

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії
(повна назва)

Кафедра Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв
(повна назва)

АТЕСТАЦІЙНА РОБОТА

Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)

Дослідження захисних просвітлюючих покриттів для сонячних перетворювачів
(тема)

Виконав:
студент 2 курсу, групи ЕППм-19-1 _____
Шелковський О.В.
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 171 «Електроніка»

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма «Електронні прилади та пристрої»

Керівник доц. Галат О.Б.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри

(підпис)

Бондаренко І.М.
(прізвище, ініціали)

2020 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії _____

Кафедра Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв

Рівень вищої освіти _____ другий (магістерський)

Спеціальність _____ 171 «Електроніка»

Тип програми _____ освітньо-професійна

Освітня програма _____ «Електронні прилади та пристрої»

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри

_____ І.М.Бондаренко

« _____ » _____ 2020р.

ЗАВДАННЯ НА АТЕСТАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові _____ Шелковському Олегу Васильовичу _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи _____ Дослідження захисних просвітлюючих покриттів для сонячних перетворювачів

затверджена наказом по університету від _____ 20__ р. № _____

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 10.12. 2020 р.

3. Вихідні дані до роботи: покриття має виконувати наступні функції:

1. Захост від механічних впливів.

2. Захист від факторів зовнішнього середовища (температура, опади).

3. Забезпечити мінімум відбиття випромінювання у діапазоні 480-600 нм.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі

1) Теоретичне підґрунтя ефекту просвітлення.

2) Огляд сонячних батарей з точки зору зовнішніх факторів впливу.

3) Матеріали просвітлюючих та захисних покриттів

4) Вибір варіантів виконання просвітлюючого покриття.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) _____ Презентація

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Пошук загальної інформації по темі	11.11.2020	
2	Формування вступу	14.11.2020	
3	Аналіз фізики ефекту просвітлення	15.11.2020	
4	Формування першого розділу роботи	16.11.2020	
5	Аналіз конкретних конструкцій сонячних батарей	18.11.2020	
6	Формування другого розділу роботи	21.11.2020	
7	Розробка робочого варіанту покриття	24.11.2020	
8	Формування третього розділу роботи	25.11.2020	
9	Розробка методики розрахунків характеристик покриття	29.11.2020	
10	Підготовка четвертого та п'ятого розділу роботи	03.12.2020	
11	Оформлення роботи згідно вимог	07.12.2020	
12	Подання роботи	10.12.2020	

Дата видачі завдання 09 .11. 2020 р.

Студент _____
(підпис)

Керівник роботи _____
(підпис) _____
(посада, прізвище, ініціали)

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	8
ВСТУП.....	9
1. СОНЯЧНІ ПАНЕЛІ. ОБСЛУГОВУВАННЯ. ПЕРЕВАГИ.....	12
1.1 Як працюють сонячні панелі.....	12
1.2 Типи сонячних панелей	13
1.3 ККД сонячних панелей	15
1.4 Накопичувальні системи	16
1.5 Переваги сонячних панелей	18
2. ОБСЛУГОВУВАННЯ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ.....	20
2.1 Доступ та доступність	20
2.2 Види процесів очищення сонячних батарей	22
2.3 Частота очищення сонячної панелі.....	26
3. НЕОБХІДНІСТЬ ПРОСВІТЛЮЮЧИХ ПОКРИТТІВ.....	28
3.1 Основні фактори дії просвітлюючого покриття.....	28
3.2 Принцип дії просвітлюючого покриття.....	30
3.3 Просвітлення оптичних систем.....	34
4. МАТЕРІАЛИ ДЛЯ ПРОСВІТЛЮЮЧИХ ОПТИЧНИХ ПОКРИТТІВ.....	37
4.1 Типи покриттів і їх призначення.....	37
4.2 Прозорі провідні оксидні покриття.....	38
4.3 Скляне покриття сонячних батарей.....	39
4.4 Загартоване скло для сонячних батарей.....	41
4.5 Антиблікове скло підвищеної прозорості.....	44
4.6 Подвійне скло «сендвіч».....	45
5. ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРАХУНКИ ПРОСВІТЛЮЮЧИХ ПОКРИТТІВ.....	46
5.1 Опис функціонування одношарового просвітлюючого покриття.....	46

5.2	Опис одношарових чвертьхвильових інтерференційних покриттів.....	47
5.3	Двошарове та багатошарове просвітлення.....	48
5.4	Придушення відображення з використанням кругового поляризатора.....	50
5.5	Методика розрахунків просвітлюючих покриттів.....	51
	ВИСНОВКИ.....	54
	ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	55
	ДОДАТОК 1.....	57
	ДОДАТОК 2.....	58

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка містить: 56 с., 16 рис., 15 джерел, 2 додатки.

СОНЯЧНІ ПАНЕЛІ, НАКОПИЧУВАЛЬНІ СИСТЕМИ, ПРОЦЕСИ ОЧИЩЕННЯ, ПРОСВІТЛЮЮЧІ ОПТИЧНІ ПОКРИТТЯ, ОКСИДНІ ПОКРИТТЯ, АНТИБЛІКОВЕ СКЛО

Об'єктом роботи є захисні просвітлюючі покриття для сонячних перетворювачів.

У роботі виконано огляд сонячних панелей, накопичувальних систем, процесів очищення сонячних панелей, просвітлюючих покриттів для сонячних перетворювачів.

Мета роботи – вивчити властивості захисних і просвітлюючих покриттів для кремнієвих фотоелектричних перетворювачів доступних в Україні технологій, запропонувати просвітлююче покриття, що забезпечує максимальну ефективність використання сонячного випромінювання в різних умовах експлуатації.

Для досягнення зазначеної мети необхідно вирішити такі завдання :

- аналіз існуючих просвітлюючих покриттів для захисних стекол сонячних елементів і оцінка їх ефективності;
- способи створення просвітлюючих покриттів і вибір найбільш підходящого для досягнення поставленої мети;
- вибір конструкції просвітлюючого покриття;
- розробка критерію оцінки ефективності просвітлюючого покриття;
- розрахунок параметрів покриття для використання в різних географічних і кліматичних умовах.

ABSTRACT

The explanatory note contains: _56 p., 16_fig.,14_sources, 2 appendices.

SOLAR PANELS, ACCUMULATORY SYSTEMS, CLEANING PROCESSES, ENLIGHTENING OPTICAL COATINGS, OXIDE COATINGS, ANTIBLICAL GLASS

The object of work is protective illuminating coatings for solar converters. The paper reviews solar panels, storage systems, solar panel cleaning processes, illuminating coatings for solar converters.

The purpose of the work is to study the properties of protective and illuminating coatings for silicon photoelectric converters of technologies available in Ukraine, to offer an illuminating coating that provides maximum efficiency of solar radiation use in different operating conditions.

To achieve this goal it is necessary to solve the following tasks:

- Analysis of existing translucent coatings for protective glasses of solar cells and evaluation of their effectiveness
- Ways to create illuminating coatings and choosing the most suitable to achieve this goal.
- The choice of the design of the brightening coating.
- Development of a criterion for evaluating the effectiveness of the brightening coating.

Calculation of coating parameters for use in different geographical and climatic conditions.

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ІТО – Indium tin oxide (Оксид індія-олова)

АКБ – акумуляторна батарея

ДБЖ – джерело безперебійного живлення

ЕлЕ – електродинамічні екрани

ККД – коефіцієнт корисної дії

ППО – прозорі провідні оксиди

ВСТУП

Розвиток сонячної енергії сягає понад 100 років. У перші дні сонячна енергія використовувалась головним чином для виробництва пари, яку потім можна було використовувати для керування машинами. Але лише відкриття "фотоелектричного ефекту" Едмоном Беккерелем дозволило перетворити сонячне світло на сонячну електричну енергію. Потім відкриття Беккереля призвело до винаходу Чарльзом Фріттом у 1893 році першої справжньої сонячної батареї, яка була утворена покриттям листів селену тонким шаром золота. І з цього скромного початку виникне пристрій, який ми сьогодні знаємо як сонячну панель (рис. 1).



Рисунок 1 – Сонячні панелі

Рассел Ол, американський винахідник з фонду оплати праці Bell Laboratories, запатентував перший у світі кремнієвий сонячний елемент у 1941р. Винахід Ола призвів до виробництва першої сонячної панелі в 1954 року цією ж компанією. Сонячні панелі знайшли своє перше загальнодоступне

використання в космічних супутниках. Для більшості людей перша сонячна батарея в їх житті, ймовірно, була вбудована в їх новий калькулятор - приблизно в 1970-х роках.

Сьогодні сонячні панелі та повні системи сонячних панелей використовуються для живлення найрізноманітніших програм. Так, сонячні панелі у вигляді сонячних батарей все ще використовуються в калькуляторах. Однак вони також використовуються для забезпечення сонячною енергією цілих будинків та комерційних будівель, таких як штаб-квартира Google у Каліфорнії.

Для регіонів з низькою інтенсивністю сонячного випромінювання актуальним завданням є збільшення ефективності роботи сонячних батарей. Це, зокрема, досягається за рахунок нанесення просвітлюють покриттів на захисні скла або безпосередньо на фронтальну поверхню сонячних елементів.

Інженери і виробники сонячних елементів вже визначили, що максимальна ефективність сонячних елементів досягається при такому положенні, коли сонячні промені перпендикулярні їх поверхні. Залишається відкритим питання, яка ефективність сонячних елементів при відмінних від нормального кута падіння, і яка залежність між кутом падіння і величиною вироблюваної при цьому енергії. Запропоновані в літературі критерії оцінки ефективності засновані або на практичних випробуваннях елементів в різних умовах (оцінюється значення струму короткого замикання), або на теоретичних співвідношеннях, що враховують втрати на відбиття в сонячному елементі або зміну потоку сонячного випромінювання зі зміною географічної широти. Таким чином, актуальною є задача створення такого критерію, який би об'єднував в собі всі або більшість зазначених факторів.

В останні роки спостерігається інтерес до колись широко поширеного методу нанесення покриттів - золь-гель технології. Експлуатаційні характеристики одержуваних з його допомогою покриттів перевершують ті, що забезпечують вакуумні методи. Такі покриття задовольняють вимогам, що

пред'являються до захисних стекол сонячних елементів, що зазнають агресивну дію навколишнього середовища.

Використання золь-гель методу відкриває широкі можливості для створення просвітлюючих покриттів. Незважаючи на те, що цим методом вже виповнилося понад півстоліття, потенціал його до кінця не розкритий і розробка покриттів на його основі як і раніше є актуальним завданням.

Метою даної роботи є створення просвітлюючого покриття, що забезпечує максимальну ефективність використання сонячного випромінювання в різних умовах експлуатації.

