

УДК 53(075.8)

Венгер Є.Ф., Мельничук Л.Ю., Мельничук О.В., Савченко В.Ф.

МОДЕЛЮВАННЯ СПЕКТРІВ ІЧ-ВІДБИВАННЯ ОКСИДУ ЦИНКУ ПРИ ВИКОНАННІ ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМУ

У роботі продемонстровано практичну цінність лабораторного практикуму на основі неруйнівного методу зовнішнього ІЧ-відбивання і показано доцільність та ефективність використання отриманих знань та навичок як у навчальному процесі, так і на виробництві.

Ключові слова: спектр відбивання, оксид цинку, комп'ютерне моделювання, науково-дослідна робота.

Вступ. На сьогоднішній день комп'ютерне моделювання фізико-хімічних властивостей оптично-анізотропних напівпровідників і діелектриків є важливою і актуальною задачею сучасного матеріалознавства. Завдячуючи швидкодії сучасних ЕОМ стає можливим здійснювати дослідження впливу оптичних та електрофізичних параметрів на їх властивості завдяки розрахунку спектрів порушеного повного внутрішнього відбивання, комбінаційного розсіювання світла, зовнішнього відбивання та пропускання в інфрачервоній (ІЧ) області спектра тощо [1–6], встановлювати зв'язки між різними спектрами та структурою напівпровідника. Крім того, поєднання методів комп'ютерної фізики із сучасними експериментальними дослідженнями надає можливість скоротити час обробки результатів та вказати на придатність їх до практичного використання [1, 4, 6]. Слід відмітити, що і обладнання для експериментальних досліджень останнім часом набуло більш високоточного та інформативного рівня [7].

Серед широкого спектра перерахованих різноманітних методів дослідження особливої уваги заслуговують неруйнівні методи інфрачервоної спектроскопії, в основу якої покладено взаємодію речовини з електромагнітним випромінюванням ІЧ-діапазону. Як показано в джерелах [1–3], ІЧ-спектри отримують за допомогою спектрометрів різних типів, робочий діапазон яких знаходиться в межах так званої фундаментальної інфрачервоної області ($200 - 4200 \text{ см}^{-1}$). Спектрофотометричні дослідження дозволяють не руйнуючи речовину встановити причетність дослідженої речовини до того чи іншого хімічного елемента, виявляти наявність легуючих домішок та з'ясувати їх вплив на оптичні та електрофізичні властивості тощо. Отже, вміння здійснювати аналіз ІЧ-спектрів досліджуваних речовин є одним із сучасних завдань фізики і особливо важливим для фізика-експериментатора.

Метою даної роботи є навчити студентів на основі зареєстрованих експериментальних спектрів зовнішнього ІЧ-відбивання проводити якісну і кількісну їх інтерпретацію, вміти розробляти алгоритм проведення дисперсійного аналізу спектрів, визначати оптичні та електрофізичні властивості моно- і полікристалів та структур на їх основі, не руйнуючи їх.

У попередніх роботах нами уже частково розглядалися питання моделювання спектрів зовнішнього відбивання поляризованих оптично-анізотропних напівпровідників, зареєстрованих в ІЧ-області [1, 4, 6].

Для досягнення поставленої мети в якості прикладу дослідження проводились на монокристалах оксиду цинку (ZnO), вирощених гідротермальним методом [8, 9]. Розглянемо покроково алгоритм виконання лабораторного практикуму з ІЧ-спектроскопії з визначення оптичних та електрофізичних властивостей напівпровідників та структур на їх основі. Лабораторний практикум розроблено для магістрів спеціальності "Прикладна фізика та наноматеріали". Саме магістри вказаної спеціальності мають теоретичні знання з фізики, хімії та математики, здатні проводити експериментальні дослідження та здійснювати аналіз отриманих результатів з подальшим використанням набутих навичок на виробництві при проходженні фахових практик.

Теоретичні відомості. Монокристали ZnO, що використовуються в лабораторному практикумі, є безколірні або світло-жовтого кольору, ізометричного габітусу, які характеризуються низькою густиною дефектів упаковки, відсутністю політипних модифікацій [8, 9]. У роботі [8] показано, що ZnO сублімується при 2000 К, плавиться при температурі 2250 К. Найбільш поширена кристалічна модифікація ZnO є гексагональна типу вюртцит. Відома також більш рідкісна кубічна типу сфалерит. Вказані монокристали є напівпровідниками *n*-типу із шириною забороненої зони 3,43 еВ. В їх органіці присутня гексагональна призма ($10\bar{1}0$), піраміда ($10\bar{1}1$), іноді піраміда ($10\bar{1}\bar{1}$) та моноедри (0001), ($000\bar{1}$). За даними спектрального аналізу кристали містять Li, Na або K у концентраціях $10^{-2} - 10^{-4}$ мас.%, захоплені з розчину Cu, Mg, Si в концентраціях $10^{-3} - 10^{-4}$ мас.% (з початкового реактиву); Ag в концентраціях $10^{-3} - 10^{-4}$ мас.%, вилужений з матеріалу футерівки; Fe в концентрації $10^{-1} - 10^{-4}$ мас.%, що потрапили з матеріалу автоклава. Найменший вміст домішок у безколірних та

