1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕМИ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

1.1. Основні визначення

Оптика — це розділ фізики, який вивчає властивості електромагнітних хвиль видимого діапазону (світло) та їхню поведінку в різних середовищах. До основних оптичних властивостей середовища належать: відбивання, поглинання та розсіювання. В залежності від оточуючого середовища поведінка світла може бути різною.

Коефіцієнт відбивання є міра того, як світло здійснює пружну взаємодію (без енергетичних втрат) при поширенні в середовищі. Зазвичай при пружній взаємодії падаючий промінь світла змінює свій напрямок на протилежний. Такий процес отримав назву відбивання. Поглинання світла — це процес, під час якого взаємодія між світлом і середовищем відбувається з втратою енергії. Поглинання залежить від довжини світлової хвилі та товщини середовища. Це означає, що деякі середовища можуть поглинати світло певних довжин хвиль краще, ніж інших. Хорошим прикладом є вода, вона добре поглинає інфрачервоне світло з довжиною світлової хвилі близько трьох мікрометрів. Розсіювання світла — це процес відхилення світлових променів від початкового напрямку під час проходження світла через середовище (для прикладу, туман, хмари, пил і т.п) з частковою втратою енергії. Одним із видів є дисперсійне розсіювання, воно пов’язане зі зміною швидкості світла в залежності від довжини світлової хвилі, як приклад при проходженні світла через скло у вигляді призми, відбувається розкладання світла на різні кольори.

Оптичний спектрометр являє собою прилад, який використовується для аналізу оптичних властивостей матеріалу (коефіцієнт відбивання, поглинання і розсіювання світла). За допомогою оптичного спектрометра будуть визначатися спектральні властивості матеріалу по методиці Брюстера. Закон Брюстера говорить про те, що існує певний кут падіння при якому відбитий промінь світла від межі двох середовищ з різними коефіцієнтами відбивання (refractive index) стає повністю поляризованим. Цей кут отримав назву кут Брюстера. Тангенс кута Брюстера дорівнює коефіцієнту відбивання середовища для падаючого світла при певній довжині хвилі. Площина поляризації відіграє ключову роль так як відбитий не поляризований промінь стає поляризованим і площина поляризації відбитого променя завжди перпендикулярна площині падіння променя. При проходженні світла через середовище вихідний промінь частково поляризується, а площина поляризації не змінюється. Отже якщо падаючий промінь буде поляризований і площина поляризації буде паралельна площині падіння то при певній довжині хвилі знайдеться такий кут (кут Брюстера, кут між відбитим і розсіяним буде рівний 90 градусів) при якому відбитий промінь буде зникати. Даний принцип широко використовується для гасіння небажаного відбитого світла, наприклад в поляризаційних окулярах чи фільтрах для фотоапаратів.

Кінематична схема ходу променів при перпендикулярній поляризації падаючого променя представлена на рисунку 1. Так як відбитий промінь стає поляризованим і площина поляризації співпадає з напрямком площини поляризації падаючого променя то при зміні кута падіння буде спостерігатися мінімум інтенсивності відбивання.

|  |
| --- |
| Рисунок 1 — Кінематична схема ходу променів при перпендикулярній поляризації падаючого променя |

|  |
| --- |
| Рисунок 2 — Кінематична схема ходу променів при паралельній поляризації падаючого променя |

Коли напрямок площини поляризації співпадає з площиною падіння променя відбитий промінь буде поляризуватися в перпендикулярному напрямку і при зміні кута падіння буде спостерігатися гасіння інтенсивності відбитого променя. На рисунку 2 представлений випадок, коли інтенсивність відбитого променя залежить від кута падіння і при куті Брюстера рівна нулю. Всі можливі варіанти падіння поляризованого світла на межу розділу двох середовищ представлено нижче. На рисунку 3 зображено залежності кута Брюстера для променів різної поляризації, а також напрямку ходу. З повітря в скло (external) і зі скла в повітря (internal).

|  |
| --- |
| Рисунок 3 — Кут Брюстера для променів різної орієнтації площини поляризації та напрямку ходу променів. Де Θp– кут Брюстера, Θc- критичний кут повного внутрішнього відбивання. |

Отже, як вияснили, змінюючи кут падіння падаючого поляризованого проміння та використовуючи широкополосний дискретний цифровий оптичний спектрофотометр можна отримати дисперсійні криві — графічні зображення залежності довжини хвилі від коефіцієнта відбивання та поглинання (extinction coefficient). Як відомо, коефіцієнти відбивання великої кількості практичних матеріалів виміряні і занесені в таблиці [1, 2, 3, 4, 5, 6]. Для ідентифікації матеріалу прийнято дисперсійну криву для коефіцієнта відбивання представляти у вигляді функціональної залежності відомої як формула Зельмеєра (покращена формула в порівнянні з формулами Коші чи Гартмана) [7]. Знаючи коефіцієнти Зельмеєра для досліджуваного зразка можна визначити досліджуваний матеріал і дізнатися його властивості.

