"Псевдомодуляційна оптична спектроскопія поверхні напівпровідникових структур"

Реферат

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.

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

Кінематична схема ходу променів при перпендикулярній поляризації падаючого променя представлена на рисунку 1.1.1. 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 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 1.1.2 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 1.1.3 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 вектора 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 [2-7]. 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) [8-10]. 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 [11-15]. Вони є частиною будь якого пристрою, що зумовлює їхню практичну і наукову цінність. Дослідження буде проводитися неруйнівним методом.

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.

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 без електромеханічного модулятора забезпечує вимірювання в режимі реального часу таким чином, що навіть варіативність поглинання еталонного зразка може компенсуватися під час проведення експерименту [16].

Оптична схема спектрофотометра в режимі вимірювання пропускання (а) та відбивання (б) наведена на рисунку 1.3.1. 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. Перевага у тому, що прилад характеризується високою роздільною здатністю так як прилад дифракційний. Але 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. |

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 1.4.1.

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 гвинтику (13) і тягне за собою шток (14), який повертає столик для розподілу (15). Поворот столика для розподілу через важелі (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, наприклад фокусуватися в торець зразка. Зручність при побудові власної кінематичної схеми ходу променів.

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

Основним елементом приладу є RGBC сенсор на базі модуля APDS-9960, 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 APDS-9960 представлена на рисунку 1.5.1.

|  |
| --- |
|  |
| Рисунок 1.5.1 — Функціональна блок діаграма APDS-9960 |

Спектральні чутливості фотодіодів APDS-9960 представлена на рисунку 1.5.2.

|  |
| --- |
|  |
| Рисунок 1.5.2 — Спектральні чутливості фотодіодів сенсора |

Перевагами даного RGBC модуля над попередньо-розглянутими є те, що сенсор фіксує відразу весь спектр світла. Наявність вбудованого цифрового інтерфейсу дозволяє здійснювати динамічну конфігурацію пристрою.

ОПИС ЦИФРОВОГО ОПТИЧНОГО СПЕКТРОМЕТРА

Загальні принципи роботи розробленого цифрового оптичного спектрометра для дослідження оптичних властивостей структури напівпровідника

В рамках роботи був розроблений концепт, основою якого став оптичний спектрометр, а також додаткове обладнання (тримачі, штативи, регулятори та поляризатори). Схема концепту представлена на рисунку 2.1.1.

Світло (2) випромінюється за допомогою лазерного пристрою або кварцової лампи (1), проходить через поляризатор (3). Далі світло падає на поверхню напівпрозорого скельця (4) і частково відбиває падаючий промінь (12) в RGBC сенсор (9) спектрометра (10). Поляризоване світло (5), яке проходить через напівпрозоре скельце, падає на поверхню матеріалу (6), після чого відбитий промінь (7) падає на RGBC сенсор (8) спектрометра (10), який передає дані до персонального комп'ютера (11). На ПК проводяться основні математичні обчислення і визначаються оптичні властивості матеріалу по формулі Зельмеєра [8-10], після чого отримані результати порівнюються з табличними даними, які вбудовані в програмне забезпечення. Як результат — визначаємо тип напівпровідникового матеріалу.

|  |
| --- |
|  |
| Рисунок 2.1.1 — Схема концепту цифрового оптичного спектрометра |

Формула Зельмеєра та її опис

Формула або як її ще називають рівняння Зельмеєра представляє собою емпіричну функцію, яка описує залежність коефіцієнта відбивання від довжини хвилі. Рівняння використовується для визначення дисперсії світла в прозорому середовищі без наявності резонансу і при мінімальному поглинанні. Рівняння вперше було запропоновано в 1872 році Вільгельмом Зельмеєром і являлося розвитком роботи Огюстена Коші. [8-10].

Рівняння Зельмеєра виглядає:

|  |  |
| --- | --- |
| *,* | (1) |

де - refractive index, - довжина хвилі, а і — експериментально визначенні коефіцієнти Зельмеєра. Коефіцієнти С зазвичай вказують в мікрометрах в квадраті.

Кожен член суми представляє собою резонанс поглинання з силою на довжині хвилі .

