

На правах рукопису

ВОЛОЩУК  
Роман Якович

УДК 621.315.592

ОПТИЧНІ ФУНКЦІЇ  
НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ТВЕРДИХ РОЗЧИНІВ  
 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  І  $\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$

01.04.10 — фізика напівпровідників і діелектриків

Автореферат  
дисертації на здобуття вченого ступеня  
кандидата фізико-математичних наук

ЛННБ України ім.В.Стефаника



00810491 (N)

Роботу виконано на кафедрі фізики напівпровідників  
Львівського державного університету ім. І. Франка.

Науковий керівник:

кандидат фізико-математичних наук БІЛЕНЬКИЙ Б. Ф.

Офіційні опоненти:

доктор фізико-математичних наук КУРИК М. В.,

кандидат фізико-математичних наук ПЕТРОВИЧ І. В.

Провідна організація — Ужгородський державний університет.

Захист дисертації відбудеться «1» сервія 1994 р.  
о 15<sup>15</sup> год. на засіданні спеціалізованої Ради Д 068.26.05 при  
Львівському державному університеті ім. І. Франка (290005  
Львів, вул. Кирила і Мефодія, 8, Велика фізична аудиторія).

З дисертацією можна ознайомитися в науковій бібліотеці  
Львівського університету (вул. Драгоманова, 5).

Відгуки на автореферат у двох примірниках, завірені печаткою, просимо надсилати за адресою: 290005, м. Львів,  
вул. Кирила і Мефодія, 8, фізичний факультет, вченому секретарю.

Автореферат розіслано «19» квітня 1994 року.

Вчений секретар  
спеціалізованої Ради 068.26.05  
доктор фіз.-мат. наук, професор

НОСЕНКО А. Є.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми досліджень. Оптичні функції є одними з найбільш важливих характеристик напівпровідникових матеріалів. Якщо для багатьох напівпровідників такі оптичні функції вже отримано в широкому діапазоні енергій фотона, то для сполук системи  $A^2B^6$  відчувається брак цих даних. Виняток, у позитивному розумінні, становить телурид кадмію  $CdTe$ , для якого різними методами отримано спектри оптичних функцій в широкій області. Однак вже для телуриду ртуті  $HgTe$  наводяться лише розрізнені дані для області фундаментального поглинання і області довгохвильових оптичних фононів.

Нема також вичерпних даних для твердих розчинів на основі  $HgTe$ , таких як  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  і, особливо,  $Hg_{1-x}Mn_xTe$ . Для  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  і, частково, для  $Hg_{1-x}Mn_xTe$  проведено досить детальні дослідження в окремих областях спектру, однак ці дані не доповнюють одне одного і часто розглядаються зовсім окремо.

Відсутність скільки-небудь повної оптичної характеристики твердих розчинів  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  і  $Hg_{1-x}Mn_xTe$  пояснюється, очевидно, значною складністю проведення оптичних досліджень цих матеріалів. Ці тверді розчини є вузькозонними матеріалами, ширина забороненої зони яких однозначно залежить від складу  $x$ . Природно, що положення краю фундаментального поглинання використовується для визначення ширини забороненої зони і, отже, складу твердого розчину. Однак, специфічні властивості цих матеріалів (вузька енергетична щільність, суттєва різниця між ефективними масами вільних електронів і дірок) призводять до того, що положення і форма краю поглинання стають залежними не лише від  $x$ , але й від концентрації вільних носіїв. Таким чином, труднощі інтерпретації оптичних даних в області краю фундаментального поглинання ускладнюють визначення такого важливого параметра як

ширина забороненої зони  $E_g$ . Існуючі методи визначення  $E_g$  дають, як правило, лише відносні зміни  $E_g$  в межах однієї партії зразків, приготованих за однаковою технологією.

Неточність встановлення ширини забороненої зони доповнюється похибками при визначенні оптичних функцій. У літературі існує значний розкид експериментальних значень, який досягає 10-20% для коефіцієнта відбивання і до 30% для діелектричної проникності, що пояснюється різними умовами постановки і проведення експерименту, а також різними методами обробки експериментальних результатів. Показовим є, зокрема, наявність величезної кількості методів аналізу інтерференційної картини у спектрах пропускання і/або відбивання тонких плівок, які, будучи застосованими до одних і тих же експериментальних даних, часто дають суттєво відмінні результати.