світложовтих кристалах. Проведене авторами [8, 9] навмисне легування домішками призводить до отримання монокристалів ZnO, що мають різне забарвлення. Так, наприклад, при великому вмісті заліза ростуть чорні кристали ZnO, при менших концентраціях – рудо-зелені. Пофарбування в різних пірамідах росту кристала різне: в пірамідах росту граней (0001) , $(10\bar{1}0)$ та $(10\bar{1}1)$ кристал немає кольору або має світло-жовтий колір, а піраміди росту граней $(000\bar{1})$, $(10\bar{1}\bar{1})$ зеленого кольору. Марганець фарбує кристал в червоний колір, кобальт – у зелений. Таким чином, візуальний огляд зразків вказує магістру на присутність домішок та їх належність до хімічного елемента, а також за інтенсивністю забарвлення дозволяє здійснити якісну оцінку концентрації вільних носіїв зарядів (мал. 1).



а)

б)

Мал. 1. Монокристали оксиду цинку, вирощені гідротермальним методом:

а) леговані кобальтом, б) леговані залізом [8, 9]

Для проведення експериментальних досліджень монокристалів оксиду цинку використано спектрофотометр ИКС-31. Схема установки для вимірювання спектрів ІЧ-відбивання описана в джерелах [1, 4]. Інфрачервоний спектрофотометр ИКС-31 є однопроменевим приладом, який здійснює відносні вимірювання монохроматизованих потоків випромінювання у режимі постійного або неперервно-змінного хвильового числа. В якості джерела випромінювання в ИКС-31 використовується "глобар". Випромінювання від "глобара" фокусується на вхідну щілину приставки ИПО-22 з подальшим перенаправленням системою плоских дзеркал на "болومتر" у приймальній камері. Спектр ІЧ-відбивання характеризується наявністю максимумів та мінімумів, які зумовлені тим, що світло, яке реєструється при відбиванні від поверхні досліджуваного зразка, є результатом взаємодії електромагнітних хвиль із поверхнею зразка.

Наступним кроком після проведення експерименту є побудова магістром під керівництвом викладача математичного виразу, здатного відтворити спектр (відбивання, пропускання тощо) досліджуваного напівпровідника або діелектрика у заданому діапазоні довжин хвиль. Слід відмітити, що математичні моделі, які описують спектр, у більшості випадків побудовані на різноманітних представленнях діелектричної проникності. Більш детальна інформація про них міститься в роботах [1, 11–14]. Отже, у будь-якому випадку для вибору методу представлення діелектричної проникності магістру необхідні фундаментальні знання з фізики твердого тіла, фізики напівпровідників, оптики поверхні тощо. Тому саме з цієї причини вивчення вказаних курсів у навчальному плані передуює проведенню лабораторного практикуму.

Математичний вираз для діелектричної проникності, який входить у формули розрахунку спектра, зокрема відбивання, пропускання є вірним у тому випадку, коли розбіжність між теорією і експериментом не перевищує допустимої похибки самого експерименту. Достовірність запису діелектричної проникності дозволить зробити правильний висновок про зв'язок між структурою речовини та оптичними й електричними властивостями. Методики запису та розрахунку діелектричної проникності детально описані в навчальних виданнях [12, 13]. Вказані вирази враховують взаємодію електромагнітного поля з коливаннями кристалічної ґратки розв'язками неоднорідних рівнянь руху системи осциляторів або йонної ґратки в гармонічному наближенні [14].

Для розрахунку коефіцієнта зовнішнього ІЧ-відбивання $R(\nu)$ від поверхні одновісного напівпровідника найчастіше використовують напівемпіричні формули представлення діелектричної проникності [1, 10, 11].

$$\varepsilon(\nu) = \varepsilon_{\infty} \left(1 + \frac{\nu_{L0}^2 - \nu_{T0}^2}{\nu_{T0}^2 - \nu^2 - i\nu\gamma} - \frac{\nu_p^2}{\nu(\nu + i\nu\gamma)} \right), \quad (1)$$

де ν_{TO} , ν_{LO} – частоти поперечного і поздовжнього оптичного фонона; ϵ_0 , ϵ_∞ – статична і високочастотна діелектричні проникності; γ_f , γ_p – коефіцієнти затухання фононної і плазмонної підсистем.