Таблиця 2.2.1 — коефіцієнти Зельмеєра для різних матеріалів

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Матеріал |  |  |  |  |  |  |
| Скло (крон) | 1.03961212 | 0.231792344 | 1.01046945 | 6.00069867 \* | 2.00179144 \* | 103.560653 |
| Сапфір (для звичайної хвилі) | 1.43134930 | 0.65054713 | 5.3414021 | 5.2799261 \* | 1.42382647 \* | 325.017834 |
| Сапфір (для не звичайної хвилі) | 1.5039759 | 0.55069141 | 6.5927379 | 5.48041129 \* | 1.47994281 \* | 402.89514 |
| Плавлений кварц | 0.696166300 | 0.407942600 | 0.897479400 | 4.67914826 \* | 1.35120631 \* | 97.9340025 |
| Фторид магнію | 0.48755108 | 0.39875031 | 2.3120353 | 0.001882178 | 0.008951888 | 566,13559 |
| Силікон | 10.6684293 | 0.0030434748 | 1.54133408 | 0.0909121907 | 1.28766018 | 1,218,816 |
| Арсенід галію | 27.83972 | 0.031764 | 0.001 43636 | 0.4431307 | 0.8746453 | 36.9166 |

2.3 Математичне обґрунтування визначення коефіцієнтів для досліджуваного матеріалу

З отриманих спектрів відбивання в усьому оптичному діапазоні було визначено оптичні та псевдо-оптичні константи досліджуваних структур. Для цього скористаємося комплексним аналізом, описаним в роботі [17].

|  |  |
| --- | --- |
| , | (2) |

Запис комплексного числа представлений у формах: Ейлера, тригонометричній та алгебраїчній.

|  |  |
| --- | --- |
| , | (3) |

|  |  |
| --- | --- |
| , | (4) |

Рівняння Френеля для комплексного коефіцієнту відбиття при нормальному падінні світла запишемо у наступному вигляді:

|  |  |
| --- | --- |
| , | (5) |

де,  – комплексний показник заломлення; *n, k* – дійсна та уявна його складові, модуль комплексного числа дорівнює кореню інтенсивності відбитого світла:

|  |  |
| --- | --- |
| , | (6) |

Домноживши на комплексно спряжене число  позбудемося комплексності виразу.

Для виділення дійсної і уявної частини комплексного відбивання рівняння Френеля зручно представляти в алгебраїчній формі:

|  |  |
| --- | --- |
| , | (7) |

|  |  |
| --- | --- |
|  | (8) |

Оскільки вимірювання проводяться в повітрі, то *n*0=1 і рівняння спрощується:

|  |  |
| --- | --- |
| . | (9) |

Застосувавши процедуру логарифмування, представимо вираз (9) в алгебраїчній формі:

|  |  |
| --- | --- |
| . | (10) |

В цьому випадку, фазова компонента *θ* може бути обрахована за допомогою перетворення Крамерса-Кроніга [17]:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (11) |

Для розрахунку фази використовувався наступний алгоритм чисельного інтегрування методом Трапецій, схема якого зображена на рисунку 9. Реалізація чисельного методу інтегрування проводилася в середовищі MathCad15. На рисунку 2.3.1 наведено оригінал алгоритму.

|  |
| --- |
|  |
| Рисунок 2.3.1 — Схема розрахунку фази |

Після чисельного інтегрування з кроком 1 меВ, комплексний показник заломлення та його компоненти можуть бути порахованими з наступної формули:

|  |  |
| --- | --- |
| , | (12) |

Для розрахунку коефіцієнта екстинкції використовувався алгоритм чисельного інтегрування методом Трапецій, схема якого зображена на рисунку 2.3.2.

|  |
| --- |
|  |
| Рисунок 2.3.2 — Схема розрахунку коефіцієнта екстинкції |

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 4.1.5 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 Ардуіно і в терміналі через протокол UART обчислювалися значення.

|  |
| --- |
|  |
| Рисунок 4.1.5 — Результати вимірювань кутів Брюстера для різних довжин хвиль |

На рисунку 4.1.6 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 4.1.6 — Результати чисельного обчислення градієнтними методами рівнянь, які складаються з формул Зельмеера. |

На рисунку 4.1.7 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 4.1.7 – Дисперсійна крива для Cu2ZnSnS4 |

На рисунку 4.1.8 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 4.1.8 – Дисперсійні криві, які були обчислені n(λ), k(λ) та експериментальна nB(λ) для Cu2ZnSnS4 |

