

Міністерство освіти і науки України  
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Кафедра Інформаційно-вимірювальних технологій

УДК 681.121

## МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Тема: Дослідження потужності роботи сонячних панелей  
(назва згідно з наказом ректора)

Спеціальність 175 – Інформаційно-вимірювальні технології  
(код і назва спеціальності)

## ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

MP.MTTm-07.00.00.000 ПЗ  
(позначення)

### Студент

MTTm-23-1 Ільків Б.В.  
(шифр групи) (підпис) (дата) (розшифровка  
підпису)

### Керівник проекту

доц. Винничук А.Г.  
(посада) (підпис) (дата) (розшифровка  
підпису)

### Консультант з нормоконтролю

доцент \_\_\_\_\_  
(посада) (підпис) (дата) (розшифровка  
підпису)

### Допускається до захисту Завідувач кафедри

професор Середюк О.Є.  
(посада) (підпис) (дата) (розшифровка  
підпису)

2024

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Інститут інформаційних технологій

Кафедра ІВТ

Спеціальність 175-Інформаційно-вимірювальних технологій

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри ІВТ

Середюк О.Є.

## ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ

Студенту Ільків Богдан Васильович  
(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема проекту Дослідження потужності роботи сонячних панелей

затверджена наказом по університету від «    » 2024р. №      /

2. Термін здачі студентом закінченого проекту 02.10.2024 р.

3. Вихідні дані до проекту: Тип пристрою – сонячна панель; інтервал температур: від -20°C до +40°C; середня продукована потужність 500кВт.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що належить розробити)

1. Аналіз методів для дослідження характеристик сонячних панелей...

2. Дослідження теоретичних та практичних засад проведення моделювання роботи сонячних панелей

3. Розроблення та оцінювання адекватності математичної моделі потужності сонячної панелі

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

1. Порівняльна характеристика програм для моделювання роботи сонячних панелей.

2. Діаграма Ісікави.

3. Загальна структура системи.

4. Порівняльна характеристика сонячних панелей.

5. Змоделюваний графік залежності сонячної інсоляції від кутів нахилу панелі.

6. Вольт-амперна характеристика сонячної панелі.

7. Графік зміни генерації та споживання енергії сонячною панеллю протягом року.

8. Графік потужності панелі протягом року в залежності від кута нахилу до Сонця.

6. Консультанти по проекту із зазначенням розділів, що їх стосуються.

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв

7. Дата видачі завдання

Керівник

Винничук А.Г.  
Особистий підпис      Розшифровка підпису

Завдання прийняв до виконання

Ільків Б.В.  
Особистий підпис      Розшифровка підпису

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Номер і назва етапів курсового проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1. Аналіз методів для дослідження характеристик сонячних панелей...		
2. Дослідження теоретичних та практичних засад проведення моделювання роботи сонячних панелей		
3. Розроблення та оцінювання адекватності математичної моделі потужності сонячної панелі		

Студент

Ільків Б.В.  
Особистий підпис      Розшифровка підпису

Керівник проекту

Винничук А.Г.  
Особистий підпис      Розшифровка підпису

## РЕФЕРАТ

Магістерська робота: 55 с, 20 формул, 9 рис., 8 джерел, 8 аркушів креслення.

Об'єкт дослідження – математична модель струму сонячних панелей.

Мета роботи – розробка математичної моделі струму сонячних панелей.

У даній магістерській роботі проведено аналіз існуючих методів та засобів моделювання роботи сонячних панелей.

В магістерській роботі розроблена математична модель струму сонячних панелей.

Наведені результати апробації математичної моделі струму сонячних панелей.

**СОНЯЧНА ЕНЕРГІЯ, ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ, МАТЕМАТИЧНЕ  
МОДЕЛЮВАННЯ, АПРОБАЦІЯ.**

## **ABSTRACT**

Master's work: 55 p, 20 formulas, 9 figures, 18 sources, 8 sheets of the drawing.

The object of research is a mathematical model of the current of solar panels.

The purpose of the work is to develop a mathematical model of the current of solar panels.

In this master's work an analysis of existing methods and tools for modeling the work of solar panels.

In the master's work the mathematical model of the current of solar panels is developed.

The results of approbation of the mathematical model of the current of solar panels are presented.

**SOLAR ENERGY, ELECTRICAL CURRENT, MATHEMATICAL MODELING, APPROBATION.**

## ЗМІСТ

Вступ.....	5
1 Аналіз методів для дослідження характеристик сонячних панелей.....	9
1.1 Аналіз основних теоретичних засад функціонування сонячних панелей..	9
1.2 Дослідження можливостей фізичного та математичного моделювання функціонування сонячних панелей.....	11
1.3 Постановка задачі на магістерську роботу.....	20
2. Дослідження теоретичних та практичних засад проведення моделювання роботи сонячних панелей.....	21
2.1 Дослідження основ явища фотоефекту та зонної теорії.....	21
2.2 Дослідження сучасної теорії світла.....	28
2.3 Принцип побудови сучасних сонячних панелей.....	36
3 Розроблення та оцінювання адекватності математичної моделі потужності сонячної панелі.....	42
3.1 Розроблення математичної моделі потужності сонячної панелі.....	42
3.2 Перевірка адекватності розробленої моделі.....	47
3.3 Аналіз основних факторів впливу на генерацію потужності сонячних панелей.....	50
Висновок.....	53
Список використаних джерел.....	54

## ВСТУП

**Актуальність теми.** За останнє століття значні зусилля дослідників спрямовані на альтернативні джерела енергії, оскільки використання нафти, вугілля, та природнього газу у майбутньому буде недоступним, через їх вичерпність та низьку відтворюваність. Енергетична криза залишиться невирішеною, якщо не використовується ефективний підхід. Крім вивчення нових джерел енергії, поточне споживання енергії має бути добре керованим з метою полегшення енергетичної проблеми.

Такі технології, як фотоелектричні сонячні елементи (так звані сонячні батареї) є важливими для прогресу відновлювальних джерел енергії. Вони пропонують велику кількість переваг, над вичерпними джерелами енергії, насамперед головною перевагою є їхня відносна безлімітність, також вони не забруднюють навколишнє середовище. Крім того, вони є найпростішим і найбільш економічно ефективним способом забезпечення енергетичної інфраструктури в світі.

Фотоелектричний ефект – це фізичне явище, що характеризує перетворення світла в електрику. Сонячна енергія уже випробувана і використовується на супутниках з 1990-х рр. Також сонячна енергія значно дешевша у капіталовкладеннях, оскільки для неї не потрібно споруджувати цілу мережу зв'язків, які будуть нести втрати в передачі енергії і потребують заміни з часом. У зв'язку зі зростанням попиту електроенергії на 13% щороку, уже через 10 років світ спіткає енергетичний дефіцит, тому для вирішення цієї проблеми сонячна енергія повинна бути вивчена якомога більше.

Використання 0,0005% енергій Сонця може забезпечити потреби світової енергетики аж на 0,5% , та на перспективу повністю покрити її потреби.

Невеликий відсоток сонячної енергії є достатнім для транспорту, промисловості та побуту в майбутньому. Важливим є те, що незалежно будемо

її використовувати чи ні, енергетичний баланс Землі та біосфери залишиться стабільним.

Сонячна енергія досягає всієї поверхні планети, ніде не набуваючи значної інтенсивності, тому її слід черпати на порівняно великих площах, потім сконцентрувати та перетворити у форму прийнятну для використання для побутовий, промислових та транспортних потреб. Окрім того, слід уміти сонячну енергію накопичувати з метою підтримувати енерго постачання в нічний час та в пошмурні дні. Згадані вище труднощі та затрати на реалізацію, створили загальне бачення про непрактичність широкого застосування енергоресурсу сонячної енергії.

Головним критерієм використання сонячної енергії це мінімізація її вартості. При вдосконаленні технологій та подорожчанні інших енергоресурсів сонячна енергія безперечно буде економічно ефективною.

За останні кілька десятиліть, застосування фотоелектричних систем швидко росло, і вони знаходяться на своєму шляху, щоб стати одним з основних джерел енергії для Європи і світу. Ємність систем, встановлених в минулому році досить для покриття щорічних потреб електропостачання більше 21 млн європейських домогосподарств. Щороку ці фотоелектричні установки заощадили понад 36 мільйонів тон CO<sub>2</sub>.

Таким чином, стверджується, що скорочення нинішніх темпів ЄС спалювання викопного палива може бути в значній мірі сприяти впровадженню злагодженого, загального та узгодженого підходу політики енергії. Проте, навіть якщо найпесимістичніший сценарій відбудеться, сонячна енергія буде продовжувати збільшувати свою частку енергетичної суміші в Європі і по всьому світу, ставши надійним джерелом чистої, безпечної і безперестанної енергії для всіх. Було висловлено припущення, що освіта на сонячних системах повинна бути одним із пріоритетів енергетичної політики, просувати додатки сонячної енергії для сталого розвитку. Неможливо успішно

просувати сонячні системи без належним чином освічених людей, які братимуть участь в їх розробці і установці.

**Метою роботи** є вирішення актуальної задачі у галузі енергозбереження, зокрема дослідження характеристик сонячних панелей, з метою моделювання зміни потужності сонячних панелей в залежності від кута падіння сонячних променів.

**Задачі дослідження.** Дослідження характеристик сонячних панелей є важливим прикладним завданням. Тому моделювання залежності зміни потужності панелей від кута падіння променів є актуальним завданням.

Для вирішення мети магістерської роботи слід сформулювати наступні задачі:

- аналіз методів дослідження сонячних панелей;
- дослідження фізичного та математичного моделювання сонячних панелей;
- дослідження теоретичних та практичних засад проведення моделювання роботи сонячних панелей
- розроблення та оцінювання адекватності математичної моделі потужності сонячної панелі

**Об'єктом дослідження** є процес дослідження зміни потужності сонячних панелей в залежності від кута падіння сонячних променів.

**Предметом дослідження** є математична модель, яка описує зміну потужності сонячних панелей від кута падіння променів.

**Методи дослідження:** теоретичні дослідження залежності потужності сонячних панелей від кута падіння променів, математичне моделювання та оцінювання її адекватності. Застосуванні основних положень теорії математичної статистики для оцінювання адекватності отриманих математичних моделей.

**Наукова новизна** обґрунтовано можливість застосування отриманої математичної моделі у лабораторному стенді шляхом статистичного оцінювання адекватності отриманих математичних моделей.

**Практичне значення** удосконалення лабораторного стенду для дослідження характеристик сонячних панелей, шляхом розроблення математичної моделі залежності потужності сонячних панелей від кута падіння променів. Що дає змогу подальшого розроблення програмного забезпечення для роботи лабораторного стенду.

# 1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ

## 1.1 Аналіз основних теоретичних засад функціонування сонячних панелей

Енергетичний рівень квантової системи – це її власне значення енергії, яке складаються з власних енергій мікрочастинок самої системи (наприклад електронів, протонів, нейтронів та ін.). Кожен енергетичний рівень системи характеризується певним її станом, чи підмножиною таких станів. Поняття енергетичного рівня може бути застосовано до атомів (електронні рівні), молекул (коливальні і обертальні рівні), атомних ядер (внутрішньоядерні енергетичні рівні) та ін.

Всі квантові стани із енергетичними рівнями, які перевищують енергію основного стану системи, називаються збудженими станами.

В сучасному розумінні орбітальної моделі атома, його електрони можуть володіти лише деякими визначемними значеннями величини енергії, та переходити з одного на інший енергетичний рівень виключно стрибкоподібно. Саме різниця між цими енергетичними рівнями буде визначати частоту коливання кванта світла, який виділяється (поглинається) при переході з одного рівня на інший. Кожній парі значень величин головного квантового числа  $n$  та орбітального числа  $l$  відповідає певний визначений рівень енергії, яку може мати електрон.

Головні енергетичні рівні атома є сукупністю атомних орбіталей, які володіють однаковими значеннями головного квантового числа. Кількість таких рівнів в атомі рівна номеру періоду, в якому розміщений відповідний хімічний елемент в періодичній таблиці хімічних елементів.

Кожний головний енергетичний рівень атома розщеплений на підрівні (орбіталі), які відповідають зміні орбітального квантового числа. При дії

досить сильного магнітного поля може виявитися розщеплення підрівнів атома на окремі стани, що відповідають різним значенням магнітного числа.