Недоліком існуючих методів визначення параметрів напівпровідникових матеріалів є те, що вони ґрунтуються на вимірюваннях абсолютних значень коефіцієнтів відбивання і пропускання, в результаті чого похибка експерименту може суттєво спотворювати кінцевий результат. Наприклад, для отримання оптичних функцій у широкому діапазоні частот найчастіше використовують аналіз Крамерса-Кроніга для спектрів відбивання. Однак, наявність похибок в експериментальних значеннях  $R$  може призвести до нефізичного результату (поява від'ємних значень коефіцієнта поглинання, злами на спектральних залежностях тощо).

У зв'язку з цим пропонується комплекс взаємодоповнюючих методик, які дозволяють з допомогою оптичного експерименту визначати оптичні функції та інші важливі параметри напівпровідникових твердих розчинів  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  і  $Hg_{1-x}Mn_xTe$ .

**Мета роботи.** Метою даної роботи було визначення оптичних функцій напівпровідникових твердих розчинів на основі халькогеніду ртуті-

ті, а також розробка і апробація комплексу взаємодоповнюючих методик, які дозволяють отримувати характеристики цих матеріалів.

Як об'єкти для досліджень було обрано тонкоплівкові монокристалічні зразки  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  і  $Hg_{1-x}Mn_xTe$ .

Для виконання роботи було поставлено наступну основну задачу: проведення спектروفотометричних досліджень і розрахунків на їх основі, а також на базі відомих літературних даних оптичних функцій та інших параметрів твердих розчинів  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  ( $0,15 < x < 0,25$ ) та  $Hg_{1-x}Mn_xTe$  ( $0,05 < x < 0,15$ ); розробка обчислювальних методів для проведення таких розрахунків.

**Наукове новизна.** Вперше запропоновано метод визначення абсолютних значень оптичних констант за відносними вимірюваннями інтерференційних спектрів в тонких плівках.

Запропоновано метод визначення ширини забороненої зони вузькощілинних напівпровідникових твердих розчинів кейнівського типу.

Вперше досліджено форму краю фундаментального поглинання твердого розчину  $Hg_{1-x}Mn_xTe$ .

Із застосуванням аналізу Крамерса-Кроніга на основі експериментальних даних розраховано спектри оптичних функцій напівпровідникових твердих розчинів  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  та  $Hg_{1-x}Mn_xTe$  у широкій спектральній області.

**Практична цінність.** Отримані оптичні функції доповнюють відомі експериментальні дані і можуть служити критерієм при розрахунках зонної енергетичної структури твердих розчинів  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  і  $Hg_{1-x}Mn_xTe$ .

Розроблений комплексний підхід до визначення ширини забороненої зони дає можливість неруйнівними методами визначати склад твердих розчинів  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  і  $Hg_{1-x}Mn_xTe$ .

Розроблена методика визначення оптичних параметрів тонких плівок за контрастністю інтерференційної картини у спектрах пропускання і відбивання дозволяє відмовитись від проведення вимірювань абсолютних значень коефіцієнтів  $R$  і  $T$  і тим самим суттєво зменшити похибку кінцевого результату.

Практичну цінність мають також розроблені алгоритми та програми для комп'ютера.

Положення, що виносяться на захист:

Контрастність інтерференційної картини у спектрах пропускання і відбивання тонких плівок разом з точними даними про спектральне положення інтерференційних екстремумів містить достатньо інформації про оптичні параметри і товщину плівки і може бути використана замість абсолютних значень  $R$  і  $T$  для визначення  $n$ ,  $k$  і  $d$ .

Визначення ширини забороненої зони вузькозонних кейнівських напівпровідників, зокрема твердих розчинів  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  і  $Hg_{1-x}Mn_xTe$ , можливе тільки з урахуванням зсуву Бурштейна-Мосса, навіть у випадку нелегованого матеріалу.

Аналіз краю фундаментального поглинання та плазмового мінімуму відбивання дозволяє одночасно визначити ширину забороненої зони, концентрацію і ефективну масу електронів у зоні провідності  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  і  $Hg_{1-x}Mn_xTe$ .

Апробація роботи. Результати дисертаційної роботи доповідались на VI, VII і VIII Всесоюзних симпозиумах "Напівпровідники з вузькою забороненою зоною і напівметали" (Львів, 1983, 1986 і 1991рр.); IV і V Всесоюзних конференціях "Потрійні напівпровідники та їх застосування" (Кишинів, 1983 і 1987рр.); II Всесоюзній науково-технічній конференції "Матеріалознавство халькогенідних і кисневмісних напівпровідників" (Чернівці, 1986р.); VII Всесоюзній конференції з росту

кристалів (Москва, 1988р.); III конференції молодих вчених фізичного факультету Львівського держуніверситету (Львів, 1988р.); II Всесоюзному семінарі з проблеми "Фізика і хімія напівпровідників" (Павлодар, 1989р.); XV Пекарівській нараді з теорії напівпровідників (Львів, 1992р.); щорічних наукових конференціях викладачів та співробітників Львівського держуніверситету (1983-1993рр.).

