МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ В. Н. КАРАЗІНА
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ КОМП'ЮТЕРНОЇ ФІЗКИ ТА ЕНЕРГЕТИКИ
Кафедра комп'ютерної фізики

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
до кваліфікаційної роботи
за освітньо-кваліфікаційним рівнем магістр

«Оптимізація геометричних параметрів наноструктурованої антиблікової поверхні для пасивного збільшення ефективності сонячних панелей»

Виконав: студент 2 курсу, групи НФ-64
Пісклов В. П.
Спеціальність: 105 – «Прикладна фізика та наноматеріали»
Освітньо-наукова програма: «Комп'ютерна фізика»
Керівник: PhD, доцент Овчаренко А. І.
Рецензент:

Харків – 2024

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

Навчально-науковий інститут комп'ютерної фізики та енергетики

Кафедра комп'ютерної фізики

Рівень вищої освіти (освітньо-кваліфікаційний рівень) магістр

Спеціальність 105 – «Прикладна фізика та наноматеріали»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Костянтин НЄМЧЕНКО

(підпис)

«____» _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Пісклову Володимиру Павловичу

1. Тема роботи «Оптимізація геометричних параметрів наноструктурованої антиблікової поверхні для пасивного збільшення ефективності сонячних панелей»,

   керівник роботи: Овчаренко Антон Ігорович, PhD, доцент, затверджені наказом по університету від 23 січня 2024 року № 4201- 5/144.
2. Строк подання студентом роботи 20 травня 2024.
3. Перелік питань, які потрібно розробити:

- Провести аналітичний огляд літератури, присвяченій антибліковим поверхням;
- Ознайомитись з існуючими методами та підходами до моделювання відбиття електромагнітної хвилі;
- Провести аналіз існуючих методів дослідження і оптимізації дизайну;
- Провести аналіз граничних умов на поверхнях оболонки та рідини

- Спираючись на проведений аналіз обрати метод моделювання та дизайн структури;
- Провести моделювання відбиття електромагнітної хвилі різними методами та порівняти результати.

4. План роботи:

№ з/п	Назви етапів роботи
1	Ознайомлення з методами моделювання оптичних властивостей наноструктурованих поверхонь.
2	Формулювання проблеми оптимізації геометричних параметрів антиблікової поверхні.
3	Зведення задачі про відбиття електромагнітних хвиль на наноструктурованих поверхнях до системи рівнянь.
4	Узагальнення числового методу моделювання відбиття світлових хвиль.
5	Чисельний аналіз ефективності антиблікових поверхонь за різних умов освітлення.
6	Визначення та формулювання висновків дипломної роботи.

5. Дата видачі завдання 23 лютого 2024 року

Студент _____ Володимир ПІСКЛОВ
(підпис)

Керівник роботи _____ Антон ОВЧАРЕНКО
(підпис)

Перелік скорочень та абревіатур

RCWA – Rigorous Coupled-Wave Analysis (Метод ригорозного аналізу зв'язаних хвиль)

GLOnet – Global Topology Optimization Network (Мережа для глобальної оптимізації топології)

GAN - Generative Adversarial Networks (генеративні змагальні мережі)

АБП - антиблікові поверхні

РЕФЕРАТ

Пісклова Володимира Павловича «Оптимізація геометричних параметрів наностроктурованої АБП для пасивного збільшення ефективності сонячних панелей». Кваліфікаційна робота магістра з прикладної фізики та наноматеріалів.- Х.: Харківській національний університет імені В. Н. Каразіна, 2024.

Кваліфікаційна робота представлена на 32 сторінках; складається з вступу, 3 розділів та висновків; містить 13 рисунків, список використаної літератури з 19 найменувань.

Метою даної роботи є моделювання наностроктурованої АБП, що збільшить ефективність сонячної батареї за рахунок зменшення відбиття від її поверхні.

Об’єктом дослідження є геометричні параметри наноструктурованих АБП.

Предмет дослідження – різні діелектричні наноструктури.

Наукова новизна даної роботи полягає у розробці та моделюванні нових конфігурацій наноструктурованих АБП, які забезпечують значне зниження відбиття світлових хвиль та підвищення ефективності сонячних панелей. Вперше було проведено комплексний аналіз впливу різних геометричних параметрів на оптичні властивості цих поверхонь.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: НАНОСТРУКТУРОВАНІ АБП, СОНЯЧНІ ПАНЕЛІ, ОПТИМІЗАЦІЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ, МАШИННЕ НАВЧАННЯ В ОПТИМІЗАЦІЇ

ABSTRACT

Volodymyr Pisklov’s thesis, "Optimization of Geometric Parameters of Nanostructured Anti-reflective Surfaces for Passive Enhancement of Solar Panel Efficiency," Master's thesis in Applied Physics of nanomaterials– Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University, 2024.

This thesis is presented on 32 pages; it includes an introduction, three chapters, and conclusions; contains 13 figures and a bibliography with 19 references.

The objective of this work is to model a nanostructured anti-reflective surface that enhances the efficiency of solar panels by reducing light reflection. The study focuses on the geometric parameters of nanostructured anti-reflective surfaces. The research subject involves various dielectric nanostructures.

The scientific novelty of this thesis lies in the development and modeling of new configurations of nanostructured anti-reflective surfaces, which substantially reduce light reflection and enhance the efficiency of solar panels. For the first time, a comprehensive analysis has been conducted on how different geometric parameters affect the optical properties of these surfaces.

KEYWORDS: NANOSTRUCTURED ANTI-REFLECTIVE SURFACES, SOLAR PANELS, GEOMETRIC PARAMETER OPTIMIZATION, MACHINE LEARNING IN OPTIMIZATION

ЗМІСТ

ВСТУП 8

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ 10

1.1 Загальна інформація про метаповерхні 10

1.2 Метод строгого аналізу зв’язаних хвиль 11

1.3 Методи опитимізації 13

1.4 Антивідбиваючі поверхні 14

РОЗДІЛ 2. МЕТОДОЛОГІЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА АНАЛІЗУ 16

2.1 Одношарові прості геометричні структури 16

2.2 Опис підходу GLOnet 17

РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ НАНОСТРУКТУРОВАНИХ АБП 20

3.1 Моделювання одношарової АБП 20

3.2 Моделювання двошарової АБП 24

3.3 Моделювання одношарової АБП за допомогою GLOnet 26

ВИСНОВОК 30

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ 31

ВСТУП

Актуальність теми.

Дана робота присвячена оптимізації геометричних параметрів наноструктурованої АБП для пасивного збільшення ефективності сонячних панелей. Сучасне суспільство стикається з величезними викликами у сфері енергетики, де основним завданням є пошук відновлюваних джерел енергії, які можуть замінити вичерпні та екологічно шкідливі традиційні ресурси. Сонячна енергетика, яка демонструє швидкі темпи розвитку в усьому світі, грає ключову роль у цьому пошуку. Оптимізація фотоелектричних систем, зокрема через вдосконалення оптичних властивостей сонячних панелей, відкриває нові можливості для збільшення їхньої ефективності і, відповідно, зниження загальних витрат на виробництво електроенергії.

У цьому контексті, значущість наноструктурованих АБП стає особливо актуальною, адже вони забезпечують значне зниження відбиття світлових хвиль, що дозволяє підвищити загальну кількість енергії, яку можна перетворити в електрику. Це, в свою чергу, зумовлює необхідність дослідження та розробки нових технологій і методів, які могли б оптимізувати такі покриття для їх більш ефективного використання.

Ось декілька основних причин, через які значущість наноструктурованих АБП є важливою:

1. Наноструктуровані АБП значно знижують відбиття світлових хвиль, підвищуючи ефективність сонячних панелей.
2. Вони підвищують загальну кількість енергії, яку можна перетворити в електрику, що сприяє зниженню витрат на виробництво електроенергії.

Таким чином, існує багато причин актуальності використання наноструктурованих АБП, які є підходящим та ефективним рішенням для підвищення ефективності сонячних панелей.

