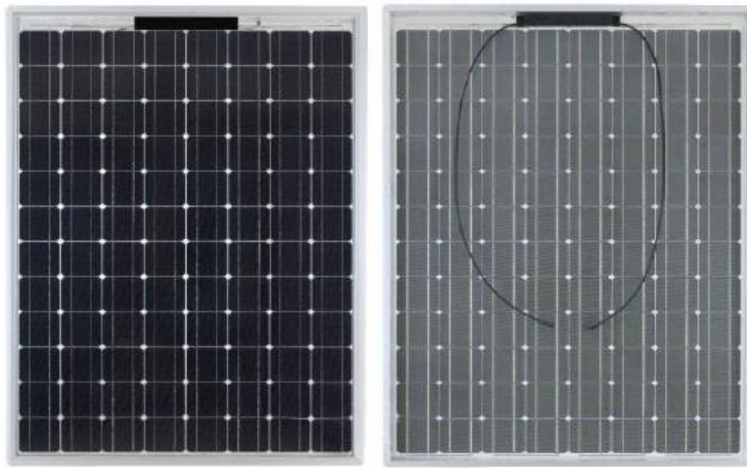


Рисунок 3.11 - Лицьова і тильна сторони двосторонньої сонячної панелі

Особливістю двосторонньої сонячної панелі є те, що на відміну від стандартних батарей на алюмінієвій основі, шар алюмінію знизу відсікається. Це дає можливість відкрити напівпровідниковий матеріал, який в свою чергу, продукує енергію від падаючого по обидві сторони світла. Такі двосторонні сонячні елементи коштують значно дорожче. На сьогоднішній день розробники вирішують питання стосовно варіантів здешевлення конструкції та вихідних матеріалів. На початковому етапі застосування, двосторонні сонячні панелі підвищували продуктивність лише на 10%. Це відбувалося за рахунок відбиття потоку світла від землі та направлення його на нижню частину елемента. В подальшому підвищенням ефективності панелей займалися вчені з Дослідницького інституту сонячної енергії Сінгапуру. Вони співпрацювали із фахівцями Національного університету Сінгапуру та Міжнародного дослідницького центру сонячної енергії Konstanz в Німеччині.

Дослідники втілили у життя інноваційні сонячні елементи із використанням двостороннього модуля [22], що працюють набагато довше звичайних. Слід відмітити, що зросло і вироблення енергії. Система поглинає світло на лицьовій та тильній стороні. Ефективність даних елементів сягає значень, які лежать в межах від 21% до 32%. Такі панелі покриті подвійним ізолюючим склом, завдяки чому термін їх експлуатації зростає до 25-30 років.

					ЕЛІТ 6.05080202.003 ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

**4 МЕТОДИКА МОДЕЛЮВАННЯ ОПТИЧНИХ ТА
РЕКОМБІНАЦІЙНИХ ВТРАТ У ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧАХ НА ОСНОВІ ГП
*n-ZnS/p-NiO***

Одним із необхідних шарів будь-якого сонячного елемента на основі гетеропереходу є поглинальний шар із матеріалу, який має оптимальну для перетворення сонячної енергії ширину забороненої зони. Нами в роботі у якості поглинального шару ФЕП були використані плівки NiO. Даний матеріал відповідає усім вимогам, які висуваються до шарів необхідних для створення сонячних елементів.

Однією із найважливіших характеристик енергії поглинача, необхідних для розрахунку оптичних та рекомбінаційних втрат і основних параметрів фотоелектричних перетворювачів з їх урахуванням є його поглинальна здатність (A). Згідно роботи [23] можна говорити стосовно поглинальної здатності потужності випромінювання (A_ϕ) та поглинальної здатності потоку фотонів (A_{hv}).

За умови нормального падіння світла на шари сонячного елемента поглинальна здатність потужності сонячного випромінювання матеріалу може визначатися законом Бугера-Ламберта:

$$A_\phi(d) = \frac{\sum_i \frac{\Phi_i + \Phi_{i-1}}{2} \left[1 - e^{-\frac{\alpha_i + \alpha_{i-1}}{2} d} \right] \Delta\lambda_i}{\sum_i \frac{\Phi_i + \Phi_{i-1}}{2} \Delta\lambda_i}, \quad (4.1)$$

де Φ_i – спектральна густина потужності випромінювання при довжині хвилі λ_i в умовах освітлення AM 1.5G; $\Delta\lambda_i$ – інтервал між сусідніми довжинами хвиль у таблиці ISO 9845-1:1992; α_i – коефіцієнт поглинання світла при довжині хвилі λ_i ; d – товщина шару.

					ЕЛІТ 6.05080202.003 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

Дослідження поглинальної здатності оксиду нікеля було проведено у діапазоні довжин хвиль від 300 нм (сонячне випромінювання меншої довжини до поверхні Землі майже не надходить) до 1250 нм (значення, що відповідає найменшій ширині забороненої зони ($E_g \sim 1$ еВ) сполуки, яке наведене у довіднику. Добре відомо, що матеріал інтенсивно поглинає фотони з енергією більшою за E_g . Враховуючи, що у довідниках значення Φ_i та α представлені за різних довжин хвиль, а формула (4.1) передбачає використання цих значень за однакових значень λ , нами було здійснено екстраполювання значень Φ_i та α із використанням програмного забезпечення OriginPro: Data Analysis and Graphing Software.