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 17 робіт.

Структура роботи. Дисертаційна робота складається з вступу, шести розділів, висновків та списку літератури і містить 209 сторінок машинопису, 69 рисунків, 11 таблиць, 182 бібліографічних посилання.

### КОРОТКИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність теми дисертації, сформульовані мета роботи, основна задача, наукова новизна, практична цінність результатів і положення, що виносяться на захист, коротко викладено зміст роботи по розділах.

Перший розділ містить огляд робіт, присвячених вивченню енергетичної зонної структури та оптичних властивостей  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  і  $Hg_{1-x}Mn_xTe$ . Показано якісну подібність основних фізичних властивостей обох матеріалів за відсутності зовнішнього магнітного поля.

$Hg_{1-x}Cd_xTe$  і  $Hg_{1-x}Mn_xTe$  являють собою тверді розчини, які кристалізуються у широкій області складів  $x$  із структурою цинкової обманки. Однакова кристалічна структура обох матеріалів у значній мірі робить подібними їх енергетичні зонні структури.  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  ( $x \leq 0,4$ ) і  $Hg_{1-x}Mn_xTe$  (у всій області існування) характеризують ся малим значенням  $E_g$ , яке може бути співмірним з енергією електронів у зоні провідності. Такий вузькозонний матеріал адекватно описується моделлю Кейна, яка враховує цей масштаб енергетичних віддалей.

Характерною рисою вузькозонних кейнівських напівпровідників є непараболічна залежність енергії зон легких дірок і електронів від хвильового числа  $k$  в центрі зони Бріллюена, яка має наслідком залежність ефективної маси електронів від їх концентрації у зоні.

Специфічні (порівняно з  $Hg_{1-x}Cd_xTe$ ) магнітні властивості  $Hg_{1-x}Mn_xTe$  пов'язані з  $3d^5$  оболонкою іонів Mn. Однак енергетичні рівні, які формуються її зайнятими і порожніми станами, знаходяться відповідно на  $-3,5$  еВ нижче і на  $-3,5$  еВ вище стелі валентної зони. Тому  $3d^5$  електрони Mn не визначають електричних та інших фізичних властивостей  $Hg_{1-x}Mn_xTe$ , і за відсутності магнітного поля характеристики  $Hg_{1-x}Mn_xTe$  і  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  повинні бути якісно подібними.

Представлений огляд оптичних властивостей демонструє цю подібність. Обидва матеріали є прямозонними напівпровідниками: максимум валентної зони і мінімум зони провідності знаходяться в точці  $\Gamma$  зони Бріллюена. Переходи між цими зонами формують край фундаментального поглинання, який при зміні температури і складу  $x$  зсувається відповідно до зміни  $E_g$ . Якщо у випадку  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  край поглинання досліджено досить повно, то для  $Hg_{1-x}Mn_xTe$  такі дані у літературі практично відсутні. Те саме стосується й вивчення ефекту Бурштейна-Мосса, плазмового мінімуму відбивання.

Відбивання обох твердих розчинів досліджено в широкому спектральному діапазоні від області фундаментального поглинання до області довгохвильових оптичних фононів. Незважаючи на це, аналіз Крамерса-Кроніга з метою отримання оптичних функцій  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  і, особливо,  $Hg_{1-x}Mn_xTe$  практично не проводиться.

У другому розділі проаналізовано описані в літературі методи визначення оптичних параметрів і товщини тонких плівок, а також методи визначення  $E_g$  вузькозонних твердих розчинів типу  $Hg_{1-x}Cd_xTe$ .

Проведений аналіз близько 30 публікацій свідчить про існування широкої палітри методів визначення  $n$ ,  $k$  і  $d$  за результатами спектрофотометричних вимірювань. Найбільш загальними є методи, у яких шукані параметри визначаються шляхом припасування теоретичних спектрів відбивання і пропускання до експериментальних спектрів  $R$  і  $T$ . Більшість методів вимагає точних абсолютних значень коефіцієнтів  $R$  і  $T$ .