Мета.

Метою даної роботи є розробка оптимальних геометричних параметрів наноструктурованих АБП для максимізації поглинання світла сонячними панелями. Для досягнення цієї мети необхідно розв’язати наступні завдання:

1. Провести аналітичний огляд літератури, присвяченій АБП;
2. Ознайомитись з існуючими методами та підходами до моделювання відбиття електромагнітної хвилі;
3. Провести аналіз існуючих методів дослідження і оптимізації дизайну;
4. Спираючись на проведений аналіз обрати метод моделювання та дизайн структури;
5. Провести моделювання відбиття електромагнітної хвилі різними методами та порівняти результати;

Об’єкт дослідження. Об’єктом дослідження є оптичні властивості наноструктурованих АБП сонячних панелей.

Предмет дослідження. Предметом дослідження є процес оптимізації геометричних параметрів наноструктурованих АБП для підвищення ефективності фотоелектричних перетворень.

Наукова новизна полягає в застосуванні та аналізі сучасних методів моделювання для вивчення впливу геометричних параметрів на оптичні властивості наноструктурованих АБП сонячних панелей. Також було досліджено, як різні конфігурації цих поверхонь можуть впливати на зменшення відбиття світлових хвиль, що сприяє підвищенню ефективності сонячних панел.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

1.1 Загальна інформація про метаповерхні.

1.1.1 Визначення та принципи роботи.

Метаповерхні — це особливий клас оптичних матеріалів, які складаються з періодично або аперіодичних повторюваних мікро та наноструктур, здатних маніпулювати властивостями світла на рівні, що недоступний однорідним матеріалам. Ці структури можуть бути виготовлені з різних матеріалів, включно з металами, діелектриками і полупровідниками, що відповідають за їх унікальні оптичні властивості. Розмір кожного елемента в метаповерхнях значно менший за довжину хвилі світла, що вони контролюють, дозволяючи ефективно маніпулювати світловими хвилями за допомогою аномального відбиття та заломлення, фокусування та дисперсії.

Ключ до розуміння принципів роботи метаповерхонь лежить у їх здатності до локальної модифікації фази світла, що проходить через або відбивається від них. Це досягається завдяки точному проектуванню форми, розміру, і взаєморозміщення наноелементів, які разом формують метаповерхню. Таке проектування дозволяє метаповерхням перетворювати плоску фазову хвилю на складні хвильові фронти, виконуючи функції лінз, призм та інших оптичних компонентів, але без зайвого баласту ваги і об'єму.[1]

1.1.2 Приклади застосування.

Метаповерхні відіграють ключову роль у багатьох передових технологічних розробках, особливо в областях, де потрібне точне керування світловими пучками. Їх застосування можна зустріти в таких сферах, як ультратонкі камери і лінзи без аберацій для споживчої електроніки, високоефективні сенсори для біомедичних застосувань, та антивідбиваючі покриття для сонячних панелей, де вони покращують абсорбцію світла і знижують відбиття.

Однією з найбільш захоплюючих застосувань метаповерхонь є створення оптичних компонентів, що можуть виконувати багатофункціональні завдання, як-от об'єднання кількох лінз у одну плоску структуру, що може змінювати свої властивості в реальному часі. Це відкриває шлях до розробки адаптивної оптики, де одна метаповерхня може виконувати роль кількох різних оптичних приладів без необхідності фізичної заміни компонентів.[2]

1.1.3 Поточні дослідження та досягнення.

Новітні дослідження в області метаповерхонь спрямовані на дальше підвищення їхньої функціональності та впровадження в широкий спектр застосувань. Велика увага приділяється пошуку нових матеріалів, що забезпечують кращі оптичні характеристики та більшу стійкість до умов експлуатації. Вчені також працюють над методами швидкісного виробництва метаповерхонь, що дозволить знизити їх вартість і зробити більш доступними для комерційного використання.

Разом з технічними вдосконаленнями, існує значний науковий інтерес до створення програмованих метаповерхонь, які можуть динамічно змінювати свої властивості за допомогою зовнішніх стимулів, як-от електричні поля або температурні зміни. Це становить особливий інтерес для розробки нових генерацій оптичних пристроїв, що можуть адаптуватися до змін умов освітлення або зовнішнього середовища без втручання користувача.[3]

1.2 Метод строгого аналізу зв’язаних хвиль.

1.2.1 Визначення та принципи роботи.

Метод строгого аналізу зв’язаних хвиль (RCWA) використовується для моделювання періодичних оптичних структур. Цей метод ефективно аналізує дифракцію світла, що дозволяє точно передбачати поведінку світлових хвиль у комплексних многошарових системах.[4,5]

1.2.2 Варіанти застосування для симуляції оптичних властивостей.

RCWA є ідеальним для розрахунку ефективності антивідбиваючих покриттів і метаповерхонь, що використовуються в сонячних панелях. Цей метод допомагає оптимізувати дизайн структур для досягнення максимальної проходження світла без значних втрат на відбиття.[6]

1.2.3 Огляд методу RCWA.

RCWA є потужним чисельним інструментом для аналізу дифракції світла на періодичних структурах. Він дозволяє моделювати взаємодію світла з комплексними мультишаровими системами, включаючи ті, що мають аномальні оптичні властивості.

Цей метод базується на розкладі електромагнітного поля на складові Фур'є, що дозволяє точно розрахувати амплітуди відбитих та пропущених хвиль через структуру. RCWA ефективний для різних матеріалів, включаючи діелектрики, метали та полупровідники, що робить його незамінним інструментом у фотоніці, нанотехнологіях та оптичному проектуванні.

Особливістю RCWA є його здатність точно моделювати поляризацію та фазу світлових хвиль, що дає змогу розробникам оптичних систем оптимізувати параметри структур на мікро- та нанорівнях. Також метод дозволяє враховувати неідеальності структури, такі як шорсткості поверхні або нерівномірність матеріалів.[7]

1.2.4 Огляд методу RCWA Його застосування для симуляції оптичних властивостей.

Завдяки своїй універсальності, RCWA став ключовим методом у розробці оптичних властивостей метаповерхонь і антивідбиваючих покриттів. Метод використовується для розрахунку ефективності цих структур, спрямованої на максимізацію пропускання світла і мінімізацію втрат через відбиття. Це особливо важливо у сфері сонячної енергетики, де кожен відсоток збільшення ефективності може значно знизити загальні витрати на енергію.

RCWA також використовується для проектування оптичних фільтрів, які можуть вибірково пропускати або блокувати певні діапазони довжин хвиль світла. У медицині, наприклад, ці фільтри застосовують для захисту чутливих ділянок тканин або компонентів оптичних приладів від шкідливого випромінювання.

Додатково, RCWA дозволяє інженерам аналізувати вплив різних факторів на пропускні властивості оптичних систем, що включає температурні зміни, механічні напруження та інші екологічні впливи, забезпечуючи таким чином високу надійність і довговічність кінцевих продуктів.[8,9]

1.3 Методи опитимізації.

1.3.1 Прямі та зворотні методи проектування.

Оптимізація у проектуванні наноструктур може бути реалізована за допомогою двох основних підходів: прямих і зворотних методів проектування. Прямі методи зазвичай включають створення дизайну на основі заданих параметрів і випробувань їх через симуляції або експериментальні методики. Цей підхід добре працює, коли інженер має чітке розуміння того, як зміни у властивостях матеріалів впливають на кінцеві характеристики наноструктури.

Зворотні методи проектування, у свою чергу, використовуються для визначення оптимальних параметрів дизайну на основі заданих функціональних вимог. Цей метод часто застосовується за допомогою алгоритмів оптимізації, таких як генетичні алгоритми або методи машинного навчання, що дозволяє знаходити оптимальні рішення в складних многопараметричних просторах. Зворотні методи є особливо корисними у випадках, коли прямий зв'язок між параметрами дизайну та їх функціональним впливом не очевидний або надто складний для аналітичного визначення.[10]

1.3.2 Роль оптимізації у проектуванні наноструктур.