Висновки

1. Описано два типових прилади цифрових оптичних спектрометрів з їхніми характеристиками та параметрами, які використовувалися для експериментів.
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. Було з'ясовано, що коефіцієнти відбивання (refractive index) великої кількості матеріалів виміряні і занесені в таблиці. Прийнято дисперсійну криву для коефіцієнта відбивання представляти у вигляді функціональної залежності Зельмеєра. Знаючи коефіцієнти Зельмеєра для досліджуваного зразка (які є унікальними) можна ідентифікувати матеріал.
4. Для розрахунку коефіцієнтів екстинції та фазової компоненти *θ*, використовувалися алгоритми чисельного інтегрування методом Трапецій. Алгоритми інтегрування були представлені в оригінальному вигляді.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. S. Semenenko, M. Dusheiko, G. Okrepka, R. Redko, S. Antonin, V. Hladkovskyi, V. Shvalagin, F. Gao, S. Shahan, A. Sarikov “Vertically-aligned p-n junction Si solar cells with CdTe/CdS luminescent solar convertors” наукового журналу Thin Solid Films (<https://doi.org/10.1016/j.tsf.2022.139536>)
2. G. H. Meeten and A. N. North, “Refractive index measurement of absorbing and turbid fluids by reflection near the critical angle” Meas. Sci. Technol. 6(2), 214–221 (1995), DOI: 10.1088/0957-0233/6/2/014.
3. A. J. Jääskeläinen, K. E. Peiponen, and J. A. Räty, “On reflectometric measurement of a refractive index of milk” J. Dairy Sci. 84(1), 38–43 (2001), DOI: doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(01)74449-9.
4. W. R. Calhoun, H. Maeta, A. Combs, L. M. Bali, and S. Bali, “Measurement of the refractive index of highly turbid media” Opt. Lett. 35(8), 1224–1226 (2010).
5. W. R. Calhoun, H. Maeta, S. Roy, L. M. Bali, and S. Bali, “Sensitive real-time measurement of the refractive index and attenuation coefficient of milk and milk-cream mixtures,” J. Dairy Sci. 93(8), 3497–3504 (2010).
6. M. McClimans, C. LaPlante, D. Bonner, and S. Bali, “Real-time differential refractometry without interferometry at a sensitivity level of 10(-6),” Appl. Opt. 45(25), 6477–6486 (2006).
7. M. H. Chiu, J. Y. Lee, and D. C. Su, “Complex refractive-index measurement based on Fresnel’s equations and the uses of heterodyne interferometry,” Appl. Opt. 38(19), 4047–4052 (1999).
8. Стороженко, И. П. Методи рефрактометрії і поляриметрії / І. П. Сторженко, В. А. Тімонюк, Е. Н. Животова. - Харків: Видавництво НФаУ, 2012. – 64 с.
9. Sellmeier, W. (1872). “Ueber die durch die Aetherschwingungen erregten Mitschwingungen der Körpertheilchen und deren Rückwirkung auf die ersteren, besonders zur Erklärung der Dispersion und ihrer Anomalien (II. Theil)” (https://zenodo.org/record/1839719). Annalen der Physik und Chemie. 223 (11): 386—403. DOI:10.1002/andp.18722231105 (<https://doi.org/10.1002%2Fandp.18722231105>).
10. [T. Skauli](about:blank), [P. S. Kuo](about:blank), [K. L. Vodopyanov](about:blank), [T. J. Pinguet](about:blank), [O. Levi](about:blank), [L. A. Eyres](about:blank), [J. S. Harris](about:blank), [M. M. Fejer](about:blank), [B. Gerard](about:blank), [L. Becouarn](about:blank), [E. Lallier](about:blank). Improved dispersion relations for GaAs and applications to nonlinear optics. *Journal of Applied Physics* 94, 6447–6455 (2003) https://doi.org/10.1063/1.1621740
11. G. Iasilli, R. Francischello, P. Lova, S. Silvano, A. Surace, G. Pesce, M. Alloisio, M. Patrini, M. Shimizu, D. Comoretto, A. Pucci “Luminescent solar concentrators: boosted optical efficiency by polymer dielectric mirrors” Mater. Chem. Front., 3 (2019), pp. 429-436.
12. H. Yang, C. Huang, X. Li, R. Shi, K. Zhang “Luminescent and photocatalytic properties of cadmium sulfide nanoparticles synthesized via microwave irradiation” Mater. Chem. Phys., 90 (2005), pp. 155-158.
13. T. Rajh, O.I. Micic, A.J. Nozik “Synthesis and characterization of surface-modified colloidal cadmium telluride quantum dots” J. Phys. Chem., 97 (1993), pp. 11999-12003.
14. W.W. Yu, L. Qu, W. Guo, X. Peng “Experimental determination of the extinction coefficient of CdTe, CdSe, and CdS nanocrystals” Chem. Mater., 15 (2003), pp. 2854-2860.
15. L.E. Brus “A simple model for the ionization potential, electron affinity, and aqueous redox potentials of small semiconductor crystallites” J. Chem. Phys., 79 (1983), pp. 5566-5571.
16. SPECORD PC 200/205/210/250 UV VIS Spectrophotometer. User's Manual / 2005 Analytik Jena AG, 43 р.