Термін «внутрішньоядерний енергетичний рівень» з'явився в галузі досліджень радіоактивності. Загалом радіаційне випромінювання поділяється класифікують наступним чином: альфа-, бета- та гамма- промені. Альфа-випромінювання є потоком ядер  $\text{He}_4$  (гелію-4), бета-випромінювання формується потоком електронів, а гамма-промені є потоком фотонів та є видом електромагнітного випромінювання. Як показали дослідження, енергії переходів електронів між різними рівнями є недостатньо для продукування гамма-променів, тому їх джерело знаходиться всередині атомного ядра. Саме ядро атома може мати різні енергетичні рівні, при переході між ними відбувається випромінювання гамма-квантів.

Наноматеріали – це дисперсні матеріали, які містять структурні елементи (кристаліти, зерна, кластери), геометричні розміри котрих щонайменше в одному вимірі є меншими 100 нм. Вони мають якісно нові властивості та функціональні характеристики.

Об'єкти, розміри яких знаходяться в межах від 1 до 100 нм, прийнято класифікувати як наноб'єкти, проте дані обмеження досить умовні. Дані розміри можуть стосуватися і всього фізичного тіла, так його структурних частин.

За своїми розмірами наноб'єкти загалом поділяють на три типи, а саме квазі-нульвимірні (0D), квазі-одновимірні (1D) та двовимірні (2D).

Квазі-нульвимірні наноб'єкти – це наночастинки, що складаються з декількох десятків (до декількох тисяч) атомів, які згруповані у зв'язки у формі клітини. При цьому частинка буде мати нанометрові розміри у всіх трьох напрямках.

Наночастинка є квазі-нульвимірним наноб'єктом, у якого всі лінійні розміри мають нано-порядок величини. Зазвичай наночастинки є сферичної

форму. Якщо ж вони мають явно виражене упорядковане розташування структурних елементів (атомів чи іонів), то їх називають нанокристалітами.

Квазі-одномірні нанооб'єкти – це вуглецеві нанотрубки та нановолокна, наностержні чи нанодроти, тобто циліндричні об'єкти, в яких один виміром в є порядку декількох мікрон, а два інших є нанометровими.

Двовимірні нанооб'єкти – це покриття чи плівки, товщина яких становить декілька нанометрів, вони знаходяться на поверхні масивного матеріалу. В такому випадку лише один вимір (товщина) має нанометричні розміри.

## **1.2 Дослідження можливостей фізичного та математичного моделювання функціонування сонячних панелей**

Одним з найбільш досліджених матеріалів в нанотехнологіях є нанокристалічний кремній або nc-Si. Даний напівпровідник є одним з найбільш перспективних матеріалів в галузі наелектроніки, оскільки технологія його отримання є відносно дешевою та відпрацьованою.

Плівки з нанокристалічного кремнію мають хороші електричні і фоточутливі характеристики, а при легуванні рідкісноземельними металами – ще й набувають люмінесцентних властивостей. Очевидним є, що вивчення нового напівпровідникового матеріалу необхідно розпочати із побудови його зонної моделі.

На сьогоднішній день синтезовано та експериментально досліджено властивості нанокристалічного кремнію, який побудований на основі аморфної кремнійової матриці, в якій розміщено кремнієві кристаліти. Даний матеріал суттєво відрізняється від попередніх зразків та фактично є системою напівпровідниковий кристаліт та напівпровідникова аморфна матриця. Особливістю нанокристалічного матеріалу є те, що це фактично є гетерофазним матеріалом-сумішшю аморфного та кристалічного матеріалів, при цьому кристалічна складова знаходиться в нанометровому діапазоні.

Енергетичну модель нанокристалічного матеріалу слід досліджувати починаючи з енергетичної будови самих кристалітів, а вже після цього врахувати його скрутку в енергетичній моделі аморфної плівки.

В залежності від розміру кристаліт можна розглядати як квантову точку чи кристалічну область, яка зберігає головні властивості об'ємного матеріалу. Отож, слід розрахувати:

- енергетичний спектер окремо кремнієвого кристаліта;
- побудувати зонну модель кремнієвого кристаліта, який знаходиться в складі аморфного кремнію;
- визначити критичний розмір кристаліта, з метою розмежування двох підходів в описі матеріалу (квантового та класичного).

Запропонована в даній магістерській роботі модель дозволяє описати енергетичну будову нанокристалічного матеріалу в залежності від розміру самих кристалітів. А розраховані значення ширини забороненої зони добре корелюють із визначеними за експериментальним спектром вбирання [1].

Одним з досліджуваних об'єктів нанофізики є плівки з квантовими точками (КТ), що представляють собою нанокристали непрямозонних напівпровідників - кремнію і германію. вони володіють фотолюмінесценцією (ФЛ) у видимій області спектра при кімнатній температурі. Встановлено, що природа видимої ФЛ пов'язана з квантово-розмірним ефектом в кремнієвих і германієвих нанокристалах (НК), які занурені в матриці їх оксидів. Більшість робіт присвячено дослідженню плівок оксиду кремнію, містять НК Si. Ведеться пошук альтернативних матриць, в яких ширина забороненої зони була б достатньою для формування потенційного бар'єру на кордоні НК Si або Ge і матриці, при цьому значення діелектричної проникності має бути таким, щоб забезпечити ефект діелектричного підсилення, а також високу щільність НК. До матеріалу бар'єрного шару КТ пред'являються також вимоги термодинамічної стабільності, відсутності взаємодії з матеріалом НК та ін.

Квазівільні електронно-діркові пари в КТ можуть існувати тільки за умови  $D > 2a_B$ , де  $D$  - діаметр КТ,  $a_B$  - борівський радіус об'ємного екситона Ваньє-Мотта ( $a_B = 4.2$  нм в Si і  $a_B \approx 20$  нм в Ge). Якщо  $D > 2a_B$ , то в КТ фактично існують лише екситон (або, іншими словами, зкорельовані кулонівською взаємодією електронно-діркові пари). Іншою умовою прояви екситонів є виконання нерівності  $E_x \gg kT$ , де  $k$  – постійна Больцмана,  $T$  - температура,  $E_x$  - енергія зв'язку екситона в КТ.

Основні результати роботи можна сформулювати наступним чином:

- вперше отримані фотолюмінісцентні плівки  $Al_2O_3$ , що містять КТ Si або Ge, одностадійним методом імпульсного лазерного осадження при формуванні зі зворотного потоку частинок ерозійного факела;

- вперше наведені результати розрахунку енергії зв'язку екситона і екситонних переходів в плівках  $Al_2O_3$  з КТ Si, Ge;

- показано гарну згоду спектрів ФЛ, виміряних в діапазоні часів 0-250 нс, що дозволило підтвердити екситонну природу ФЛ і визначити параметри моделі  $D^-$ ,  $\sigma$ ,  $\theta$ . [2]

Квазінульмірних системи, які являють собою напівпровідникові мікрочастинки (ПМ) сферичної форми з розмірами  $a \approx 1-10$  нм, вирощені в прозорих діелектричних матрицях, привертають увагу в зв'язку з їх нелінійними оптичними властивостями і можливими додатками в оптоелектроніці (Зокрема, як нові матеріали, перспективні для створення елементів, керуючих оптичними сигналами). Оскільки енергетична щільність напівпровідника істотно менше, ніж щільності діелектричних матриць, то рух носіїв заряду в ПМ буде обмежено його обсягом. При цьому розміри ПМ а будуть порівнянні з характерними розмірами квазічастинок в напівпровідниках. В таких умовах вплив поверхні розділення ПМ та діелектрична матриця може спричинити розмірне квантування енергетичного спектра електрона та дірки, пов'язане з просторовим обмеженням безпосередньо області квантування, та з поляризаційною взаємодією носіїв

заряду та поверхню ПМ. В експериментальних роботах було виявлено, що структура спектра міжзонного поглинання світла малого ПМ визначалася розмірним квантуванням енергетичного спектра його квазічастинок. в рамках даної моделі квазінульмірних системи показано, що край поглинання малих ПМ CdS формується двома зрівняними по інтенсивності переходів з різними рівнями розмірного квантування дірки ( $n_h = 0; l_h = m_h = 0$ ) і ( $n_h = 1; l_h = m_h = 0$ ), йдуть на нижній рівень розмірного квантування електрона ( $n_e = 1; l_e = m_e = 0$ ). [3]

В даний час найбільш розповсюдженим є метод виробництва полікристалічного кремнію (первинна сировина для подальшої очистки та отримання зливків) з використанням процесу хімічного осадження полікремнію з газової фази  $\text{SiCl}_3$  (Сіменс-процес). В цьому процесі зливки полікремнію отримують водневим відновленням трихлорсиланів (ТХС) при високій температурі. При цьому полікремній осаджується на стрижні-затравки, розміщені в реакторі. Необхідно зазначити, що, незважаючи на свою розповсюдженість і відлагодженість, Сіменс-процес є дуже енергозатратною технологією. Крім того, використання ТХС пов'язано зі значними екологічними ризиками. В зв'язку з цим існують певні обмеження по розташуванню таких підприємств і їх віддаленості від населених пунктів.

При розроці технологічного процесу отримання кремнійового матеріалу, який максимально задовольняє вимогам сонячної енергетики по електрофізичним параметрам і по вартості, необхідно використовувати комплекс вимірювальних методів. Ряд методів включено в міжнародні стандарти (ASTM) і забезпечують вимірювання основних параметрів кремнію. До таких методів слід віднести:

- інфрачервону (ІЧ) спектроскопію;
- рентгенівську дифрактометрію;
- вимірювання часу життя нерівноважних носіїв заряду;
- спектроскопію глибоких рівнів;

- вимірювання електропровідності;
- мас-спектрометрію.

Інші методи (зокрема, електронна і тунельна мікроскопія, електронний і ядерний парамагнітний резонанс, фотолюмінесценція, нейтронно-активаційний аналіз, фотоелектронна спектроскопія та деякі інші) доцільно використовувати для встановлення детальних механізмів взаємодії дефектів, домішково-дефектних комплексів, природи центрів розсіювання носіїв заряду та ін.

Як відомо, кремній має відносно малі значення коефіцієнту поглинання світла, тому при застосуванні кремнієвого матеріалу в сонячній енергетиці для реалізації ефективного збирання фотогенерованих носіїв заряду необхідно забезпечити відносно великі значення дифузійної довжини  $L_d$  неосновних нерівноважних носіїв заряду в цьому матеріалі. З довжиною дифузії також пов'язаний інший важливий параметр – час життя неосновних нерівноважних носіїв заряду в об'ємі напівпровідника  $\tau_v = L_d^2 / D$ , де  $D$  – коефіцієнт дифузії неосновних носіїв. Відомо декілька методів визначення параметра  $L_d$ : — метод спектральних залежностей поверхневої фото-е.р.с.  $V_{ph}$ ; — методи кінетики спаду фотовідгуку (фотопровідність, поглинання на нерівноважних носіях струму) в різних модифікаціях; — метод координатних залежностей фотоструму при локальному збудженні (метод скануючого світлового зонду та його модифікації).[4]

Граничне положення  $E_v + 0,39$  eВ було виміряне в високоомних зразках p-Si з низьким вмістом кисню. У деякому інтервалі доз опромінення рівень Фермі (від початкового  $E_v + 0,42$  eВ) після збільшення концентрації дірок до  $2,4 \cdot 10^{12}$  см<sup>-3</sup> зберігався на  $E_v + 0,39$  eВ. Можна припустити, що таку концентрацію дірок в p-Si може постачати при  $\gamma$ -опроміненні і кімнатній температурі тільки акцепторний рівень  $E_v + 0,42$  eВ міжвузлового атома кремнію (ISi), який спільно з донорним рівнем  $E_v + 0,36$  eВ дефекту  $C_iO_i$  забезпечує закріплення рівня Фермі в деякому інтервалі доз опромінення. Коли початкова концентрація дірок в p-Si була вище  $2,4 \cdot 10^{12}$  см<sup>-3</sup>, зі збільшенням

доза  $\gamma$ -опромінення концентрація дірок в зразках p-Si зменшувалася. Така поведінка можна зрозуміти, так як бор є ефективним центром захоплення межузельних атомів кремнію при  $\gamma$ -опроміненні. При опроміненні кремнію високоенергетичними ядерними частинками граничне положення  $E_v + 0,476$  eV пояснювалося участю акцепторного рівня дивакансії  $E_v + 0,425$  eV і донорного рівня  $E_v + 0,25$  eV в деякому інтервалі доз опромінення. Насправді донорного рівня дивакансії  $E_v + 0,25$  eV не існує, а дивакансії є дефектом з нейтральним рівнем  $E_v + 0,53$  eV в першій конфігурації і  $E_v + 0,45$  eV в другій.