Встановлено, що близько 98 % сонячного випромінювання поглинається в шарах за товщини близької до 1 мкм, при товщині $d = 3$ мкм дана величина складає майже ~ 100 %. Відомо, що кількість згенерованих електронно-діркових пар у поглиначі не є пропорційною потужності сонячного випромінювання оскільки утворення пар електрон-дірка відбувається незалежно від енергії поглинутого фотона (при $h\nu > E_g$), проте при малих товщинах d відбувається поглинання, зазвичай, низькоенергетичних фотонів, в той час як при збільшенні d збільшується поглинання фотонів із високою енергією [23]. Отже, є вкрай важливим визначення поглинальної здатності потоку фотонів (A_{hv}) сонячного випромінювання в матеріалі NiO. Для цього використовується наступне співвідношення:

$$A_{hv}(d) = \frac{\sum_i \frac{\Phi_i + \Phi_{i-1}}{2h\nu_i} \left[1 - e^{\frac{-(\alpha_i + \alpha_{i-1})d}{2}} \right] \Delta\lambda_i}{\sum_i \frac{\Phi_i + \Phi_{i-1}}{2h\nu_i} \Delta\lambda_i}, \quad (4.2)$$

де $h\nu_i$ – енергія фотону.

Встановлено, що за малих товщин шару NiO поглинальна здатність потоку фотонів (A_{hv}) є меншою за поглинальну здатність потужності (A_ϕ) сонячного випромінювання. При товщині поглинаючого шару $d = 1$ мкм відбувається

						Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ЕЛІТ 6.05080202.003 ПЗ	

поглинання $\sim 97\%$ фотонів, а зі збільшенням товщини до 3 мкм це значення A_{hv} досягає близько 100 %.

Слід зазначити, що максимальні експериментальні значення ефективності мали сонячні елементи із поглинальним шаром NiO товщиною від 1 до 3 мкм. Дані результати добре корелюють із проведеними розрахунками, оскільки при подальшому збільшенні товщини шару збільшується послідовний опір фотоелектричного перетворювача, а поглинання світла залишається незмінним.

Досягти зменшення товщини поглинального шару у два рази та подальшого збільшення поглинальної здатності потоку фотонів (A_{hv}) сонячного випромінювання у шарах ФЕП можливо за рахунок нанесення тильного контакту із відбивного матеріалу (на практиці часто використовуються контакти із молібдену, що утворює на границі із поглинаючим шаром омичний контакт. Крім того, A_{ϕ} та A_{hv} можуть бути збільшені за рахунок текстуровання поверхні функціональних шарів сонячних елементів або шляхом нанесення на фронтальну поверхню антивідбивного покриття.

4.1 Визначення оптичних втрат з врахуванням відбиття та поглинання сонячного спектру в сонячному елементі

У роботі були розглянуті тонкоплівкові сонячні елементи на основі ГП, що мають багатшарову структуру та містять підкладку (скло), струмознімальний фронтальний контакт, віконний шар ZnS і поглинальний NiO шар та тильний металевий контакт. Потік сонячного світла, перед потраплянням до поглинального шару NiO, де під його впливом фотогенеруються електронно-діркові пари, проходить через ряд допоміжних шарів сонячного елемента. За даних умов відбуваються оптичні втрати енергії за рахунок відбиття світла від границь та поглинання світлового потоку в різних шарах.

Показник відбиття від границь контактуючих шарів розраховувався із використанням формули Френеля [24-25]:

					ЕЛІТ 6.05080202.003 ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$R = \left(\frac{n_i - n_j}{n_i + n_j} \right)^2, \quad (4.3)$$

де n_i, n_j – показники заломлення першого та другого контактуючого матеріалу, відповідно.

У випадку використання електропровідних матеріалів коефіцієнт відбиття визначається за допомогою співвідношення [26]:

$$R_{ij} = \frac{|n_i^* - n_j^*|}{|n_i^* + n_j^*|} = \frac{(n_i - n_j)^2 + (k_i - k_j)^2}{(n_i + n_j)^2 + (k_i + k_j)^2}, \quad (4.4)$$

де n_i^*, n_j^* – комплексні показники заломлення світла; k_i, k_j – коефіцієнти ослаблення (екстинкції) матеріалу.

Спектральні залежності показників заломлення та ослаблення для шарів ZnS та NiO наведені на рис. 4.1. Значення коефіцієнту ослаблення для скла було прийнято рівним нулю ($k = 0$), оскільки, зазвичай, у фотоелектричних перетворювачах використовується спеціальне скло із дуже малим коефіцієнтом поглинання у діапазоні довжини хвилі сонячного спектру.

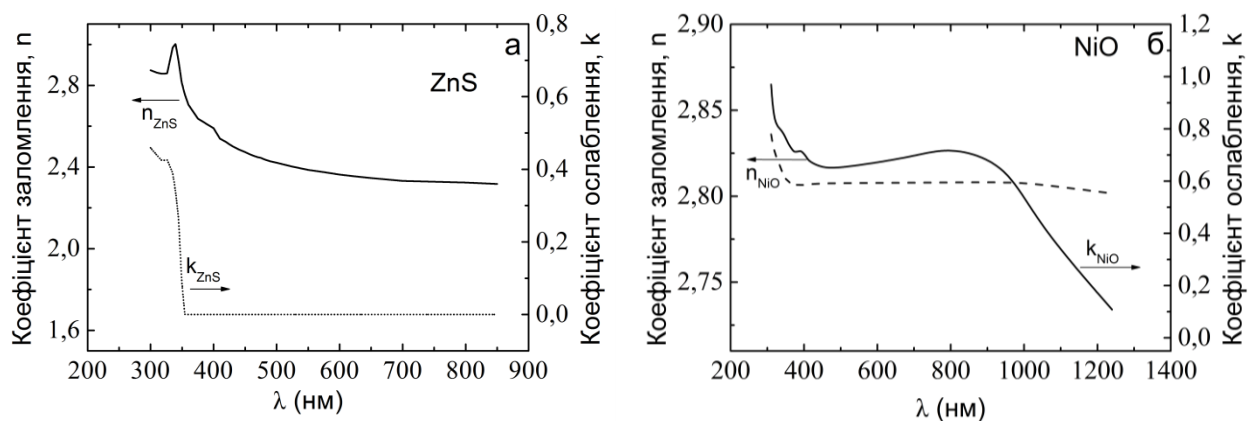


Рис. 4.1. Спектральні залежності коефіцієнтів заломлення (n) та ослаблення (екстинкції) для ZnS (а) та поглинаючого шару NiO (б).