Для досягнення зазначеної мети необхідно вирішити такі завдання :

- аналіз існуючих просвітлюючих покриттів для захисних стекол сонячних елементів і оцінка їх ефективності;
- способи створення просвітлюючих покриттів і вибір найбільш підходящого для досягнення поставленої мети;
- вибір конструкції просвітлюючого покриття;
- розробка критерію оцінки ефективності просвітлюючого покриття;
- розрахунок параметрів покриття для використання в різних географічних і кліматичних умовах;
- виготовлення експериментальних зразків покриттів і вимір їх властивостей.

1 СОНЯЧНІ ПАНЕЛІ. ОБСЛУГОВУВАННЯ. ПЕРЕВАГИ

1.1 Як працюють сонячні панелі

Панелі сонячних батарей збирають чисту відновлювану енергію у вигляді сонячного світла і перетворюють його в електрику, яка потім може використовуватися для забезпечення електричних навантажень. Сонячні панелі складаються з декількох окремих сонячних елементів, які самі складаються з шарів кремнію, фосфору (який забезпечує негативний заряд) і бору (який забезпечує позитивний заряд). Панелі сонячних батарей поглинають фотони і при цьому ініціюють електричний струм. Отримана енергія, яка утворюється від фотонів, що вражають поверхню сонячної панелі, дозволяє електронам вибиватися з атомних орбіт і випускатися в електричне поле, генероване сонячними елементами, які потім тягнуть ці вільні електрони в напрямлений струм. Весь цей процес відомий як фотоелектричний ефект.

У добре збалансованій мережевій конфігурації сонячна батарея генерує енергію вдень, яка потім використовується вдома вночі. Програми мережевого обліку дозволяють власникам сонячних генераторів отримувати зарплату, якщо їх система виробляє більше енергії, ніж необхідна в будинку. У позамережевих сонячних додатках - акумуляторна батарея, контролер заряду та, в більшості випадків, інвертор є необхідними компонентами. Сонячна батарея передає електроенергію постійного струму через контролер заряду в банк акумуляторів. Потім живлення від акумуляторної батареї подається на інвертор, який перетворює постійний струм у змінний струм, який можна використовувати для приладів, що не мають постійного струму. За допомогою інвертора масиви сонячних панелей можуть мати розміри, що відповідають найвищим вимогам щодо електричного навантаження. Струм змінного струму може використовуватися для живлення навантажень у будинках чи комерційних будівлях, рекреаційних транспортних засобах та човнах,

віддалених кабінах, котеджах або будинках, дистанційному керуванні рухом транспорту, телекомунікаційному обладнанні, контролі потоку нафти та газу та багато іншого. Розглядаючи принцип роботи сонячної батареї, відзначимо, що в конструкції модулів передбачено два типи напівпровідників:

- n-шар - із зайвими електронами;
- p-шар - з недостатньою кількістю електронів.

При попаданні променів сонця на перший шар електрони залишають атоми і переміщуються в другий шар, де для них є вільні місця. Таким чином забезпечується рух електронів по замкнутому колу, сформованому фотоелементами і акумулятором. Поки йде цей процес, АКБ набирає заряд.

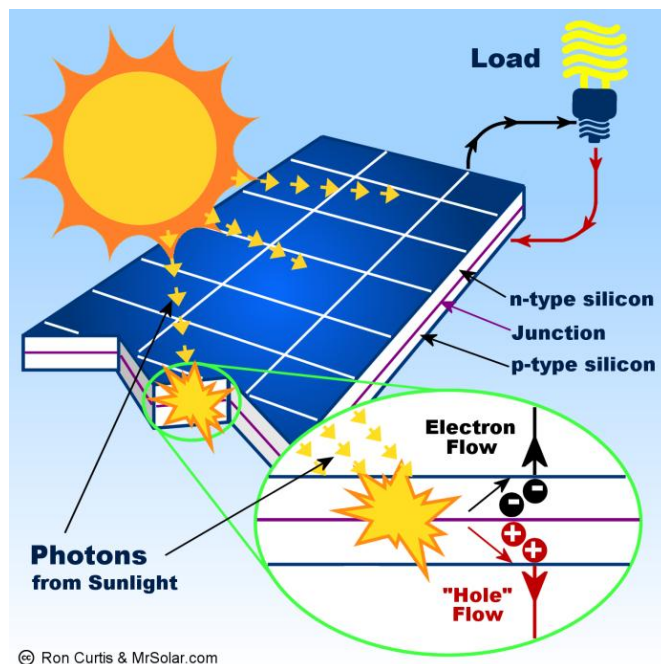


Рисунок 1.1 - Приклад роботи сонячної панелі

1.2 Типи сонячних панелей

Стандартні сонячні батареї виробляють з моно- і полікристалів кремнію, так само є і на основі аморфного кремнію. Будь-які сонячні батареї виготовлені з осередків, з'єднаних між собою. У разі монокристалічних сонячних батарей

осередки виготовляють з максимально чистого кремнію, який видобувається за методом Чохральського. Після затвердіння, отриманий кристал розрізають на пластини товщиною 250-300мкм, які згодом пронизуються металевою сіткою з електродів. Ця технологія дорога, тому такі батареї дорожче полікристалічних, зате вони володіють високим ККД 17-22%.



Рисунок 1.2 – Полікристалічний модуль

Для виготовлення полікристалічних батарей використовуються полікристали. Щоб їх отримати, кремнієвий розплав піддається повільному охолодженню. Ця технологія вимагає менших витрат (але тим не менше все одно величезних), але і батареї мають менший ККД 12-18%, що може бути досить критично при використанні батарей в великих кількостях. Проблема в тому, що всередині кристалу отриманого таким способом є області з зернистими межами, що знижує ККД.

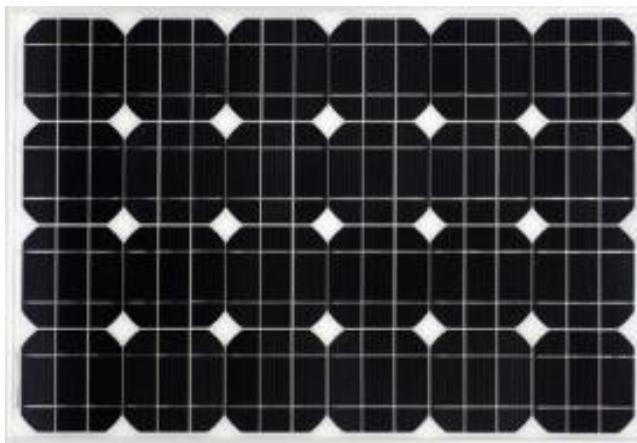


Рисунок 1.3 – Монокристалічний модуль

Варто так само відзначити, що є батареї з аморфного кремнію, які за матеріалом відносяться до кремнієвих, а за принципом виготовлення - до плівкових. Для їх виготовлення використовують силан або кремневодород, які наносять на матеріал підкладки. ККД у таких батареях низький (близько 6 %), зате їх можна гнути, а в похмуру погоду вони мають ККД нарівні (а часом і вище) з моно і полікристалічними батареями.

Полімерна сонячна батарея - це плівка, яка складається з активного шару (полімеру), електродів з алюмінію, гнучкою органічної підкладки та захисного шару. Для створення рулонних полімерних сонячних батарей окремі плівкові фотоелементи об'єднують між собою. Такі батареї недорогі у виробництві (для їх виготовлення не використовується дорогий кремній) і екологічні, до того ж, не дивлячись на низький ККД (найбільший ККД 6.5 відсотка при освітленості 0.2 вата на квадратний сантиметр - одиничний екземпляр) вони володіють і плюсами - як уже було сказано, низька вартість виготовлення, легкість, гнучкість, компактність.

1.3 ККД сонячних панелей

Коефіцієнт корисної дії – це відношення кількості корисної енергії, отриманої від будь-якого її перетворювача, до кількості підводиться до нього

енергії. ККД сонячної батареї – це відношення кількості енергії, яка видається джерелом світла, до кількості енергії виробленої батареєю.

Як вже було сказано при описі різних типів батарей, середній ККД у них досить низький. Це пов'язано з тим, що батареї здатні ефективно поглинати і переробляти тільки певні ділянки спектру, починаючи з деякої енергії. Для найпоширеніших кремнієвих сонячних батарей, як уже було сказано, ця величина не досягає 30 %. Однак по всьому світу розробляються спроби підвищити цей показник.

1.4 Накопичувальні системи

Очевидно, що вироблену сонячними батареями енергію необхідно зберігати. Для зберігання електроенергії використовуються акумулятори. Вони, разом з сонячними батареями, дозволяють зробити автономну систему енергопостачання. Загальна схема такої системи виглядає так:



Рисунок 1.4 – Схема автономної системи на сонячних батареях

Таким чином, в світлий час доби батареї заряджають акумулятори, які в темний час доби дозволяють забезпечувати енергією те, до чого ця схема підключена.

Детальніше розберемо, що вдає із себе кожен елемент такої системи:

- Контролер заряду – схема живлення в складі зарядного пристрою, яка управляє процесом заряду акумуляторів. У функції управління процесом зазвичай входять реалізація алгоритму розряду або заряду, ефективного для даного типу акумуляторів, стабілізація напруги, при одночасному використанні акумуляторів, і деякі інші функції, які залежать від конкретно взятої моделі.

- Інвертор – пристрій, що перетворює постійний струм в змінний, змінюючи при цьому напругу. За своїм принципом дії інвертори діляться на автономні і залежні, але в системах сонячних батарей зазвичай використовуються автономні. Останні, в свою чергу, можуть перетворювати як напругу, так і струм.

- Акумулятори для автономних систем на базі сонячних батарей або вітрових електрогенераторів, а так само ДБЖ – це літій-залізо-фосфатні АКБ, вони мають високий ККД, найвищий з усіх типів АКБ – близько 90 відсотків. Тільки за рахунок ККД заряду-розряду енергії виходить більше в порівнянні з іншими АКБ рівній ємності. Сам по собі акумулятор не псується і приблизний термін служби 15 років і 3000 циклів при розрядах на 80%, а при розрядах на 50% 5000 циклів, а якщо розряджати менше, то циклів обіцяють до 10000.



Рисунок 1.5 – Приклад автономного інвертора сонячних панелей

1.5 Переваги сонячних панелей

Використання сонячних панелей - це дуже практичний спосіб виробництва електроенергії для багатьох застосувань. Проживання поза мережею означає проживання в місці, яке не обслуговується головною електромережею. Віддалені будинки та каюти мають користь від сонячних енергетичних систем. Більше не потрібно платити величезні збори за встановлення електричних опор та підведення кабелів від найближчої основної точки доступу до мережі. Сонячна електрична система потенційно дешевша і може забезпечувати живлення протягом трьох десятиліть, якщо її правильно використовувати.