Оптимізація є критично важливою для проектування наноструктур, оскільки вона дозволяє максимально використати властивості матеріалів,

зменшити втрати і підвищити ефективність приладів. У контексті сонячних панелей, оптимізація наноструктур може включати розробку таких конфігурацій, які забезпечують максимальну абсорбцію світлових хвиль при мінімальному відбитті. Такі технології, як антивідбиваючі покриття та фотонні кристали, можуть бути оптимізовані для конкретних діапазонів довжин хвиль, що значно підвищує загальну продуктивність сонячних модулів.

Крім того, важливу роль відіграє зменшення виробничих витрат і збільшення масштабованості виробництва. За допомогою оптимізації можна визначити такі параметри виробництва, які забезпечать найкраще співвідношення ціна/якість, зберігаючи при цьому високу продуктивність продуктів. Це включає аналіз матеріалів, технологічних процесів і логістичних аспектів виробництва.[11,12]

1.4 Антивідбиваючі поверхні.

1.4.1 Мотивація використання.

Антивідбиваючі покриття є важливим компонентом у сонячних панелях, де вони відіграють критичну роль у підвищенні загальної ефективності енергетичного перетворення. Ці покриття знижують втрати світла, які відбуваються через відбиття, тим самим забезпечуючи більшу абсорбцію світла у фотовольтаїчних елементах. Ефективне застосування антивідбиваючих покриттів може значно збільшити кількість електричної енергії, що генерується, тим самим зменшуючи загальні витрати на енергію для кінцевих споживачів.[13]

1.4.2 Поточні технології.

Сучасні антивідбиваючі технології активно використовують наноструктурні підходи для досягнення найкращих результатів у зниженні відбиття світла. Пірамідні, мозаїчні, і багатошарові наноструктури ефективно мінімізують втрати світла на широкому діапазоні довжин хвиль, забезпечуючи оптимальну абсорбцію у фотовольтаїчних системах. Ці технології

застосовуються не тільки в сонячних панелях, але й у багатьох оптичних приладах, де важливе ефективне управління світлом.[14]

1.4.3 Інновації в антивідбиваючих матеріалах.

Дослідження в області антивідбиваючих матеріалів розвивається швидкими темпами, особливо з акцентом на розробку нових діелектричних матеріалів та вдосконалення методів нанесення. Використання наноінженерії дозволяє створювати структури, які оптимально взаємодіють зі світлом, що призводить до значного зниження відбиття. Основні інновації включають розробку більш стійких до стирання та ультрафіолетового впливу покриттів, а також створення адаптивних систем, які можуть змінювати свої оптичні характеристики в залежності від умов навколишнього середовища.[14]

РОЗДІЛ 2. МЕТОДОЛОГІЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА АНАЛІЗУ.

2.1 Одношарові прості геометричні структури.

Одношарові прості геометричні структури – це моделі, що використовуються для оптимізації ефективності сонячних елементів, зменшуючи відбиття і підвищуючи поглинання світла. Ці структури, зазвичай включаючи періодичні наноструктурні візерунки, розроблені для маніпуляції світлом на нанорівні. Процес моделювання використовує передові обчислювальні методи для прогнозування, як ці візерунки впливатимуть на оптичні властивості поверхні. Регулюючи параметри, такі як форма, розмір та відстань між наноструктурами, можна визначити оптимальну конфігурацію, яка призведе до значного покращення продуктивності сонячних панелей.

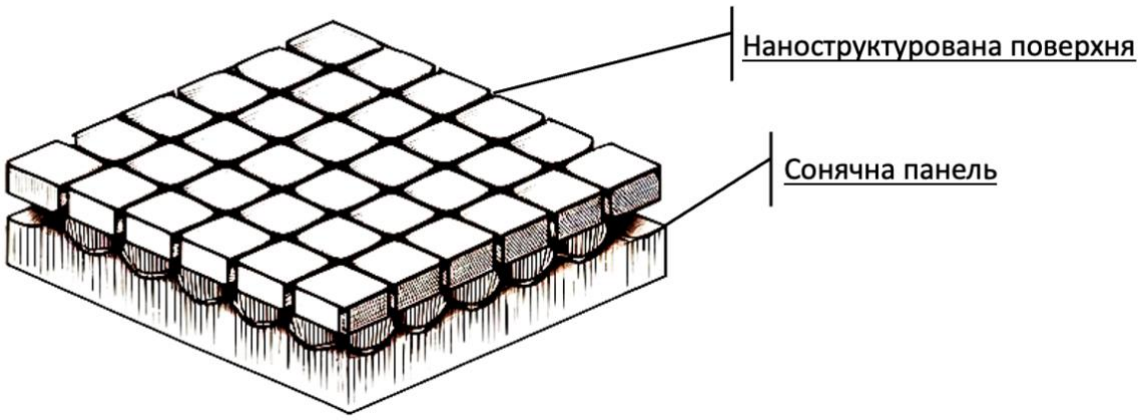


Рис.2.1.1 Схематичне зображення моделі що досліджується

Рисунок 2.2.1 демонструє просту геометричну наноструктуровану поверхню в розрізі, розроблену для антивідбивання на сонячних елементах. Візерунок включає серію періодичних елементів, які мають на меті максимізувати поглинання світла шляхом мінімізації відбиття.

2.1 Структури з додавання прошарку скла.

Структури з додаванням прошарку скла – це моделі, які використовуються для покращення ефективності сонячних елементів шляхом оптимізації відбиття і поглинання світла. Додавання скляного прошарку дозволяє краще маніпулювати світловими хвилями на нанорівні, що покращує їх оптичні

властивості. Моделювання таких структур включає використання передових обчислювальних методів для прогнозування впливу скляного прошарку на загальну ефективність сонячних панелей. Регулюючи параметри наноструктур і скла, такі як товщина, форма і відстань між шарами, можна досягти оптимальних результатів, що сприяють значному підвищенню продуктивності сонячних елементів.

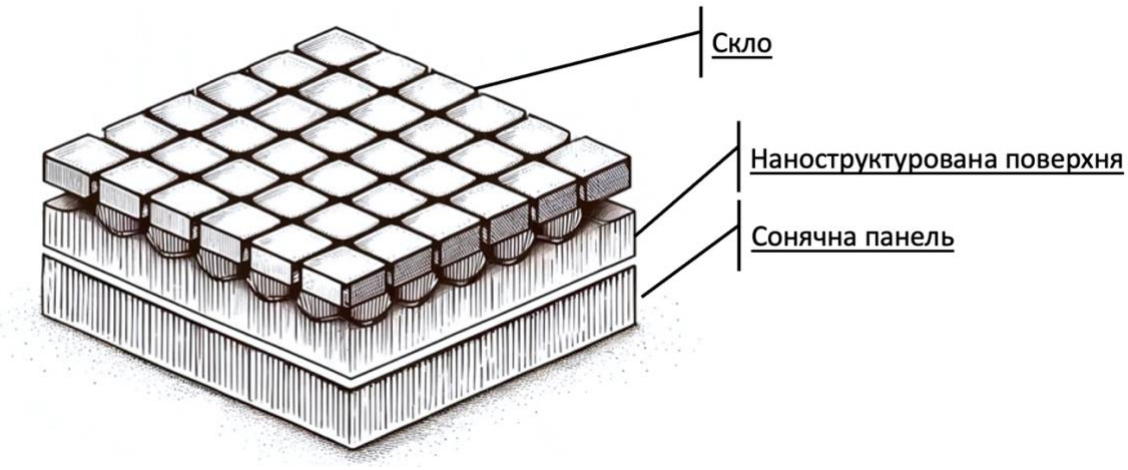


Рис. 2.2.1 Структура з додавання прошарку скла

Рисунок 2.2.1 демонсдемонструє наноструктуровану поверхню з додаванням прошарку скла. Верхній шар містить періодичні елементи, а нижній шар представлений склом, що забезпечує покращені оптичні властивості для антивідбивання на сонячних елементах.