При інтерпретації експериментальних даних постають дві проблеми: відсутність розв'язків і їх неоднозначність. У різних областях спектру і для матеріалів з різними значеннями  $n$  і  $k$  ці проблеми розв'язуються по-різному. Розробка ж універсального методу, який би давав гарантовані і єдині розв'язки, є, очевидно, неможливою.

У другій частині розділу представлено огляд існуючих методів визначення  $E_g$   $Hg_{1-x}Cd_xTe$  (оскільки для  $Hg_{1-x}Mn_xTe$  якісь особливі методи відсутні) за результатами дослідження краю фундаментального поглинання. У деяких роботах ширину забороненої зони намагались пов'язати з енергією фотонів, при якій  $\alpha$  або  $T$  дорівнює певній, досить довільно обраній величині. Розглянуто також методи, які для визначення  $E_g$  опираються на експоненціальну форму краю поглинання. Отримані у такий спосіб значення ширини забороненої зони міститимуть систематичну похибку і можуть характеризувати лише відносну зміну  $E_g$  від зразка до зразка, при умові, що ті виготовляються за однаковою технологією і мають схожі електрофізичні і оптичні характеристики.

Третій розділ містить короткий опис методики оптичного експерименту, а також характеристики зразків.

Об'єктом досліджень були тонкі монокристалічні плівки  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  ( $0,15 < x < 0,25$ ) і  $Hg_{1-x}Mn_xTe$  ( $0,05 < x < 0,15$ ), отримані методом височастотного епітаксійного напылення в ртутній плазмі на підкладках  $CdTe$ . Склад  $x$  твердих розчинів визначався за даними рент-

генівського мікроаналізу. Товщина плівок становила від 3 до 15 мкм, підкладки мали товщину від 0,3 до 1 мкм.

Оптичні вимірювання проводились на стандартних інфрачервоних спектрофотометрах у діапазоні температур від кімнатної до температури рідкого азоту в області хвильових чисел 50...50000 см<sup>-1</sup>.

У четвертому розділі викладено і обґрунтовано метод визначення показника заломлення  $n$ , коефіцієнта екстинкції  $k$  та товщини  $d$  тонких плівок, який не вимагає вимірювань абсолютних значень коефіцієнтів відбивання і пропускання.

Інтерференційні явища у тонкоплівковій структурі описують на основі електромагнітної теорії. Якщо монохроматичне світло падає зі середовища з номером  $j=0$  нормально до меж розділу середовищ, то коефіцієнти відбивання і пропускання на  $j$ -ій межі розділу можуть бути записані у вигляді рекурентних співвідношень

$$r_{c,j-1} = \frac{f_{j-1} + r_{c,j} \exp(-2i\varphi_j)}{1 + f_{j-1} r_{c,j} \exp(-2i\varphi_j)}, \quad t_{c,j-1} = \frac{t_{c,j} \exp(-i\varphi_j)}{1 + f_{j-1} r_{c,j} \exp(-2i\varphi_j)}, \quad (1)$$

де  $f_{j-1} = (\hat{n}_{j-1} - \hat{n}_j) / (\hat{n}_{j-1} + \hat{n}_j)$ ,  $g_{j-1} = 2\hat{n}_{j-1} / (\hat{n}_{j-1} + \hat{n}_j)$ , за допомогою яких для структури з відомими  $\hat{n}_j$ ,  $k_j$ ,  $d_j$  всіх  $j=1...M$  шарів можна розраховувати одну за одною величини  $r_{c,j}$ ,  $t_{c,j}$  і визначити амплітудні коефіцієнти відбивання і пропускання всієї багат шарової структури  $r_{c,0}$ ,  $t_{c,0}$ , отже, енергетичні коефіцієнти  $T = 1 - R = |t_{c,0}|^2$ ,  $R = |r_{c,0}|^2$ .

Характерною рисою більшості методик, оглянутих у розділі 2, є те, що визначення  $n$ ,  $k$  і  $d$  в них опирається на абсолютні значення енергетичних коефіцієнтів пропускання і/або відбивання. На відміну від абсолютних значень  $R$  і  $T$  контрастність інтерференційної картини  $C^R = R_{\max} / R_{\min}$ ,  $C^T = T_{\max} / T_{\min}$  є значно менш чутливою до похибок, її визначення не вимагає вимірювання абсолютних значень  $R$  і  $T$ .