Окрім того, що сонячні панелі дозволяють жити поза мережею, мабуть, найбільшою перевагою, яку ви отримаєте від використання сонячної енергії, є те, що вона є і чистим, і відновлюваним джерелом енергії. З появою глобальних кліматичних змін стало більш важливим, щоб ми робили все можливе, щоб зменшити тиск на нашу атмосферу від викидів парникових газів. Сонячні

панелі не мають рухомих частин і вимагають незначного обслуговування. Вони міцно побудовані і прослужують десятки років.

Нарешті, але не менш важливими перевагами сонячних панелей та сонячної енергії є те, що, як тільки система оплатить свої початкові витрати на встановлення, електроенергія, яку вона виробляє протягом решти періодів життя системи, яка може становити до 15-20 років залежно від якості системи, абсолютно безкоштовно. Для власників сонячних енергосистем, що працюють за мережею, переваги починаються з моменту підключення системи до Інтернету, потенційно усуваючи щомісячні рахунки за електроенергію або, і це найкраща частина, фактично отримуючи власнику системи додатковий дохід від електричної компанії. Якщо ви використовуєте менше енергії, ніж виробляє ваша сонячна електрична система, цю надлишкову потужність можна продати, іноді за премію, вашій електричній компанії.

2. ОБСЛУГОВУВАННЯ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ

2.1 Доступ та доступність

Сонячне світло не рівномірно розподіляється на земній поверхні. Проте одна година енергії, отриманої від Сонця, еквівалентна енергетичним потребам приблизно одного року. Ресурс сонячної енергії залежить від широти. З цієї причини європейські південні країни (Португалія, Іспанія та Італія) мають найвищу річну сонячну освітленість, а країни Півночі Європи (Норвегія, Швеція та Данія) - найменшу щорічну доступність сонячного опромінення. Німеччина є європейською країною з найбільшими енергетичними установками від фотоелектричних систем, проте не є країною з найбільшим річним сонячним опроміненням в Європі. Португалія є європейською країною з найкращим сонячним потенціалом сонячної електроенергії, оскільки вона є однією з країн з найбільшим річним сонячним опроміненням в Європі.

Від 35°N до 35°S (низькі широти) посушливі та напівзасушливі райони отримують найбільше пряме нормальне опромінення – кількість сонячного опромінення, отримане на одиницю площі поверхнею, яка завжди утримується перпендикулярно (або нормально) променям, що надходять прямою лінією від напрямку сонця в поточному положенні на небі. Масштабні сонячні електростанції, як правило, знаходяться в цих широтах, у тому числі в семи пустелях світу. Пустелі та посушливі зони, крім переваги високої готовності до перетворення сонячної енергії через велику кількість сонячного світла, мають і недоліки довкілля. Недоліками є: висока температура навколишнього середовища (ризик руйнування масиву через надлишок вихідного струму) і висока концентрація атмосферного пилу (хвилинні тверді частинки з діаметром менше 500 мкм в діаметрі).

Китай, Європа, Близький Схід, Австралія та США вже встановили широкомасштабні сонячні установки, і більшість з них розташовані в пустелях. Місія Desertec має намір забезпечити електричну енергію через сонячне випромінювання країн Північної Африки та Близького Сходу (Північно-Африканська Республіка), щоб забезпечити найбільші потреби в енергії на землі та 15% потреб у електроенергії з Європи до 2050 року.

Осадження пилу на оптичній поверхні сонячних панелей є однією з основних причин, що сприяють зниженню ефективності, яку можна фактично контролювати. Неможливо контролювати погодні умови, неможливо також контролювати деякі втрати ефективності внаслідок термодинамічних причин або навіть інших природних негараздів. Однак можна вдосконалити маршрути, щоб підтримувати сонячні батареї в чистоті.

Пил, відходи птахів, сажа, ріст органічних порід, забруднення рослинними продуктами та відкладення плям води (солей) на панелях фотоелектричних батарей зменшує вихід енергії та, отже, впливає на загальну продуктивність фотоелектричної системи. Забруднення твердих частинок в оптичних поверхнях називається ефектом «забруднення» і приносить зазначені раніше недоліки через втрати розсіювання та поглинання падаючого світла, що, відповідно, призводить до втрат вихідної потужності. Фотоелектричні установки мають ефективність модулів, як правило, від 10 до 25% через втрати в електропроводці, інверторі та через великий вплив ефекту «забруднення». Для того, щоб уникнути накопичення пиловідкладень важливо керувати обслуговуванням сонячних панелей. Однак деякі широкомасштабні сонячні електростанції розташовані в місцях з поганим доступом води. Важливо нагадати, що вода перебуває у протилежній ситуації від сонячної енергії, оскільки є обмеженим ресурсом, і в багатьох країнах дефіцит води навряд чи виправдовує її використання в якості «очисного матеріалу». Для очищення сонячних панелей у воді не повинно бути солі. Транспортування води у віддалені або безлюдні райони є дуже дорогим, і за допомогою цієї альтернативи неможливо буде окупити сонячні електростанції. Якщо вода є

обмеженим ресурсом, це виявляється найдорожчою частиною обслуговування сонячних панелей після вартості праці. З цієї причини важливо знайти альтернативні засоби для чищення та незалежні від води.

Ще одним фактором, який слід враховувати, є те, що осідання пилу залежить від двох основних факторів, таких як: розташування від сонячних електростанцій та поведінка клімату.

2.2 Види процесів очищення сонячних батарей

Процеси очищення можна розділити на: природні, ручні, автоматичні та пасивні методи. Процеси природного очищення залежать від опадів, вітру, гравітаційних сил та інших природних явищ. Тим не менше, дощі є найефективнішим природним миючим засобом для видалення пилу з поверхонь сонячних панелей. Деякі країни забезпечують періодичне миття поверхонь за допомогою погодних моделей погоди (Бельгія, Берн, Швейцарія), і не потрібно регулярне ручне чищення поверхонь. Однак в інших регіонах погодна допомога не є широко поширеною і необхідна втручання людини для очищення поверхонь.

Вітер – це інша природна подія, яка може сприяти видаленню пилу з фотоелектричних поверхонь, але може також приносити пил, тому він має подвійний ефект. Крім того, у випадку сонячних елементів з кристалічним діоксидом кремнію (SiO_2), коли швидкість вітру зростає, температура панелі знижується, що покращує ефективність системи. Ще однією перевагою є те, що вища швидкість вітру зменшує відносну вологість навколишнього середовища, що дозволяє досягти більшої ефективності панелі.

Адгезія пилу з поверхнею фотоелектричних панелей також може знизити ефективність завдяки більшим швидкостям вітру, що сушить шар вологи, що утворюється між частинками пилу та поверхнею. Фотоелектричні панелі можна встановити на більш високому рівні над землею (швидкість вітру зростає із висотою), щоб скористатися швидкістю вітру. Тим не менше, ефект очищення

вітром не може видалити частинки розміром менше 50 мкм, і в запиленому середовищі вітер буде осідати більше пилу на фотоелектричні модулі. У деяких регіонах цей природний процес очищення застосовувати не можна, і ручне очищення є варіантом.

У процесі технічного обслуговування при ручному очищенні зазвичай використовується розчин демінералізованої води та миючих засобів для ефективного очищення поверхонь фотоелектричних систем, а потім поверхня протирається м'якою тканиною. Цей процес технічного обслуговування в основному використовується в невеликих установках. На широкомасштабних фотоелектричних установках прийнята процедура включає струмені води під високим тиском з аніонними миючими засобами та чищенням після них. У всіх типах установок рекомендується чистити рано вранці, коли дзеркала мокрі, оскільки пил легко видаляється з покриттів або поверхонь без нього без пошкоджень. Звичайно, ручний процес очищення має той недолік, що багаторазове витирання чи чищення щіткою може спричинити подряпини та пошкодити поверхню. Трудові та водні ресурси є найдорожчою частиною очищення, а автоматизовані системи очищення сприяють зменшенню цих витрат за допомогою механічних пристроїв, керованих комп'ютером.

В автоматизованих системах очищення використовується одновісна система відстеження сонця, оснащена механізмом очищення. У цьому випадку очищення може бути автоматизоване і може обертатися до тих пір, поки поверхня не буде повернута вниз, щоб уникнути відкладення пилу через штормову погоду, а фотоелектрична панель може повернутися на 360°, щоб можна було будь-коли змінити кут нахилу, наприклад перпендикулярно землі для видалення пилу. Робот для очищення фотоелектричної поверхні складається з однієї очисної головки, що рухається та чистить щіткою вгору та вниз, а також рухомих візків, розміщених у верхній та нижній частині панелей. Однак ця процедура також потребує технічного обслуговування та водопостачання (системи без використання води все ще розробляються) як ресурс для очищення. Розчин може знаходитись на знесоленій воді (дорого і

доступно не в усіх місцях) або резервуарах для води (ризик випаровування води при високих температурах навколишнього середовища). Для автоматизованих процесів очищення потрібні навчені люди для обслуговування прибиральних роботів, і витрати величезні, особливо у віддалених районах. Іншими процесами очищення, названими пасивними методами, є: електродинамічні екрани або антизабруднюючі покриття (їх також називають самоочисними покриттями).

Електродинамічні екрани використовують електростатичну силу для відштовхування частинок і піску, які транспортуються до покривного скла сонячної панелі. Цей спосіб очищення не потребує водних ресурсів або робочої сили для експлуатації та обслуговування. Це система очищення, придатна для мегасонячних електростанцій, побудованих у пустелях, оскільки є потенційно недорогою. Хоча це метод, який все ще перебуває на стадії розробки та ще не повністю встановлений.

Базові методи очищення наведені у табл.1.1.

Таблиця 1.1 – Переваги та недоліки кожного процесу очищення.

Метод очищення	Переваги та недоліки
1	2
Природне очищення	Переваги: відсутність витрат на прибирання; ефективність сонячної панелі можна відновити за допомогою сильного дощу або танення снігу; видалення великих частинок пилу з поверхонь фотоелектричних панелей через сильний вітер
	Недоліки: відкладення пилу та ефективність знижуються за рахунок невеликих опадів у запиленій атмосфері з подальшим запиленням вітром.

1	2
Ручне очищення струменем високого тиску	Переваги: прибирання можна проводити за необхідності.
	Недоліки: дорогі витрати робочої сили та водних ресурсів; вимагає навченого персоналу; водні ресурси в посушливих зонах дуже обмежені; ПАР, що використовується для видалення органічної плівки, шкідливий для навколишнього середовища.
Автоматизоване очищення контрольованим розпиленням води	Переваги: при використанні процесу очищення води знижується робоча температура комірки та підвищується ефективність; можна активувати за допомогою насоса автоматично або вручну.
	Недоліки: не зручний для широкомасштабних фотоелектричних систем; масштабованість методу не є економічно ефективною; потрібні водні ресурси; не забезпечує рівномірного очищення по всій поверхні; втрата води при випаровуванні.
Робототехнічна система очищення	Переваги: очищення можна автоматизувати; ефективні системи водоспоживання використовуються для економічного очищення.
	Недоліки: потребує водних ресурсів для очищення; їй потрібна команда техніків для контролю роботи робота; не є економічно ефективним у деяких додатках через енергоспоживання роботизованого пристрою; високі витрати на експлуатацію та обслуговування.