При високому рівні опромінення зразки кремнію стають близькими до власного, тобто рівень Фермі буде знаходитися на нейтральному рівні дивакансії  $E_v + 0,53$  eV в першій конфігурації. При малих флюенсах опромінення за умови переважного введення дивакансій за рахунок меншої деформації решітки кремнію реалізується ситуація, коли енергетично вигідно, щоб частина дивакансій перебувала в другій конфігурації, що забезпечує експериментально спостережуване положення рівня Фермі при кімнатній температурі  $E_v + 0,476$  eV в деякому інтервалі доз опромінення p-Si.[5]

Розглядається моделювання сонячної панелі в середовищі MATLAB / simulink. Модель розроблена з використанням основних рівнянь фотоелектричних сонячних елементів, які враховують впливу рівня сонячного випромінювання і перепадів температур. Проведено експериментальну перевірку розрахункових співвідношень MATLAB-моделі на сонячній панелі типу TSM-210SB.

Підсумки проведеної роботи:

1. Побудована комп'ютерна Matlab-модель сонячної панелі включає в себе сонячні елементи і активне навантаження. Модель сонячної панелі виконана за модульним принципом.

2. Розроблена блок-система сонячної панелі для розміщення в бібліотеці Matlab / Simulink.

3. Експериментальна перевірка розрахункових співвідношень Matlab-моделі сонячної панелі типу TCM-210SB підтвердила їх справедливість.

4. Отримано вирази, що дозволяють розраховувати характеристики сонячного елемента з урахуванням рівня сонячної інсоляції та температури навколишнього середовища.

5. Створено спрощена формула для розрахунку потужності сонячної панелі стосовно регіону Республіки Башкортостан в діапазоні сонячної інсоляції 300-1000 Вт/м<sup>2</sup>.

Фотоелектрична модель генератора зазвичай базується на описі його електричних характеристик, тобто, співвідношення поточної напруги комірки на різних рівнях випромінювання та при різних температурах комірки. Найпростіша схема сонячної батареї складається з поточного джерела під'єданого паралельно до діода.

Вихідна енергія джерела буде прямо пропорційною до сили потоку світла, яке падає на комірку ( $I_{ph}$ ). При відсутності світла сонячна батарея є неактивною, вона працює лише як діод з p-n переходом:

$$I = I_{ph} - I_{sat} \left[ e^{\frac{q(U+IR_s)}{nkT}} - 1 \right] \quad (1.1)$$

де

$I_{ph}$  – світловий струм [А],

$I_{sat}$  – зворотний струм насичення діодів [А],

$R_s$  – послідовний опір [Ом]

$U$  – робоча напруга [В],

$I$  – робочий струм [А],

$q = (1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C})$ , - заряд одного електрона,

$n$  – діод, фактор ідеалізації,

$k = (1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K})$  – стала Больцмана,

$T$  – температура переходу.

У статті [7] наводиться результати розрахунків математичної моделі (теоретичні) і експериментальних досліджень вольт-амперної і ват-амперної характеристики режимів роботи сонячної мобільного фотоелектричної станції в залежності від внутрішніх і зовнішніх факторів, ступеня орієнтації на Сонце в аридній середовищі Туркменістану.

Математична модель дозволяє визначити вплив на вихідні характеристики модуля внутрішніх (число послідовно, паралельно з'єднаних елементів, внутрішнього опору) і зовнішніх факторів впливу (температури повітря, інтенсивності сонячного випромінювання, ступеня орієнтації на Сонце в залежності від пори року та часу доби).

Порівняння отриманих при моделюванні значень інтенсивності сонячного випромінювання з даними, ді слідження показало, що похибка не перевищує 12%, а температури навколишнього повітря з даними, наведеними в довіднику по клімату - 5%. Зіставлення значень отриманих при моделюванні зі значеннями, наведеними в паспортних даних модуля, підтверджує адекватність розробленої моделі. З стеженням потужність і сила струму збільшується на 15%, природно і ККД збільшується на 1%. о 10 годині ранку. Математичну модель можна використовувати для оцінки доцільності застосування систем автоматичного спостереження в сонячних установках.

Цей документ підсумовує рівняння та додатки, пов'язані з моделлю ефективності фотоелектричних масивів, розробленої в National Laboratories Sandia протягом останніх дванадцяти років. Електричні, теплові та оптичні характеристики для фотоелектричних модулів включені в модель, і модель призначена для використання погодинних сонячних ресурсів та метеорологічних даних. Універсальність та точність моделі були перевірені на модулі з плоскими пластинами (всі технології) і для концентраторних модулів, а також для великих масивів модулів. Додатки включають в себе проектування системи та визначення розміру, переклад вимірювань польової продуктивності до стандартних умов

звітування, оптимізацію продуктивності системи та порівняння вимірювань у порівнянні з очікуваною продуктивністю в реальному часі.

При проектуванні фотоелектричної системи необхідно передбачити очікуване річне виробництво енергії. Для цього теплова модель необхідна для оцінки робочої температури модуля на основі локальних умов навколишнього середовища; сонячне випромінювання, температура навколишнього середовища, швидкість вітру  $i$ , можливо, напрямок вітру. Залежні від сайту сонячні ресурси та метеорологічні дані з визнаних баз даних або з метеорологічних моделей зазвичай використовуються для забезпечення екологічної інформації, необхідної для аналізу дизайну масиву. Оцінки середньо-добових значень для сонячного випромінювання, температури навколишнього середовища та швидкості вітру використовуються в тепловій моделі для прогнозування відповідної операційної імпеданції фотоелектричного модуля. Існує невизначеність, пов'язана як з табульованими екологічними даними, так і з термічною моделлю, але цей підхід виявився адекватним для цілей проектування системи.

Після встановлення системи, сонячне випромінювання та температуру модуля можна виміряти безпосередньо та результати, що використовуються в моделі продуктивності. Виміряні величини дозволяють уникнути властивої невизначеності, пов'язаної з оцінкою температури модуля на основі параметрів навколишнього середовища та підвищення точності моделі продуктивності для постійного прогнозування очікуваної продуктивності системи. [9]

### **1.3 Постановка задачі на магістрську роботу**

Для вирішення завдань поставлених в даній магістерській роботі слід сформулювати наступні завдання:

- проаналізувати теоретичні аспекти функціонування сонячних панелей;
- дослідити основи перетворення енергії у кремнієвих пластинах;
- математично змодельовати генерацію потужності сонячною панеллю;
- здійснити апробацію отриманої математичної моделі;
- вказати основні фактори, що впливають на роботу сонячної панелі та оцінити ступінь їх впливу.

## 2 ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕОРЕТИЧНИХ ТА ПРАКТИЧНИХ ЗАСАД ПРОВЕДЕННЯ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ

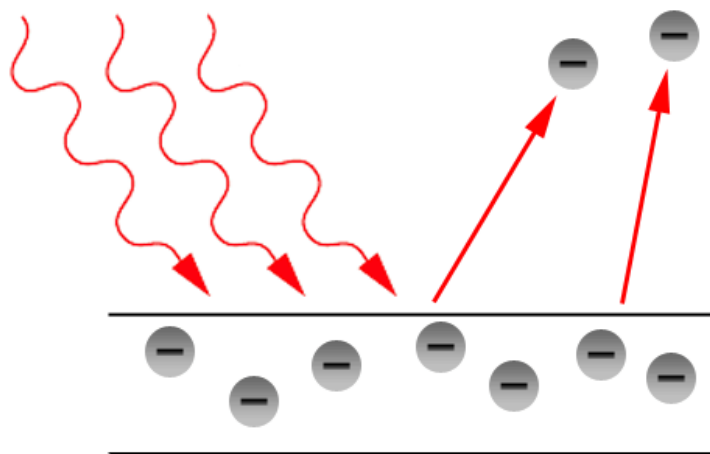
### 2.1 Дослідження основ явища фотоефекту та зонної теорії

Фотоефект — це явище вибивання квантами світла електронів з деяких металів. Під час цього явища відбувається повне або часткове вивільнення електрона від зв'язків із ядром в атомі речовини.

Загалом розрізняють фотоефект:

- *зовнішній*, при якому вибивання електронів відбувається під дією світла (фотоелектронна емісія) чи гамма-випромінювання, тощо;
- *внутрішній*, при якому відбувається збільшення електропровідності напівпровідників чи діелектриків при дії світла (фотопровідність);
- *вентильний*, при якому відбувається збудження електрорушійної сили світлом на межі металу та напівпровідника, чи між різнорідними напівпровідниками.

Фотоефект застосовується в деяких аналізаторах речовин, а явище фотоефекту є основою принципу дії фотоелементів.



Рисинок 2.1 – Ілюстрація фотоефекту

Сформулювати три закони явища фотоефекту.

1. Кількість фотоелектронів завжди є прямо пропорційною інтенсивності світла.
2. Кінетична енергія фотоелектронів є прямо пропорційною частоті випромінювання світла, а їх максимальна кінетична енергія не залежить від безпосередньої інтенсивності світлових променів.
3. Кожна речовина характеризується пороговими значеннями частоти і довжини хвилі світла, що відповідають межі існування явища фотоефекту. При цьому, світло з меншою частотою хвиль та більшою їх довжиною не викликає фотоефекту.

Таке порогове значення отримало назву червоної межі, оскільки воно завжди є ближчим до спектру червоного світла.

Явище виникнення червоної межі фотоефекту існує через притягування електрона до ядра. Разом з цим, останній закон фотоефекту не можливо пояснити на основі лише уявлень про світло як плавних коливань у вакуумі, оскільки такі хвилі мали б довго розхитувати електрони аж до моменту, коли їх швидкість стала б достатня для відриву.

Вичерпне пояснення явища фотоефекту належить Альберту Ейнштейну. Він застосував ідею німецького фізика Макса Планка, щодо світлового випромінювання і поширення окремими порціями, тобто квантами, які потім отримали назву фотони.

Для обчислення енергії одного кванта світла Макс Планк запропонував наступну формулу:

$$E = h\nu \quad (2.1)$$

де  $E$  – енергія одного фотона,  $h$  — стала Планка,  $\nu$  — лінійна частота коливань.

Ейнштейн в свою чергу припустив, що фотоефект виникає внаслідок поглинання електроном лише одного кванта випромінювання, а в той час як всі інші кванти не беруть участь у даному процесі. Тому енергія одного кванта

світла, тобто фотона витрачається лише на подолання бар'єру (на роботу виходу чи відриву від матеріалу) та надання кінетичної енергії фотоелектрону.

Дане припущення дозволило Планк сформулювати закон збереження енергії для процесу фотоефекту (2.1).

Виходячи з даних міркувань логічно припустити, що для вивільнення електрона з металу йому необхідно надати більшу енергію за роботу виходу.

Теоретичне обґрунтування явища дав Альберт Ейнштейн, отримавши за це Нобелівську премію.

Припустивши, що світло також поглинається порціями, Ейнштейн пояснив залежність швидкості вибитих електронів та довжини хвилі випромінення.

$$h\nu = \frac{mv^2}{2} + A \quad (2.2)$$

де  $\nu$  — частота хвилі світла,  $h$  — стала Планка,  $m$  — маса одного електрона,  $v$  — швидкість електрона,  $A$  — робота виходу електрона.

Праця Ейнштейна має надзвичайно велике значення для розвитку квантової механіки та квантової оптики.

Для побудови моделі основного стану твердого тіла, за умови, що його одноелектронні стани є відомими, можна вдатися до наступних міркувань. Спочатку виберемо рівень з найнижчої енергії й помістимо до нього два електрони з протилежними власними спінами, потім заповним наступний рівень електронами з більшою енергією, та будемо робити так доти, поки не впорядкуємо за таким принципом всі електрони умовного твердого тіла. За таким принципом найвищий заповнений рівень називають рівнем Фермі.