Основним предметом дослідження в представленій магістерській дисертації будуть напівпровідники та діелектрики по тій причині, що це є основні матеріали для виробництва електроніки [8, 9, 10, 11, 12]. Вони є частиною будь якого пристрою, що зумовлює їхню практичну і наукову цінність. Дослідження буде проводитися неруйнівним методом.

1.2. Загальний опис проблеми

Дослідження фізичних властивостей матеріалів в наш час є дуже важливою задачею, оскільки за допомогою отриманих значень можна сказати про досліджуваний матеріал майже все: що він в собі містить, як може взаємодіяти з іншими матеріалами та багато іншого. Тому розробка пристрою для неруйнівного дослідження оптичних властивостей поверхні напівпровідникових структур - оптичного спектрометра є актуальною і важливою задачею, як з наукової, так і з практичної точки зору.

1.3. Опис спектрометра *Specord 210*

Для оптичних вимірювань спектрів в УФ- та видимому діапазонах довжин хвиль використовуються стандартні прилади. Наприклад, використовувався двопроменевий спектрофотометр *Specord 210*. Спектральний діапазон від 190 до 1100 нм може бути досліджено з роздільною здатністю 0,5/1/2/4 нм. Оптична система (рис. 2.19) без електромеханічного модулятора забезпечує вимірювання в режимі реального часу таким чином, що навіть варіативність поглинання еталонного зразка може компенсуватися під час проведення експерименту [13].

Оптична схема спектрофотометра в режимі вимірювання пропускання (а) та відбивання (б) наведена на рисунку 4. Колесо світлофільтрів (5), увігнута дифракційна решітка (7), а також скомпонований блок вхідної (6) та вихідної (8) щілин утворюють систему оптичних елементів, яка виконує роль монохроматора. Колесо світлофільтрів (5) містить наступні фільтри: а) чотири кольорові скляні фільтри, які використовуються для придушення небажаного випромінювання в монохроматорі; б) стандартний фільтр із оксиду гольмію використовується для автоматичного калібрування довжин хвиль; в) дві порожні позиції для проходження не розсіяного світла; г) блокуюча позиція необхідна для генерації даних вимірювань. Завдяки малій кількості рухомих частин, спектрофотометр *Specord 210* забезпечує стабільно високу якість отриманих результатів вимірювань.

Для дослідження спектрів відбивання в оптичній схемі спектрофотометра *Specord 210* використовувалась оригінальна інтегруюча сфера з внутрішнім діаметром 75 мм та кутом падіння 8°. В цій оптичній схемі випромінювання від дейтерієвої чи галогенової лампи потрапляє на зразок, який розміщувався всередині інтегруючої сфери. Внутрішня поверхня інтегруючої сфери виготовлена з високо-відбиваючого матеріалу *Spectralon*, що забезпечує більше 99% розсіяння падаючого випромінювання у всіх напрямках в спектральному діапазоні 400÷1500 нм та більше 95% – в діапазоні 250÷2500 нм. Після багаторазового відбивання випромінювання потрапляє на вікно фотодетектора. Як референсний спектр використовувався спектр порошку *BaSO*4. Фотоприймач дзеркально відбитих променів використовується для аналізу частки дзеркальної компоненти спектру пропускання.

Переваги та недоліки: двопроменевий, апертура фотодетектора пару сантиметрів, що не зручно для вимірювання надмалих зразків. Обов'язково використовувати однакові діафрагми для обох променів. При вимірюваннях спектрів відбивання задіяні два фотоприймачі у яких різні кінематичні маршрути променів. При цьому відбувається зміна фази променя при кожному відбиванні від дзеркал. Висока роздільна здатність так як прилад дифракційний. Недолік в цьому, що необхідно використовувати відсікаючі фільтри так як дифракційні спектри мають порядок. Тобто на певний діапазон може прийти референсний сигнал від іншого порядку спектру.

|  |
| --- |
|  |
| Рисунок 4 — Оптична схема спектрофотометра *Specord 210*:  1 – дейтерієва лампа, 2 – галогенна лампа, 3 – поворотне дзеркало, 4 – тороїдне освітлювальне дзеркало, 5 – колесо світлофільтрів, 6 – вхідна щілина, 7 – увігнута дифракційна решітка, 8 – вихідна щілина, 9 – світлоділитель, 10 – тороїдні дзеркала з кварцовим покриттям, 11 – плоскі дзеркала, 12 – відсік для зразків, 13 – комірки для зразків, 14 – кювети для щільних зразків, 15 – фотодетектори, 16 – інтегруюча сфера, 17 – зразок, 18 – детектор дзеркально відбитого випромінювання. |

1.3. Опис спектрометра ДМР-4

Для оптичних вимірювань спектрів в УФ- та видимому діапазонах довжин хвиль, використовувався однопроменевий дисперсійний монохроматор рефлексивний ДМР-4. Спектральний діапазон від 21 до 650 нм може бути зафіксований з роздільною здатністю 1 нм/мм. Оптична система наведена на рисунку 5.