1	2
Протизабруднене покриття	Переваги: покращує ефективність очищення природних миючих засобів; триває кілька років; ефективний спосіб зробити поверхню або сильно гідрофобною, або гідрофільною; дозволяє уникнути осідання пилу та підвищує ефективність роботи сонячних батарей.
	Недоліки: адгезія пилу сильно залежить від електростатичних характеристик плівки та пилу;
Електродинамічний екран	Переваги: не потребує водних ресурсів або робочої сили для роботи; споживання енергії дуже низьке.
	Недоліки: на стадіях розробки довговічність невідома; продуктивність, обмежена відносною вологістю нижче 50%.

Покриття покращують ефективність очищення природних засобів для чищення, мають термін служби кілька років і можуть приносити деякі корисні властивості залежно від застосування. Покриття повинно бути міцним, витримувати високі температури, піщані бурі та ультрафіолетове випромінювання. Іншими бажаними характеристиками є: низька ціна та потужність, що застосовується на різних типах сонячних систем.

2.3 Частота очищення сонячної панелі

Скільки разів нам слід чистити сонячну панель? Відповідь не однакова для всіх випадків. Кожен випадок має певний спосіб управління технічним обслуговуванням. По-перше, неминуче думати про вартість робочої сили, вартість та доступ до водних ресурсів, вартість матеріалів, обладнання та втрату енергоефективності. Частота прибирання залежить від: концентрації

атмосферного пилу, характеристик ділянки (наприклад, рослинності поблизу, руху пішоходів та автомобілів, виверження вулканів та забруднення повітря), погодних умов (наприклад, температури навколишнього середовища, вологості та вітру). Більш конкретно, режим швидкісного вітру допомагає видаляти пил, кут нахилу фотоелектричної системи (горизонтальні поверхні накопичують більше пилу, ніж похилі, завдяки дії сили тяжіння), менш липка і гладка поверхня сонячних панелей накопичує менше пилу.

Для кожної фотоелектричної системи передбачений цикл очищення. Для того, щоб відповісти на це питання, фотоелектричні установки можна розділити на три регіони: регіони з низькою, середньою та високою широтою. Як обговорювалося раніше, менший кут нахилу, як правило, накопичує більш високі відкладення пилу, і це вимагає більшої кількості циклів очищення. Фотоелектричні панелі, розташовані в регіонах з низькими широтами, потребують низьких кутів нахилу для досягнення максимального сонячного виграшу, в середніх широтах вони повинні мати вищі кути нахилу, а у високих широтах кути нахилу майже вертикальні. Наприклад, між 15° і 25° у північній та південній півкулях є сухі тропічні зони, що характеризуються частими пиловими подіями та відсутністю опадів. Пилові події вимагають щонайменше щотижневого очищення, але у випадку пилових бур у пустелях з високим рівнем вологості повітря (утворення грязі на поверхні сонячних панелей) слід негайно чистити (нанесення покриттів, що покривають дустрепеллінг, є альтернативою, щоб уникнути постійної потреби в чищенні). Рекомендується щотижневе прибирання при нестачі опадів. У регіонах, де регулярно очікуються опади, природне прибирання дощем відновлює ефективність фотоелементів (наприклад, вологий тропічний клімат). Регіони з вищим накопиченням пилу через близькість до галузей вимагають щоденного прибирання. Якщо регіони схильні до підвищеного пилу внаслідок людської діяльності, потрібно щотижневе прибирання. У високих широтах є регіони, де сніг є частим, і сніг слід негайно очищати від поверхні сонячних панелей.

3. НЕОБХІДНІСТЬ ПРОСВІТЛЮЮЧИХ ПОКРИТТІВ

3.1 Основні фактори дії просвітлюючого покриття

Як відомо, світло при проходженні через кордон розділу двох оптично прозорих середовищ відбивається. Тому відображає світло і очкова лінза - без спеціальної обробки її поверхонь на відбите світло може припадати до 10-15% падаючого на неї світла в залежності від показника заломлення матеріалу очкової лінзи. У очкової лінзи з CR-39 на відображення втрачається близько 8% світла.



Без просветляющего покрытия



С просветляющим покрытием

Действие просветляющего покрытия
в условиях вождения автомобиля ночью

Рисунок 3.1 – Дія просвітлюючого покриття в умовах керування автомобілем
вночі

Відбиті від поверхонь очкової лінзи світлові промені утворюють помилкові вторинні зображення, відблиски, так звані гало навколо яскравих точкових джерел світла (наприклад, навколо вуличних ліхтарів або світять фар автомобілів вночі). Ці ефекти погіршують якість зору, зменшують зоровий комфорт, знижують контраст зображення у користувачів очками. Наприклад, відображені в лінзах джерела освітлення в приміщеннях викликають зорове стомлення при тривалій роботі за комп'ютером. При водінні автомобіля вночі в лінзах без просвітлюючого покриття якість зору водія значно погіршується через розмиття і двоїння зображень фар їдуть назустріч автомобілів і ламп вуличного освітлення.

Крім того, відбитий від передньої поверхні очкової лінзи світло заважає бачити очі користувача окулярами, що особливо важливо для людей, які виступають перед публікою, наприклад, для дикторів телебачення. Ці відображення в певній мірі погіршують зовнішній вигляд будь-якого користувача очками.

Таким чином, відображення світла від поверхонь очкової лінзи призводить до наступних негативних явищ:

- зменшення світлопропускання очкової лінзи;
- погіршення якості зору в лінзах (помилкові зображення, відблиски, знижений контраст, зоростомлення);
- погіршення зовнішнього вигляду користувача очками.

Для усунення цих дефектів на лінзи наносять спеціальні покриття.

Як «працюють» покриття, що просвітлюють

Для зменшення відбиття світла від поверхонь очкової лінзи на них наносять покриття, що просвітлюють.

3.2 Принцип дії просвітлюючого покриття

Принцип дії просвітлюючого покриття ґрунтується на ефекті інтерференції.

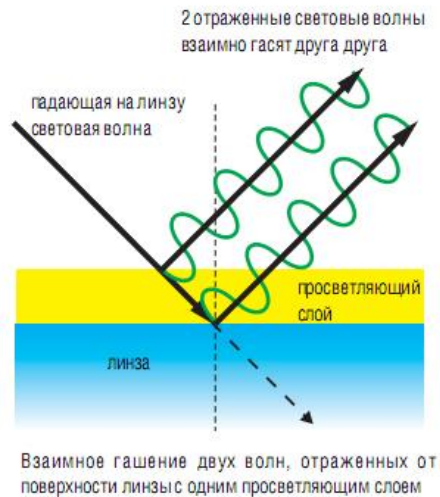


Рисунок 3.2 - Взаємне гасіння двох хвиль розкритих від поверхні лінзи з одним просвітлюючим шаром

Щоб зрозуміти механізм інтерференції, слід згадати, що світло має хвильову природу, тобто світловий промінь можна представити у вигляді хвилі. Відомо, що якщо дві поширюються в одному напрямку хвилі збігаються по фазі (гребені хвиль збігаються), то хвилі «підсумовуються» - виходить одна хвиля з більшою амплітудою. Якщо, навпаки, дві хвилі знаходяться в протифазі (гребінь однієї збігається з мінімумом іншої), то хвилі «віднімаються» - сумарна хвиля має амплітуду, рівну різниці амплітуд двох хвиль. (Цей ефект називається інтерференцією світла.) Таким чином, якщо амплітуди двох знаходяться в протифазі хвиль рівні, то в результаті інтерференції хвилі повністю погасять один одного.

Для зменшення відбиття світла від поверхні очкової лінзи на неї наносять найтонший просвітлюючий шар - в результаті замість однієї кордону розділу (повітря - очкова лінза) виходить дві: повітря - просвітлюючий шар,

просвітлюючий шар - очкова лінза. Світло буде відбиватися від обох меж розділу - утворюються дві відбиті хвилі. Якщо підібрати матеріал і товщину просвітлюючого шару спеціальним чином, то обидві відбиті хвилі повністю погасять один одного - і відбиття світла практично не буде. Для повного гасіння відбитих хвиль товщина шару повинна бути дорівнює приблизно чверті ($1/4$ довжини хвилі світла). Так, для досягнення максимального ефекту для видимого діапазону світла товщина просвітлюючого шару повинна бути порядку 100 нм.

Скільки ж просвітлюючих шарів повинно бути в якісному покритті очкової лінзи? З описаного вище механізму «просвітлення» випливає, що один просвітлюючий шар може ефективно «працювати» тільки для вузького діапазону довжин хвиль. Тому, щоб покриття, що просвітлює очкової лінзи зменшувало відображення у всьому діапазоні видимого світла, воно повинно складатися з декількох просвітлюючих шарів (до 8-10 шарів на одній поверхні). Таке багатошарове покриття очкової лінзи здатне зменшити відображення в 5-10 разів і забезпечити практично 100% проходження світла через незабарвлену очкову лінзу (реальне пропускання світла багатошарових просвітлюючих покриттів лінз становить 96-99% в залежності від якості покриття і застосовуваної методики вимірювання).

Покриття, що просвітлюють можуть відрізнятися числом просвітлюючих шарів, їх складом, методом нанесення. Високоякісні покриття, що просвітлюють очкових складаються з декількох просвітлюючих шарів і мають дуже слабе видиме залишкове відображення (його часто називають «залишковим рефлексом»). Колір цього залишкового відображення у різних компаній може відрізнятися (зазвичай він буває блакитного або зеленуватого відтінків). Нещодавно дві компанії заявили про створення просвітлюючих покриттів, повністю позбавлених залишкового рефлексу.