У напівпровіднику рівень Фермі відповідає середній енергії електронів і дірок, якщо вони відповідно знаходяться поблизу дна зони провідності та верхнього рівня валентної зони, тобто рівень Фермі у власне напівпровіднику знаходиться посередині забороненої зони (рис. 2 а).

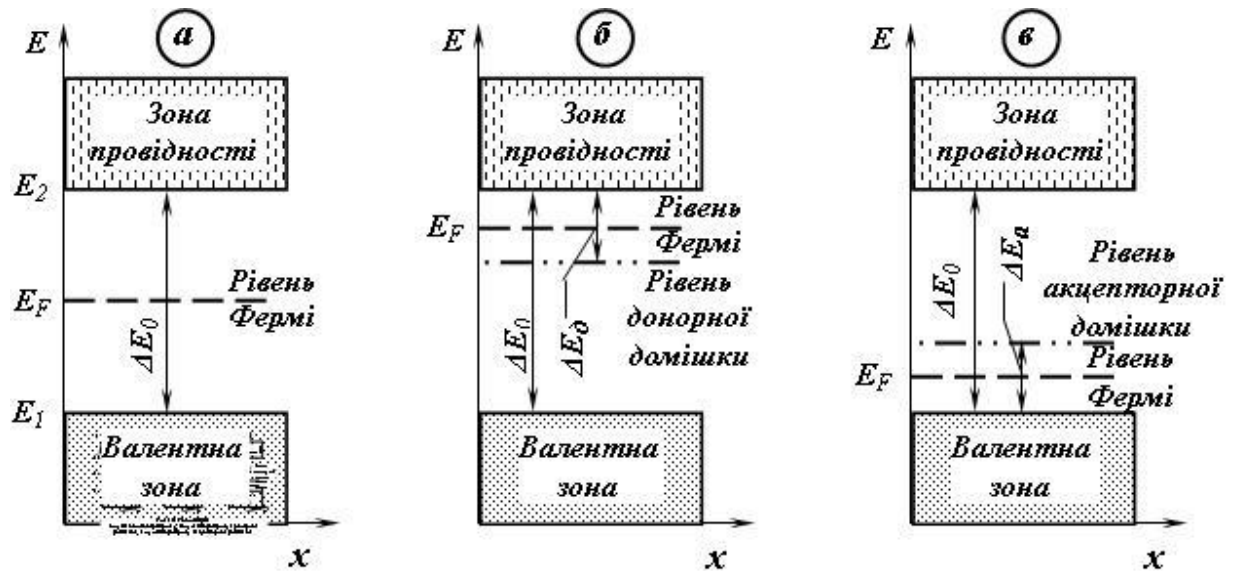


Рисунок 2.2 - Рівні Фермі:

*a* – у власне напівпровіднику; *б* – у напівпровіднику з донорною домішкою; *в* – у напівпровіднику з акцепторною домішкою.

Якщо в напівпровідник вводяться домішки, положення рівня Фермі суттєво змінюється – створюються рівні домішок. У напівпровіднику з донорною домішкою і відповідним рівнем донорної домішки, який розташований на відстані  $\Delta E_d$  від дна зони провідності, рівень Фермі знаходиться на середині між рівнем донорної домішки та дном зони провідності (рис. 3 б). Якщо у напівпровіднику присутня акцепторна домішка, то рівень Фермі знаходиться між рівнем донорної (чи акцепторної) домішки та верхнім рівнем валентної зони (рис. 3 в).

Положення рівня Фермі в напівпровідниках з донорною або акцепторною домішкою визначатиметься наведеними вище рівняннями тільки за тієї умови, що концентрація електронів і дірок, обумовлена внесенням у напівпровідник відповідних домішок, у багато разів більша концентрації цих носіїв струму, що властиві власне провіднику.

Зміна температури напівпровідника спричиняє зміщення рівня Фермі щодо його первісного положення. Фактор температури сильно впливає на електропровідність напівпровідника. У власне напівпровіднику з підвищенням

температури все більша кількість електронів буде збуджуватись, переборювати заборонену зону, і переходити у зону провідності. Одночасно в такій же кількості у валентній зоні створюватимуться дірки.

Зонна теорія кристалів є розділом фізики конденсованих середовищ (фізики твердого тіла). В даному розділі фізичні властивості твердих тіл досліджуються на основі одноелектронного наближення.

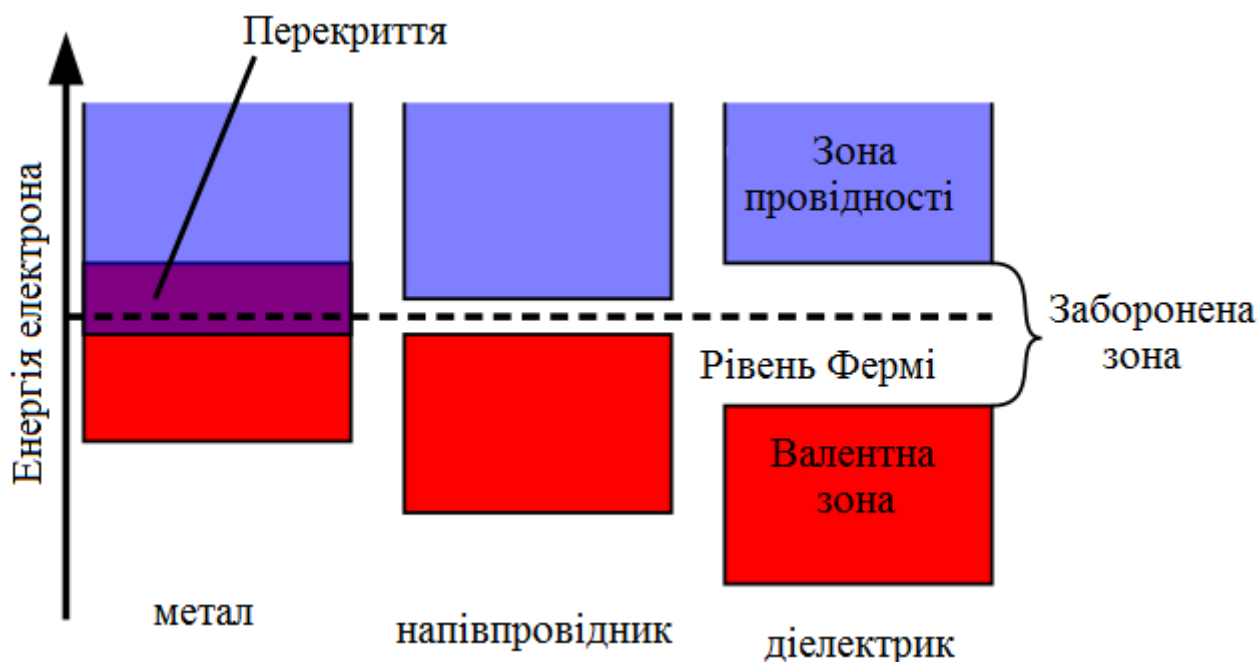


Рисунок 2.3 - Спрощена схема зонних структур провідників, напівпровідників та діелектриків.

Одноелектронне наближення базується на припущенні, що квантову систему можна представити, як систему окремих електронів, які рухаються в потенціальному полі. Такий підхід дозволяє врахувати як взаємодію з ядрами атомів, так і взаємодію з іншими електронами.

В одноелектронному наближенні хвильова функція багатоелектронної системи вибирається в вигляді детермінанта Слейтера з певного набору функцій, які залежать від координат та однієї частинки.

В ідеальному варіанті потенціал, в якому рухаються електрони має бути самоузгодженим. Щоб цього досягнути використовується ітераційна процедура, наприклад, метод Гартрі-Фока.

Одноелектронний гамільтоніан має наступний загальний:

$$\hat{H} = -\frac{\hbar^2}{2m} \Delta + V(r) \quad (2.3)$$

де  $V(r)$  – усереднений потенціал.

А спектр хвильових функцій даного гамільтоніану буде визначатися розв'язками наступного рівняння:

$$\hat{H}\psi_i = E_i\psi_i \quad (2.4)$$

де  $i$  - номер ці функції.

Кількість власних функцій гамільтоніана є незліченною. Основному стану квантової системи може відповідати набір з  $N$  функцій, для котрих одноелектронні енергії  $E_i$  є найменшими.

Сума одноелектронних енергій визначає повну енергію основного стану системи:

$$E = \sum_{i=1}^N E_i \quad (2.5)$$

Хвильова функція багатоелектронної системи складається з хвильових функцій  $\psi_i$  за умови врахування антисиметричності щодо перестановок. Часто з цією метою застосовують детермінанту Слейтера. Таку хвильову функцію можна подати наступним чином:

$$\Psi = \hat{a}_1^+ \hat{a}_2^+ \dots \hat{a}_N^+ |0\rangle \quad (2.6)$$

В зонній теорії розглядають ідеальні кристали з трансляційною симетрією. Вона базується на теорії Блоха, що визначає загальний вигляд одноелектронних хвильових функцій, та визначає для них квантове число, що називається квазіімпульсом.

Квазіімпульс — це квантове число властиве для квазічастинки кристалах. Має багато рис спільних із імпульсом, але є певні відмінності. Так, квазіімпульс обмежений першою зоною Бріллюена. квазі-імпульс визначається за формулою  $\mathbf{p} = \hbar\mathbf{k}$  обмежений першою зоною Бріллюена хвильовий вектор.

Доволі часто, зважаючи на очевидний зв'язок між двома величинами, квазіімпульсом називають хвильовий вектор .

При додаванні квазіімпульсів результат приводиться до першої зони Бріллюена, додаючи чи віднімаючи вектор оберненої ґратки. Завдяки цьому закон збереження квазіімпульсу має цікаву особливість, і в кристалі можливі процеси із зміною квазіімпульсу на вектор оберненої ґратки. Такі процеси називають процесами перекиду. Цими процесами, зокрема, зумовлена теплопровідність у кристалах.

Всі рівні одноелектронних станів розбивають на неперервні смуги, які отримали назву дозволених зон.

Між дозволеними зонами, також існують заборонені зони. Всі одноелектронні стани в загальному випадку характеризуються трьома квантовими числами, а саме: квазіімпульсом, номером зони та спіном.

Основний стан тіла будується шляхом послідовного заповнення електронами всіх одноелектронних станів, починаючи від найнижчого. Усі одноелектронні рівні енергія яких нижча за рівень Фермі, тобто найвищий стан, в основному стані є заповненими, а всі одноелектронні рівні із енергією вищою рівня Фермі є незаповненими.

Для напівпровідників та діелектриків рівень Фермі співпадає з верхом валентної зони, валентна зона в такому випадку є повністю заповненою. Наступну зону називають зоною провідності. Провідність кристалів визначається електронами, що потрапляють в зону провідності під час збудження кристалу (термічно, оптично чи шляхом електронної інжекції).

Для металів, валентна зона заповнена не повністю, а лише наполовину, тому вона є водночас зоною провідності.

Зонна теорія успішно пояснює більшість електронних властивостей твердих тіл.

В залежності від заповненості валентної зони в основному стані кристали діляться на метали і діелектрики, підкласом яких є напівпровідники.

Провідність, теплопровідність та термоелектричні властивості матеріалів пояснюються за допомогою розсіяння електронів на дефектах і коливаннях кристалічної ґратки.

Оптичні властивості матеріалів пояснюються за допомогою переходів між одноелектронними станами різних зон.

Зонна теорія важлива для розуміння принципу дії різноманітних електронних пристроїв.

## 2.2 Дослідження сучасної теорії світла

Фотон – це квант електромагнітного випромінювання (в т.ч. світла), елементарна частинка, яка є носієм електромагнітної взаємодії.

Це безмасова частинка, яка здатна існувати у вакуумі тільки рухаючись зі швидкістю світла. Електричний заряд фотона також дорівнює нулю. Фотон може перебувати лише у двох спінових станах з проекцією спіна на напрямок руху (спіральністю)  $\pm 1$ . У фізиці фотони позначаються літерою  $\gamma$ .

Класична електродинаміка описує фотон як електромагнітну хвилю з круговою правою чи лівою поляризацією. З точки зору класичної квантової механіки, фотону як квантовій частинці властивий корпускулярно-хвильовий дуалізм, він проявляє одночасно властивості частинки і хвилі. Квантова електродинаміка, яка базується на квантовій теорії поля і Стандартній моделі, описує фотон як калібрувальний бозон, який забезпечує електромагнітну взаємодію: віртуальні фотони є квантами-носіями електромагнітного поля і забезпечують взаємодію між двома електричними чи магнітними зарядами. Їм приписується спін 1.