Рівняння (1) можна представити через дійсну і уявну частини діелектричної проникності $\epsilon(\nu) = \epsilon_1(\nu) + i\epsilon_2(\nu)$. Водночас діелектрична проникність в оптичному частотному діапазоні пов'язана із показником заломлення n і поглинання k світла співвідношеннями:

$$\epsilon_1(\nu) = n^2 - k^2, \quad (2)$$

$$\epsilon_2(\nu) = 2nk. \quad (3)$$

Співвідношення для визначення коефіцієнта відбивання $R(\nu)$ в ІЧ-області спектра через $n(\nu)$, $k(\nu)$ пов'язані між собою співвідношенням [1]:

$$R(\nu) = \frac{[n(\nu) - 1]^2 + k^2(\nu)}{[n(\nu) + 1]^2 + k^2(\nu)}. \quad (4)$$

У випадку слабкого поглинання, коли $n \gg k$ вираз (4) набуває спрощеного вигляду:

$$R(\nu) = \frac{[n(\nu) - 1]^2}{[n(\nu) + 1]^2}. \quad (5)$$

При $n(\nu) = 1$ коефіцієнт зовнішнього відбивання має мінімальне значення, що дозволяє визначити частоти, на яких $R_{\min}(\nu) = 0$. При подальшому скануванні за частотою спостерігається збільшення $R(\nu)$ від 0 до максимального значення при $R(\nu) \approx 1$. Особливої уваги заслуговує ділянка спектра ІЧ-відбивання між частотами $\nu_{TO} - \nu_{LO}$, де показник заломлення $n(\nu) = \epsilon(\nu)$ є чисто уявною величиною. У спектрі ІЧ-відбивання на вказаній ділянці $R(\nu) = 100\%$, тобто повністю відбиває падаюче на нього світло. Подальше збільшення частоти від ν_{LO} супроводжується зменшенням коефіцієнта відбивання від 100% до 0.

Крім того, на основі проведеного вище аналізу викладач звертає увагу магістрів на можливість практичного використання взаємоузгоджених спектрів ІЧ-відбивання для визначення ефективної маси та рухливості вільних носіїв зарядів, знаючи при цьому лише частоту в точці мінімуму відбивання і значення ϵ_∞ , яке визначається із спектра $R(\nu)$ у високочастотній області.

$$m^* = \frac{e^2 n_0}{\epsilon_0 \nu_{\min}^2 (\epsilon_\infty - 1)}, \quad (6)$$

де n_0 – концентрація вільних носіїв зарядів; e – заряд електрона.

Алгоритм виконання лабораторного практикуму для одновісних напівпровідників

Робота виконується протягом двох занять. На першому занятті проводиться перевірка теоретичних знань студентів з фізики твердого тіла, оптики поверхні напівпровідників, ІЧ-спектроскопії. Студенти, які отримали позитивну оцінку, переходять до практичного ознайомлення з будовою та принципом роботи інфрачервоного спектрофотометра ИКС-31. Спільно з асистентом викладача проводиться юстування приладу за наявності оптичної приставки ИПО-22 у режимі відбивання та пропускання і здійснюється вимірювання спектрів ІЧ-відбивання еталонних зразків на "реперних" точках вказаних викладачем при різних значеннях ширини щілини, кроку сканування, кількості вимірювань на даній довжині хвилі, коефіцієнті підсилення сигналу тощо. Узгодження отриманих даних з експериментальними даними в інструкції вказує на готовність приладу до проведення досліджень на зразках, наданих викладачем. Отримані результати розміщуються в електронній таблиці даних і готові до якісної і кількісної інтерпретації. Аналіз і підготовка звіту проводяться магістром самостійно під час другого заняття.

Наявність експериментальних даних і математичних виразів для моделювання спектрів ІЧ-відбивання дозволяють здійснити їх дисперсійний аналіз. Для моделювання спектра зовнішнього відбивання в ІЧ-області необхідні відомості про фундаментальні параметри монокристала, які магістр повинен отримати, аналізуючи ІЧ-спектр відбивання, а саме: частоти поперечного ν_{TO} і поздовжнього ν_{LO} оптичного фонона, статичну ϵ_0 та високочастотну ϵ_∞ діелектричні проникності, коефіцієнти затухання фононної γ_f та плазмової підсистем γ_p , значення максимумів і мінімумів інтенсивності для еталонного монокристала і т.д. [1, 3, 11]. У роботі [11] представлено методику визначення вказаних параметрів за

спектрами зовнішнього ІЧ-відбивання. Вказана методика має низку недоліків, які детально описано в монографії [1]. Проте якісно дозволяє провести аналіз досліджуваних кристалів, неруйнуючи кристал та вказати на його практичну придатність.