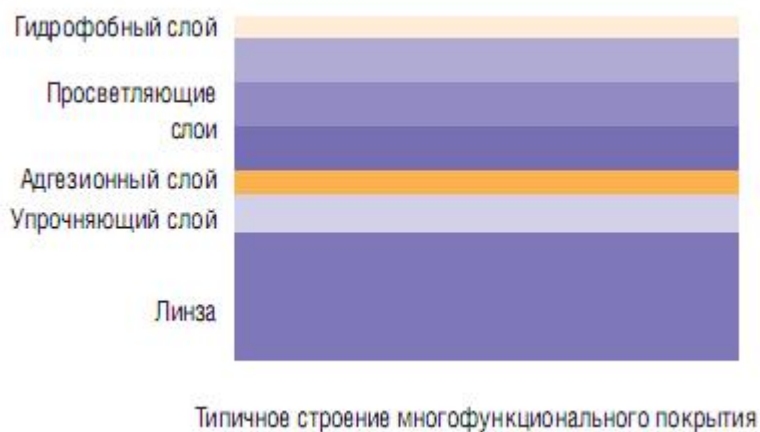


Рисунок 3.3 – Типова побудова багатofункціонального покриття

Лінзи з таким покриттям, за заявами виробників, абсолютно безбарвні. Лінзи з обмеженою кількістю просвітлюють шарів мають яскравий залишковий рефлекс, колір якого залежить від числа шарів і їх характеристик. Зазвичай для просвітлюють покриттів використовуються такі мінеральні речовини, як оксиди деяких металів, фтористий магній, фтористий кальцій. В результаті органічна очкова лінза з покриттям стає неоднорідною: сама очкова лінза органічна, а покриття, що просвітлює - мінеральне. Однак мінеральні та органічні речовини мають різними фізичними властивостями - наприклад, у них різні коефіцієнти теплового розширення. Тому нанесення будь-якого мінерального просвітлюючого покриття послаблює властивості міцності органічної очкової лінзи - очкова лінза з таким покриттям більш чутлива до нагрівання і дії механічного навантаження, ніж очкова лінза без просвітлюючого покриття. Нещодавно один з виробників випустив першу повністю органічну очкову лінзу з покриттям, що складається тільки з органічних речовин. Така очкова лінза, за заявою виробника, має більш високу стійкість до нагрівання і механічних навантажень, ніж органічні лінзи з традиційними прояснюючим покриттями.

Оскільки товщина і вага лінз зменшуються при використанні матеріалів з високими значеннями показника заломлення (особливо помітно зменшення при великих діоптрій), то високопреломляючі лінзи користуються все більшим попитом у користувачів, які піклуються про зоровому комфорті і привабливості свого зовнішнього вигляду.

Зі збільшенням показника заломлення (n) матеріалу очкової лінзи втрати на відбиття збільшуються:

$$r = (n - 1)^2 / (n + 1)^2 \times 100\%$$

де r - коефіцієнт відбиття світла від однієї поверхні очкової лінзи в повітрі при нормальному падінні світла на цю поверхню.

Оскільки високозаломні лінзи відбивають світло в більшій мірі (до 2 разів), ніж лінзи з матеріалу з показником заломлення 1,5, то вони вимагають обов'язкового нанесення просвітлюючих покриттів.

Чому деякі вважають, що лінзи з покриттям брудняться сильніше і їх важче очищати, ніж лінзи без такого покриття?

Твердження, що лінзи з покриттям брудняться сильніше і їх важче очищати, ніж лінзи без таких покриттів, помилково. Справа в тому, що на лінзах з покриттям набагато помітнішими стають забруднення: по-перше, на чистій поверхні (без маскують віддзеркалень і відблисків) завжди помітніше будь-які забруднення, навіть ті, на які зазвичай не звертають уваги, якщо очкова лінза сильно « відблискує », а по-друге, плями води і жиру порушують тонкий механізм роботи просвітлюючого покриття. Звідси випливає, що лінзи з покриттям просто вимагають більш тщательной очистки. Та бруд, яка не "кидається в очі» на лінзах без покриття, дуже помітна на лінзах з покриттям. Але ж слід пам'ятати, що будь-які забруднення, помітні вони або непомітні, в будь-якому випадку зменшують пропускання світла через очкову лінзу і

погіршують якість зображення. Так що краще, щоб лінзи завжди були максимально чистими.

Для додання очковим лінзам з покриттям водо- і брудовідштовхуючих властивостей на поверхню очкової лінзи наносять спеціальний гідрофобний шар (поверх просвітлюють шарів).

Очкова лінза з таким шаром стає не тільки більш гладкою, але і набуває водовідштовхувальні (гідрофобні) властивості. В результаті вода і бруд на ній практично не затримуються. Крім гідрофобних властивостей цей шар може також мати і жиро відштовхуючими (ліпофобними) властивостями, що ще більше сприяє підтримці чистоти очкової лінзи. Типове будова багатошарових покриттів провідних виробників лінз показано на малюнку. Такі багатошарові покриття (їх називають багатофункціональними) включають крім просвітлюють шарів зміцнюючий шар (підвищує опірність лінз до утворення подряпин), адгезійний шар (для зчеплення зміцнюючого і просвітлюють шарів), а також гідрофобний шар. У провідних виробників лінз гідрофобний шар має також антистатичними властивостями. З такими властивостями лінзи менше брудняться, так як на них не сідає пил.

3.3 Просвітлення оптичних систем

Об'єктиви з багатошаровим просвітленням, блиск лінз має характерний вигляд.

Просвітлення оптики - технологія обробки поверхні лінз, призм і інших оптичних деталей для зниження відбиття світла від оптичних поверхонь, що межують з повітрям. Це дозволяє збільшити світлопропускання оптичної системи і підвищити контрастність зображення за рахунок зниження заважають паразитних віддзеркалень в оптичній системі.

Більшість застосовуваних оптичних систем, наприклад, об'єктиви фотоапаратів і відеокамер складаються з багатьох лінз і відображення від кожної поверхні розділу скла з повітрям зменшує проходить корисний

світловий потік. Без застосування методів просвітлення падіння інтенсивності світла, що проходить в багатолінзові системі може досягати декількох десятків відсотків. Тому у всіх сучасних об'єктивах використовується просвітлена оптика.

Застосовуються чотири шляхи зниження коефіцієнта відбиття від поверхні, в тому числі, просвітлення оптики:

- з використанням інтерференційних тонкошарових покриттів;
- з використанням явища поляризації світла;
- надання оптичної поверхні мікротекстурних нерівностей;
- просвітлення градієнтном зміною показника заломлення.

В основному застосовуються інтерференційні покриття, що просвітлюють оптичні поверхні (рис. 3.4). У таких покриттях на оптичні поверхні наноситься один або кілька шарів тонкої плівки, сумірною по товщині з довжиною світлових хвиль. Показник заломлення цих шарів відрізняється від показника заломлення матеріалу оптичної деталі. Належним підбором товщини покриття і їх показників заломлення вдається знизити коефіцієнт відображення практично до нуля для однієї або декількох, в разі багатошарових покриттів, довжин хвиль світла.



Рисунок 3.4 – Антивіблискуюче покриття

Покриття поверхонь, що знижують коефіцієнт відображення також називають антивідблискуючим. Такі покриття застосовуються не тільки в оптичних системах, але і для зменшення завад відблисків від інших поверхонь, наприклад, екранів моніторів.

При падінні світла на кордон розділу двох прозорих середовищ з різними показниками заломлення і відбувається часткове відображення потоку світла від кордону розділу (рис. 3.5). Ступінь відображення характеризують коефіцієнтом відображення - часткою відбитого світла від падаючого світла який зазвичай виражають у відсотках. Коефіцієнти відбиття однакові як для світла, що падає з менш оптично густого середовища (середовища з меншим показником заломлення), так і для зворотного напрямку світла при рівних кутах падіння. залежить від кута падіння і в загальному випадку виражається формулами Френеля.

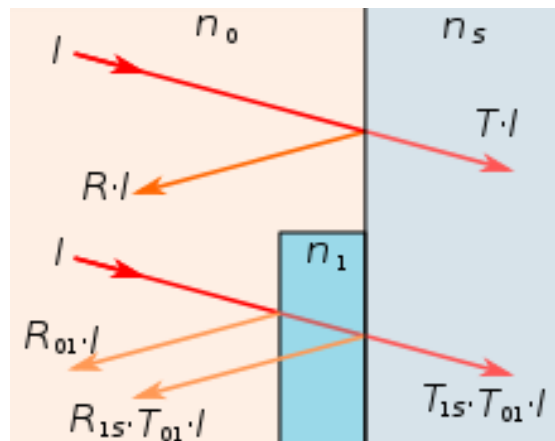


Рисунок 3.5 - Схема відображення від кордону розділу оптичних середовищ

В окремому випадку при нормальному падінні (тобто при перпендикулярному падінні на поверхню або, що те ж саме, вуглі падіння рівним нулю виражається відомими формулами Френеля.

4. МАТЕРІАЛИ ДЛЯ ПРОСВІТЛЮЮЧИХ ОПТИЧНИХ ПОКРИТТІВ

4.1 Типи покриттів і їх призначення

В залежності від призначення покриття ділять на такі типи:

- просвітлюючі покриття, застосовуються для зменшення залишкового відображення, а також для збільшення спектрального діапазону, характеризуються коефіцієнтом заломлення, використовуються в фотоелектричних елементах, як антивідбиваюче покриття, в якого малий коефіцієнт заломлення;
- захисні покриття, використовуються для забезпечення хімічної стійкості різних деталей або навіть інших типів покритті, можуть використовуватись для збільшення поверхневої міцності;
- дзеркальні покриття, застосовуються для відбиття від поверхонь падаючих світлових потоків, а також для збільшення променевої стійкості покриття, характеризуються коефіцієнтом відбиття;
- топологічні покриття, в яких перемінний коефіцієнт пропускання (відбивання) по поверхні, можуть використовуватись в якості елемента резонатора в лазерній техніці, завдяки яким формуються випромінювання, в яких діаграма спрямованості;
- фільтруючі покриття, використовуються для фільтрування падаючих світлових потоків в певній частині спектра, характеризуються шириною спектрального інтервалу, а також коефіцієнтом відображення (пропускання);
- струмопровідні покриття, використовуються для захисту деталей від обмерзання, запотівання (наприклад, для скла літака), також можуть знімають накопичені електростатичні заряди;
- спектроподільні покриття, використовуються для поділу світлового потоку на прохідний і відбитий застосовуються в оптоелектроніці та для

оптичного зв'язку, характеризуються відношенням коефіцієнта відбиття до коефіцієнта пропускання;

- поляризуючі покриття, використовуються для отримання лінійного поляризованого світла в вузькому області спектра, характеризують ступінь поляризації відбиваючого і прохідного світлового потоку, в певній частині спектра.

4.2 Прозорі провідні оксидні покриття

Прозорі провідні оксиди це матеріали з доброю оптичною прозорістю і високою електропровідністю, які знаходять широке застосування для виробництва великої різноманітності оптико-електронних приладів. Більшість ППО це бінарні або потрійні сполуки, що містять один або два металевих елемента. Поверхневий опір ППО досягає $6 \text{ Ом} / \text{м}$, а коефіцієнт поглинання в оптичному видимому спектральному діапазоні близько 90% в силу їх широкої забороненої зони. Це чудове поєднання провідності і прозорості, як правило, неможливо отримати в власних або нелегованих стехіометричних оксидах. Для отримання високої провідності цих матеріалів, вони повинні бути нестехіометричні за складом або повинні бути леговані відповідним елементом.

