4. ТЕСТУВАННЯ ПРИСТРОЮ ТА АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ

4.1. Тестування пристрою

Тестування цифрового оптичного спектрометра здійснювалося у вигляді лабораторного досліду, результатом якого є визначення досліджуваного матеріалу за допомогою математично оброблених даних, які були отримані з Arduino Mega платформи оптичного спектрометра при різних кутах падіння поляризованого світла.

Загальна схема послідовності експерименту та обчислень, зображена на рисунку 4.1.1. Відповідно до схеми ми змінюємо кут падіння світла з метою знаходження кутів, при яких червона, зелена або синя складові світла зникнуть (будуть рівні або максимально близькі до нуля), ми визначаємо коефіцієнти заломлення (n), використовуючи методику Брюстера. Обчисливши значення коефіцієнтів заломлення (n). Використовуючи формули Зельмеєра, обчислюємо значення шести коефіцієнтів Зельмеєра (B1, B2, B3, C1, C2, C3). Попередньо, в програму Qt терміналу, занесені значення коефіцієнтів Зельмеєра для багатьох матеріалів (напівпровідників, діелектриків, скло, пластмаса) і як результат ми отримаємо ім’я досліджуваного матеріалу, як основний результат досліду.

|  |
| --- |
| Рисунок 4.1.1 — Загальна схема послідовності експерименту та обчислень |

Блок-схема, яка включає в себе послідовність виконання команд Qt терміналу для виконання експерименту і тестування роботи цифрового оптичного спектрометра зображена на рисунку 4.1.2. Перед тим як розпочати експеримент, надсилається команда CONFIG від Qt терміналу до Arduino Mega через UART для того, щоб конфігурувати два APDS сенсори, які приєднані. Після відправки команди ми очікуємо на відповідь від Arduino Mega, якщо приходить помилка конфігурації (Failure) — знову пробуємо надіслати команду CONFIG, якщо приходить позитивна відповідь (Success) — переходимо до основної частини експерименту. В ній міняємо кут падіння світла починаючи з 10 градусів і до 80 градусів з кроком +10. Кут падіння менше 10 градусів називається кут нормального падіння (normal incidence case). При нормальному падіння поляризація падаючого променя не проявляється на відбитому та пройденому тому даний різновид експерименту ми не використовуємо. Кожного разу коли виставляється кут падіння (10, 20, …, 80), відправляється команда MEASURE до Qt терміналу із параметром ‘i’, який містить кут падіння, який був виставлений (приклад команди — “MEASURE 10”). Результатом команди є надсилання команд CAPTURE\_DATA до Arduino Mega для того, щоб зняти значення з APDS сенсорів. Після того як дані були зняті Arduino Mega відправляє пакети запакованих даних назад до Qt терміналу, які ми розпакувавши заносимо у програмну таблицю. Після того, як було заповнено таблицю для всіх можливих кутів, надсилається команда CALCULATE до Qt терміналу, після якої рахуються коефіцієнти заломлення (n) (refractive index), коефіцієнти Зельмеєра та визначається тип матеріалу і виводяться результати у вікні терміналу. Отримані результати з терміналу порівнюються з реальними.

|  |
| --- |
| Рисунок 4.1.2 — Блок-схема тестування роботи цифрового оптичного спектрометра |

Результати роботи оптичного спектрометра показано на рисунку 4.1.3 і рисунку 4.1.4. Сенсори були успішно сконфігуровані, значення червоної, зеленої та синьої складових світла були виміряні та передані на обробку до Qt терміналу.

|  |
| --- |
| Рисунок 4.1.3 — Результати роботи оптичного спектрометра 1 |

За допомогою математичних перетворень (метод Брюстера, формули Зельмеєра) було обчислено коефіцієнти Зельмеєра: B1 = 28.145, B2 = 0.040, B3 = 0.000, C1 = 0.489, C2 = 0.874, C3 = 37.211. Програмно співставивши отримані коефіцієнти з табличними значеннями, які були занесені, ми отримали ім’я напівпровідника, який найбільше підходить для обчислених коефіцієнтів — Арсенід галію.

|  |
| --- |
| Рисунок 4.1.4 — Результати роботи оптичного спектрометра 2 |

Назва напівпровідника була визначена абсолютно вірно — досліджувався напівпровідник Арсенід галію, який дуже широко використовується в електронних приладах і тому є важливим в промисловому виробництві.

4.2. Аналіз результатів

Для тестування, налаштування, калібрування та проведення випробування пристрою були задіяні наступні прилади: Specord 210, ДМР-4, Спектрометричний Гоніометр Г5М. Двопроменевий спектрофотометр Specord 210 використовувався в конфігурації вимірювання спектрів відбивання (дифузне відбивання з інтегральною сферою). Однопроменевий монохроматор ДМР-4 використовувався для точного визначення спектральних складових джерел освітлення та спектральних чутливостей модулів APDS. Гоніометр використовувався як високоточний координатний поворотний столик для встановлення модулів APDS при певних кутах (для вимірювання кутів Брюстера).