У даному випадку можливі два підходи. По-перше, якщо відомі фундаментальні параметри кристалічної ґратки, то є можливість розрахувати спектр нелегованого напівпровідника в ІЧ-області. По-друге, наявність відомостей про оптичні та електрофізичні параметри дозволяє провести розрахунок спектра при врахуванні ступеня легування та якості обробки поверхні. Кожен із підходів є однаково значимим.

Розглянемо покрокове визначення основних фундаментальних параметрів одновісного напівпровідника методом дисперсійного аналізу.

1. Згідно з методикою, описаною в роботах [1, 4], отримаємо експериментальний спектр зовнішнього ІЧ-відбивання в області фундаментальних частот.

2. Проведемо аналіз експериментального спектра ІЧ-відбивання в області частот "залишкових променів", тобто в околі частот $\nu_{TO} - \nu_{LO}$. Це дозволить визначити частоти ν_{TO} , ν_{LO} , діелектричні проникності ϵ_0 , ϵ_∞ , а також коефіцієнт затухання γ_f .

Вказані фундаментальні параметри напівпровідника визначаються шляхом підгонки теоретичного спектра ІЧ-відбивання до експериментального наступним чином [1, 11]:

2.1. Перше наближення величини ν_{TO} вибирається як частота, що відповідає найбільш крутій точці довгохвильового краю смуги відбивання.

2.2. Значення величини ϵ_∞ визначається при використанні коефіцієнта відбивання $R_\infty(\nu)$ у високочастотній області спектра за формулою:

$$\epsilon_\infty = \left[\frac{1 + \sqrt{R_\infty(\nu)}}{1 - \sqrt{R_\infty(\nu)}} \right]^2. \quad (7)$$

2.3. Значення величини ϵ_0 визначається при використанні коефіцієнта відбивання $R_0(\nu)$ у низькочастотній області спектра за формулою:

$$\epsilon_0 = \left[\frac{1 + \sqrt{R_0(\nu)}}{1 - \sqrt{R_0(\nu)}} \right]^2. \quad (8)$$

2.4. Використовуючи формули (7) і (8), обчислимо силу осцилятора.

2.5. З максимуму коефіцієнта відбивання визначимо величину затухання фоновної підсистеми γ_f .

Очевидно, що розрахунковий спектр відбивання матиме ділянки з достатньо добрим узгодженням з експериментом, але будуть і ділянки, де неузгодження значно перевищує допустиму точність експерименту. Враховуючи, що ν_{TO} , ν_{LO} , ϵ_0 , ϵ_∞ , а також, що коефіцієнт затухання γ_f є фіксованим, необхідно методом проб і помилок визначити значення сили осцилятора f_i , при якому ширина смуги відбивання розрахункового спектра співпала б з експериментальною.

2.6. Враховуючи, що ν_{TO} , ϵ_∞ є сталі за нової величини f_i , підбирається друге наближення величини затухання γ_f таким, щоб коефіцієнт відбивання в максимумі розрахункового спектра збігався з експериментальним.

2.7. Вивчаємо вплив параметрів плазмової підсистеми ν_p (частота плазмового резонансу) і γ_p (коефіцієнт затухання плазмонів) на спектр зовнішнього відбивання.

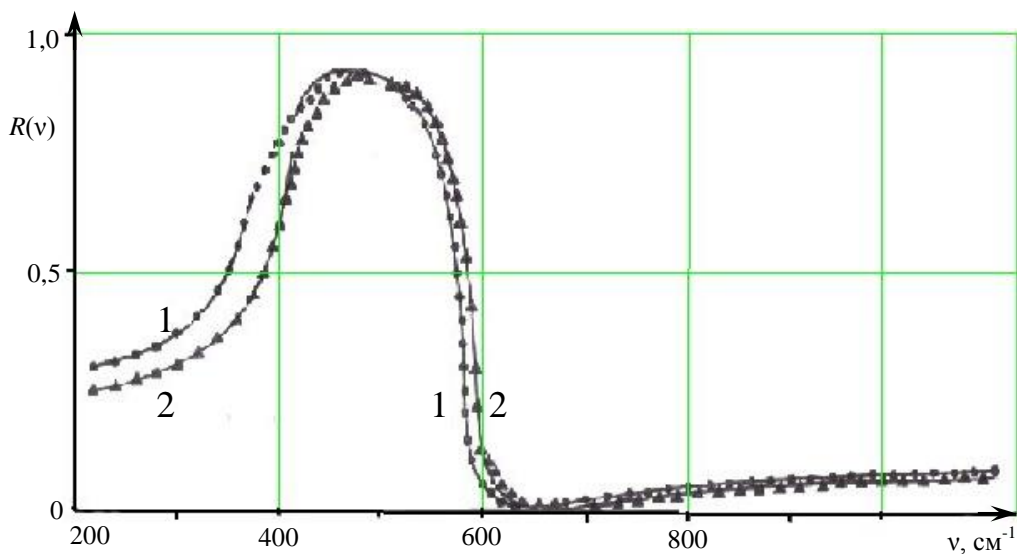
Очевидно, що кожен із параметрів має суттєвий вплив на спектр відбивання в окремо взятій області. Так, збільшення величини коефіцієнта затухання фоновної підсистеми призводить до зменшення коефіцієнта відбивання в області частоти поперечного оптичного фонона. При збільшенні ступеня легування монокристалів спостерігається зменшення коефіцієнта відбивання в області поздовжнього оптичного фонона.