Дослідження ППО почалися з дослідження металевих тонких покриттів такого металу, як золото із властивостями прозорості у видимій області спектра. Пізніше з'ясувалося, що оксидні тонкі покриття показали більш стабільні характеристики, такі як електрична провідність і оптична прозорість. Зацікавленість до цих матеріалів можна простежити з ХХ століття, коли вперше з'явилися повідомлення про *CdO* покриття. Перший ППО виявив Бадекег (1907) і це був *CdO* в формі тонкої плівки. Пізніше було виявлено, що тонкі суцільні покриття *ZnO*, *SnO₂*, *In₂O₃* і їх сплави також гарні як ППО. Контрольований домішки цих оксидів може поліпшити їх електричну провідність без погіршення оптичної передачі. З тих пір спостерігається зростаючий інтерес до цих матеріалів з унікальними властивостями.

Для отримання високої провідності оксидних матеріалів, вони повинні бути нестехіометричними за складом або повинні бути леговані відповідним елементом. В даний час відомо, що нестехіометричні і леговані покриття оксидів на основі олова, індію, кадмію, галію, міді і цинку і їх сумішей характеризуються прозорістю у видимій області світла, а також провідністю. Основні важливі напівпровідники ППО – це домішкові леговані ZnO , In_2O_3 , SnO_2 і CdO , потрібні сполуки Zn_2SnO_4 , $ZnSnO_3$, $Zn_2In_2O_5$, $Zn_3In_2O_6$, In_2SnO_4 , $CdSnO_3$ і багатокомпонентні оксиди, що складаються з комбінацій ZnO , In_2O_3 і SnO_2 . Sn-легованих In_2O_3 , (ІТО) і F-легованих SnO_2 . Зараз найбільш широко використовується Sn-легований In_2O_3 (ІТО).

Як показано в таблиці 2 більше двадцяти різних ППО були отримані і охарактеризовані, з яких *ITO* і *ZnO* були найкращим.

Таблиця 3.1 – ППО з'єднання

ППО	Домішки
SnO_2	Sb, F, As, Nb, Ta
ZnO	$Al, Ga, B, In, Y, Sc, F, V, Si, Ge, Ti, Zr, Hf, Mg, As, H$
In_2O_3	$Sn, Mo, Ta, W, Zr, F, Ge, Nb, Hf, Mg$
CdO	In, Sn
$GaInO_3$	Sn, Ge
$CdSb_2O_3$	Y

4.3 Скляне покриття сонячних батарей

Зрозуміло, що вкладаючи гроші в настільки дороге устаткування, яким є сонячна домашня електростанція, покупець припускає, що це - довгострокові інвестиції, а, отже, це обладнання повинно надійно функціонувати не один десяток років. Розуміючи це, провідні світові виробники можуть гарантувати

безперебійну роботу своїх виробів на термін до 25 років. Для покупця важливо, щоб цей виробник або його дилери знаходилися в межах досяжності споживача. Тоді при виході з ладу будь-якого елемента його можна без проблем замінити по гарантії.

Користуючись тією обставиною, що є безліч регіонів, до яких великі виробники ще не дісталися, цей ринок почали освоювати невеликі фірми, що реалізують свою продукцію за нижчими цінами. Природно, ця нижча ціна відповідає і якості виробленої продукції. Відповідно, термін гарантійного обслуговування зменшується до двох років. Термін служби виробу, його ефективність залежать від багатьох факторів. І багато в чому ця залежність обумовлена якістю скляного покриття.

Для зниження вартості своєї продукції маленькі фірми використовують найчастіше недороге скло. Це скло може прослужити кілька років, поступово втрачаючи свої первісні якості. Потім воно може помутніти, а каламутне скло різко знижує ефективність сонячного модуля. Дешеве скло по своїй міцності, ударовинослівості в рази поступаються дорогим покриттям.

А якщо скло не витримає, наприклад, ударів граду, то це може створити дуже серйозні проблеми. Навіть через невелику тріщину вода може потрапити у внутрішню порожнину сонячного модуля і викликати коротке замикання. Крім того, у дешевих стекол, як правило, відсутня покриття антивідблиску, що також знижує ефективність виробу.

Тому при покупці гелієвих панелей обов'язково слід перевіряти, яке саме скло встановлено на виробі. Це повинно бути зафіксовано в специфікації на виріб. Якщо в специфікації відсутня інформація про якість скла, то найрозумнішим буде відмовитися від покупки. Найкраще в системах гелієвої енергетики зарекомендувало себе загартоване ударостійке скло з покриттям антивідблиску. Звичайно, таке скло коштує набагато дорожче звичайного листового скла, але воно служить і гарантією того, що сонячна панель прослужить вірою і правдою кілька десятиліть. У специфікації на виріб тип скла, його характеристики повинні бути вказані окремим пунктом.

Листове скло різної товщини в якості покриття гелієвого модуля найбільш часто застосовують маловідомі фірми для того, щоб залучити покупців невисокою ціною виробів. Але, як уже було сказано, ефективність і якість таких виробів залишають бажати кращого. Що стосується продукції відомих світових виробників, то в деяких їхніх виробках також застосовується листове скло. Йдеться про сонячних батареях на базі аморфного кремнію. При виготовленні панелей на базі аморфного кремнію використовується не кристалічний кремній, а з'єднання кремнію з воднем - силан. Силан наноситься тонким шаром на плоский скляний лист, як цього вимагає технологія виробництва аморфних сонячних батарей. Але в якості покриття виробу обов'язково використовується ударостійке загартоване скло.

4.4 Загартоване скло для сонячних батарей

Це скло має властивості, які роблять його незамінним для застосування в системах сонячного енергозабезпечення. В процесі виготовлення матеріал проходить стадію термічної обробки (загартування). Під час цієї технологічної операції у внутрішньому обсязі скляної маси виникають механічні напруги, рівномірно розподілені як по поверхні, так і в тілі листа.

Саме завдяки цим фізичним напруженням з векторами стиснення і розтягування (рис. 4.1) матеріал, отриманий в результаті такої термообробки, набуває високу механічну міцність, стійкість до миттєвим механічних впливів, а при руйнуванні утворює дрібні осколки з затупленими кінцями і ребрами (рис. 4.2). Завдяки останньої особливості загартоване скло називають також безпечним склом.

Функціональна схема технології виготовлення загартованого скла:

- попереднє нагрівання скляного листа приблизно до або вище температури розм'якшення;
- нагрівання попередньо нагрітого листа радіочастотною енергією при одночасному охолодженні поверхонь скляного листа;

- різке охолодження нагрітого скляного листа.

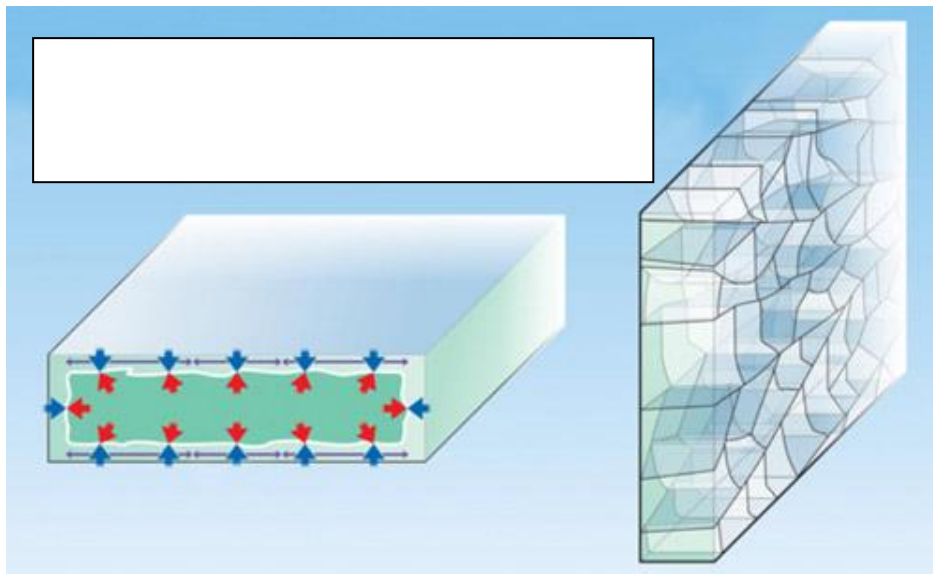


Рисунок 4.1 – Розподіл навантаження в загартованому склі

Процес виготовлення загартованого скла сам по собі дуже складний і вимагає великих витрат як за часом, так і енергетичних.



а)

б)

Рисунок 4.2 - Реакція на ударну дію загартованого (а) і звичайного (б) скла

Головна технологічна операція - термохімічних обробка скла. У процесі загартування скло нагрівається до температури $+ 650^{\circ} \text{C} + 700^{\circ} \text{C}$. При цьому скляна маса стає м'якою. Відразу після нагрівання матеріал потрапляє в камеру охолодження, де він обдувається повітрям.

Це дуже відповідальна операція, так як при охолодженні необхідно постійно контролювати потік повітряних струменів, щоб вони рівномірно розподілялися по поверхні охолоджуваного листа. У цьому режимі в поверхневих шарах скла виникають потужні напруги стиснення, а в самому тілі матеріалу виникають напруги розтягнення.

В кінцевому підсумку в матеріалі утворюється та сама система врівноважують напружень, яка і надає склу високу механічну і термічну стійкість. Крім цих основних видів внутрішніх напружень в склі можуть виникати і інші напруги. Ці побічні напруги виникають від того, що окремі частини матеріалу (наприклад, кераміка або метал) можуть мати різні коефіцієнти теплового розширення і різні ступені пружності. Ці напруги для даного матеріалу постійні і не надають скільки-небудь істотного впливу на якість кінцевого продукту.

Процес виготовлення загартованого скла дуже складний і рясніє безліччю нюансів, врахувати які неможливо без повністю автоматичного контролю і управління. Тільки за таких умов дотримуються всі основні технологічні вимоги, і виходить високоякісне загартоване скло. Після завершення процесу загартування будь-які операції по механічній обробці скла стають неможливими. Тому процесу загартування піддаються вже готові листи, обрізані заздалегідь по потрібним габаритам.

Готове загартоване скло вибірково перевіряють на ударостійкість. Згідно з методикою перевірки шестімільметрове загартоване скло повинне витримувати удар металевої кульки вагою в 250 грамів, який падає з висоти два метри. Але як показав ряд випробувань, якісно загартоване скло витримує удар такої кульки, кинутого з висоти три метра. Восьмимільметрове загартоване скло здатне витримати удар півкілограмові гирі, що падає з висоти два метри.

Загартоване скло для сонячних батарей характеризується:

- високою міцністю;
- тривалим терміном служби - від 25 років і більше;
- стійкої внутрішньою структурою;
- підвищеної проникною здатністю за рахунок часткового зниження в складі оксиду заліза (Fe_2O_3) з одночасним підвищенням оксидів свинцю (PbO) і барію (B_2O_3).