Показник заломлення скла розраховувався із використанням формули Зелмеєра [27]:

$$n^2 = 1 + \frac{a_1 \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_1^2} + \frac{a_2 \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_2^2} + \frac{a_3 \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_3^2}, \quad (4.5)$$

де сталі дорівнюють: $a_1 = 0,6962$, $a_2 = 0,4079$, $a_3 = 0,8974$, $\lambda_1 = 68$ нм, $\lambda_2 = 116$ нм, $\lambda_3 = 9896$ нм.

Для побудови спектральних залежностей n та k нами були використані довідникові значення коефіцієнтів заломлення і ослаблення для ZnS та NiO [28]. Слід зазначити, що при моделюванні для повітря було прийнято, що $n = 1$, $k = 0$. Розраховані спектральні залежності коефіцієнту відбиття від шарів сонячного елемента при їх безпосередньому контакті із повітрям представлені на рис. 4.2.

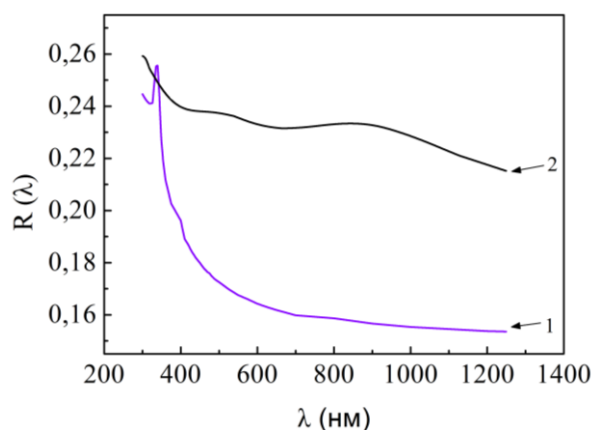


Рис. 4.2 - Спектральні залежності коефіцієнтів відбивання (R) для меж: повітря/ZnS (1), повітря/NiO (2).

Серед досліджених віконних шарів найменші значення величини $R = 0,14-0,22$, майже у всій досліджуваній області довжини хвилі випромінювання ($\lambda = (350-1250)$ нм), були отримані отримані для границі повітря/ZnS.

На рис. 4.3 представлені розрахункові спектральні залежності коефіцієнту відбиття для меж двох контактуючих між собою шарів сонячного елемента.

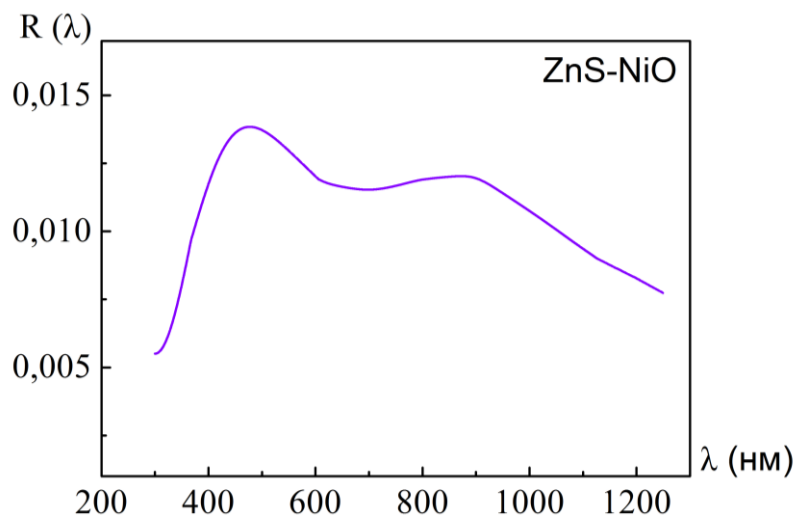


Рис. 4.3 Спектральні залежності коефіцієнтів відбивання (R) від меж контактуючих шарів в сонячному елементі ZnS/NiO.

Вцілому значення R при контакті шарів мають низькі значення, що можна пояснити малою різницею між оптичними константами матеріалів. Слід відмітити, що результати розрахунків відбиття від межі поділу вищезазначених матеріалів із повітрям мають значно вищі значення (рис. 4.2). Звертає на себе увагу той факт, що досить малим був отриманий коефіцієнт відбиття від границі поділу між поглинальним шаром NiO і віконним матеріалом ZnS (рис. 4.3). Це говорить про те, що дані шари є перспективними при створенні сонячних елементів із відносно малим коефіцієнтом відбиття світла.

В свою чергу, коефіцієнт пропускання світла крізь допоміжні шари скла у випадку нехтування процесами поглинання в них визначається за формулою $T = 1 - R$. Отже, коефіцієнт пропускання багатошарової структури СЕ може бути отриманий за допомогою співвідношення [29]:

$$T(\lambda) = (1 - R_{12})(1 - R_{23})(1 - R_{34})(1 - R_{45}), \quad (4.6)$$

де $R_{12}, R_{23}, R_{34}, R_{45}$ – коефіцієнти відбиття від границь.

Слід відзначити, що представлене співвідношення не враховує багаторазові процеси відбиття світла у шарах ZnS, що є цілком прийнятно за умови малих коефіцієнтів відбиття на межах поділу матеріалів (рис. 4.3). Малі значення

коефіцієнтів відбиття дозволяють також ігнорувати інтерференційні ефекти у тонких плівках.