Порядок виконання роботи

В якості прикладу виконання лабораторного практикуму продемонструємо описану вище послідовність дій для монокристалів оксиду цинку із різним ступенем легування.

Згідно п. 1 (див. вище) проведемо реєстрацію експериментального спектра відбивання на спектрофотометрі ІКС-31 з використанням приставки ІПО-22 та поляризатора в ІЧ-області від 400 до 1200 cm^{-1} (мал. 2).

Проведемо аналіз експериментального спектра ІЧ-відбивання в області частот "залишкових променів", тобто в околі частот $\nu_{TO} - \nu_{LO}$. Це дозволить визначити частоти ν_{TO} , ν_{LO} , діелектричні проникності ϵ_0 , ϵ_∞ , а також коефіцієнт затухання γ_f .



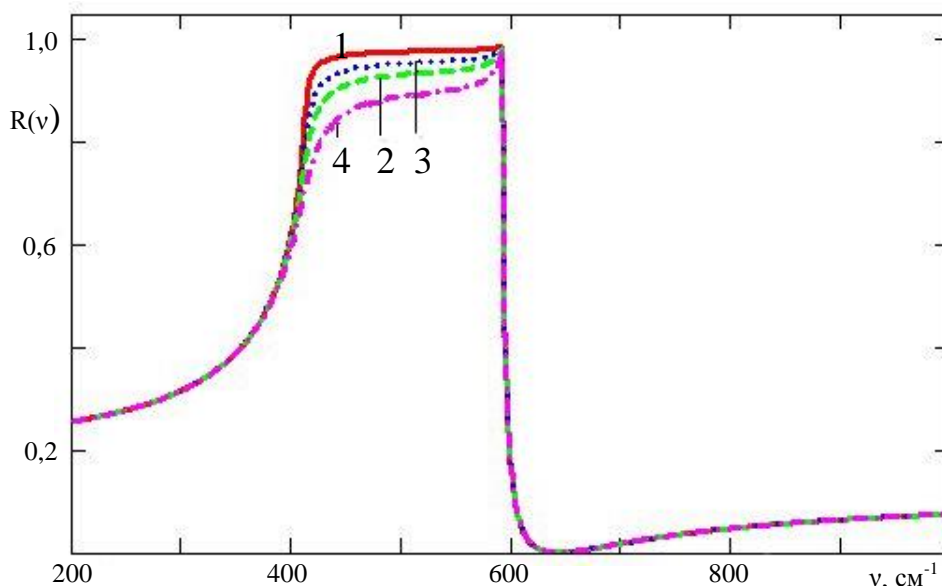
Мал. 2. Експериментальний спектр зовнішнього відбивання від поверхні монокристала оксиду цинку: 1 - $E \perp C$; 2 - $E \parallel C$

1. Згідно п. 2.1 частоти $\nu_{TO} = 380$ і 412 cm^{-1} для $E \perp C$ і $E \parallel C$, високочастотна ϵ_∞ і статистична ϵ_0 діелектричні проникності, розраховані при використанні експерименту на мал. 2, відповідно рівні для $\epsilon_\infty = 3,95$; $4,05$. Наступні кроки проведемо для орієнтації $E \perp C$.

2. Згідно пп. 2.2 і 2.3 високочастотна ϵ_∞ і статистична ϵ_0 діелектричні проникності розраховані за виразами (7) та (8) при використанні експерименту на мал. 2 (крива 1), відповідно рівні для $\epsilon_\infty = 3,95$ та $\epsilon_0 = 8,1$.

3. Використовуючи формули (7) і (8), обчислимо силу осцилятора $f_l = 4,15$.

4. Для одновісних напівпровідників досить хорошим наближенням є одноосциляторна модель [1, 3, 11]. Розрахунки залежності коефіцієнта ГЧ-відбивання від частоти для монокристалів ZnO в області "залишкових променів" виконаємо за формулою (4) при врахуванні (1) та значень, отриманих у пп. 1 – 4.