На закінчення слід додати, що на скла, призначені для систем сонячної фотовольтаїки, наноситься анібліковане покриття, яке не тільки підвищує ступінь захисту від механічних і хімічних впливів, але і знижує пропускання променів ультрафіолетового й інфрачервоного частини спектру, що запобігає надмірне нагрівання фотоелементів.

4.5 Антиблікове скло підвищеної прозорості

Найбільш дорогі моделі сонячних батарей пропускають через скло 95,0% - 97,5% падаючого випромінювання. Для виготовлення такого покриття застосовується наступна високотехнологічна процедура:

- 1 етап – закалка скла;
- 2 етап – механічна поліровка;
- 3 етап - хімічне травлення поверхонь з заміщенням іонів кальцію іонами калію і кобальту;
- 4 етап - «Вбудовування» в поверхню спеціального покриття антивідблиску за технологією NSTM (Nano Selective Transmission Modeling), в спрощеному вигляді застосовується у виробництві екранів для якісних смартфонів.

В результаті скляна поверхня стає надміцної, ідеально гладкою, надійно захищеної від несприятливих механічних, хімічних, атмосферних і біологічних зовнішніх впливів і максимально, наскільки це можливо, пропускає сонячне світло.

Тому відповідь на часто задають питання «заряджається чи сонячна батарея через скло» - позитивний. При цьому рівень поглинання прямо залежить від якості скляного моноліту - особливо його зовнішньої поверхні.

4.6 Подвійне скло «сендвіч»

Ще одна, що набуває популярності технологія - використання сонячних панелей з напівпровідниковим шаром, впаяним між двома однаковими за конструктивними особливостями, хімічним складом і геометрії скляними покриттями.

Головна перевага такої технології - в забезпеченні абсолютно однакового коефіцієнта теплового розширення на верхній і нижній половині скляного «сендвіча» при будь-яких температурних умовах. Це значно зменшує навантаження на напівпровідниковий шар і подовжує термін його експлуатації.

Чи працює сонячна батарея через таке скло краще? Ні, її прозорість, надійність та інші фізико-технічні характеристики не змінюються. Але довговічність панелі зростає на 25-30%.

5. ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРАХУНКИ ПРОСВІТЛЮЮЧИХ ПОКРИТТІВ

5.1 Опис функціонування одношарового просвітлюючого покриття

Основна ідея інтерференційного просвітлення - досягти складання в протифазі відбитих хвиль від двох поверхонь розділу (рис. 5.1).

Згідно зображення хвиля падає на поверхність сонячної батареї, вкриту просвітлюючим покриттям товщиною $\lambda/4$.

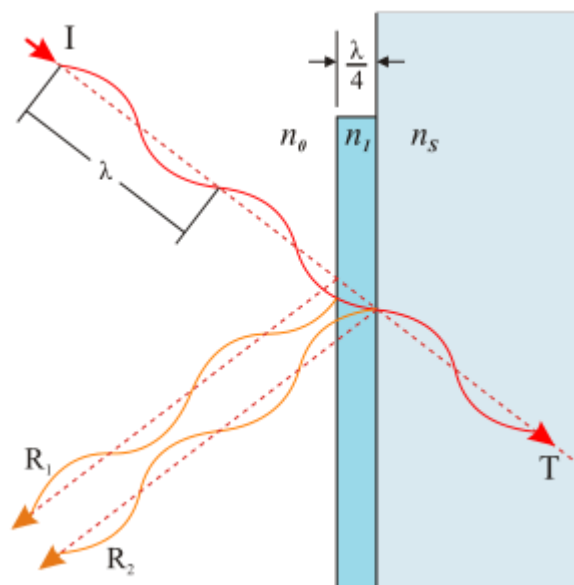


Рисунок 5.1 – Принцип дії просвітлюючого покриття

З наведеного також випливає, що за товщині плівки кратної половині довжини хвилі навпаки відбувається збільшення коефіцієнта відображення. Тому у відносно широкому діапазоні довжин хвиль для просвітлення найбільш ефективна чвертьхвильова плівка, так як фазовий зсув для сусідніх довжин хвиль малий у порівнянні з просторовим періодом хвилі. Наприклад, якщо для однієї довжини хвилі плівка дає ефект просвітлювання, для іншої довжини хвилі такого ефекту немає. Для першої довжини хвилі плівка даної товщини

просвітлює, для іншого - відбиває. Відношення довжин хвиль наприклад вони розрізняються лише на 10%. Для наведеного прикладу це, наприклад, довжини хвиль 500 нм і 550 нм - сусідні довжини хвиль в зеленій частині спектра.

Для товстих плівок ширина спектральних максимумів і мінімумів звужується, зближуються і, врешті-решт, при подальшому збільшенні товщини плівки зливаються. Саме тому у товстих плівок в білому світі не спостерігається інтерференція і товсті плівки непридатні в якості інтерференційного просвітлюючого покриття.

Так як довжина шляху світла в плівці залежить від кута падіння, при косому падінні мінімум коефіцієнта відображення зміщується в бік більш коротких довжин хвиль і одночасно збільшується. Здавалося б, що збільшення довжини шляху світла в плівці при косому падінні має зміщувати мінімум в сторону довших хвиль, але це не так. Більш тонкий облік взаємодії хвильового фронту з плівкою призводить до зміщення мінімуму в сторону більш коротких хвиль.

5.2 Опис одношарових чвертьхвильових інтерференційних покриттів

Зазвичай зовнішнє середовище для скла - повітря з показником заломлення дуже близьким до 1 і показник заломлення просвітлюючої плівки має дорівнювати квадратному кореню з показника заломлення оптичного скла лінзи.

Традиційним матеріалом для просвітлюючої плівки є фторид магнію, що має відносно низький показник заломлення і хороші механічні властивості, а також корозійну стійкість. При просвітління фторидом магнію кронового скла з показником заломлення 1,4 шар фториду магнію може знизити коефіцієнт відображення з приблизно 4% до 1,5% при нормальному падінні світла. На флінтовом склі з показником заломлення близько 1,9 чвертьхвильова плівка фториду магнію може зменшити відображення практично до нуля для однієї заданої довжини хвилі світла.

Але відбивна здатність скла, просвітленого таким способом, сильно залежить від довжини хвилі, що є основним недоліком одношарового просвітління. Мінімум відбивної здатності відповідає чверті довжини хвилі в матеріалі плівки.

У перших просвітлених об'єктивах знижували коефіцієнта відбиття для променів зеленого ділянки спектра (550 нм) - область найбільшої чутливості людського ока), тому відблиски на лінзах таких об'єктивів мають пурпурове або блакитно-синє забарвлення (так звана «блакитна оптика»). Відповідно, пропускання світла таким об'єктивом максимально для зеленого ділянки спектра і нижче для інших ділянок спектра, що призводить до деякої помилки в передачі кольору.

У наші часи (2020 рік) одношарове просвітлення (головна його перевага – низька вартість) використовується тільки в недорогих оптичних системах і в системах лазерної оптики, призначеної для роботи у вузькому спектральному діапазоні. Така оптика принципово не вимагає просвітлення в широкому спектральному діапазоні.

5.3 Двошарове та багатошарове просвітлення

Двошарове просвітлення складається з двох просвітлюючих шарів, зовнішній - з меншим коефіцієнтом заломлення. Має кращі характеристики, ніж одношарове, оскільки просвітлення досягається для більш широкого діапазону довжин хвиль.

Недолік одношарового просвітлюючого покриття у тому, що воно забезпечує просвітлення тільки для вузького спектрального діапазону. Цей недолік можна подолати застосовуючи багатошарові інтерференційні покриття.

Багатошарове покриття представляє собою послідовність з не менше ніж трьох шарів матеріалів з різними показниками заломлення. Раніше вважалося, що для видимої області спектра досить 3-4 шарів. Сучасні багатошарові покриття, що просвітлюють практично для всіх виробників мають 6-8 шарів і

характеризуються низькими втратами на відображення у всій видимій області спектра. Основна перевага багатошарового просвітління стосовно фотографічної і спостережної оптиці - незначна залежність відбивної здатності від довжини хвилі в межах видимого спектру.

До складу багатошарового просвітлюючого покриття, крім власне шарів, що просвітлюють, зазвичай входять допоміжні шари, що поліпшують зчеплення зі склом, захисні, гідрофобні та ін.

Блиск лінз з багатошаровим просвітленням, викликаний відображенням поза спектром просвітленої області, має різні відтінки зеленого і фіолетового кольору, аж до дуже слабких сіро-зелених у об'єктивів останніх років випуску. Але колір блиску не є показником якості просвітлюючої технології.

Інтерференційні покриття, що просвітлюють, відрізняються:

- по числу шарів;
- методами нанесення: травленням, осадженням з розчину, напиленням в вакуумних установках;
- складом покриттів: зазвичай це солі і оксиди різних хімічних елементів.

Історично першим був метод травлення, при якому на поверхні скла утворювалася плівка з кремнезему.

Сучасні просвітлені об'єктиви з інтерференційним покриттям вимагають дбайливого обслуговування, так як найтонші просвітлюючі плівки на лінзах легко пошкодити. Забруднення на поверхні просвітлюючого покриття (плями жиру, масла) погіршують його оптичні властивості і знижують якість зображення через збільшення відображення і дифузного розсіювання світла. Крім того, забруднення (в тому числі і відбитки пальців) можуть привести до руйнування просвітлюючого покриття. Сучасні покриття, що просвітлюють зазвичай мають захисний зовнішній шар, що робить їх більш стійкими до несприятливого впливу навколишнього середовища.

З 1970-х років для просвітлюють покриттів стали застосовуватися органічні плівки на основі високомолекулярних сполук. Просвітлення стало

можливо наносити в кілька шарів, підвищуючи його ефективність не тільки в одному діапазоні довжин хвиль, але і в широкому спектрі, що особливо актуально для кольорової фотографії / кінозйомки / відео.

5.4 Придушення відображення з використанням кругового поляризатора

Принцип дії такого покриття антивідблиску заснований на застосуванні кругової поляризації світла [4] [5]. Круговий поляризатор складається зі звичайного лінійного поляризатора і чвертьхвильової пластинки (чвертьхвильову платівку не слід плутати з чвертьхвильовим інтерференційним шаром). Чвертьхвильова платівка перетворює плоскополяризоване світло, що проходить через неї в світло з круговою поляризацією, і навпаки, світло з круговою поляризацією в плоскополяризоване світло. Зовнішнє неполяризоване світло, проходячи через лінійний поляризатор перетворюється в плоскополяризоване світло, а після чвертьхвильової пластинки в світло, поляризоване по колу. Це світло, відбившись від поверхні, відблиски від якої потрібно усунути, змінює хіральність на протилежну, тобто якщо напрямок обертання світла з круговою поляризацією було направлено до відображення за годинниковою стрілкою, то після відображення напрямок обертання стає протилежним. Це відбите випромінювання повторно пройшовши через чвертьхвильову платівку знову стає плоскополяризованим, але площина поляризації його повернена щодо падаючого світла за лінійним поляризатором на 90° і тому не проходить назовні через поляризатор.