Результати розрахунків залежності коефіцієнту пропускання світла від довжини хвилі у сонячному елементі на основі ГП $n\text{-ZnS}/p\text{-NiO}$ представлені на рисунку 4.4, але визначити оптимальну комбінацію допоміжних шарів ФЕП з нього складно. З цією метою був розрахований так званий коефіцієнт оптичних втрат енергії (Δ):

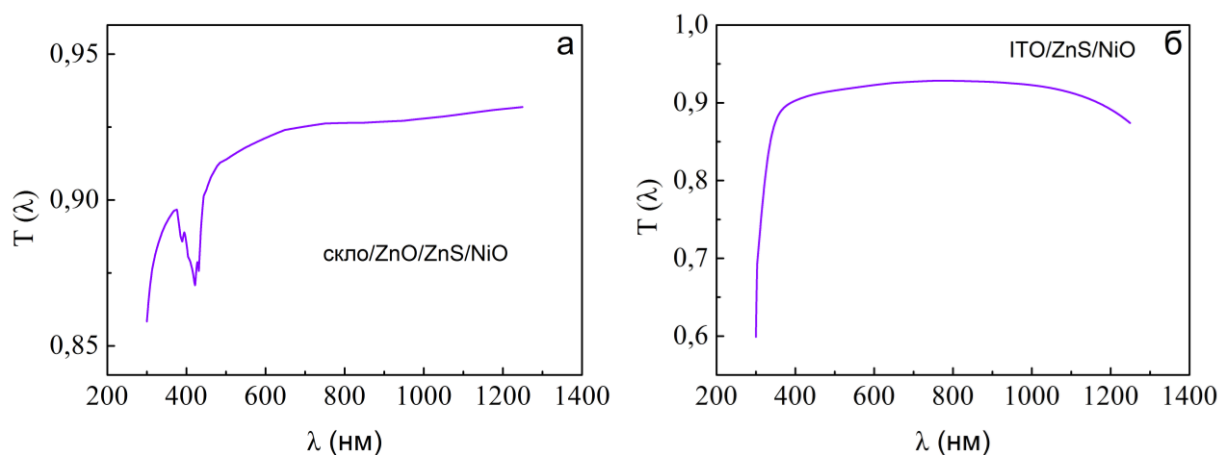


Рис. 4.4 - Спектральні залежності коефіцієнтів пропускання сонячного елемента із структурою скло/ZnO/ZnS/NiO (а) та скло/ITO/ZnS/NiO (б) при врахуванні відбиття світла від міжфазних границь.

$$\Delta = \frac{T_{\max}(\lambda) - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i(\lambda)}{T_{\max}(\lambda)}. \quad (4.7)$$

Враховуючи, що $T_{\max} = 1$, то вираз (4.7) може бути спрощений до вигляду:

$$\Delta = 1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i(\lambda). \quad (4.8)$$

Розраховані значення коефіцієнта оптичних втрат для кожної розглянутої конструкції СЕ наведені в таблиці 4.1. Оптимізувати структури необхідно за іншими параметрами, оптичними втратами пов'язаними із поглинанням у допоміжних шарах, рекомбінацією вільних носіїв у поглиначі або якістю

спряження кристалічних ґраток матеріалів.

Таблиця 4.1 – Значення коефіцієнта втрат (Δ) світла для сонячного елемента типу n - ZnS/ p -NiO.

№	Конструкція тонкоплівкового СЕ	Коефіцієнт втрат, Δ (%)	Коефіцієнт проходження світла, T (%)
1	КОНТ/ZnS/NiO	8,9	91,1

У загальному випадку крім відбиття необхідно також враховувати втрати світла на поглинання у допоміжних шарах ФЕП. Коефіцієнт пропускання із урахуванням втрат на відбиття та поглинання у віконному та струмопровідному шарах сонячного елемента згідно [29] розраховується із використанням виразу:

$$T(\lambda) = (1 - R_{12})(1 - R_{23})(1 - R_{34})(1 - R_{45})(e^{-\alpha_1 d_1})(e^{-\alpha_2 d_2}), \quad (4.9)$$

де α_1, α_2 – коефіцієнти поглинання матеріалів провідного та віконного шарів; d_1, d_2 – їх товщини.

При цьому коефіцієнт поглинання матеріалів $\alpha(\lambda)$ з урахуванням показника ослаблення $k(\lambda)$ може бути розрахований за наступним співвідношенням:

$$\alpha(\lambda) = \frac{4\pi}{\lambda} k. \quad (4.10)$$

Моделювання процесів проходження світла через багат шарову структуру було проведене у діапазоні товщин віконного шару $d_{\text{ZnS}} = (25-100)$ нм та струмознімального фронтального шару $d_{\text{ITO(ZnO)}} = (100-200)$ нм. Дані значення є типовими для реальних СЕ. Залежності коефіцієнту пропускання від довжини