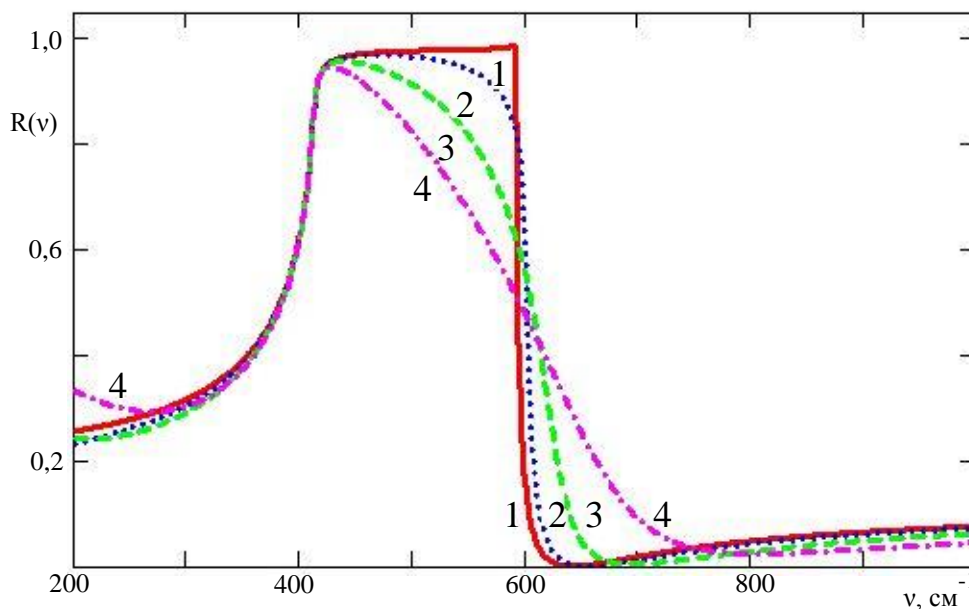


Мал. 3. Залежність коефіцієнта зовнішнього відбивання від частоти для ZnO при різних значеннях коефіцієнта затухання. Криві 1 - 4: $\gamma_f = 5, 10, 15, 25 \text{ cm}^{-1}$

6. З максимуму коефіцієнта відбивання визначимо величину затухання фононної підсистеми γ_f . Для якісної інтерпретації необхідно провести не лише ідентифікацію частот поперечного і поздовжнього оптичного фонона, а дуже важливим є визначення коефіцієнтів затухання фононної та плазмонної підсистем. Дослідимо, як саме впливає коефіцієнт затухання фононної підсистеми на спектр зовнішнього

відбивання ZnO при орієнтації $E \perp C$. Проведені розрахунки представлено на мал. 3. Як видно, збільшення коефіцієнта затухання від 5 до 25 cm^{-1} супроводжується зменшенням $R(\nu)$ до 20 % в області частоти поперечного оптичного фонона.

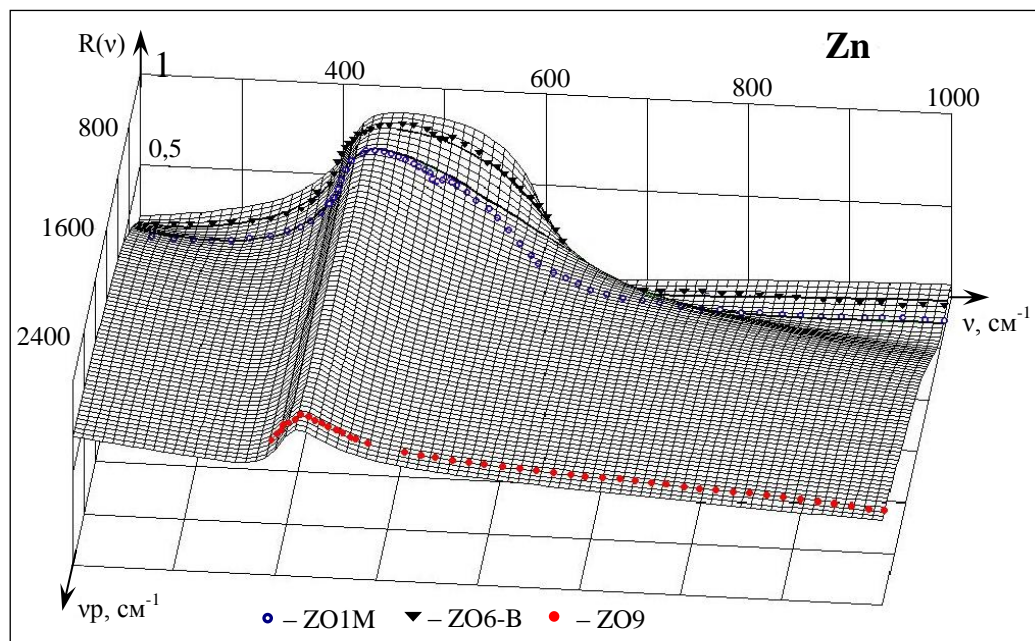
7. Залежність коефіцієнта затухання плазмонної підсистеми на спектр зовнішнього відбивання ZnO при орієнтації $E \perp C$ представлено на мал. 4. Як видно, збільшення коефіцієнта затухання плазмонів від 35 до 500 cm^{-1} супроводжується зменшенням $R(\nu)$ до 50 % в області частоти поздовжнього оптичного фонона.