Фотони є істинно нейтральними частинками, і не мають античастинок. Фотон сам є власною античастинкою.

Античастинки — частинки з рівними, але протилежними за знаком електричним зарядом і магнітним моментом в порівнянні з відповідними елементарними частинками, наприклад, антипротон — протон, позитрон — електрон. Антиатоми і антиядра можна одержати з відповідних атомів та ядер заміною всіх елементарних частинок, що входять до їхнього складу, на античастинки. Речовина, що цілком складається з античастинок називається антиматерією.

Сучасна теорія світла базується на роботах багатьох вчених. Квантовий характер випромінювання і поглинання енергії електромагнітного поля був постульований Максом Планком в 1900 році для пояснення властивостей теплового випромінювання. Термін фотон введено хіміком Гілбертом Льюїсом в 1926 році. В 1905-1917 роках Альберт Ейнштейн опублікував ряд робіт, присвячених протиріччям між результатами експериментів та класичною хвильовою теорією світла, зокрема фотоефекту і здатності речовини перебувати в тепловій рівновазі з електромагнітним випромінюванням.

Робилися спроби пояснити квантові властивості світла напівкласичними моделями, в яких світло, як і раніше, описувалося рівняннями Максвелла без врахування квантування, а об'єктам, що випромінювали та поглинали світло, приписувалися квантові властивості (див., наприклад, теорію Бора). Незважаючи на те, що напівкласичні моделі вплинули на розвиток квантової механіки (про що, зокрема, свідчить те, що деякі їхні положення і навіть наслідки в явному вигляді входять у сучасні квантові теорії), експерименти підтвердили правоту Ейнштейна про квантову природу світла (див., наприклад, фотоефект). Слід відмітити, що квантування енергії електромагнітного випромінювання не є винятком. У сучасній теорії значення багатьох фізичних величин є дискретними (квантованими). Прикладами таких величин є: кутовий момент, спін та енергія зв'язаних систем.

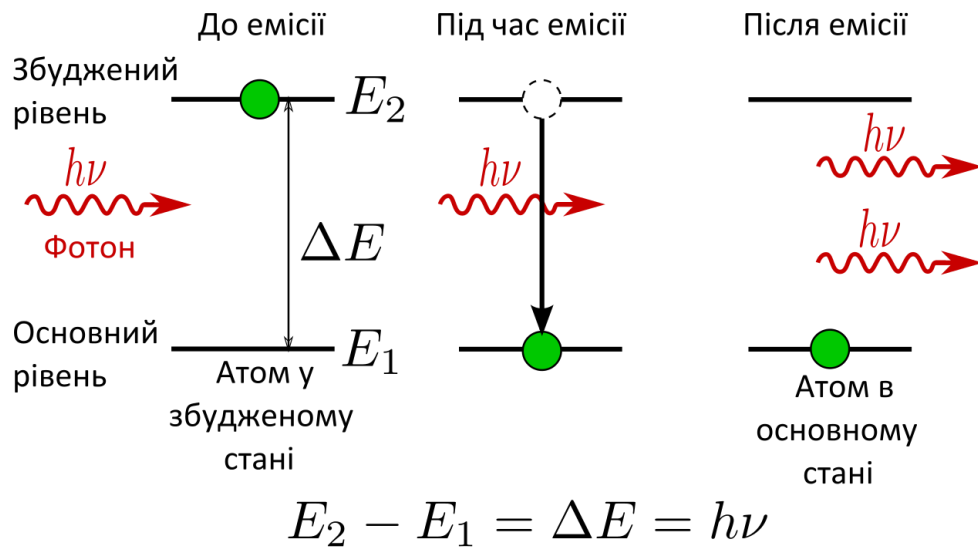


Рисунок 2.4 - Вимушене випромінювання фотона

Введення поняття фотона сприяло створенню нових теорій та фізичних приладів, а також стимулювало розвиток експериментальної та теоретичної бази квантової механіки. Наприклад, були винайдені мазер, лазер, відкрите явище конденсації Бозе - Ейнштейна, сформульована квантова теорія поля та ймовірна інтерпретація квантової механіки. У сучасній Стандартній моделі фізики елементарних частинок існування фотонів є наслідком того, що фізичні закони інваріантні відносно локальної калібрувальної симетрії у будь-якій точці простору-часу (див. детальніший опис нижче в розділі Фотон як калібрувальний бозон). Цією ж симетрією визначаються внутрішні властивості фотона, такі як електричний заряд, маса та спіні.

Концепція фотонів застосовується у фотохімії, відеотехніці, комп'ютерній томографії, мікроскопії високої роздільності та вимірюванні міжмолекулярних відстаней. Фотони також використовуються як елементи квантових комп'ютерів і наукомістких приладів для передачі даних (див. квантова криптографія).

У більшості теорій, розроблених до XVIII століття, світло розглядалося як потік частинок. Одна з перших таких теорій була викладена у Книзі про оптику Ібн ал-Хайсамом в 1021 році. У ній світловий промінь описано як потік дрібних частинок, які мають недостачу всіх властивостей, окрім самої енергії.

Але такі моделі потоку світла не могли пояснити явища рефракції, дифракції та подвійного заломлення променя. Пізніше було запропоновано хвильову теорію світла, засновниками якої були Роберт Гук (1665), Рене Декарт (1637) та Християн Гюйгенс (1678). Проте моделі, які базуються на ідеї дискретної природи світла, все ж залишалися домінуючими, великою мірою через вплив авторитета вченого Ісаака Ньютона, який притримувався саме цієї теорії.

На початку XIX століття вчені Томас Юнг і Огюстен Френель змогли наочно продемонструвати явища інтерференції і дифракції світла, провівши серію дослідів. Після цього хвильові моделі стали загально прийнятими. А вже в 1865 році Джеймс Максвелл припустив, що світло є хвилею. На початку 1888 року цю гіпотезу експериментально підтвердив Генріхом Герцом.

Хвильова теорія Максвелла не змогла, однак, пояснити всіх властивостей світла. Згідно з цією теорією енергія світлової хвилі повинна залежати лише від її інтенсивності, але не від частоти. Насправді ж результати деяких експериментів показали, що передана від світла атомам енергія, навпаки, залежить лише від частоти світла, а не від інтенсивності. Аналогічно, електрони можуть бути вирвані з поверхні металічної пластини лише при опроміненні світлом з частотою вищою певного значення, так званої червоної межі фотоефекту; енергія вирваних електронів залежить лише від частоти світла, але не від його інтенсивності.

Дослідження властивостей випромінювання абсолютно чорного тіла, яке здійснювалося протягом майже сорока років (1860—1900), завершилися висуненням гіпотези Макса Планка про те, що енергія будь-якої системи при випромінюванні чи поглинанні електромагнітного випромінювання частоти може змінюватися лише на величину, кратну енергії кванта  $E = h\nu$  (тобто дискретно), де  $h$  — стала Планка. Альберт Ейнштейн показав, що таке уявлення про квантування енергії повинно бути прийняте, щоб пояснити спостережувану теплову рівновагу між речовиною та електромагнітним випромінюванням. На цій основі був теоретично описаний ним

фотоелектричний ефект. Теорія Максвелла, навпаки, припускає, що електромагнітне випромінювання може мати яку завгодно енергію (тобто не квантується).

Багато фізиків спочатку вважали, що квантування енергії це результат якоїсь невідомої властивості матерії, яка поглинає та випромінює електромагнітні хвилі. У 1905 році Ейнштейн висловив припущення, що квантування енергії — властивість самого електромагнітного випромінювання. Визнаючи справедливість теорії Максвелла, Ейнштейн вказав, що багато аномальних на той час результатів експериментів можуть бути пояснені, якщо енергію світлової хвилі локалізувати у кванти, подібні до частинок, які рухаються незалежно один від одного, навіть якщо хвиля неперервно поширюється у просторі. У 1909 і 1916 роках, Ейнштейн показав, виходячи зі справедливості закону випромінювання абсолютно чорного тіла, що квант енергії повинен також мати імпульс  $p = \frac{h}{\lambda}$ . Імпульс фотона був виявлений експериментально Артуром Комптоном, за цю роботу він отримав Нобелівську премію з фізики у 1927 році. Однак питання узгодження хвильової теорії Максвелла з експериментальним обґрунтуванням дискретної природи світла залишалося відкритим. Деякі автори стверджували, що випромінювання та поглинання електромагнітних хвиль відбувається порціями, квантами, однак процеси поширення хвилі неперервні. Квантовий характер явищ випромінювання і поглинання доводить наявність у мікросистем, зокрема в електромагнітного поля, окремих енергетичних рівнів і неможливість мікросистеми мати довільну величину енергії. Корпускулярні уявлення добре узгоджуються з експериментально спостережуваними закономірностями випромінювання та поглинання електромагнітних хвиль, зокрема, із закономірностями теплового випромінювання та фотоефекту. Однак, на їхню думку, експериментальні дані свідчать про те, що квантові властивості електромагнітної хвилі не проявляються при поширенні, розсіюванні,

дифракції електромагнітних хвиль, якщо вони не супроводжуються втратою енергії. У процесах поширення електромагнітна хвиля не локалізована в певній точці простору, поводить себе як єдине ціле і описується рівняннями Максвелла. Розв'язок було знайдено в рамках квантової електродинаміки (див. розділ корпускулярно-хвильовий дуалізм нижче) та її наступниці Стандартної моделі.

Стандартна модель в контексті фізики елементарних частинок є теоретичною конструкцією, яка описує електромагнітну, слабку та сильну взаємодії для всіх елементарних частинок. Стандартна модель не описує темну матерію та не описує вплив гравітації. Необхідність розширення поняття стандартної моделі з'явилася аж в 2002 році з причини виявлення нейтринних осциляцій. Підтвердження факту існування бозона в 2012 році завершило виявлення частинок, які передбачає Стандартна модель. Всього Стандартна модель описує властивості 61 елементарної частинки.

Фотон — безмасова нейтральна частинка. Спін фотона дорівнює 1 (частинка є бозоном), але через нульову масу спокою більш придатною характеристикою є спіральність, проекція спіну частинки на напрямок руху. Фотон може перебувати тільки у двох спінових станах зі спіральністю, рівною  $\pm 1$ . Ці властивості в класичній електродинаміці відповідає циркулярна поляризація електромагнітної хвилі.

Масу спокою фотона вважають рівною нулю, базуючись на експерименті (відмінність маси фотона від нуля призвела б до дисперсії електромагнітних хвиль у вакуумі, що розмазало б по небі спостережувані зображення галактик) та теоретичних обґрунтуваннях (у квантовій теорії поля доводиться, що якщо б маса фотона не дорівнювала нулю, то електромагнітні хвилі мали б три, а не два поляризаційних стани). Тому швидкість фотона, аналогічно як швидкість будь-якої частинки без маси, дорівнює швидкості світла. З цієї причини (не існує системи відліку, в якій фотон перебуває у стані спокою) внутрішня парність частинки не визначена. Якщо приписати фотону наявність так званої

релятивістської маси (термін виходить із вжитку) виходячи з співвідношення

то вона складе  $m = \frac{h\nu}{c^2}$  Фотон — істинно нейтральна частинка (тотожний до своєї античастинки), тому його зарядова парність від'ємна і дорівнює  $-1$ . Через закон збереження зарядової парності та її мультиплікативність в електромагнітних процесах неможливе перетворення парної кількості фотонів у непарну і навпаки (теорема Фаррі).

Фотон належить до калібрувальних бозонів. Він бере участь в електромагнітній та гравітаційній взаємодіях.

Калібрувальні бозони — бозони, які переносять фундаментальні взаємодії. Елементарні частинки, взаємодії яких описуються калібрувальною теорією, взаємодіють між собою за допомогою обміну калібрувальними бозонами, зазвичай як віртуальними частинками.

Фундаментальні взаємодії чи Фундаментальні сили є різними типами взаємодій, які не доєднуються одна до одної, елементарних частинок чи складених з цих частинок тіл. На сьогодні доведено існування чотирьох фундаментальних взаємодій, а саме: гравітаційна, електромагнітна, сильна і слабка. Існування якої-небудь іншої взаємодії на даний момент не доведено.