					ЕЛІТ 6.05080202.003 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

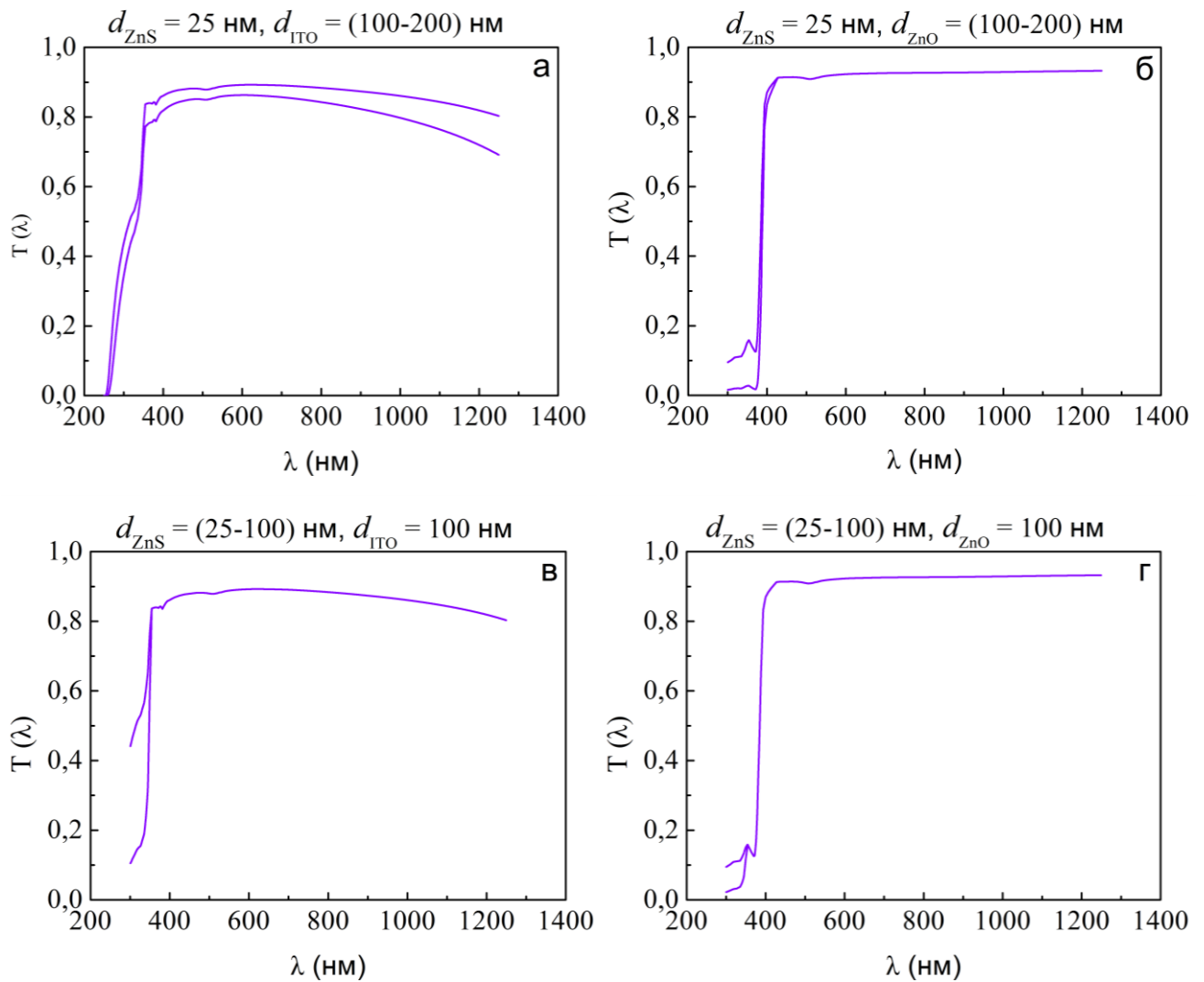


Рис. 4.5 - Спектральні залежності коефіцієнтів пропускання сонячних елементів із конструкцією скло/ITO/ZnS/NiO (а, в); скло/ZnO/ZnS/NiO (3) (б, г) та різною товщиною струмознімального та віконного шарів. Враховано відбиття світла від міжфазних границь та поглинання у допоміжних шарах.

хвилі випромінювання СЕ з шарами із урахуванням поглинання у допоміжних шарах зі різних значень їх товщини наведені на рис. 4.5.

Отримані розрахункові значення коефіцієнта оптичних втрат для представленої конструкції сонячного елемента та різної товщини струмопровідного (ITO, ZnO) та віконного ZnS шарів представленні в таблиці 4.2. Як і передбачалося, при $d_{ZnS} = 25-100$ нм використання у якості вікна ФЕП матеріалу ZnS призводить до зростання коефіцієнту пропускання багатошарової структури у першу чергу у короткохвильовій області спектру.

Таблиця 4.2 – Значення коефіцієнта втрат світла для сонячних елементів різних конструкцій (із урахуванням поглинання випромінювання у допоміжних шарах).

№	Конструкція тонкоплівкового СЕ	Коефіцієнт втрат, Δ (%)			
$d_{\text{ITO}(\text{ZnO})} = 100 \text{ нм}$					
	$d_{\text{ZnS}}, \text{ нм}$	25	50	75	100
1	ZnO/ZnS/NiO	14,7	14,9	15,0	15,1
2	ITO/ZnS/NiO	14,9	15,8	16,4	16,8
$d_{\text{ITO}(\text{ZnO})} = 200 \text{ нм}$					
3	ZnO/ZnS/NiO	16	16,3	16,6	17,1
4	ITO/ZnS/NiO	20,3	21,0	21,5	22,1

Шар ZnO є більш перспективним у порівнянні з ITO, оскільки дозволяє покращити коефіцієнт проходження світла до поглинального шару NiO у випадку вікон із усіх розглянутих матеріалів. Як і передбачалося зі збільшенням товщини провідного шару, коефіцієнт пропускання сонячного елемента погіршується, що в подальшому призводить до зниження ККД відповідних ФЕП. До подібного ефекту приводить збільшення товщини віконного шару приладу. Таким чином, ці допоміжні шари СЕ повинні мати мінімальну технологічно досяжну товщину.

Проведений аналіз отриманих результатів свідчить те, що при досліджених товщинах найбільш привабливою конструкцією сонячного елемента є прилад із конструкцією ZnO/ZnS/NiO.

4.2 Визначення рекомбінаційних втрат в ФЕП

Однією із важливих характеристик, що визначає ефективність ФЕП є його внутрішній квантовий вихід (Q_{int}), що дорівнює відношенню кількості згенерованих світлом електронно-діркових пар до загальної кількості фотонів, які досягли поглинального шару та створюють дрейфову (J_{drift}) та дифузійну (J_{dif}) складові фотоструму (J_{ph}) в СЕ і як наслідок струм короткого замикання (J_{sc}). Внутрішній квантовий вихід (Q_{int}) СЕ залежить від рекомбінаційних втрат, що мають місце на межі гетеропереходу $n\text{-ZnS}/p\text{-NiO}$, в об'ємі і на тильній стороні

поглинального NiO та в об'ємі віконного ZnS шару. Оскільки в СЕ відбуваються втрати світла при відбиванні та поглинанні в допоміжних шарах приладу, то важливим також є визначення зовнішнього квантового виходу (Q_{ext}) [30, 31].