Мал. 4. Залежність коефіцієнта зовнішнього відбивання від частоти для ZnO при різних значеннях концентрації та коефіцієнта затухання плазмонів.
Криві 1 - 4: $\nu_p = \gamma_p = 35, 150, 300, 500 \text{ cm}^{-1}$

Провівши математичний експеримент, магістр робить висновок про необхідність врахування пп. 6 і 7 при моделюванні спектрів ГЧ-відбивання одночасно.

На мал. 5 подано теоретичну поверхню тримірного представлення залежності коефіцієнта зовнішнього відбивання від частоти при скануванні за концентрацією вільних носіїв зарядів.



Мал. 5. Поверхня зовнішнього відбивання монокристалів ZnO в ГЧ-області спектра (точки - експеримент; лінії - розрахунок)

Затухання фононної підсистеми для кожного спектра вважалось сталим, але варіювалось у межах від 5 до 30 см^{-1} . Точки відповідають за експериментальні дані коефіцієнта зовнішнього відбивання $R(\nu)$ при $E \perp C$ відповідно для монокристалів оксиду цинку типу ZO6-B – $n_0 = 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, ZC1M (o) – $n_0 = 4,2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$; ZO9 (Δ) – $n_0 = 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. За допомогою дисперсійного аналізу спектрів $R(\nu)$ (точки 1–3) визначені оптичні параметри плазмон-фононної підсистеми, представлені у табл. 1.

Форма спектрів якісно узгоджується з розрахунком. Максимальне відхилення розрахункових спектрів $R(\nu)$ від експериментальних спостерігається в області 500 – 700 см^{-1} , що пов'язано з залежністю коефіцієнта затухання плазмон-фононної моди від частоти. Концентрація електронів у монокристалах ZnO розрахована з виразу (7) та отриманих даних у пп. 1 – 6, в якій однозначно проявляється залежність коефіцієнтів затухання поперечних оптичних фононів γ_f і плазмонів γ_p від плазмової частоти ν_p . Величина $\gamma_{p\perp}$ змінюється від 150 до 1480 см^{-1} для сильно легованих монокристалів ZnO.

Таблиця 1

Параметри монокристалів ZnO, одержаних при порівнянні розрахункових $R(\nu)$ з експериментальними при $E \perp C$

Зразок	$\nu_p, \text{см}^{-1}$	$\gamma_p, \text{см}^{-1}$	$\gamma_f, \text{см}^{-1}$	$\delta \cdot 10^3$
ZO1-3	240	280	13	3,0
ZO6-B	420	406	21	3,1
ZO9	2115	1480	40	1,9

Отримані в роботі параметри монокристала ZnO дозволяють прогнозувати їх оптичні властивості в широкому діапазоні концентрацій носіїв зарядів. На мал. 5 (лінії) показані теоретичні спектри ІЧ-відбивання ($E \perp C$) при $\gamma_f = 14 \text{ см}^{-1}$, даних табл. 1 та значеннях $\gamma_p = \nu_p$ від 35 до 2500 см^{-1} . Істотні зміни в спектрах спостерігаються при концентраціях $10^{18} - 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Максимальна зміна коефіцієнта відбивання зареєстрована в області частот 500–900 см^{-1} .

Слід відмітити, що до теперішнього часу накопичена велика кількість експериментальних спектрів, які знаходяться у вільному доступі та дозволяють проводити їх моделювання, використовуючи різноманітні математичні підходи та програми для їх реалізації [15]. Це значно розширює можливості магістрів у моделюванні властивостей монокристалів, які відсутні у лабораторії спецфізпрактикуму.

Вимоги до звіту

Робота може бути виконана на різних рівнях складності, які відрізняються інтерпретацією експериментальних даних на різних рівнях теоретичного аналізу. У будь-якому випадку звіт повинен містити мету роботи, опис експериментальної установки і умов, за яких проводився експеримент, паспорт зразка, експериментальний спектр зовнішнього відбивання, математичні вирази та програми для проведення розрахунку та дисперсійного аналізу, таблицю з отриманими даними, пропозиції щодо можливого їх використання.