Фотон перебуває частину часу у вигляді віртуальної частинки векторного мезона або віртуальної пари адрон-антиадрон. За рахунок цього явища фотон здатний брати участь у сильних взаємодіях. Свідченням участі фотона у сильних взаємодіях є процеси фотонародження лмезонів на протонах і нейтронах, а також численні утворення нуклонів на протонах і ядрах. Перетини процесів фотонародження нуклонів на протонах і нейтронах дуже близькі один до одного. Це пояснюється тим, що у фотона є адронна складова, за рахунок чого фотон бере участь у сильних взаємодіях.

Фотон не має електричного заряду і не розпадається спонтанно у вакуумі, стабільний. Може мати один із двох станів поляризації та описується трьома просторовими параметрами — складовими хвильового вектора, який визначає його довжину хвилі та напрямок поширення.

Фотони випромінюються у багатьох природних процесах, наприклад, при русі електричного заряду з прискоренням, при переході атома або ядра зі збудженого стану в стан із меншою енергією, або при анігіляції пари електрон-позитрон. При обернених процесах — збудження атома, народження електрон-позитронних пар — відбувається поглинання фотонів.

Якщо енергія фотона дорівнює  $E$ , то імпульс  $p$  пов'язаний з енергією співвідношенням  $E = cp$ , де  $c$  — швидкість світла (швидкість, з якою в будь-який момент часу рухається фотон як безмасова частинка). Для порівняння, для частинок з ненульовою масою спокою зв'язок маси та імпульсу з енергією визначається формулою  $E^2 = c^2 p^2 + m^2 c^4$ , як показано в спеціальній теорії відносності.

Спеціальна теорія відносності (СТВ) є фізичною теорією, яка належить Альберту Ейнштейну та була ним опублікована в 1905 році. Згідно цієї теорії усі фізичні закони мають однакове формулювання в усіх інерційних системах відліку. Такий підхід фактично замінює собою класичну механіку Ньютона.

Окрема або спеціальна теорія відносності не поширюється на рух частинок чи тіл в неінерційних системах, а також на гравітаційні сили. В 1916 році Альберт Ейнштейн опублікував нову узагальнену теорію відносності, яка змогла пояснити природу гравітації.

Класичні формули для енергії та імпульсу електромагнітного випромінювання можуть бути отримані виходячи із уявлень про фотони. Наприклад, тиск випромінювання здійснюється за рахунок передачі імпульсу фотонів тілу при їх поглинанні. Справді, тиск — сила, яка діє на одиницю

площі поверхні, а сила дорівнює зміні імпульсу, віднесеній до часу цього вимірювання.

В залежності від електричної та магнітної мультипольності системи зарядів, яка випромінила даний фотон, для фотона можливі стани з повними моментами імпульсу  $L = 1\hbar, 2L = 1\hbar, 2$  і парністю  $-1$  чи  $1$ . Розрізняють стани фотонів електричного та магнітного типу. Стан фотона з моментом  $l$  і парністю  $(-1)^L$  називається фотонним  $2^L$  — полем електричного типу, з парністю  $(-1)^{L+1}$  називається фотонним  $2^L$  — полем магнітного типу. Для позначення фотонів певної мультипольності спочатку пишеться буква для електричного мультиполя чи  $M$  для магнітного мультиполя і впритул до цієї букви пишеться цифра, яка дорівнює повному моменту. Електричний дипольний фотон позначається як, магнітний дипольний — , електричний квадрупольний фотон — , і т.д.

### 2.3 Принцип побудови сучасних сонячних панелей

Історично склалося, що сонячні батареї є вже другою спробою людства приборкати енергію Сонця та змусити її працювати для своїх потреб. Першою спробою були сонячні колектори або сонячні термальні електростанції, принцип дії яких полягав у виробництві електрики нагрітою до температури кипіння водою під сфокусованими сонячними променями.

Сонячні батареї виробляють електрику безпосередньо, що є набагато ефективнішим методом отримання енергії.



Рисунок 2.5 – Сонячна термальна електростанція м.Севілья (Іспанія)

Сонячні батареї складаються з фотоелементів, по суті напівпровідникових пристроїв, які перетворюють сонячну енергію в електричний струм безпосередньо. Процес при якому сонячна енергія перетворюється в електричної струм називають фотоелектричним ефектом.

Явище фотоефекту відкрив та дослідив французький фізик Олександр Едмон Беккерель ще в середині XIX. Перший діючий фотоелемент створив вчений Олександр Столетов вже через пів століття.

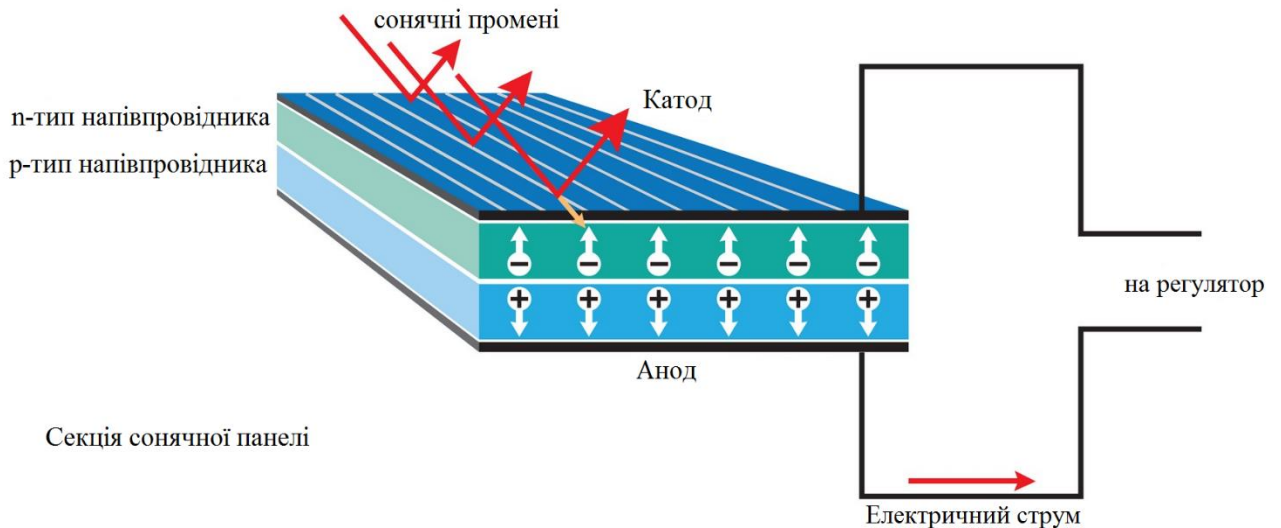


Рисунок 2.6 - Принцип роботи сонячної панелі

Напівпровідником називають матеріал, в атомах якого є зайві електрони (n-тип) чи дірки, тобто недостача електронів (р-тип). Напівпровідниковий фотоелемент складається з шарів з різною провідністю, зазвичай двох. В якості катода використовується шар n-типу (із зайвими електронами), а в як анод виступає шар р-типу (із недостачею електронів).

Вільні електрони з n-шару відриваються від своїх атомів, водночас шар р-типу захоплює вільні електрони. При явищі фотоелектричного ефекту промені світла вибивають електрони в n-шарі, після чого вони переміщуються в р-шар на порожні місця. В такий спосіб електрони рухаються по колу. Вони виходять з р-шару, потім проходячи через навантаження (наприклад акумулятор) та повертаючись знову в попереднє положення.

Селен став першим в історії матеріалом з дослідженими фотоелектричними властивостями. На його основі виготовляли фотоелементи в кінці XIX - на початку XX століття. Але зважаючи на мізерно малий ККД (менш ніж 1%), його застосування швидко виявили неефективним.

На заміну селено, для виробництва сонячних панелей, стали застосовувати кремній. Телекомунікаційна компанія Bell Telephone першою розробила фотоелемент на основі кремнія. Кремній до сьогоднішній день залишається найпоширенішим матеріалом для виробництва сонячних батарей.

Суттєвим недоліком застосування кремнію є те, що його очищення є процесом витратний, тому ведуться активні дослідження щодо альтернативних матеріалів, наприклад, сполук міді, галію, кадмію, індію та ін.

Для отримання вихідної потужності на достатньому рівні для живлення електроприладів, окремі фотоелементи об'єднують в електричні ланцюги формуючи сонячні батареї або так звані сонячні панелі.

Загалом сонячні батареї класифікуються за потужністю електрики, яку панель виробляється. В свою чергу потужність залежить від площі панелі та її конструкції. Наприклад, потужність потоку променів на екваторі може досягнути до 1 кВт, тоді як в середніх широтах при пасмурній погоді вона може знизитися в десять разів.

Найнижчим коефіцієнтом фотоелектричного перетворення характеризуються фотохімічні, аморфні та органічні фотоелементи. Для перших двох вказаних типів він рівний приблизно 10%, а для третього вказаного типу всього лише 5%. Це означає, що наприклад при потужності сонячних променів 500 Вт така сонячна панель на площі один квадратний метр буде продукувати 50 Вт та 25 Вт електроенергії відповідно.

На противагу вищевказаним типам фотоелементів виступають кремнієві сонячні панелі, тобто батареї на основі кремнієвих напівпровідників. Для панелей такого типу коефіцієнт фотоелектричного перетворення є на рівні 20%, а для сприятливих умов застосування може досягати і 25%. В результаті чого, потужність такої сонячної панелі площею один квадратний метр може досягати 125 Вт і більше.

Конкурувати за продуковану потужністю з кремнієвими сонячними батареями можуть хіба що панелі на основі арсеніду галію. На основі цього елемента можна створювати багатошарові фотоелементи з продуктивністю понад 30%, тобто до 150 Вт електрики на один квадратний метр.

В сучасному виконанні сонячні панелі існують у вигляді мініатюрних платівок потужністю до 10 Вт (для зручної транспортування), а також

застосовують великі листи на потужність 200 Вт і більше, для стаціонарного використання.



Рисунок 2.7 - Безпілотний літак, який здатний пролетіти від східного до західного узбережжя США на сонячній енергії (розроблений NASA Ames Research Center)

Звичайно, на продуктивність роботи сонячних батарей можуть впливати ряд факторів. Наприклад, при зростанні температури знижується продуктивність тихоокеанський фотоелементів, що є дивним, оскільки сонячні батареї встановлюють в жарких країнах, де відсоток сонячних днів є максимальний. Тому в цьому питанні виникає своєрідна палиця з двох кінців.

Сонячна батарея побудована із окремих сонячних елементів, що з'єднуються між собою послідовно та паралельно з метою збільшення вихідних параметрів: струму, напруги, потужності.

При послідовному з'єднанні збільшується вихідна напруга, а при паралельному зростає вихідний струм. Якщо завдання стоїть збільшити струм та напругу водночас, тоді комбінують два способу з'єднання в одній панелі. Крім того, при комбінованому способі з'єднання вихід з ладу одного сонячного

елемента не призведе до виходу з ладу всієї панелі вцілому, що суттєво підвищує надійність роботи сонячної батареї.

Елементи сонячної батареї шунтуються діодами. Найчастіше їх є чотири, тобто по одному, на кожну чверть батареї. Діоди виконують функцію запобігання виходу з ладу кожної частини батареї окремо, якщо з якоїсь причини ця частина виявиться затемненою. Батарея при цьому буде генерує на 25% меншу потужність, ніж при повному освітленні Сонцем всієї поверхні панелі.

За умови відсутності діодів, сонячні елементи можуть перегріватися та навіть виходити з ладу, оскільки вони на час затемнення іншої частини батареї перетворюються у споживачів струму, а при монтуванні діодів, вони шунтуватимуться і струм через них не протікатиме взагалі. Діоди повинні бути за своїми характеристиками низькоомними, для того, щоб зменшити падіння напруги на них.

## 3 РОЗРОБЛЕННЯ ТА ОЦІНЮВАННЯ АДЕКВАТНОСТІ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПОТУЖНОСТІ СОНЯЧНОЇ ПАНЕЛІ

### 3.1 Розроблення математичної моделі потужності сонячної панелі

Створення нових ефективних фотоелектричних елементів є одним із актуальних завдань розвитку сонячної енергетики. В останні роки фотоелектричні елементи використовуються в системах водопостачання, насосних і кондиціонерних станцій у віддалених та ізольованих районах, де лінії електропередач недоступні або економічно недоцільні. У зв'язку з цим оцінка ефективності їх роботи є досить важливою.