Математична обробка отриманих сигналів та відпрацювання алгоритмів здійснювалося в програмному середовищі Mathcad 11-15. Символьне обчислення здійснювалося в версії 11 так як в ньому вбудоване символьне ядро програмного продукту Maple. Версія програми 15 дозволяє здійснювати автоматичне обчислення результатів вимірювань та підтримує можливість звернення до скриптових інструкцій зовнішніх програм, таких як Python, cmd, bat. Блоки алгоритмів обчислень були спеціально реалізовані у вигляді чисельних методів (максимально не використовувалися вбудовані функції). Для обчислень систем рівнянь в середовищі Mathcad є набір вбудованих функцій, а саме: Find, Minner, lsolve. В нашій роботі були задіяні функції Find та Minner. Внутрішня механіка даних функцій базується на використанні чисельних градієнтних методів обчислення. Обидві функції однакові, однак Minner при розбіжності ітераційного процесу виводить наближене значення, а інша функція Find – помилку обчислення. Даний підхід дав змогу перенести алгоритми на мову програмування с++ і створити власний фреймворк. Розроблені методи були згруповані у вигляді класів для підключення як сторонні бібліотеки на боці Arduino Mega так і в Qt терміналі.

Для тестування запропонованої установки були задіяні зразки у вигляді плоских пластин розміром 1см х 1см з нанесеними плівками Cu2ZnSnS4. Дані зразки були надані авторами роботи [17] і попередньо були ретельно досліджені.

Дослідження проводилося у відповідності до методики представленої на рисунку 4.1.1. Отримані результати передавалися терміналу і вводилися вручну в розрахункову площину програми Mathcad 15. Кроки обчислень наведені на рисунках нижче.

На рисунку 4.2.1 наведені результати вимірювань кутів Брюстера від різних джерел світла. Кути вимірювалися на Гоніометрі Г5М, довжина хвилі виділялася монохроматором ДМР-4 від спектроскопічної лампи накалювання з увіолієвим склом. Результати інтенсивності світла фіксувала платформа Arduino Mega і в терміналі через протокол UART обчислювалися значення.

|  |
| --- |
| Рисунок 4.2.1 — Результати вимірювань кутів Брюстера для різних довжин хвиль |

На рисунку 4.2.2 представлений оригінальний алгоритм обрахунку системи рівнянь, які складаються з формул Зельмеера. Так як ітераційний процес сходиться то використовували вбудовану функцію Find (в іншому випадку будуть братися наближені корені рівнянь). Програмна реалізація функції, як було сказано вище організована на градієнтних алгоритмах чисельними методами.

|  |
| --- |
| Рисунок 4.2.2 — Результати чисельного обчислення градієнтними методами рівнянь, які складаються з формул Зельмеера. |

На рисунку 4.2.3 представлені функціональна залежність показника заломлення (refractive index) від довжини хвилі, а також графічне зображення. Дисперсійна крива може бути використана в подальшому з певними обмеженнями. А саме, формула Зельмеера базується на принципі, що матеріал не поглинає світло і відсутні резонансні процеси.

| ; ; ; |
| --- |
| Рисунок 4.2.3 – Дисперсійна крива для Cu2ZnSnS4 |

На рисунку 4.2.4 наведені експериментальні значення, які були отримані по методиці Брюстера та дисперсійні математично обчислені криві. Крива коефіцієнта екстинкції (синього кольору) була обрахована за інтегралом Крамерса-Кроніга, алгоритм чисельного інтегрування детально описаний у розділі 2.

|  |
| --- |
| Рисунок 4.2.4 – Дисперсійні криві, які були обчислені n(λ), k(λ) та експериментальна nB(λ) для Cu2ZnSnS4 |

4.3. Висновки до розділу

1. У даному розділі, було повністю протестовано розроблений пристрій, а саме програмна та апаратна частини. Результатом дослідження було стало правильне визначення досліджуваного напівпровідника у вигляді полірованої пластини — пристрій абсолютно точно визначив тип матеріалу, яким був Арсенід галію.
2. До плюсів розробленого пристрою, за результатами дослідження можна віднести відносно простоту пристрою у порівнянні з попередниками. Це стало можливим завдяки оптичному сенсору APDS-9960, який одночасно може вимірювати інтенсивність для довжин хвиль зеленого, червоного та синього складових білого світла.
3. До мінусів розробленого пристрою можна віднести відсутність автоматичної системи зміни кута падаючого світла (все дослідження кути змінювалися вручну на координатному столику Гоніометра ГМ5 і заносилися у Qt термінал за допомогою команд). В майбутньому буде додана модифікація даного пристрою із використанням механічних крокових двигунів, які будуть змінювати кут падіння. Одним із мінусів також є залежність від комп’ютера, що робить його не компактним.