Одним із параметрів необхідних для аналізу рекомбінаційних втрат в СЕ є ширина ОПЗ (w), тобто, область збіднення, яка виникає на контакті гетеропари, де діє електричне поле, що розділяє згенеровані світлом електронно-діркові пари. Ця ширина головним чином залежить від концентрації некомпенсованих акцепторів ($N_a - N_d$) (тобто, різниці між концентрацією акцепторів та донорів), що знаходяться у напівпровіднику, та висоти контактного бар'єру на гетерограниці. Слід відмітити, що остання величина для досліджених переходів, нажаль, не відома. Проблема вирішена шляхом побудови зонних діаграм гетеропереходів.

При побудові зонних діаграм вважалося, що на межі поділу матеріалів присутня мала кількість приповерхневих станів, при цьому механізм струмоперенесення через перехід описується моделлю Андерсона.

Отже, розриви зон провідності ΔE_c та валентної ΔE_v матеріалів ГП $n\text{-ZnS}/p\text{-NiO}$ визначається із використанням наступних виразів:

$$\Delta E_c = |\chi_{ZnS} - \chi_{NiO}|, \quad \Delta E_v = |E_{g\ ZnS} - E_{g\ NiO} - \Delta E_c|. \quad (4.11)$$

Прийнявши, що сумарний контактний потенціал на гетерограниці дорівнює різниці робіт виходу матеріалів:

$$V_D = |V_{NiO} + V_{ZnS}| = |W_{NiO} - W_{ZnS}|. \quad (4.12)$$

Відношення потенціалів V_{NiO} та V_{ZnS} задається наступним виразом:

$$\frac{V_{ZnS}}{V_{NiO}} = \frac{N_{A\ NiO} \cdot \epsilon_{NiO}}{N_{D\ ZnS} \cdot \epsilon_{ZnS}}, \quad (4.13)$$

де $N_{A\ NiO}$, $N_{D\ ZnS}$ – концентрації некомпенсованих донорів і акцепторів у відповідних матеріалах.

					ЕЛІТ 6.05080202.003 ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Прийнято, що положення рівня Фермі у контактуючих матеріалах співпадає із енергією залягання їх основних власних точкових дефектів [37, 43-45]. Розраховані значення ΔE_c , ΔE_v , V_D , V_{NiO} , V_{ZnS} наведено в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Розрахункові характеристики ГП n -ZnS/ p -NiO.

Параметр	n -ZnS/ p -NiO
ΔE_c , eB	-0,42
ΔE_v , eB	2,25
V_D , eB	1,10
V_{NiO} , eB	0,29
V_{ZnS} , eB	0,82

Для розрахунку w та Q у роботі використовувались значення величин, які представлені в таблиці 4.3-4.4.

Таблиця 4.4 - Значення величин, що були використані для визначення w та Q

Параметри	Значення
$V_D - qU$, eB	$(1,14)_{ZnS}$
S, S_b , см/с	10^7
τ_{np} , нс	7,8
τ_{pn} , нс	$(10)_{ZnS}$
D_{np} , см ² /с	25
D_{nn} , см ² /с	$(6)_{ZnS}$
D_{pp} , см ² /с	2
T , К	300

Як відомо, розв'язок рівняння неперервності дозволяє визначити дрейфову компоненту внутрішнього квантового виходу (Q_{drift}) СЕ, що враховує рекомбінацію на межі гетеропереходу та в ОПЗ, за співвідношенням:

$$Q_{drift\ p(n)} = \frac{1 + \frac{S}{D_{pp(nn)}} \left(\alpha_{p(n)} + \frac{2 \cdot (V_D - qU)}{w_{p(n)} \cdot kT} \right)^{-1}}{1 + \frac{S}{D_{pp(nn)}} \left(\frac{2 \cdot (V_D - qU)}{w_{p(n)} \cdot kT} \right)^{-1}} - \frac{e^{-\alpha_{p(n)} w_{p(n)}}}{1 + \alpha_{p(n)} \cdot L_{np(pn)}}, \quad (4.14)$$

де S – швидкість рекомбінації носіїв на границі ГП та в ОПЗ; $D_{p(pn)}$ – коефіцієнти дифузії дірок та електронів в поглинальному та віконних шарах; $\alpha_{p(n)}$ – коефіцієнт поглинання світла в поглинальному та віконних шарах; k – стала Больцмана; T – температура; $L_{n(pn)}$ – дифузійна довжина електронів та дірок в поглинальному та віконних шарах ($L_{n(p)} = (\tau_{n(p)} \cdot D_{n(p)})^{1/2}$, де $\tau_{n(p)}$ – час життя електронів та дірок, $D_{n(p)}$ – коефіцієнти дифузії електронів та дірок у відповідних шарах).

Загальний внутрішній квантовий вихід фотоелектричного перетворювача легко визначити як суму усіх квантових виходів врахувавши напрями дифузійних та дрейфових струмів у приладі.

Встановлено, що значення Q_{ext} для СЕ із конструкцією $n\text{-ZnS}/p\text{-NiO}$ є більшими ніж для тих де у якості віконного шару використані, наприклад, плівки CdS та ZnSe незалежно від матеріалу струмознімального контакту. Таким чином СЕ із віконними шарами, що мають більші значення ширини забороненої зони, демонструють більші значення квантового виходу. При цьому слід звернути увагу на те, що була знехтувана різниця у стані міжфазної границі різних гетеропереходів. Проте в реальності концентрація дислокацій невідповідності на границі розглянутих гетеропереходів різна.

4.3 Розрахунок впливу рекомбінаційних та оптичних втрат на максимальну ефективність сонячних елементів

Ефективність розглянутих сонячних елементів (η) було розраховано із використанням виразу [32]:

$$\eta = \frac{U_{oc} \cdot J_{sc} \cdot FF}{P_{in}} \quad (4.15)$$

де U_{oc} – напруга холостого ходу СЕ; J_{sc} – густина струму короткого замикання; FF – фактор заповнення; P_{in} – вхідна потужність.