Необхідно мати можливість розрахувати вихідні залежності сонячних панелей під впливом різних факторів навколишнього середовища, а також порівняти ефективність використання сонячних панелей виготовлених з різних матеріалів, та оцінити поведінку фотоелектричних перетворювачів для різних режимів роботи. Для ефективного використання всіх фотоелектричних елементів слід мати дані про значення точки їх максимальної потужності та забезпечити такий режим, при якому продукована потужність при зміні умов навколишнього середовища була максимально можливою. При відпрацюванні сонячних панелей використовуються імітатори сонячних батарей, які дозволяють відтворювати характеристики сонячних панелей під різноманітними зовнішніми впливами. Сонячна панель будується з серії послідовно-паралельної комбінації фотоелектричних сонячних елементів

Найефективнішим методом дослідження сонячних панелей є їх імітаційне моделювання. При такому підході, на відміну від натурального експерименту, існує можливість змодельовати та врахувати вплив великого числа параметрів на характеристики сонячних панелей, також такий підхід дозволяє скоротити час і кошти при проведенні необхідних досліджень та подальших розрахунків.

Фотоелектрична модель генератора зазвичай базується на електричних його характеристиках, тобто, поточне відношення напруги однієї комірки під різними рівнями сонячного випромінювання та при різних температурах.

В основу математичного моделювання покладено класичну модель фотоперетворювача з р-n переходом. Найважливіша характеристика, за якою оцінюють сонячні панелі звичайно це її потужність.

Потужність електричного струму — це фізична величина, яка характеризує швидкість передачі чи перетворення електричної енергії в інший вид енергії.

Електрична напруга є відношення роботи, яку виконує електричне поле при перенесенні електричного заряду з деякої точки А в точку В, до величини цього заряду. Тобто, фактично електрична напруга рівна роботі із перенесення одиничного заряду між двома умовними точками.

Робота, яку виконують заряди при переміщенні від початку до кінця ділянки кола, дорівнює сумарній роботі всіх одиничних зарядів.

Потужність – це виконана робота за одиницю часу:

$$P_{AB} = \frac{A}{\Delta t} \quad (3.1)$$

де А – робота при русі заряду з т.А до т.В;  $\Delta t$  – час за який виконувалась робота.

Для одиничного заряду на ділянці відрізка АВ:

$$P_{AB} = \frac{U}{\Delta t} \quad (3.2)$$

де U – напруга на деякому відрізку АВ.

Для всіх перенесених на відрізку АВ зарядів:

$$P_{AB} = \frac{U}{\Delta t} \cdot Q = U \cdot \frac{Q}{\Delta t} \quad (3.3)$$

де Q – перенесений сумарний заряд на відрізку АВ.

Оскільки струм є кількістю зарядів перенесених через певну площу за одиницю часу, тобто:  $I = \frac{Q}{\Delta t}$ , тоді:

$$P_{AB} = U \cdot I \quad (3.4)$$

Вважаючи час перенесення заряду нескінченно малим, можна зробити припущення, що величина напруги та струму також, за цей час, зміняться мізерно мало.

Тепер варто більш детально розібратись з напругою та струмом.

Для початку нашого моделювання розглянемо електричний струм. Електричний струм характеризується густиною і силою. Густиною електричного струму називають векторну величину, яка розраховується, як величина заряду, що протікає через одиницю площі, за одиницю часу. Сила струму, який протікає через деякий провідник із площею поперечного перерізу  $S$ , є величиною, яка чисельно дорівнює кількості заряду  $\Delta q$ , який переміщено через переріз провідника за певний проміжок часу  $\Delta t$ .

Одиницею вимірювання сили струму в міжнародній системі СІ є ампер (позначається: А), густина струму в свою чергу вимірюється в А/м<sup>2</sup>.

За законом Ома, потужність дорівнює:

$$P = I \cdot I \cdot R \quad (3.5)$$

де  $I$  – це електричний струм на виході панелі,  $R$  – опір шунта панелі.

Опір шунта сонячної батареї величиною незмінною, точніше зазначити, що її зміни будуть незначними за час роботи сонячної панелі, загалом в даному випадку її можна вважати константою.

Тоді вираз для визначення сили струму буде мати вигляд [7]:

$$I = I_{\text{ф.с.}} - I_{\text{насичення}} \quad (3.6)$$

де  $I_{\text{ф.с.}}$  – величина фотоструму;  $I_{\text{насичення}}$  – струм насичення.

Значення струму насичення буде незмінним в процесі роботи сонячної панелі. Ця величина задається виробником, та він залежить від конструкції панелі, матеріалу з якого вона виготовлена та способів з'єднання комірок.

Фотострум розраховується за наступним виразом:

$$I_{\text{ф.с.}} = I_{\text{к.замк.}} \cdot \frac{E_a}{E_c} + a(\Delta T_p) \quad (3.7)$$

де  $I_{\text{к.замк.}}$  – це величина струму при короткому замиканні холостого ходу;

$E_a$  – інсоляція, яку отримує панель, Вт/м<sup>2</sup>;

$E_c$  – інсоляція при нормальних умовах (1000 Вт/м<sup>2</sup>);

$a$  – температурний коефіцієнт величини струму;

$\Delta T_n$  – різниця наявної та нормальної температур.

Далі розглянемо вплив температури на величину струму в сонячних панелях. На власну температуру панелі будуть мати вплив перш за все температура навколишнього середовища, а також величина отримуваної інсоляції. Також, значний вплив чинитиме наявність та інтенсивність вітеру, та інтенсивність передача тепла від сонячної панелі до навколишнього середовища при умові, що навколишнє середовище має меншу температуру ніж поверхня панелі.

Враховуючи те, що зміни струму буде спричиняти зміна температури, тобто відхилення її значення від нормальної, вираз для знаходження різниці буде мати наступний вигляд [8]:

$$\Delta T_n = E_a \cdot e^{c+b \cdot v} + T_a - T_{н.у.} \quad (3.8)$$

де  $T_{н.у.}$  – значення нормальної температури, тобто 25°C;

$T_a$  – значення температури навколишнього середовища, °C;

$c$  – коефіцієнт, який встановлює максимальну температуру для коли низька швидкість вітру;

$b$  – коефіцієнт, який враховує зміну температури при значній швидкості вітру;

$v$  – величина швидкості вітру, м/с.

Коефіцієнт  $c$  вважають коефіцієнтом для пасивної передачі тепла від сонячної панелі в навколишнє середовище, оскільки в такому випадку теплова енергія передається без вітру.

Залишилось розглянути сонячне випромінювання, що має найбільший вплив на утворення струму в сонячних панелях, формула для визначення інсоляції має вигляд [9]:

$$E_a = E_{пр.} \cdot \frac{\cos \varepsilon}{\cos \theta} + E_{роз.} \cdot \frac{(1 + \cos \beta)}{2} + \rho(E_{пр.} + E_{роз.}) \cdot \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (3.9)$$

де  $E_{\text{пр.}}$  – це інтенсивність прямого сонячного випромінювання, в Вт/м<sup>2</sup>;  
 $E_{\text{роз.}}$  – це інтенсивність розсіяного сонячного випромінювання, в Вт/м<sup>2</sup>;  
 $\rho$  – коефіцієнт відбивання поверхонь;  
 $\beta$  – кут нахилу панелі по відношенню до горизонту;  
 $\varepsilon$  – кут між нормаллю та нахилом до Сонця;  
 $\theta$  – кут між нахилом панелі до Сонця та зенітом.

Отже сонячна інсоляція впливає на утворення струму в сонячній панелі двома способами, по перше це під час прямого сонячного випромінювання, а по друге – при розсіяному сонячному світлі. Тому потужність сонячної панелі буде також залежати і від навколишніх об'єктів, зокрема їхнього коефіцієнта відбиття сонячних променів.

Кут нахилу панелі між Сонцем та нормаллю можна розрахувати за наступним виразом:

$$\cos \varepsilon = \sin(\varphi - \beta) \cdot \sin \delta + \cos(\varphi - \beta) \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega \quad (3.10)$$

де  $\varphi$  – значення широти місцевості, град.;

$\beta$  – нахил сонячної панелі по відношенню до горизонту, град.;

$\delta$  – кут нахилу Сонця, град.;

$\omega$  – часовий кут руху Сонця, град.

Кут нахилу між Сонцем та зенітом можна розрахувати за виразом:

$$\cos \theta = \sin \delta \cdot \sin \varphi + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \omega \quad (3.11)$$

Математична модель генерованої потужності сонячної панелі показує, що значна частина показників, які впливають на її потужність, залежить від виробника та комплектації, зокрема, з якими показниками якості виробник підходить до виготовлення панелі, з якою ступеню очистки буде використаний в панелі кремній, та ін. Вказані показники зазвичай не зазнають великих змін впродовж року, тому змінювати свій вплив на потужність сонячної панелі не будуть. Інші ж показники, до яких зокрема належить швидкість вітру, температура середовища, альbedo навколишнього середовища, інсоляція, мають мінливий характер та безпосередній вплив на потужність роботи сонячної панелі.

Сонячне випромінювання має найбільший вплив при утворенні струму в сонячній панелі, а відповідно і на її потужність.

### 3.2 Перевірка адекватності розробленої моделі

При апробації розробленої моделі перш за все слід виконати розрахунки за даною моделлю, також з допомогою програми, яка моделює роботу сонячної панелі. Для моделювання проведених розрахунків було обрано сонячну панель Bosch Solar Module c-Si M 60, та наступні вихідні дані:

$$I_{\text{насихчення}} = 0,56, \text{ A};$$

$$I_{\text{к.замк.}} = 8,92, \text{ A};$$

$$a = 0,00031, \text{ A/K};$$

$$\varphi = 48^\circ ;$$

$$\rho = 0,15 ;$$

$$E_{\text{пр.}} = 500 \text{ Вт/м}^2;$$

$$E_{\text{роз.}} = 250 \text{ Вт/м}^2;$$

$$T_a = 30 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$c = -3,473;$$

$$b = -0,0594;$$

$$v_{\text{в}} = 5 \text{ м/с.}$$

Змінними залишилися нахил сонячної панелі по відношенню до горизонту, нахил Сонця та часовий кут руху Сонця.

Проведено розрахунок значення струму за розробленою математичною моделлю та в програмі, яка моделює сонячну панель.