Використані джерела

1. Венгер Є.Ф., Мельничук О.В., Пасічник Ю.А. Спектроскопія залишкових променів. – К.: Наук. думка, 2001. – 192 с.
2. Дмитрук Н.Л. Поверхностные поляритоны в полупроводниках и диэлектриках / Н.Л. Дмитрук, В.Г. Литовченко, В.Л. Стрижевский. – К.: Наук. думка, 1989. – 375 с.
3. Виноградов Е.А., Дорофеев И.А. Термостимулированные электромагнитные поля твёрдых тел. – М.: Физматлит, 2010. – 484 с.
4. Венгер Є.Ф., Мельничук Л.Ю., Мельничук О.В. Застосування наукового обладнання при виконанні лабораторного практикуму з ІЧ-спектроскопії // Вісник Чернігівського національного педагогічного університету. Серія: Педагогічні науки. – 2016. – Вип. 138. – С. 14 – 19.
5. Стронський О.В., Венгер Є.Ф., Олексенко П.Ф., Мельничук О.В. Халькогенідні склоподібні напівпровідники: власивості та практичні застосування. – Ніжин: Видавництво НДУ ім. М. Гоголя, 2016. – 236 с.
6. Кошарний О.І., Мельничук Л.Ю., Мельничук О.В. Комп'ютерне моделювання фізичних процесів в курсі загальної фізики. Комп'ютерно-орієнтовані системи навчання: Збірник наук. праць. – К.: НПУ ім. М.П. Драгоманова, 2003. – Вип. 6. – С. 253 – 259.
7. Обладнання для наукових досліджень. – Режим доступу: <http://chemtest.com.ua/ik-fure-spektrometr-iraffinity-1>

8. Демьянец Л.Н., Комарова Е.Е., Кузьмина И.П., Мельничук А.В., Пасечник Ю.А. Монокристаллы оксида цинка. Получение и оптические свойства в инфракрасной области спектра: Препр. / АН России. Ин-т Кристаллографии АН Р. – М.: 1992. – 39 с.
9. Кузьмина И.П., Никитенко В.А. Окись цинка. Получение и оптические свойства. – М.: Наука, 1984. – 166 с.
10. Пуле А., Матье Ж.-П. Колебательные спектры и симметрия кристаллов. – М.: Мир, 1973. – 438 с.
11. Уханов Ю.И. Оптические свойства полупроводников. – М.: Наука, 1977. – 366 с.
12. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: Том VIII: Электродинамика сплошных сред: Учебник. – Т. 8. – М.: Физматлит, 2003. – 656 с.
13. Ильинский Ю.А., Келдыш Л.В. Взаимодействие электромагнитного излучения с веществом: Уч. пособие. – М.: Изд-во МГУ, 1989. – 304 с.
14. Ю П., Кардона М. Основы физики полупроводников. – М.: Физматлит, 2002. – 560 с.
15. Wiley Spectra Lab Spectroscopy Solved. – Режим доступа: https://wiley-1888.docs.contently.com/v/wiley-spectra-lab-infographic?elq_mid=12075 &elq_cid=2235424

Venger E.F., Melnichuk L.Yu., Melnichuk O.V., Savchenko V.F.

MODELING SPECTRA OF IR-REFLECTION ZINC OXIDE IN CARRYING LABORATORY WORKSHOP

The article indicated the need of training in high school universal competitive specialist at the labor market for manufacturing and scientific research, who will be equally competent in all areas of physics and have a unique set of skills.

Method of laboratory practical for determining optical and electrophysical parameters of uniaxial semiconductors and dielectrics by IR spectroscopy of external reflection is represented by authors.

Demonstrated practical value of laboratory work based on non-destructive method of the external IR reflection, and showed feasibility and effectiveness of acquired knowledge and skills in the learning process as well as in manufacturing.

It is noted that the use of modern instruments in the study of semiconductor structures requires a high level of theoretical knowledge of students. This level of training can only be achieved in case Master's degree programs. The complex realized a possibility of choice of high education degree master or postgraduate.

As an example, demonstrated the study of monocrystals of zinc oxide.

It is shown that introduction of computer modeling techniques in the cycle of laboratory work has significant advantages and reduces the costs of high-cost physical experiments on scientific and technological equipment.

It was established that the introduction of modern scientific complex in the learning process as a laboratory workshop is able to not only increase the assimilation of theoretical knowledge of students in the field of optics semiconductor surface but also enable them to acquire practical skills for further work in manufacturing or postgraduate degrees.

Key words: reflection spectrum, zinc oxide, computer modeling, scientific research work.

Стаття надійшла до редакції 29.05.2017