Контрастності можна розглядати як функції наступних параметрів:

$$\begin{cases} C_m^T = f_T(p_m, k_m, d, \lambda_m^T, \lambda_{m+1}^T) \\ C_m^R = f_R(p_m, k_m, d, \lambda_m^R, \lambda_{m+1}^R) \end{cases} \quad (2)$$

Порівнюючи експериментальні і теоретичні значення контрастності отримаємо систему рівнянь:

$$\begin{cases} C_m^{T \text{exp}} = f_T(p_m, k_m, d, \lambda_m^{T \text{exp}}, \lambda_{m+1}^{T \text{exp}}) \\ C_m^{R \text{exp}} = f_R(p_m, k_m, d, \lambda_m^{R \text{exp}}, \lambda_{m+1}^{R \text{exp}}) \end{cases} \quad (3)$$

Величина  $d$  невідома, у зв'язку з чим незалежне розв'язання систем (3) для всіх  $m$  стає неможливим. Однак, задавши певне значення  $d$  як параметра функцій (2), можна для кожної смуги знайти  $p_m$  і  $k_m$  з системи (3). При неправильному значенні  $d$  неточними будуть і всі розв'язки  $p_m$  і  $k_m$ , внаслідок чого екстремуми функцій  $T(p_m, k_m, d, \lambda)$  і  $R(p_m, k_m, d, \lambda)$  виявляться зсунутими відносно експериментально зафіксованих положень  $\lambda_m^{T \text{exp}}$  і  $\lambda_m^{R \text{exp}}$ . Тоді можна змінити  $d$  і продовжити розв'язання систем рівнянь (3) до досягнення мінімуму функції  $F(d)$ :

$$F(d) = \sum_{m=1}^M \left[ \left( \lambda_m^{T \text{theor}} - \lambda_m^{T \text{exp}} \right)^2 + \left( \lambda_m^{R \text{theor}} - \lambda_m^{R \text{exp}} \right)^2 \right] \quad (4)$$

де  $\lambda_m^{T \text{theor}}$ ,  $\lambda_m^{R \text{theor}}$  - положення екстремумів  $T(\lambda)$  і  $R(\lambda)$ . Проведені дослідження показали, що така цільова функція  $F(d)$  завжди має чіткий екстремум (див. рис.1).

При розгляді  $M$  інтерференційних смуг рівняння (3) разом з умовою мінімізації функції (4) утворюють систему з  $2 \cdot M + 1$  рівняння з  $2 \cdot M + 1$  невідомим ( $2 \cdot M$  значень  $p_m, k_m$  ( $m=1 \dots M$ ) плюс товщина  $d$ ), яка може бути розв'язана методом ітерацій, починаючи з нульового набли-

ження для  $d$ . На кожній ітерації для всіх  $M$  інтерференційних смуг розв'язуються системи (3). Знайдені  $n_m$  і  $k_m$  використовуються при мінімізації  $F(d)$ . Визначене  $d$  порівнюється з попереднім наближенням, і ітераційний процес продовжується до досягнення необхідної точності.

Викладена процедура визначення  $n$ ,  $k$  і  $d$  тонких плівок була реалізована у вигляді програми для комп'ютера, яка після тестування на модельних спектрах використовувалась для аналізу реальних спектрів  $R$  і  $T$  досліджуваних зразків  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  і  $Hg_{1-x}Mn_xTe$ .

В останніх параграфах розділу представлено результати розрахунку дисперсії  $n(\hbar\omega)$  для твердих розчинів з двома зонами характером спектрів ґраткового відбивання, а також результати дослідження плазмового мінімуму відбивання, який для ряду зразків спостерігався в області довжин хвиль 5...25 мкм.

У п'ятому розділі наведено результати досліджень тонких плівок  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  і  $Hg_{1-x}Mn_xTe$  в області краю фундаментального поглинання.

Аналіз експериментальних спектрів поглинання проводиться на основі зонної моделі Кейна. Коефіцієнт поглинання з урахуванням легких і важких дірок є функцією  $E_g$ ,  $E_v$  (положення рівня Фермі) і  $\hbar\omega$ :

$$\alpha = \alpha_{1h} + \alpha_{2h} = f(E_g, E_v, \hbar\omega) \quad (5)$$

Модель Кейна зв'язує рівень Фермі з концентрацією носіїв:

$$n = f(E_g, E_v) \quad (6)$$

тому  $\alpha$  може розглядатися як функція тільки  $\hbar\omega$  і  $E_g$ :

$$\alpha = f(E_g, \hbar\omega) \quad (7)$$

Таким чином, теоретична залежність коефіцієнта поглинання містить лише один невідомий параметр -  $E_g$ . Його можна визначити, припасувавши методом найменших квадратів залежність  $\alpha(E_g, \hbar\omega)$  до експериментальних значень  $\alpha(\hbar\omega)$ . З допомогою розробленої комп'ютер-

ної програми визначено ширину забороненої зони зразків  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  і  $Hg_{1-x}Mn_xTe$ . Виявлено добре узгодження отриманих значень з результатами інших, у тому числі неоптичних експериментів.