Для визначення впливу оптичних та рекомбінаційних втрат на максимальну ефективність СЕ із конструкцією $n\text{-ZnS}/p\text{-NiO}$ були взяті значення напруги холостого ходу, що співпадали з висотою контактної різниці потенціалів на

					ЕЛІТ 6.05080202.003 ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

гетеропереходах: $U_{oc} = (1,14 \text{ В})_{\text{ZnS}}$, а значення фактора заповнення таке, що відповідає максимально можливому $FF = 89 \%$ [5]. Відповідно встановлено, що максимальне значення ККД одноперехідного СЕ складає близько 32-33 %.

Аналізуючи результати проведених розрахунків можна відмітити наступне: серед різних конструкцій сонячних елементів найкращими виявилися прилади де у якості віконного шару був використаний ZnS ($\eta = 23-27 \%$), при цьому найбільші значення ефективності має прилад з конструкцією ZnO/ZnS/NiO ($\eta \sim 28 \%$ при $d_{\text{ZnO}} = 100 \text{ нм}$, $d_{\text{ZnS}} = 25-100 \text{ нм}$).

ВИСНОВКИ

1. В роботі проаналізовані полікристалічні, монокристалічні та інші типи сонячних колекторів та досконально описані переваги і недоліки зазначених типів сонячних фотоперетворювачів.

2. Проведено порівняльну характеристику для певних типів сонячних панелей та методів поліпшення їхньої продуктивності за такими критеріями як: ефективність, середня продуктивність, співвідношення ціна-якість та ін.

3. Визначено переваги та недоліки деяких напрямків поліпшення продуктивності сонячних батарей. Проаналізовані результати досліджень провідних компаній у розробках та виготовленні сонячних панелей. Результати аналізу свідчать про те, що одними з найбільш ефективних та перспективних у наш час є двосторонні сонячні панелі.

4. Визначено оптичні та рекомбінаційні втрати в сонячних елементах на основі гетеропереходу $n\text{-ZnS}/p\text{-NiO}$ з застосуванням як фронтальних стумознімальних шарів ІТО(ZnO). Досліджено вплив цих втрат на зовнішній (Q_{ext}) та внутрішній (Q_{int}) квантовий вихід та розраховано максимальну ефективність (η) ФЕП.

5. Встановлено, що за товщини поглинального шару NiO в 1 мкм поглинальна здатність потужності сонячного випромінювання (A_{ϕ}) складає близько 98 %, а поглинальна здатність потоку фотонів (A_{hv}) приблизно становить 97 %.

					Е/ІТ 6.05080202.003 ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Значення A_ϕ та A_{hv} близькі до 100 % спостерігаються вже за товщини поглинаючого шару NiO в 3 мкм.

6. Проведений аналіз оптичних втрат на відбивання та поглинання світла у струмознімальному та віконному шарах показав, що як і було передбачено, при товщині шару ZnS в 25 нм використання у якості вікна фотоелектричного перетворювача сполуки ZnS, приводить до підвищення коефіцієнта пропускання багат шарової структури у першу чергу у короткохвильовій області спектру. Дана умова виконується як при використанні шару ІТО так і ZnO ($d_{ITO(ZnO)} = 100-200$ нм).

7. Аналіз отриманих залежностей свідчить про те, що значення Q_{ext} для сонячних елементів із конструкцією $n\text{-ZnS}/p\text{-NiO}$ є більшими лише для тих, де у якості віконного шару були застосовані плівки, такі як, CdS та ZnSe незалежно від матеріала струмознімального контакту. Отже, як і передбачалось, сонячні елементи із віконними шарами, що мають більші значення ширини забороненої зони, демонструють більші значення квантового виходу.

8. Розглянувши різні типи конструкцій сонячних елементів було встановлено, що найкращими є прилади де у якості віконного шару виступав ZnS ($\eta = 23-27\%$), при цьому найбільші значення ефективності належать приладу із конструкцією типу ZnO/ZnS/NiO ($\eta \sim 28\%$ при $d_{ZnO} = 100$ нм, $d_{ZnS} = 25-100$ нм).

9. Наведені в роботі розрахунки дають можливість визначити максимальні значення ефективності сонячного перетворювача на основі гетеропереходу $n\text{-ZnS}/p\text{-NiO}$ та можуть використовуватися для оптимізації конструкції існуючих тонкопліткових сонячних елементів. Шар ZnS має більшу ширину забороненої зони, тому відбувається зменшення втрат на поглинання у додатковому шарі, що в свою чергу призведе до збільшення кількості згенерованих пар електрон-дірка, від чого і залежить значення ефективності приладу.

					ЕЛІТ 6.05080202.003 ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Vakeesan D. Solar energy for future world: - A review / D. Vakeesan, N. Kannan // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2016. – V. 62. – P. 1092.
2. Sze S. Physics of semiconductor devices / S. Sze, N. Kwok. – New York: John Wiley & Sons. – 2006. – 832 p.
3. Електронний ресурс: <http://investor.firstsolar.com/releasedetail.cfm?ReleaseID=956479>. Доступ: 20.05.2021 р.
4. Kumar S.G. Physics and chemistry of CdTe/CdS thin film heterojunction photovoltaic devices: fundamental and critical aspects / S.G. Kumar, K.S.R. Koteswara Rao // Energy & Environmental Science. – 2014. – V. 7. – P. 45-102.
5. Ito K. Copper zinc tin sulfide-based thin film solar cells. – Chichester: John Wiley & Sons. – 2015. – 440 p.
6. CZTS based thin film solar cells: a status review / M.P. Suryawanshi, G.L. Agawane, S.M. Bhosale, S.W. Shin [et al.] // Materials Technology. – 2013. – V. 28, № 1-2. – P. 98-109.
7. ZnS buffer layer for $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{SSe})_4$ monograin layer solar cell / M. Nguyen, K. Ernits, K.F. Tai, C.F. Ng [et al.] // Solar Energy. – 2015. – V. 111. – P. 344-349.
8. Development of thin film solar cell based on $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ thin films / H. Katagiri, K. Saitoh, T. Washio, H. Shinohara [et al.] // Solar Energy Materials and Solar Cells. – 2001. – V. 65, № 1-4. – P. 141-148.
9. Photovoltaic materials: present efficiencies and future challenges / A. Polman, M. Knight, E.C. Garnett, B. Ehrler [et al.] // Science. – 2016. – V. 352, № 6283. – P. aad4424(10pp).
10. Device characteristics of CZTSSe thin-film solar cells with 12.6% efficiency / W. Wang, M.T. Winkler, O. Gunawan, T. Gokmen, T.K. Todorov [et al.] // Advanced Energy Materials. – 2014. – V. 4, № 7. – P. 1301465(5pp).
11. Solar cell efficiency tables (version 48) / M.A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa, W. Warta [et al.] // Progress in Photovoltaic. – 2016. – V. 24, № 7. – P. 905-913.