Світло проходить через вхідну щілину (1) і попадає на сферичне дзеркало (2), від якого паралельним пучком направляється на призму (3). Дзеркальний зовнішньо осьовий параболічний об’єкт (4) збирає дисперсійний пучок світла на середній щілині (5), яка розташована в фокальній площині об’єктива. Щілина (5) одночасно являється вхідною щілиною другого монохроматора. Лінза (6) дає можливість сумістити зрачки першого і другого монохроматора. Параболічний об’єктив (7) направляє монохроматичне світло на призму (8), а сферичний об’єктив (9) збирає його на вихідній щілині (10). Довжина світлової хвилі на вихідній щілині змінюється при прокручуванні барабана (11), при цьому гайка (12) переміщується по винтику (13) і тягне за собою шток (14), який повертає столик для розподілу (15). Поворот столика для розподілу через ричаги (16) передається одночасно на два призмових столика (17).

Переваги та недоліки: нелінійна шкала так як пристрій дисперсійний. Чудова світлосила, погана роздільна здатність. Можна фокусувати на надмалі зразки. Зручність при побудові кінематичної схеми ходу променів.

|  |
| --- |
| Рисунок 5 — Оптична схема спектрометра ДМР-4 |

1.4. Постановка задачі магістерської дисертації і опис обраної технології

Основна задача представленої магістерської дисертації є розробка цифрового оптичного спектрофотометра (апаратної і програмної частини), який надасть можливість визначити властивості досліджуваного матеріалу неруйнівним методом і який буде виконувати ті ж самі основні функції, що й промислові аналоги.

Основним елементом приладу є RGBC сенсор на базі модуля APDS9960, за допомогою якого фіксується інтенсивність відбитого світла в одиницях µВат/м2. Основою даного RGBC сенсора є стандартні фотодіоди, як для всіх RGB сенсорів: датчики червоного (Red), зеленого (Green) та синього (Blue) кольорів. На відміну від типових RGB сенсорів, всі фотодіоди є широко-полосними, але перед кожним з них розташований полосовий оптичний фільтр, а також є додатковий сенсор для вимірювання без фільтру (Clear). В основі фотодіодів є діод InGaN з такими характеристиками фільтрів:

* довжина хвилі 465 нм і спектральна напівширина 22 нм;
* довжина хвилі 525 нм і спектральна напівширина 35 нм;
* довжина хвилі 625 нм і спектральна напівширина 15 нм;

Функціональна блок діаграма APDS9960 представлена на рисунку 6.

|  |
| --- |
| Рисунок 6 — Функціональна блок діаграма APDS9960 |

Спектральні чутливості фотодіодів APDS9960 представлена на рисунку 7.

|  |
| --- |
| Рисунок 7 — Спектральні чутливості фотодіодів сенсора |

Перевагами даного RGBC модуля є над попередньо-розглянутими — є те, що сенсор доволі розумний, оскільки фіксує відразу весь спектр світла ()Смарт, фіксує відразу весь спектр.

1.5 Висновки до розділу

1. У розділі було розглянуто принципи і визначення оптики, які використовуються або є частиною процесу роботи цифрового оптичного спектрометра. Оглянуто загальну проблему, яка розглядається в магістерській дисертації. Описано два типових прилада цифрових оптичних спектрометрів з їхніми характеристиками та параметрами. Також описано основну постановку задачі дисертації
2. З аналізу літератури було з'ясовано, якщо падаючий промінь буде поляризований і площина поляризації буде паралельна площині падіння то при певній довжині хвилі знайдеться такий кут (кут Брюстера) при якому відбитий промінь буде зникати. Змінюючи кут падіння падаючого поляризованого проміння та використовуючи широкополосний дискретний цифровий оптичний спектрофотометр отримаємо значення refractive index для кута брюстера.
3. Коефіцієнти відбивання (refractive index) великої кількості матеріалів виміряні і занесені в таблиці. Для ідентифікації матеріалу прийнято дисперсійну криву для коефіцієнта відбивання представляти у вигляді функціональної залежності Зельмеєра. Знаючи коефіцієнти Зельмеєра для досліджуваного зразка (які є унікальними) можна ідентифікувати матеріал.