У першому випадку було випадково обрано наступні значення:

$$\delta = 46; \omega = 35; \beta = 8.$$

При моделюванні за допомогою програми отримано наступне значення струму за формулою (13):

$$I_{\text{пр}} = 4,3364 - 0,56 = 3,7764, \text{ A.}$$

При розрахунку з допомогою розробленої моделі струм становив:

$$I_m = 4,3367 - 0,56 = 3,7767, \text{ A.}$$

У другому випадку було випадково обрано наступні значення:

$$\delta = 44; \omega = -76; \beta = 17.$$

При моделюванні за допомогою програми отримано наступне значення струму:

$$I_{\text{пр}} = 3,5789 - 0,56 = 0,0189, \text{ A.}$$

При розрахунку з допомогою розробленої моделі струм становив:

$$I_m = 3,5788 - 0,56 = 0,0188, \text{ A.}$$

У третьому випадку було випадково обрано наступні значення:

$$\delta = 37; \omega = -38; \beta = 78.$$

При моделюванні за допомогою програми отримано наступне значення струму:

$$I_{\text{пр}} = 1,5201 - 0,56 = 0,9601, \text{ A.}$$

При розрахунку з допомогою розробленої моделі струм становив:

$$I_m = 1,5202 - 0,56 = 0,9602, \text{ A.}$$

У четвертому випадку було випадково обрано наступні значення:

$$\delta = 79; \omega = -70; \beta = 82.$$

При моделюванні за допомогою програми отримано наступне значення струму:

$$I_{\text{пр}} = 0,93673 - 0,56 = 0,37673, \text{ A.}$$

При розрахунку з допомогою розробленої моделі струм становив:

$$I_m = 0,93673 - 0,56 = 0,37673, \text{ A.}$$

У п'ятому випадку було випадково обрано наступні значення:

$$\delta = 70; \omega = 63; \beta = 4.$$

При моделюванні за допомогою програми отримано наступне значення струму:

$$I_{\text{пр}} = 5,1877 - 0,56 = 4,6277, \text{ A.}$$

При розрахунку з допомогою розробленої моделі струм становив:

$$I_m = 5,1876 - 0,56 = 4,6276, \text{ A.}$$

Для підтвердження правильності результатів моделювання визначимо адекватність моделі:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(I_M - I_{mp})^2}{n-1}} \quad (3.13)$$

$$\sigma = 0,00017 \text{ А.}$$

Достовірність математичної моделі розраховується за формулою:

$$R = 1 - \frac{\sum(I_M - I_{mp})^2}{\sum(I_M^2) - \frac{1}{n}\sum(I_M)^2} \quad (3.14)$$

$$R=0.99$$

Моделювання у програмі даної математичної моделі, на усіх можливих кутах повороту панелі до сонця, дало змогу побудувати наступний графік:

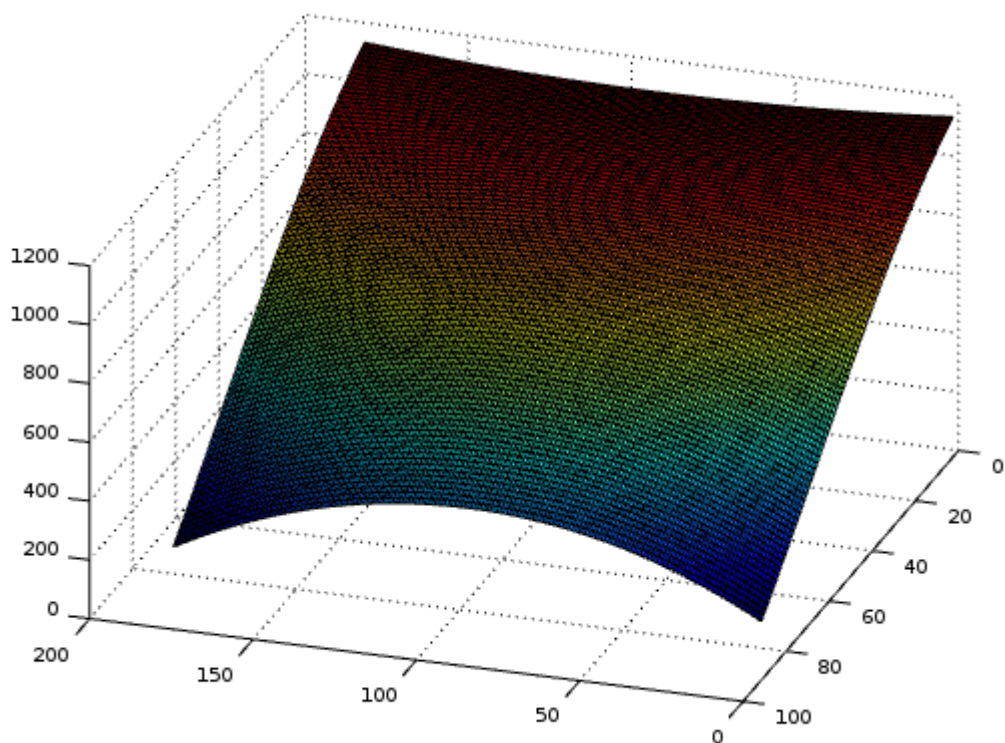


Рисунок 3.1 - Графік залежності інсоляції від кутів нахилу панелі до Сонця

Отже, на основі результатів моделювання очевидним є те, що програмне забезпечення із достатньою високою точністю описує розроблену математичну модель і може застосовуватись для виконання проміжних розрахунків.

### **3.3 Аналіз основних факторів впливу на генерацію потужності сонячних панелей.**

На роботу сонячних панелей, має вплив низка різноманітних факторів, що можуть сприяти, чи знижувати утворенню фотоструму. Їх варто розділити на 3 категорії: характеристики, що закладені виробником панелі; вплив навколишнього середовища; вплив додаткового обладнання.

Перше з чого починається будь-яке виробництво, в тому числі і виробництво сонячних батарей – це підготовка сировини. Основною сировиною в даному випадку служить кремній, а точніше кварцовий пісок певних порід. Технологія підготовки сировини складається з 2 процесів: високотемпературного плавлення; синтезу, що супроводжується додаванням різних хімічних речовин. За рахунок додавання різних хімічних домішок, може підвищуватись ККД панелі.

Другий етап технології являє собою процес пайки пластин в секції, з подальшим формуванням з цих секцій блоків на склі. Для перенесення готових секцій на поверхню скла використовують вакуумні держачи. Це необхідно для того, щоб виключити можливість механічного впливу на готові сонячні елементи. Секції, як правило, формують з 9 або 10 сонячних елементів, а блоки – з 4 або 6 секцій. Проведення якісної пайки пластин, і об'єднання пластин в секції, а секцій в свою чергу у блоки, теж має вплив на роботу панелі.

Наступний етап – це етап ламінування. Спаяні блоки фотоелектричних пластин ламінують етиленвінілацетатною плівкою і спеціальним захисним покриттям. Використання комп'ютерного управління дозволяє стежити за рівнем температури, вакууму і тиску. А також програмувати необхідні умови ламінування в разі використання різних матеріалів.

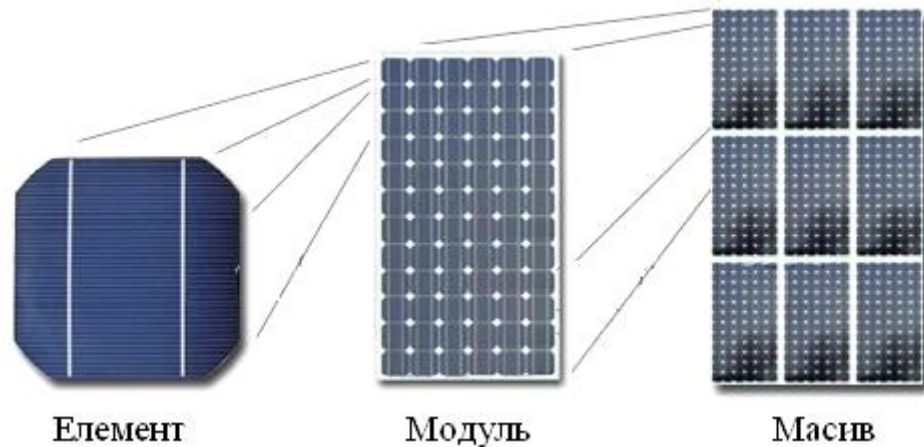


Рисунок 3.2 Структура сонячної панелі.

Останній етап виробництва сонячних панелей – це монтування. На цьому етапі виготовлення блоків сонячних батарей монтується алюмінієва рама і сполучна коробка. Для надійного з'єднання коробки і модуля використовується спеціальний герметик-клей. Після чого сонячні батареї проходять тестування, де вимірюють показники струму короткого замикання, струму і напруги точки максимальної потужності і напруги холостого ходу. Для отримання необхідних значень сили струму і напруги можливе об'єднання не тільки сонячних елементів, але і готових сонячних блоків між собою.

На кожному з перелічених етапів виробництва, виробник закладає можливості панелі, що в подальшому будуть впливати, на її експлуатацію.

Навколишнє середовище здійснює найбільший вплив на функціонування панелі. Як уже зазначалось при побудові математичної моделі, температура, швидкість вітру, коефіцієнт альбедо, широта розміщення, день року, година, кути нахилу до оточуючого середовища, до сонця, це все перелічене має прямий зв'язок із фотострумом, що генерується сонячною панеллю. Для прикладу кут нахилу до оточуючого середовища, показує скільки розсіяного сонячного випромінювання поглинається панеллю з оточуючого середовища. А от широта, на якій розміщується дозволяє розрахувати на який кут до горизонту необхідно повернути панель на південь, щоб вона отримала якомога більше сонячного випромінювання. Також надзвичайно важливим є затінення

окремих блоків панелі, тому, що вони перестають генерувати струм, і навіть починають його споживати, та нагріватись, власне тому, панелі потрібно чистити від снігу й пилу, для цього розробляють спеціальні автоматичні системи, що з певний періодом, очищують панель.

Також важливим у роботі сонячної панелі є структурні елементи, що отримують потужність та її зберігають. Оскільки, в залежності від їхніх характеристик, буде засвоюватись потужність із сонячної панелі. І надзвичайно важливо правильно підібрати усі елементи, щоб вони разом функціонували так би мовити у гармонії. Адже акумулятори, що зберігають енергію з панелі, можуть не вмщати в себе отримвану потужність, яка буде витрачатись на нагрівання елементів, і витрачатись не раціонально, також можливий зворотній ефект, коли сонячна панель не має змоги підтримувати заряд в акумуляторі на рівні 20%, що негативно впливає на його роботу, та тривалість його служби. Не менш важливим є MPPT-контролер, що слідкує за напругою та струмом, що створює панель, та тримає їх у певному діапазоні.

## ВИСНОВОК

Енергію Сонця люди почали використовувати здавна, ще стародавні єгиптяни освітлювали піраміди з допомогою дзеркал та сонця, окремі племена в Південній Америці готували їжу з допомогою сонячної кухні, теплова маса матеріалів зберігає сонячну енергію протягом дня, і звільняє цю енергію коли стає холодніше. Люди здавна навчились використовувати сонячну енергію і вона досить проста у використанні. З розвитком людства сонячна кухня, з використанням дзеркал, удосконалилась у сонячні колектори.

У даній роботі проаналізовано фізичні, а також математичні моделі сонячних панелей, розглянуто основи перетворення енергії у панелях, їхні принципи функціонування.

Розроблена модель враховує вплив температури навколишнього середовища і температури, що отримала панель у процесі функціонування, й вплив вітру на температуру панелі, також вона враховує вплив часу доби, дня року, кутів нахилу панелі на південь, на сонце, можливостей світловідбивання оточуючого середовища. Врахований вплив характеристик самої панелі, та її допоміжних елементів функціонування, на отримувану споживачем потужність.

Проведена апробація даної моделі вказує на можливість її застосування для моделювання функціонування панелі при різних характеристиках навколишнього середовища.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. В. М. Коваль, «Розрахунок зонного моделю нанокристалічного кремнію», Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології 2009р, т. 7, № 4, сс. 987-998.
2. В. Г. Литовченко, Б. М. Романюк, В. Г. Попов, В. П. Мельник, О. С. Оберемок, В. П. Кладько, І. П. Лісовський, В. В. Стрельчук, В. В. Черненко, В. О., «Шаповалов Комплексні дослідження кристалічного матеріалу для сонячної енергетики», Металлофиз. новейшие технол. / Metallofiz. Noveishie Tekhnol. 2011р, т. 33, № 7, сс. 873-898.
3. D.L. King, W.E. Boyson, J.A. Kratochvill, «Photovoltaic Array Performance Model», SANDIA REPORT SAND2004-3535 Unlimited Release Printed December 2004.
4. D. King, J. Kratochvil, and W. Boyson, "Temperature Coefficients for PV Modules and Arrays: Measurement Methods, Difficulties, and Results," 26th IEEE PV Specialists Conference, 1997, pp. 1183-1186.
5. Пінкевич І. П., Сугаков В. Й. Теорія твердого тіла. - К. и: ВПЦ "Київський університет", 2006. - 333 ис.
6. Clauser, J. F. (1974). Experimental distinction between the quantum and classical field-theoretic predictions for the photoelectric effect. Phys. Rev. D 9: 853-860.
7. Grangier, P.; Roger G.; Aspect A. (1986). Experimental Evidence for a Photon Anticorrelation Effect on a Beam Splitter: A New Light on Single-Photon Interferences. Europhysics Letters 1: 501-504.
8. Білий М. У., Охріменко Б. А. Атомна фізика. - К.: Знання, 2009. 559с.
9. D. King, W. Boyson, and B. Hansen, "Improved Accuracy for Low-Cost Solar Irradiance Sensors," 2nd World Conference on PV Solar Energy Conversion, Vienna, 1998, pp. 2001-2004.

10.D. King, T. Hund, W. Boyson, and J. Kratochvil, "Experimental Optimization of the Performance and Reliability of Stand-Alone Photovoltaic Systems," 29th IEEE PV Specialists Conference, 2002.