					Е/ІТ 6.05080202.003 ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

12. Study a novel hybrid system for cooling solar panels and generate power / A. Homadi, T. Hall, L. Whitman // Applied Thermal Engineering. – 2020. – V. 179. – P.115503.

13. Электронный ресурс: <https://uk.top-home-tips.com/9650145-the-principle-of-the-solar-battery-how-it-works-and-the-solar-panel>. Доступ: 25.05.2021 г.

14. Solar energy storage in the rechargeable batteries / Q. Lee, Y. Liu, S. Guo [et.al] // Nanotoday. – 2017. – V.17. – P.46-60.

15. Электронный ресурс: https://economy.24tv.ua/vse_shho_treba_znati_pro_sonyachni_batareyi_shhob_spravdi_ekonomiti_n702617. Доступ: 25.05.2021 г.

16. Tandem amorphous/microcrystalline silicon thin-film solar modules: Developments of novel technologies / C. Tsai, C-Y. Tsai // Solar Energy. – 2018. – V.170. – P. 419-429.

17. Effects of copper diffusion in gallium arsenide solar cells for space applications / R.H. van-Leest, G.J. Bauhuis, P. Malder [et.all] // Solar Energy Materials and Solar Cells. – 2015. – V.140. – P.45-53.

18. Environmental impacts of recycling crystalline silicon (c-SI) and cadmium telluride (CDTE) solar panels / T. Maani, I. Celik, M.J. Heben [et.al] // Science of The Total Environment. – 2020. – V.735. – P. 138827.

19. Performance enhancement of CIGS thin-film solar cell / M.W. Bouabdelli, F. Rogti, M.Maache [et.al] // Optik. – 2020. – V.216. – P.164948.

20. PbS Colloidal Quantum Dot Inks for Infrared Solar Cells / S. Zheng, J. Chen, X. Zhang [et. al]// iScience. – 2020. – V.23. – P.101753.

21. Control algorithms applied to active solar tracking systems: A review / Rosa F.Fuentes-Morales, ArturoDiaz-Ponce, Manuel.Peña-Cruz, Pedro M.Rodrigo, Luis M.Valentín-Coronado, FernandoMartell-Chavez, Carlos A.Pineda-Arellano // Solar Energy. – 2020. – V.212. – P.203-219.

22. Progress in full spectrum solar energy utilization by spectral beam splitting hybrid PV/T system / H. Liang, F. Wang, L. Yang [et.al] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2021. – V.141. – P.110785.

					Е/ПТ 6.05080202.003 ПЗ	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

23. Косяченко Л.А. Поглощательная способность полупроводников, используемых в производстве солнечных панелей / Л.А. Косяченко, Е.В. Грушко, Т.И. Микитюк // ФТП. –2012. –Т. 46, № 4. –С. 482-486.

24. Kosyachenko L.A. Quantitative assessment of optical losses in thin-film CdS/CdTe solar cells / L.A. Kosyachenko, E.V. Grushko, X. Mathew // Solar Energy Materials and Solar Cells. – 2012. – V. 96. – P. 231-237.

25. Mohamed H.A. Dependence of efficiency of thin-film CdS/CdTe solar cell on optical and recombination losses / H.A. Mohamed // Journal of Applied Physics. – 2013. – V. 113, № 9. – P. 093105(6pp).

26. Optical and recombination losses in thin-film Cu(In,Ga)Se₂ solar cells / L.A. Kosyachenko, X. Mathew, P.D. Paulson, V.Y. Lytvynenko [et al.] // Solar Energy Materials and Solar Cells. – 2014. – V. 130. – P. 291-302.

27. Kasap S.O. Optoelectronics and photonics: principles and practices / S.O. Kasap. – Upper Saddle River: Prentice Hall. – 2001. – 340 p.

28. Ito K. Copper zin tin sulfide-based thin film solar cells. – Chichester: John Wiley & Sons. – 2015. – 440 p.

29. Mykytyuk T. Limitations on thickness of absorber layer in CdS/CdTe solar cells / T. Mykytyuk, V.Y. Roshko, L. Kosyachenko, E. Grushko // Acta Physica Polonica A. – 2012. – V. 122. – P. 1073-1076.

30. Kosyachenko L. Current–voltage characteristics and quantum efficiency spectra of efficient thin-film CdS/CdTe solar cells / L. Kosyachenko, T. Toyama / Solar Energy Materials and Solar Cells. – 2014. – V. 120, Part B. – P. 512-520.

31. Kosyachenko L.A. Problems of efficiency of photoelectric conversion in thin-film CdS/CdTe solar cells / L.A. Kosyachenko // Semiconductors. – 2006. – V. 40, № 6. – P. 710-727.

32. Photovoltaic materials: present efficiencies and future challenges / A. Polman, M. Knight, E.C. Garnett, B. Ehrler [et al.] // Science. – 2016. – V. 352, № 6283. – P. aad4424(10pp).

					ЕЛІТ 6.05080202.003 ПЗ	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		