Досліджено форму краю поглинання твердого розчину  $Hg_{1-x}Mn_xTe$ . Показано, що спектральна залежність коефіцієнта поглинання в діапазоні температур 77+300 К добре описується аналітичними виразами  $\alpha(\hbar\omega)$ , отриманими в рамках теорії Кейна (див. рис.2).

Запропоновано метод визначення ширини забороненої зони і концентрації вільних носіїв заряду за результатами лише оптичних вимірювань. Метод апробовано на прикладі зразків  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  і  $Hg_{1-x}Mn_xTe$ , для яких спостерігається плазмовий мінімум відбивання.

У шостому розділі проведено розрахунок оптичних функцій  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  і  $Hg_{1-x}Mn_xTe$  методом Крамерса-Кроніга. Описано процедуру обчислень, способи уникнення нефізичних результатів. Показано кореляцію результатів аналізу Крамерса-Кроніга з даними, отриманими з аналізу інтерференційної картини у спектрах T і R тонких плівок.

Розрахунок інтегралу Крамерса-Кроніга проводиться чисельним методом з використанням екстраполяції внесків у фазу відбитої хвилі від невимірних областей за методом Рюсслера, який є математично коректним і дає задовільні результати. Процедуру розрахунку реалізовано у вигляді програми для комп'ютера.

Показано, що нефізичного результату в аналізі Крамерса-Кроніга можна уникнути, якщо при визначенні параметрів екстраполяції припасовувати розрахункові оптичні функції до експериментальних значень коефіцієнта екстинкції в області краю фундаментального поглинання.

Проведено аналіз спектрів R( $\hbar\omega$ ) зразків  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  і  $Hg_{1-x}Mn_xTe$  і розраховано n( $\hbar\omega$ ) і k( $\hbar\omega$ ) в діапазоні 50...50000  $cm^{-1}$ . Для визначення параметрів екстраполяції використовувались значення k, стрима-

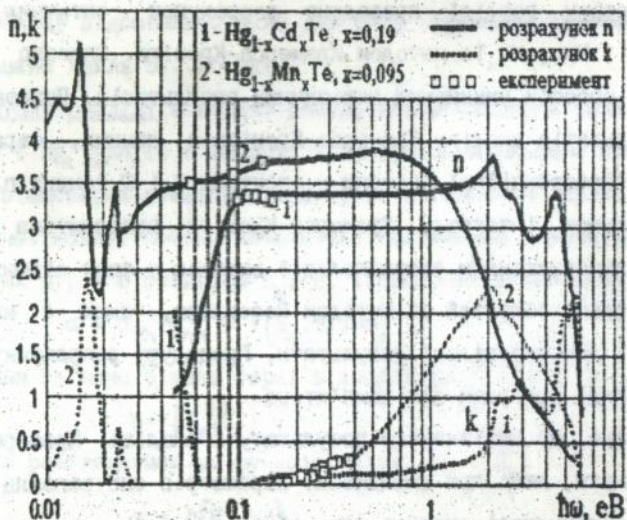
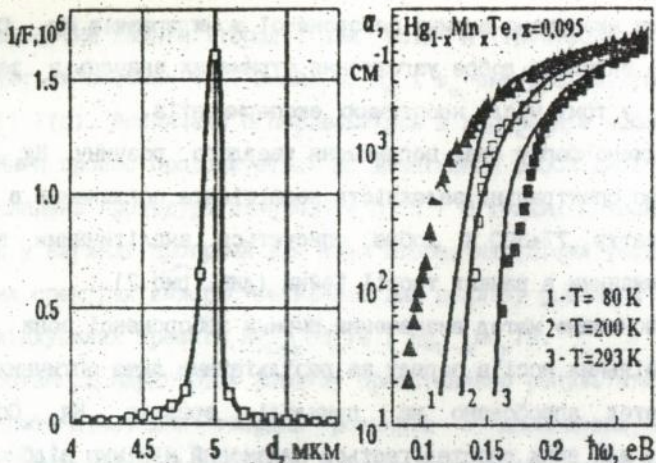


Рис.1. Обернена величина до цільової функції  $F(d)$  (4) для модельної структури з товщиною плівки  $d=5$  мкм.