2.2 Опис підходу GLOnet.

Останні роки, набуває розвитку застосування принципів та досягнень сфери машинного навчання в фізиці, і, зокрема, в фотониці [15]. Ці підходи обіцяють вищу якісь запропонованих дизайнів, тому в рамках поточній роботи було прийняте рішення дослідити ці методи і порівняти їх з класичними. Однією з найбільш перспективних реалізацій цього підходу є GLOnet [16]. Цей підхід добре задокументований у літературі та пройшов успішні тестування, що стало однією з причин вибору GLOnet. Відкритий код GLOnet надає можливість широкого використання та модифікації під конкретні потреби, що також є вагомою перевагою.

2.3.1 Застосування машинного навчання в фотонному дизайні

Поєднання машинного навчання з проектуванням структур у фотоніці стало важливим проривом у цій галузі. Машинне навчання дозволяє створювати сурогатні моделі, які імітують роботу програмних пакетів електромагнітного модлювання. Це відкриває перспективи для вирішення складних завдань зворотнього дизайну фотонних пристроїв. Проте, масштабованість таких методів до складних систем залишається викликом.

Одним із рішень цієї проблеми є використання генеративних змагальних мереж (GAN). GAN продемонстрували великий потенціал в обробці зображень і успішно застосовуються в фотонному зворотньому дизайні, навчаючись відтворювати високоефективні шаблони пристроїв на основі навчальних даних. Основною ідеєю використання машинного навчання в фотонному дизайні є створення бази даних геометрій пристроїв і їх оптичних характеристик для тренування нейронних мереж. Після тренування ці мережі можуть швидко запропонувати нові дизайни.

Різні стратегії машинного навчання, такі як глибокі та згорткові мережі, а також GAN, показали можливість прогнозувати оптичні властивості на основі структурних геометрій. Проте ефективність цього підходу обмежується великим обсягом обчислювальних ресурсів, необхідних для створення початкових навчальних наборів, і складністю геометрій пристроїв у великому дизайновому просторі. Це вимагає розробки інноваційних методів машинного навчання, здатних орієнтуватися в високодименсіональних дизайнових просторах з практичною користю в електромагнітному дизайні.

2.3.2 Формулювання GLOnets

На шляху до більш глобально оптимальних дизайнів Джіанг і Фан запропонували нову оптимізаційну структуру під назвою Global Topology Optimization Networks (GLOnets). GLOnets поєднують обчислювальну електромагнетику з тренуванням генеративних нейронних мереж для виявлення кращих фотонних структур. Відмінно від градієнтних методів, які

працюють з окремими пристроями, GLOnets оптимізують цілу популяцію пристроїв, дозволяючи комплексно досліджувати дизайновий ландшафт.

Підхід GLOnet вирішує проблему оптимізації, тренуючи генератор на основі нейронної мережі, який генерує зразки в околицях глобального оптимуму в параметричному просторі, кількість вимірів якого дорівнює довжині вектора x. Цей підхід не потребує навчального набору даних, оскільки метою є не "вивчення" рівнянь Максвелла, а ефективне вибіркове дослідження параметричного простору з меншою кількістю моделювань, які будуть виконані під час тренування.

Існує дві варіації GLOnet: безумовна та умовна. Безумовна варіація працює без додаткових вхідних параметрів, тоді як умовна включає додаткові параметри, такі як робоча довжина хвилі та/або кут дифракції. Генератор починається з випадкових вагових значень, а також випадкового шумового вектора, який є вхідним для генератора. Спочатку генератор буде генерувати переважно низькоефективні пристрої через випадковий розподіл індексів. Проте, поступово налаштовуючись за допомогою градієнта Eff(x) відносно x, алгоритм використовує метод зворотного розповсюдження помилки для оновлення вагових значень генератора.

Перевага GLOnet полягає у здатності досліджувати практично весь дизайновий простір, знаходячи глобально оптимальні рішення. Це дозволяє забезпечити не лише одне, а цілий набір високоефективних рішень, значно перевищуючи можливості традиційних локальних оптимізаційних методів. Таким чином, застосування машинного навчання та інноваційних підходів, таких як GLOnet, відкриває нові горизонти у фотонному дизайні, сприяючи розробці більш ефективних і високопродуктивних фотонних структур.

РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ НАНОСТРУКТУРОВАНИХ АБП.

В дипломній роботі розглядається моделювання нанастуруктурованої АБП різних типів за допомогою імплементацію RCWA, пакет на матлабі авторів [17].

3.1 Моделювання одношарової АБП.

Спочатку розглянемо найпростіший випадок одношарової структури на поверхні сонячної панелі.

Моделюємо трьохшарову середу:

1. Прошарок полікристалічного кремнію
2. Антибліковий шар
3. Шар повітря.

Основа дослідження

За основу сонячної панелі мы використовуємо полікристалічний кремній, що має дисперсійні властивості, які зображені на графіку нижче.

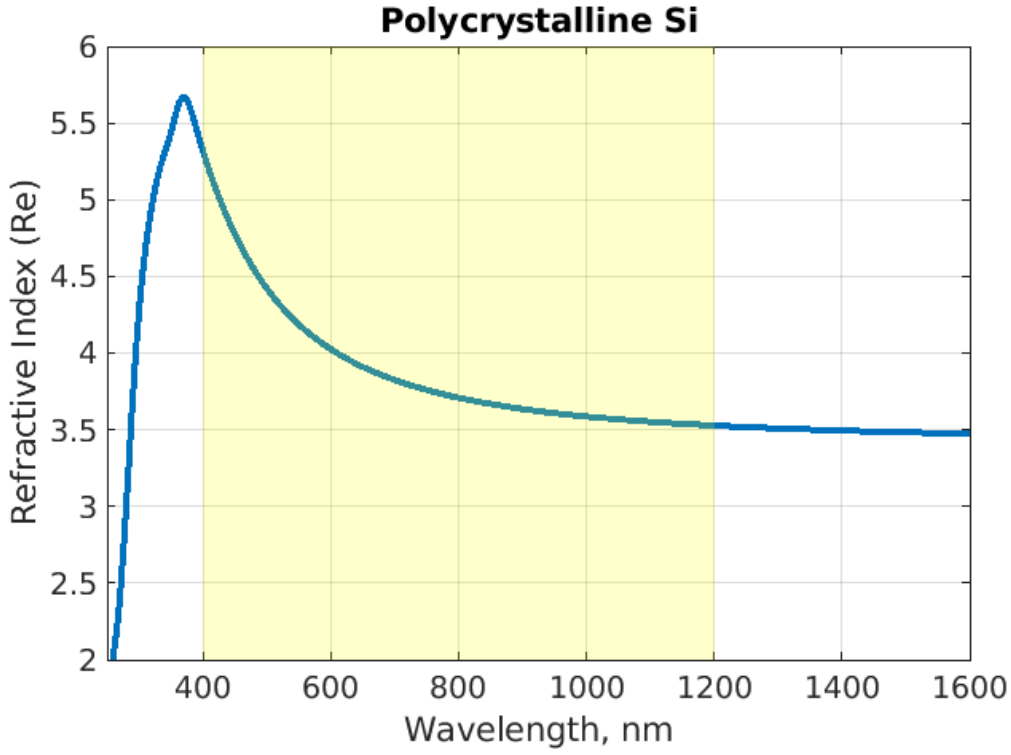


Рис.3.1.1 Дисперсія полікристалічного кремнію

Дисперсія цього матеріалу важлива, адже вона впливає на ефективність поглинання світла. Реальна частина показника заломлення в цьому діапазоні становить близько 3.935, що змінюється нелінійно. Жовтий колір на графіку вказує на видимий та інфрачервоний діапазони, що відповідають максимальному випромінюванню сонця.