Застосування кругової поляризації дозволяє повністю усунути мерехтіння на поверхнях, що відображають, навіть металевих. Недолік такого методу - якщо падаюче зовнішнє світло неполяризоване, то потужність (інтенсивність) потоку світла, що проходить через кругової поляризатор, падає більш ніж удвічі, що обмежує застосування такого методу просвітлення в оптичних системах.

Придушення відблисків за допомогою кругової поляризації застосовується для створення антивідблискових покриттів екранів моніторів.

5.5 Методика розрахунків просвітлюючих покриттів

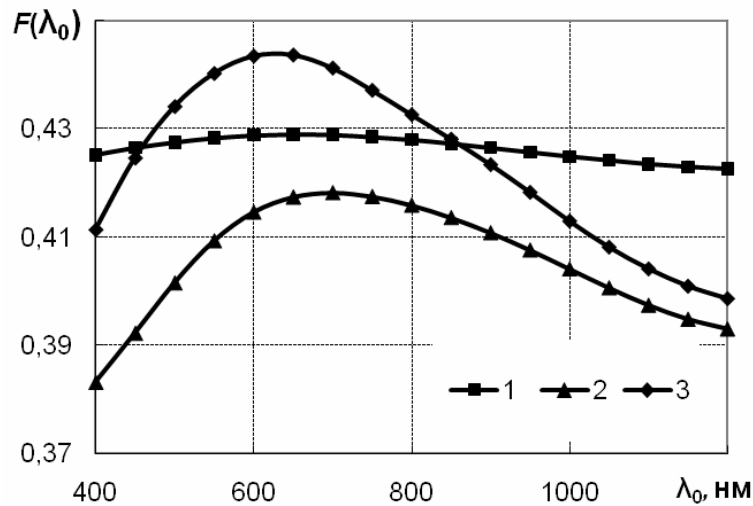
Для теоретичного аналізу використовувалися основні співвідношення сонячної енергетики, елементи теорії тонких плівок і отримана на їх основі методика оцінки ефективності просвітлюють покриттів. У практичній частині для вимірювання оптичних параметрів отриманих покриттів використовувалися еліпсометричеській і фотометричний методи. При проведенні еліпсометричеських вимірювань застосовувалися дві моделі плівки.

Методика оцінки ефективності просвітлюю чого покриття для захисних шарів сонячних елементів використовує наступні етапи:

- вибір критерію оцінки конструкції просвітлюючого покриття;
- результати розрахунку оптимальних параметрів покриттів для різних умов експлуатації сонячного елемента;
- засоби створення просвітлюючого покриття з низьким показником заломлення;
- порівняння ефективності експериментально отриманих зразків і розрахункових даних.

На рис. 5.2 представлені криві [13], що відповідають трьом конструкціям покриттів, що просвітлюють. Можна бачити, що тришарове покриття, що просвітлює, володіє найбільшою ефективністю для довжини хвилі $\lambda_0 = 628$ нм. Різниця в порівнянні з одношаровим покриттям в максимумі становить лише 3%. Для одношарового покриття характерна найменша залежність ефективності від довжини хвилі найменшого відображення. Крім того, виготовлення одношарового просвітлюючого покриття більш технологічно, що особливо актуально для нашого випадку, так як захисні скла мають значні розміри [13...15]. Таким чином, для проведення подальших розрахунків

використовувалася одношарова конструкція. Ввівши показник заломлення одношарового покриття n_1 як змінну, була розрахована ефективність покриття в залежності від оптичних параметрів n_1 і λ_0 . Результати розрахунку представлені у вигляді контурного графіка [14] на рис. 5.3.



1 – $n_1 = 1,45, n_1 d_1 = \lambda_0 / 4$, 2 – $n_1 = 1,92, n_2 = 1,45, n_1 d_1 = n_2 d_2 = \lambda_0 / 4$, 3 – $n_1 = 1,65, n_2 = 1,92, n_3 = 1,45, n_1 d_1 = n_3 d_3 = \lambda_0 / 4, n_2 d_2 = \lambda_0 / 2$

де λ_0 - довжина хвилі найменшого відображення.

Рисунок 5.2 – Загальна ефективність покриттів в залежності від оптичної товщини шару за нормального падіння

Як видно з графіка, функція ефективності має яскраво виражений максимум, який для випадку нормального падіння досягається *при* $n_1 = 1,233$ і $\lambda_0 = 657$ нм і становить 0,449. Нанесення такого покриття призводить до збільшення ефективності на 8% в порівнянні з чистою підкладкою. За використання в якості плівкового матеріалу SiO_2 з показником заломлення $n_1 = 1,44$ ефективність збільшується на 3%. За похилого падіння сонячного випромінювання ефективність покриття знижується за рахунок збільшення відображення на кордоні середовищ.

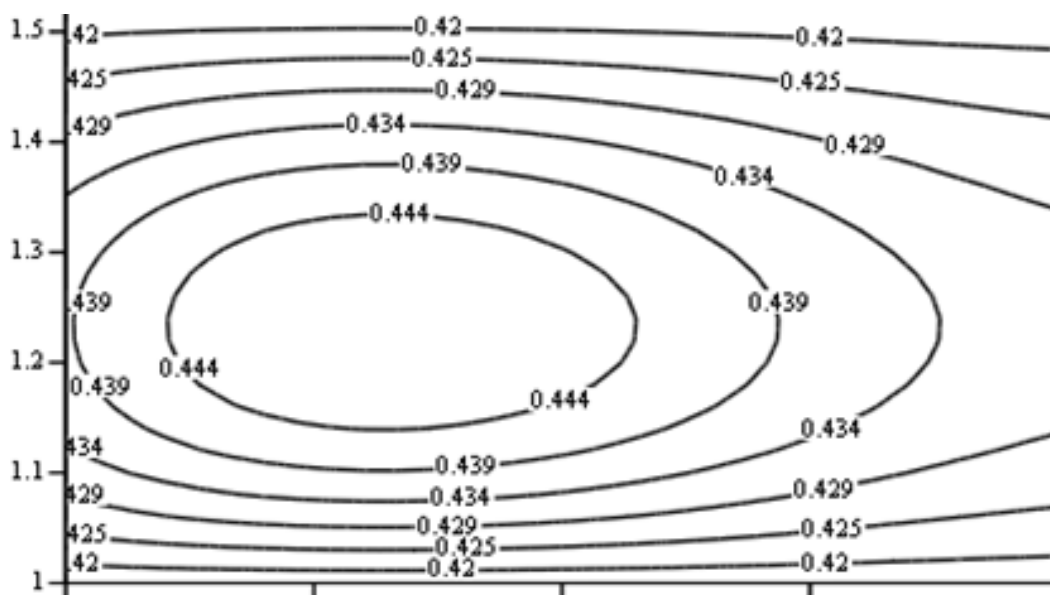


Рисунок 5.3 – Ефективність одношарового покриття $F(\lambda_0)$ за нормального падіння, де λ_0 - довжина хвилі найменшого відображення

Ефективність використання того чи іншого просвітлюючого покриття крім його оптичних характеристик залежить від спектральної чутливості матеріалу сонячного елемента, спектрального розподілу інтенсивності сонячного випромінювання в даній точці земної кулі для даної пори року і часу доби, а також від погодних умов.

ВИСНОВКИ

В результаті виконання атестаційної роботи виконано огляд сонячних панелей, накопичувальних систем, процесів очищення сонячних панелей, наявних захисних та просвітлюючих покриттів для різних використань.

Проаналізовано завдання та вихідні данні до нього, сформульовані напрямки його реалізації.

Розглянуті теоретичні підґрунтя просвітлюючих покриттів, ретельно досліджено матеріали, що використовують, досліджені властивості захисних і просвітлюючих покриттів для кремнієвих фотоелектричних перетворювачів доступних в Україні технологій, запропоновано просвітлююче покриття, що забезпечує максимальну ефективність використання сонячного випромінювання в різних умовах експлуатації.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Физика тонких пленок. Современное состояние исследований и технические применения. / Под ред. Хасса Г. и Туна Р. Э.. – М.: Мир, 1967. – Т. Т. 2.. – 396 с: ил с.
2. A. Deinega et. al. Minimizing light reflection from dielectric textured surfaces (англ.) // JOSA A : journal. – 2011. – Vol. 28. – P. 770.
3. Антиотражающие текстурированные покрытия.
<http://fdtd.kintechlab.com/ru/ar> (дата звернення 16 .11.2020).
4. J.-Q. Xi, Martin F. Schubert, Jong Kyu Kim, E. Fred Schubert, Minfeng Chen, Shawn-Yu Lin, W. Liu, J. A. Smart. [3 1] // . – 2007. – С. 176–179. – [doi:10.1038/nphoton.2007.26](https://doi.org/10.1038/nphoton.2007.26).
5. Стеклоанне покрытие солнечных батарей <https://solarb.ru/steklyannoe-pokrytie-solnechnykh-batarei> (дата звернення 18 .11.2020)
6. Дослідження характеристик плівок https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/30684/1/Venher_magistr.pdf (дата звернення 28 .11.2020)
7. Брус В. В. Оптические свойства тонких пленок / В. В. Брус, З. Д.
8. Ковалюк, П. Д. Марьянчук // Журнал технической физики. – 2009. – Т. 63– № 9. – С. 28 – 36.
9. Фаренбрух ,А. Солнечные элементы: Теория и эксперимент / А.Фаренбрух, А.И. Акишин. – М.: НИИЯФ МГУ, 2007. – 209 с
- 10.Глиберман А.Я. Кремниевые солнечные батареи / А.Я. Глиберман, А.К.Зайцева. . Ленинград ; Москва: Госэнергоиздат, 1972. – 72 с.
- 11.Чопра, К. Тонкопленочные солнечные элементы / К. Чопра, С. Дас. – М.Мир, 1986 г. – 438 с.
- 12.Колтун, М.М.- Оптика и метрология солнечных элементов / М.М. Колтун. – М.:Мир, 1985. – 280 с.

13. <https://greentechtrade.com.ua/ru/steklo-dlya-solnechnyh-batarej-effektyvnost-y-zaryadka/> (дата звернення 28 .11.2020)
14. https://www.researchgate.net/publication/266563281_Antireflection_and_protective_films_for_silicon_solar_cells (дата звернення 30 .11.2020)
15. Натарова Ю.В., Галат А.Б., Гнатенко А.С. Исследование фотоэлектрических преобразователей на основе различных полупроводниковых материалов // Журнал нано- та електронної фізики, 2018, Том 10 № 4, 04023-1 - 04023-6