Рис.2. Край фундаментального поглинання  $\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ : точки - експеримент, лінії - теоретичний вираз  $\alpha(h\nu)$ .

Рис.3. Спектри показника заломлення і коефіцієнта екстинкції  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  і  $\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ : Точки - експеримент, лінії - розрахунок методом Крамерса-Кроніга.

ні експериментально в області краю фундаментального поглинання. Розрахункові спектри  $k(\hbar\omega)$  добре узгоджуються з експериментальними. Відзначено також добре співпадіння розрахункових спектрів показника заломлення із експериментальними значеннями  $n(\hbar\omega)$ , визначеними з інтерференції в області прозорості, хоча останні ніяк не використовувались в аналізі Крамерса-Кроніга (див. рис.3). За відомими значеннями  $n(\hbar\omega)$  і  $k(\hbar\omega)$  розраховано інші оптичні функції.

### ОСНОВНІ ВИСНОВКИ І РЕЗУЛЬТАТИ

1. Розроблено і обґрунтовано метод аналізу інтерференційної картини в спектрах пропускання і відбивання, який не вимагає вимірювань абсолютних значень коефіцієнтів  $R$  і  $T$ .
2. Досліджено плазмовий мінімум відбивання зразків  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  і  $Hg_{1-x}Mn_xTe$ . Методом найменших квадратів з використанням окремої програми для комп'ютера проаналізовано весь хід кривих  $R(\hbar\omega)$ , що дозволило визначити відношення концентрації носіїв до їх ефективної маси  $m^*$ , високочастотну діелектричну проникність  $\epsilon_\infty$ , час релаксації  $\langle\tau\rangle$  та деякі інші параметри.
3. Шляхом припасовування теоретичного спектра  $\alpha(\hbar\omega)$  до експериментальних значень коефіцієнта поглинання в області краю визначено ширину забороненої зони твердих розчинів  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  і  $Hg_{1-x}Mn_xTe$ . Виявлено добре узгодження отриманих значень з результатами інших експериментів.
4. Досліджено форму краю поглинання напівпровідникового твердого розчину  $Hg_{1-x}Mn_xTe$ . Показано, що спектральна залежність коефіцієнта поглинання в діапазоні температур 77+300 К добре описується аналітичними виразами  $\alpha(\hbar\omega)$ , отриманими в рамках теорії Кейна.

5. Запропоновано метод визначення ширини забороненої зони і концентрації вільних носіїв заряду за результатами лише оптичних вимірювань. Метод апробовано на прикладі зразків  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  і  $Hg_{1-x}Mn_xTe$ , у спектрах відбивання котрих спостерігається плазмовий мінімум відбивання.
6. Проведено аналіз спектрів відбивання твердих розчинів  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  і  $Hg_{1-x}Mn_xTe$  і розраховано оптичні функції в діапазоні хвильових чисел  $50 \dots 50000 \text{ см}^{-1}$ .

Основні результати дисертації опубліковано в наступних роботах:

1. Біленький Б.Ф., Волощук Р.Я., Данилюк Д.В. О применимости методик расчета оптических параметров тонких полупроводниковых пленок на прозрачных подложках // Опт. и спектроскопия.- 1989.- Т.67, вып.5.- С.1150-1153.
2. Біленький Б.Ф., Волощук Р.Я., Данилюк Д.В. Оптика напівпровідників: оптичні функції. Фізичний практикум. Ч.І. Львів: ЛДУ, 1993.- 99с.
3. Біленький Б.Ф., Волощук Р.Я., Данилюк Д.В., Белых В.М. Визначення оптичних параметрів напівпровідників за контрастністю інтерференційної картини в тонких плівках // XV Пекаровское совещание по теории полупроводников. Тезисы докладов (г.Львов, 14-18 сентября). Донецк, 1992.- С.15.
4. Біленький Б., Волощук Р., Данилюк Д., Міліянчук М. Оптичні дослідження кейнівського напівпровідника  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  // Фізичний збірник Наукового товариства ім.Т.Шевченка. Т.І. Львів, 1993.- С.304-320.
5. Біленький Б.Ф., Данилюк Д.В., Волощук Р.Я. Краевое поглощение и дисперсия показателя преломления  $Mn_{0.16}Hg_{0.84}Te$  // Полупроводни-