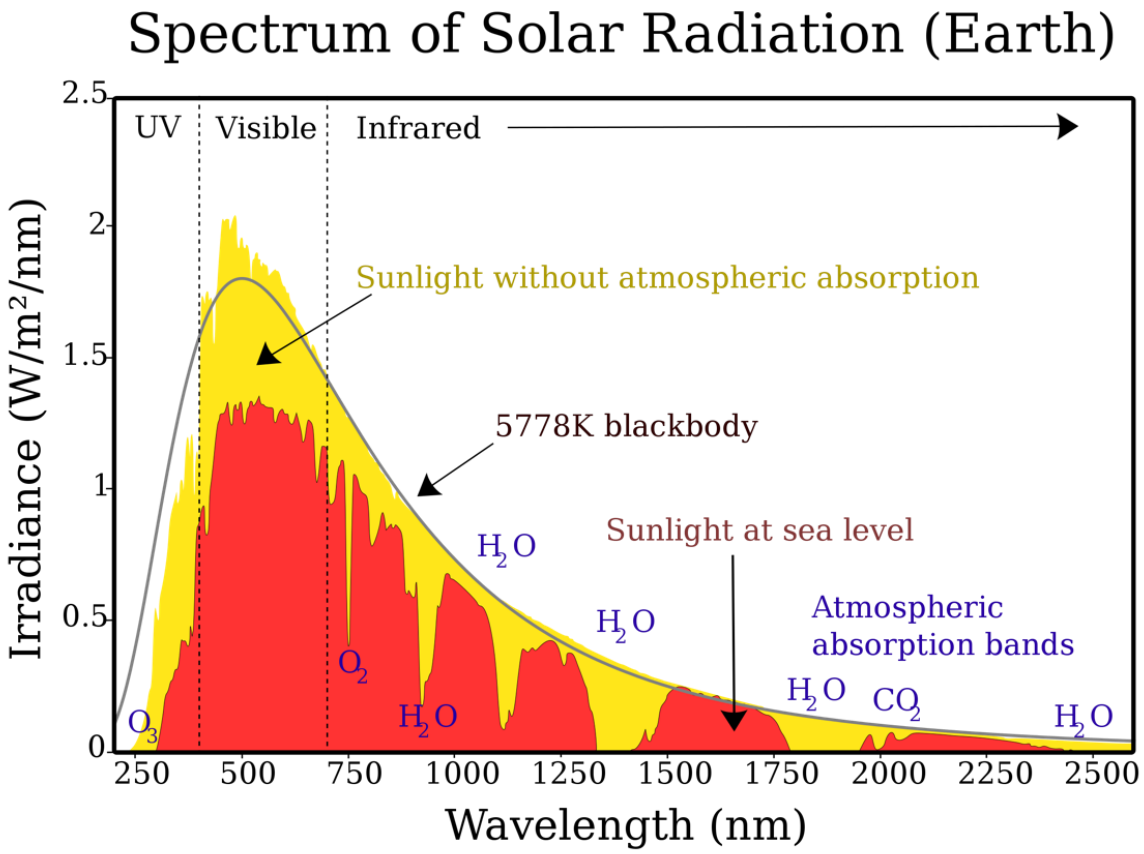


Рис.3.1.1 Спектр сонячного випромінювання[18]

Геометричні параметри сегмента АБП

Сегмент представлений у вигляді хреста з циліндром у середині ця геометрія досліджувалась в роботі [19] з фіксованим P (періодом) 400 нм, та змінними параметри R, W, H, L:

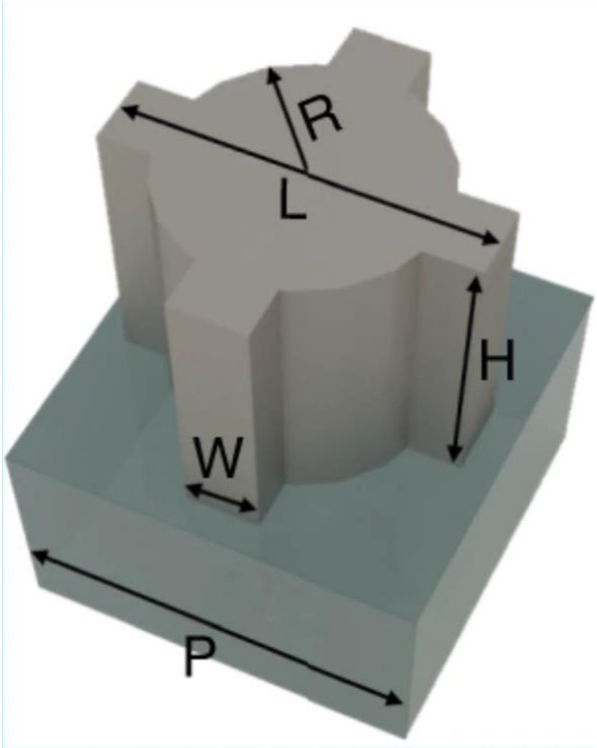


Рис.3.1.2 Макет сегмент АБП

Після серії моделювань з різними комбінаціями параметрів, що змінюються, найкраща з них відповідає зображенню, що наведене на Рис. 3.1.3

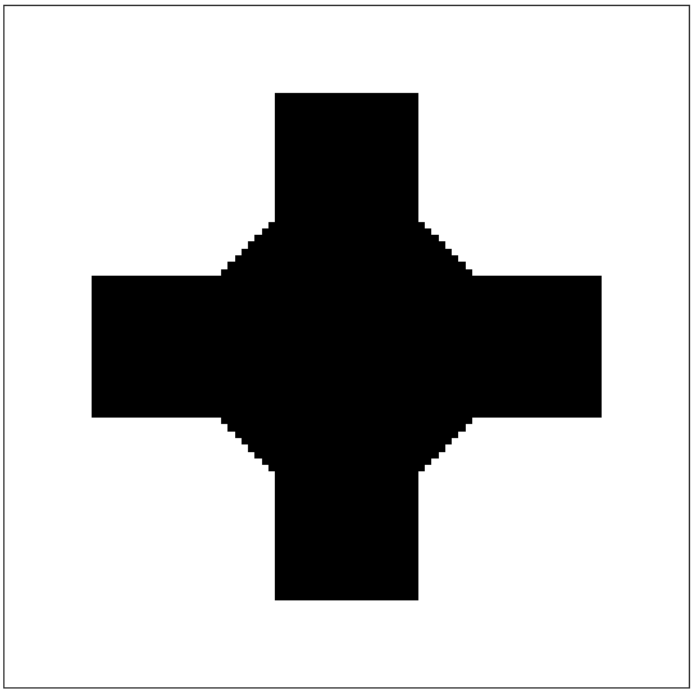


Рис.3.1.3 Змодельований сегмент АБП

З такимим параметрами

1. R (радіус): - 84 нм
2. W (ширина): - 83 нм
3. L (довжина): - 296 нм
4. H (висота): - 325 нм

Порівняння показує значне зниження відбиття світла завдяки використанню антиблікового шару:

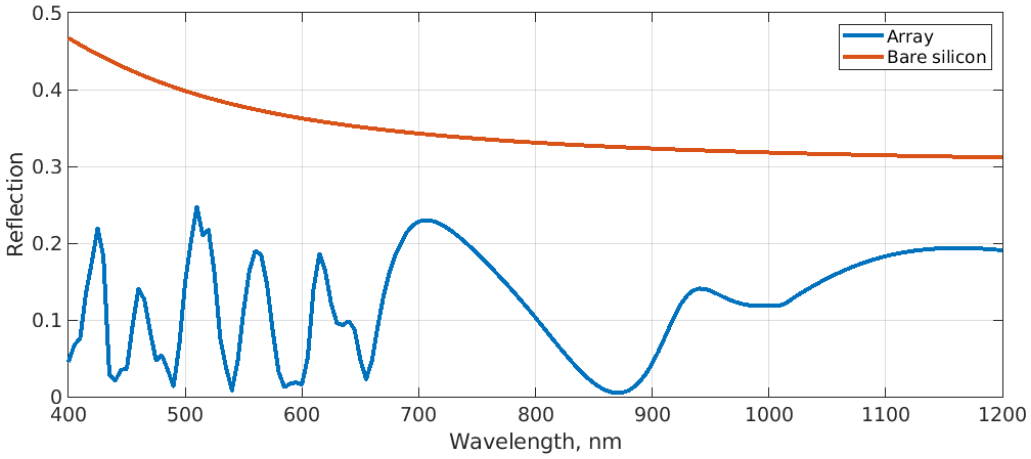


Рис.3.1.4 Порівняння зниження відбиття світла

Без антиблікового шару (bare Si) середнє відбиття становить 34.5%.

З антибліковим шаром: Середнє відбиття знижується до 12.5%.

Ці дані демонструють значну ефективність АБП у зниженні втрат світла через відбиття, що сприяє кращому поглинанню світла сонячною панеллю і збільшенню її загальної продуктивності.

3.2 Моделювання двошарової АБП.

Для збільшення ефективності та оптимізації параметрів ми додаємо прошарок скла, що дозволяє зменшити різкість контрасту індексу заломлення між шарами та покращити умови переходу світлових хвиль через структуру.

Моделюємо чотирьохшарову середу:

1. Прошарок полікристалічного кремнію.
2. Антибліковий шар.
3. Шар скла.
4. Шар повітря.

Основа дослідження

Скляний шар було обрано через його оптичні властивості, які відображені на наступному графіку. Ці властивості важливі для забезпечення плавного переходу світлових хвиль та зменшення втрат на відбиття.

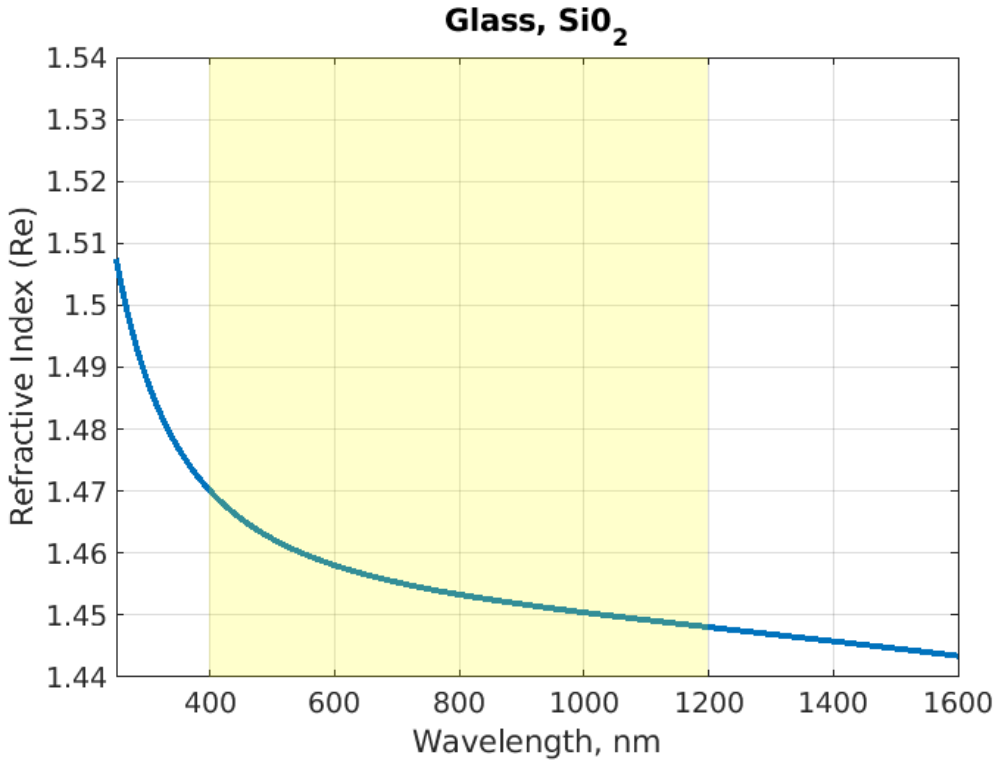


Рис.3.2.1 Дисперсія скла

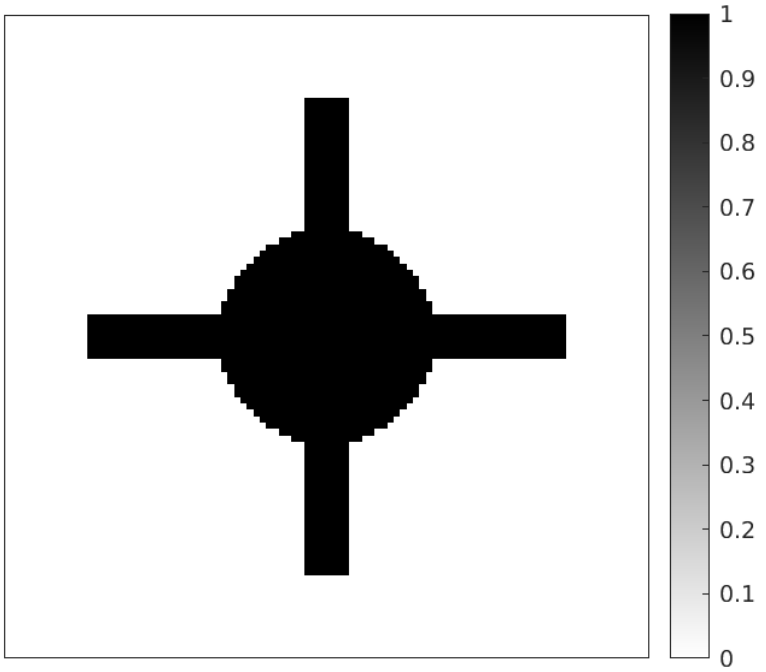


Рис.3.2.2 Змодельований сегмент двошарової АБП

Геометричні параметри, оптимізовані програмою:

1. R (радіус): 67 нм
2. W (ширина): 27 нм
3. L (довжина): 293 нм
4. H (висота): 180 нм
5. H_glass (висота скла): 775 нм

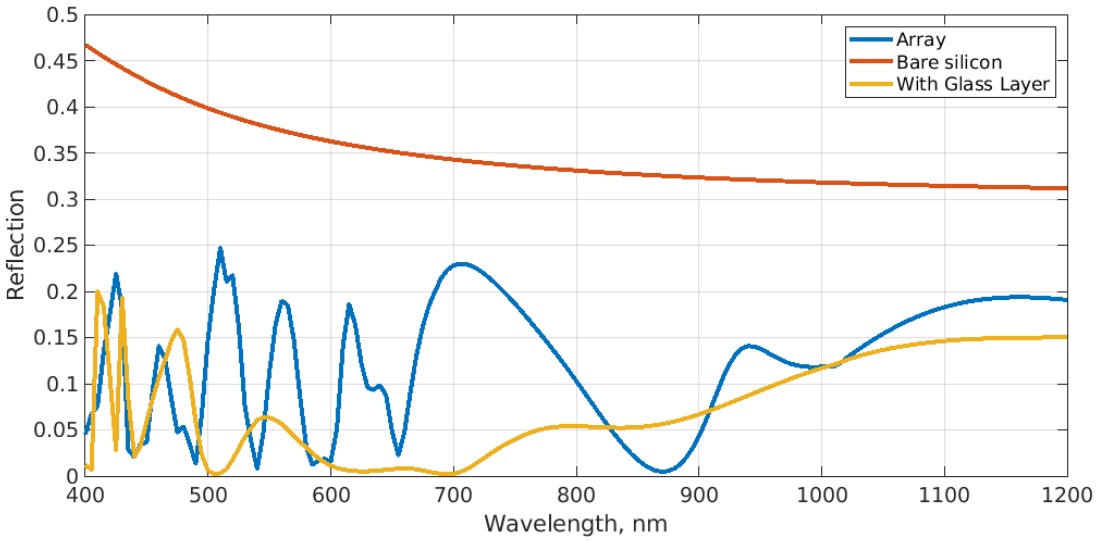


Рис.3.2.3 Порівняння зниження відбиття світла

За результатами оптимізації, середнє відбиття світла знизилося до 7.5%. Це підтверджує значне зменшення відбиття у спектрі від 500 нм до 900 нм, що є важливим для покращення загальної продуктивності сонячних панелей.