- ки с узкой запрещенной зоной и полуметаллы: *Мат. VI Всес. симп.* - Львов, 1983. - С.253-254.
6. Биленький Б.Ф., Данилюк Д.В., Волошук Р.Я. Математическое моделирование краевого поглощения четырехкомпонентного полупроводника  $Hg_xCd_yMn_zTe$  ( $x+y+z=1$ ) // *V Всес. конф. "Тройные полупроводники и их применение"*. Тез. докл.: Кишинев, 1987. - Т.2. - С.94.
7. Биленький Б.Ф., Данилюк Д.В., Волошук Р.Я. Оптическое поглощение и фотопроводимость кристаллов системы Hg-Mn-Te // *Материаловедение халькогенидных и кислородосодержащих полупроводников*. Тез. докл. II Всес. научно-техн. конф., Черновцы, октябрь 1986 г.: Черновцы, - 1986. - Т.1. - С.111.
8. Биленький Б.Ф., Данилюк Д.В., Волошук Р.Я., Кужель Б.С. Оптические характеристики полумагнитных тройных халькогенидов // *Тезисы докладов IV Всес. конф. "Тройные полупроводники и их применение"*. Кишинев, 1983. - С.235.
9. Биленький Б.Ф., Данилюк Д.В., Волошук Р.Я., Смелян И.П. Дисперсия показателя преломления света в полупроводниковых твердых растворах с двухмодовым характером спектров отражения // *УФЖ.* - 1986. - Т.31, № 12. - С.1811-1816.
10. Биленький Б.Ф., Данилюк Д.В., Кульчицкий Н.А., Волошук Р.Я., Хашимов Р.Н. Теория краевого поглощения и определение зонных параметров полупроводников системы  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  // *Препринт № 181.* - Львов: Изд. ФМИ им.Г.В.Карпенко АН УССР. - 1990. - 35с.
11. Волошук Р.Я. Выбор оптимального метода расчета оптических параметров тонких пленок из анализа интерференционной картины в спектрах прозрачности // *Мат. 3 конф. мол. ученых физ. ф-та Львовского госуниверситета (г.Львов, 29-30 марта 1988 г).* Деп. УкрНИНТИ, № 2945-Ук88 от 5.12.88.г. - С.83-85.

12. Волошук Р.Я. Деякі особливості розрахунку оптичних функцій методом Крамерса-Кроніга // Вісник Львів. ун-ту. Сер. фізична.- 1985.- в.19.- С.39-43.
13. Волошук Р.Я., Данилюк Д.В., Біленький Б.Ф., Кульчицький М.О., Хашимов Р.Н. Визначення ширини забороненої зони та концентрації вільних носіїв заряду в напівпровідникових твердих розчинах  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  методами оптичної спектроскопії // Вісник Львів. ун-ту. Сер. фізична.- 1990.- в.23.- С.51-58.
14. Данилюк Д.В., Біленький Б.Ф., Волошук Р.Я., Петров Д.Е., Фодчук И.М. Температурные зависимости оптического поглощения слоев  $Hg_{1-x}Mn_xTe$  // Полупроводники с узкой запрещенной зоной и полуметаллы: Мат. VIII Всес.симп.- Львов, 1991.- Ч.1.- С.210-212.
15. Данилюк Д.В., Волошук Р.Я., Біленький Б.Ф. Зонные параметры твердых растворов  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  ( $0 < x < 0,8$ ) // Полупроводники с узкой запрещенной зоной и полуметаллы: Мат. VII Всес.симп.- Львов, 1986.- Ч.1.- С.89-91.
16. Данилюк Д.В., Волошук Р.Я., Кульчицкий Н.А., Біленький Б.Ф., Милиянчук М.В., Хашимов Р.Н. Проявление выделений второй фазы в тонких пленках  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  и  $Hg_{1-x}Mn_xTe$  // Примеси и дефекты в узкозонных полупроводниках. Мат. II Всес. сем. по проблеме "Физика и химия полупроводников", Павлодар, 1989.- Ч.1.- С.110-113.
17. Данилюк Д.В., Милиянчук М.В., Біленький Б.Ф., Волошук Р.Я., Беликович Б.А. Тонкие слои полумагнитных полупроводников системы ртуть-марганец-теллур: структура и оптические свойства // 7 Всес. конф. по росту кристаллов. Симпозиум по молекулярно-лучевой эпитаксии. Расширенные тезисы. М., 1988.- Т.1.- С.55-57.

*Волошук*

---

Підписано до друку 2. 03. 94. Формат паперу  $60 \times 84^{1/16}$ . Друк офсетний.  
Ум. др. арк. 1,0. Тираж 100. Зам. 316.

---

Навчально-виробничі майстерні Львівського поліграфічного технікуму.  
290004, м. Львів, вул. Винниченка, 12.

463003

AB 29.922

**AB 29.922**