3.3 Моделювання одношарової АБП за допомогою GLOnet

У попередніх розділах ми розглянули прямі методи оптимізації, що дозволяли нам варіювати декілька параметрів і вибрати найкраще рішення серед заданих варіантів. Цей підхід, хоч і ефективний, має свої обмеження, зокрема у випадках коли потрібно оптимізувати велику кількість параметрів або коли рішення необхідно адаптувати під складні умови.

Впровадження GLOnet

Для подальшого підвищення потенціалу оптимізації та вивчення переваг просунутішого підходу, ми вирішили використати алгоритм GLOnet. GLOnet - це метод, заснований на генеративних нейронних мережах, який дозволяє гнучко змінювати розподіл матеріалу в структурі без чітко заданої конфігурації. Та продемонструємо результати використання GLOnet для оптимізації наноструктурованих антиблікових поверхонь.

Фіксовані параметри для GLOnet:

1. H (висота): 150 нм
2. P (період): 400 нм

Моделювання середи

Алгоритм працює в межах наступної трьохшарової конструкції але оптимізується межаш тільки середнього шару:

1. Прошарок полікристалічного кремнію
2. Антибліковий шар
3. Шар повітря

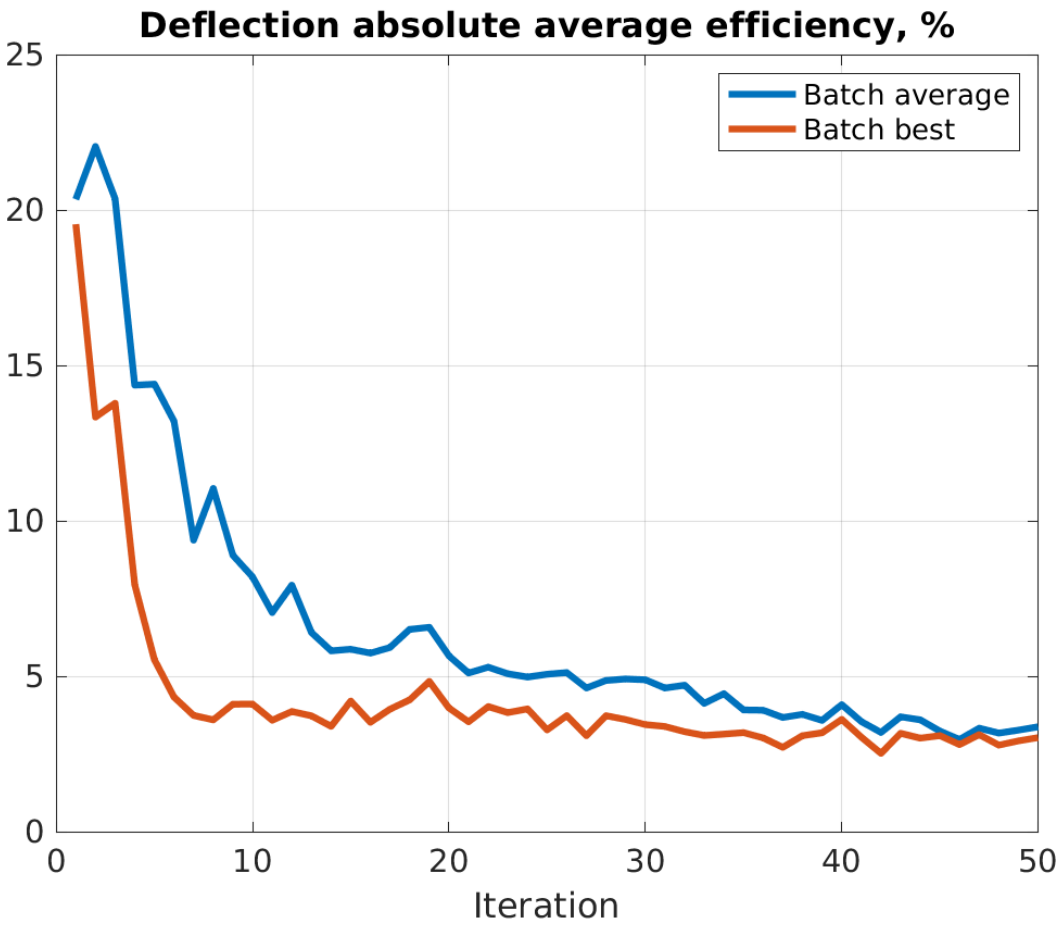


Рис.3.3.1 Динаміка тренування

На Рис. 3.3.1 показано процес тренування з 50 ітерацій, де наглядно видно динаміку покращення результатів з кожною ітерацією. Batch це кількість матричних дивайсів, які ми перевіряємо за один раз. Як видно з графіку, з кожною наступною ітерацією, як середній результат (Batch average), так і найкращий результат (Batch best) покращуються, демонструючи зниження відбиття світла. Це дозволило отримати оптимальний дизайн, який демонструє значно знижене відбиття світла порівняно з раніше розглянутими моделями.

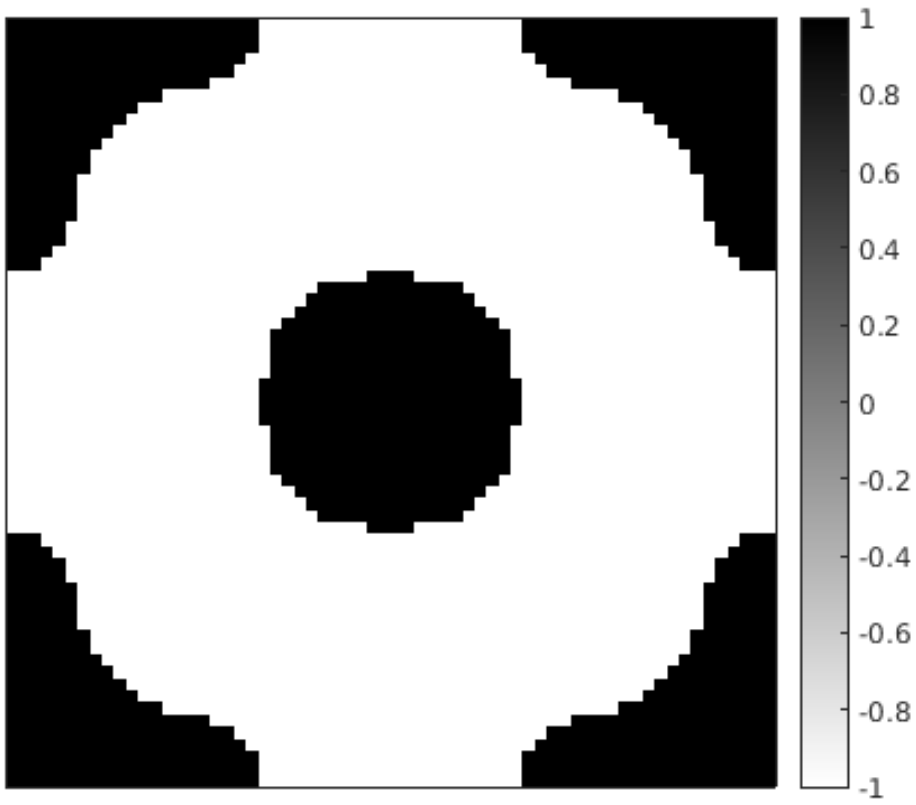


Рис.3.3.2 Змодельований сегмент за допомогою GLOnet

Результати моделювання показали, що використання GLOnet дозволило знизити середнє відбиття до 3.55%, що є значним покращенням порівняно з попередніми підходами. Нижче представлено візуалізацію змодельованого сегмента та порівняння відбиття світла:

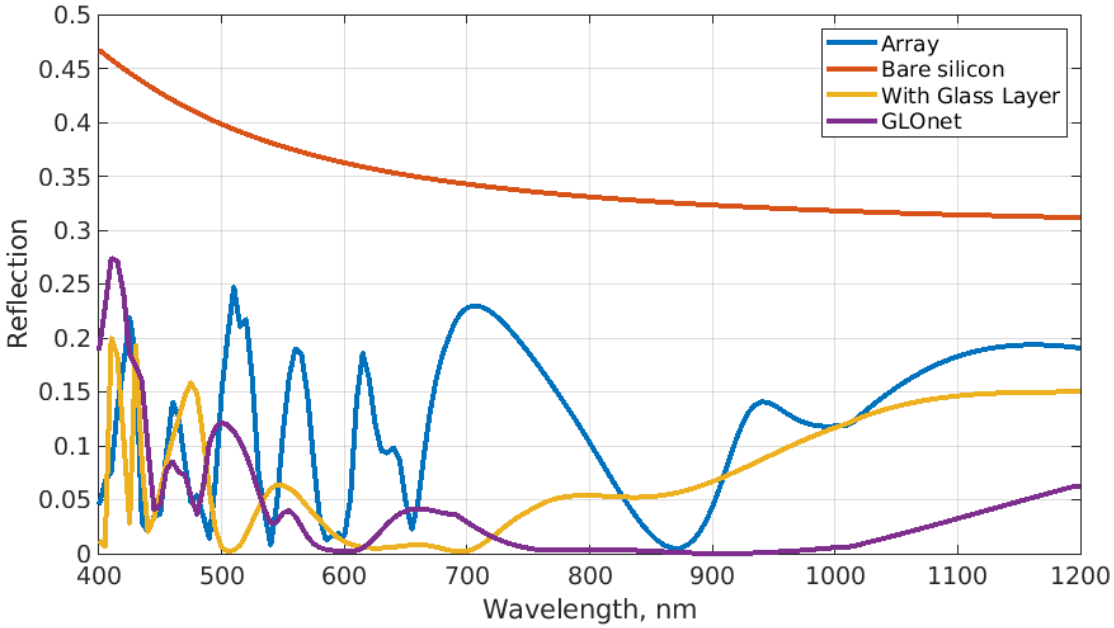


Рис.3.3.3 Порівняння зниження відбиття світла

Ці результати вказують на великий потенціал використання генеративних нейронних мереж для оптимізації фотонних структур і підкреслюють переваги адаптивного підходу в сучасних наукових дослідженнях.

ВИСНОВОК

Це дослідження здійснило аналіз застосування сучасних методів оптимізації для покращення наноструктурованих АБП у сонячних панелях. Зокрема, було вивчено використання генеративних змагальних мереж (GAN) і (GLOnet), які ефективно використовують машинне навчання для фотонного дизайну.

Дослідження показало, що GAN може точно моделювати і прогнозувати оптичні властивості нових геометрій, що дозволяє оптимізувати дизайн з меншою кількістю експериментальних випробувань. GLOnet забезпечує важливий прорив у підході до оптимізації, дозволяючи ефективно досліджувати параметричний простір для знаходження глобально оптимальних рішень без необхідності проведення великої кількості симуляцій.

Застосування цих методів значно збільшує ефективність сонячних панелей, зокрема за рахунок зменшення відбиття світла і підвищення кількості світлової енергії, що перетворюється на електрику. Це веде до зниження вартості виробництва електроенергії та підвищення конкурентоспроможності відновлювальної енергії.

В подальшому, можна модернізувати код для дослідження для оцінки впливу АБП під різними кутами інцидентності світла. Це дозволить забезпечити ще більшу точність у моделюванні та оптимізації, зокрема для додаткових кліматичних та експлуатаційних умов.

Результати цього дослідження підтверджують, що використання інноваційних технологій у фотонному дизайні є ключовим для підвищення загальної продуктивності фотоелектричних систем.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Gomez-Diaz, J. S. S., & Alù, A. (2016). Flatland Optics with Hyperbolic Metasurfaces. ACS Photonics, 3(12), 2211–2224.
2. Brongersma, M. L. (2020). The road to atomically thin metasurface optics. Nanophotonics, 0(0), 643–654.
3. Yao, J., Lin, R., Chen, M. K., & Tsai, D. P. (2023). Integrated-resonant metadevices: a review. Advanced Photonics, 5(2), 24001.
4. Moharam, M. G., Pommet, D. A., Grann, E. B., & Gaylord, T. K. (1995). Stable implementation of the rigorous coupled-wave analysis for surface-relief gratings: enhanced transmittance matrix approach. Journal of the Optical Society of America A, 12(5), 1077–1086. https://doi.org/10.1364/JOSAA.12.001077
5. Lalanne, P. (2002). Electromagnetic analysis of photonic crystal waveguides operating above the light cone. IEEE Journal of Quantum Electronics, 38(7), 800–804. https://doi.org/10.1109/JQE.2002.1017589
6. Moharam,M.G.,Grann,E.B.,Pommet,D.a.,&Gaylord,T.K.(1995).Formulation for stable and efficient implementation of the rigorous coupled-wave analysis of binary gratings. Journal of the Optical Society of America A, 12(5), 1068. https://doi.org/10.1364/JOSAA.12.001068
7. Cao, Q., Lalanne, P., & Hugonin, J.-P. (2002). Stable and efficient Bloch-mode computational method for one-dimensional grating waveguides. Journal of the Optical Society of America A, 19(2), 335–338. https://doi.org/10.1364/JOSAA.19.000335
8. Lalanne, P., & Morris, G. M. (1996). Highly improved convergence of the coupled- wave method for TM polarization. Journal of the Optical Society of America A, 13(4), 779–784. https://doi.org/10.1364/JOSAA.13.000779
9. Peng, S., & Morris, G. M. (1995). Efficient implementation of rigorous coupled-wave analysis for surface-relief gratings. Journal of the Optical Society of America A, 12(5), 1087–1096. https://doi.org/10.1364/JOSAA.12.001087

10. Campbell, S. D., Sell, D., Jenkins, R. P., Whiting, E. B., Fan, J. A., & Werner, D. H. (2019). Review of numerical optimization techniques for meta-device design [Invited]. Optical Materials Express, 9(4), 1842–1863.
11. Chen, M., Jiang, J., & Fan, J. A. (2022). Algorithm-Driven Paradigms for Freeform Optical Engineering. ACS Photonics, 9(9), 2860–2871.
12. Elsawy, M. M. R., Lanteri, S., Duvigneau, R., Fan, J. A., & Genevet, P. (2020). Numerical Optimization Methods for Metasurfaces. Laser and Photonics Reviews, 14(10), 1900445.
13. Jahani, S., & Jacob, Z. (2016). All-dielectric metamaterials. Nature Nanotechnology, 11(1), 23–36.
14. Mascaretti, L., Chen, Y., Henrotte, O., Yesilyurt, O., Shalaev, V. M., Naldoni, A., & Boltasseva, A. (2023). Designing Metasurfaces for Efficient Solar Energy Conversion. ACS Photonics, 10(12), 4079–4103.
15. Jiang, J., & Fan, J. A. (2019). Global Optimization of Dielectric Metasurfaces Using a Physics-Driven Neural Network. Nano Letters, 19(8), 5366–5372.
16. Jiang, J., & Fan, J. A. (2019). Simulator-based training of generative neural networks for the inverse design of metasurfaces. Nanophotonics, 9(5), 1059–1069.
17. Hugonin, Jean Paul, and Philippe Lalanne. "Reticolo software for grating analysis." *arXiv preprint arXiv:2101.00901* (2021).
18. https://en.wikipedia.org/wiki/Sunlight#/media/File:Solar_spectrum_en.svg
19. Ndao, Abdoulaye, et al. "Octave bandwidth photonic fishnet-achromatic-metalens." Nature communications 11.1 (2020): 3205.