

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ ФІЗИКИ НАПІВПРОВІДНИКІВ

На правах рукопису



КАРАЧЕВЦЕВА ЛЮДМИЛА АНАТОЛІЇВНА

ІЧ-ФОТОЧУТЛИВІ ТВЕРДІ РОЗЧИНИ CdHgTe:  
ФІЗИКО-ТЕХНОЛОГІЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ТА  
ДЕФЕКТНОЇ СТРУКТУРИ

(01.04.10 - фізика напівпровідників та діелектриків)

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора фізико-математичних наук

Київ-1996



Дисертація є рукопис

Робота виконана в Інституті фізики напівпровідників НАН України (м. Київ)

Науковий консультант: доктор фізико-математичних наук  
професор ЛЮБЧЕНКО Олексій Вікторович

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук  
професор ЛАШКАРЬОВ Георгій Вадимович  
доктор фізико-математичних наук  
професор ШЕНДЕРОВСЬКИЙ Василь Андрійович  
доктор фізико-математичних наук  
професор БЕРЧЕНКО Микола Миколайович

Провідна організація: Інститут прикладної фізики Львівського університету

Захист відбудеться "26" квітня 1996 р. о 14<sup>15</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д.50.07.01 при Інституті фізики напівпровідників НАН України за адресою 252650 МСП, Київ 28, проспект Науки, 45.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Інституту фізики напівпровідників НАН України

Автореферат розісланий "21" березня 1996 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

ШЕНКО С.С.

ЛННБ ім. В. Стефаника  
АН України

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність проблеми. Основною задачею фотоелектроніки є виявлення гранично слабких джерел електромагнітного випромінювання на рівні фонового. В наш час перспективність цього напрямку визначається прогресом технології виготовлення багатоелементних матриць або неперервних лінійних фотоприймачів-перетворювачів зображення, а також можливістю реалізації граничних фотоелектричних параметрів окремих елементів матриці та всієї структури. Для виявлення світлового сигналу у діапазоні максимальної питомої потужності випромінювання земних об'єктів ( $300 \pm 50$  К), зокрема, у вікні прозорості 8-14 мкм, сьогодні найбільш перспективним матеріалом є твердий розчин телуриду кадмій-ртуті ( $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ ,  $x \sim 0.2$ ), який використовується у діапазоні власного оптичного поглинання і має великі значення відношення рухливостей електронів та дірок. Це забезпечує високу фоточутливість та ефективність детектування, близьку до порогової. Саме тому  $\text{CdHgTe}$  займає близько 60% загальносвітлового ринку ІЧ-фотоприймачів.

Поряд з безумовними перевагами цього матеріалу існує ряд проблем, пов'язаних з його технологічним відтворенням та оптимізацією фізичних параметрів. Для твердих розчинів  $\text{CdHgTe}$  однією з основних задач є одержання однорідного за складом матеріалу з мінімально допустимою концентрацією просторових дефектів, які формуються у процесі росту. Окрім цього, значні відхилення від стехіометрії (специфіка фазової діаграми  $\text{CdHgTe}$ ) забезпечують високий вміст електрично активних власних дефектів у вирощених кристалах. Тому стехіометризуюча термообробка є чи не основною технологічною операцією (поряд з бездефектною обробкою) на шляху створення фотоприймальної структури.

На початку 80-х років у результаті відпрацювання нових методів вирощування телуриду кадмій-ртуті та підвищення рівня очищення вихідних компонент було одержано матеріал на рівні термодинамічної неупорядкованості твердого розчину за складом 2-3%. Окрім цього, до середини 80-х років було достатньо докладно досліджено фазову діаграму твердого розчину (зокрема, для складу  $x = 0.2$ ), що дозволило відпрацювати прецизійні методи низькотемпературного стехіометризуючого

відпалу. У даному технологічному просторі проблема оптимізації та відтворення параметрів ІЧ-фотоприймачів на основі  $\text{Cd}_2\text{Te}$  пов'язана з (1) пошуком та обґрунтуванням нових фізико-технологічних процесів підвищення фоточутливості  $\text{Cd}_2\text{Te}$ , (2) адекватним дослідженням рекомбінаційних та кінетичних процесів у цьому матеріалі, (3) встановленням механізмів принципового (теоретичного) обмеження параметрів ІЧ-фотоприймачів на основі реальних кристалів і гетероструктур з розвиненою системою точкових та просторових дефектів.

Робота виконувалась згідно з постановами Президії АН УРСР № 604 від 25.12.80 р. "Комплексні фізико-хімічні дослідження напівпровідників у зв'язку з технологією одержання та обробки" та № 320 від 10.09.86 р. "Дослідження фізико-хімічних процесів у системі напівпровідник-активоване середовище з метою створення наукових основ бездефектних технологій одержання, обробки та контролю напівпровідникових матеріалів"; розпорядженням Президії НАН України № 160 від 19.02.92 "Пошук та дослідження фізико-технологічних принципів формування та параметричного контролю напівпровідникових багаточастотних структур для реєстрації та перетворення випромінювання в рентгенівському, оптичному та ІЧ діапазонах спектру"; Програмою ДКНТ України 7.1 "Матеріали електронної техніки" (Постанова ДКНТ України № 19 від 24.07.92 р.); господарськими угодами між Інститутом фізики напівпровідників НАН України і підприємствами України та Росії.

Мета роботи. Включає пошук та наукове обґрунтування режимів фізико-технологічних процесів оптимізації параметрів структурно-дефектних твердих розчинів телуриду кадмію-ртуті для одержання порогової ефективності детектування ІЧ-випромінювання. Виконання поставленої мети пов'язане з вирішенням наступних задач:

- розробити методи підвищення фоточутливості телуриду кадмію-ртуті;

- розробити методи контролю параметрів  $\text{Cd}_2\text{Te}$  ( $x \approx 0.2$ ), адекватні рівню технології їх одержання та обробки, які включають вимірювання зонних параметрів, метрику "слабкого" р-типу провідності, профільної неоднорідності;

- вивчити кінетичні та рекомбінаційні процеси у фоторези-

стивному  $\text{CdHgTe}$  для вироблення кількісних критеріїв обмеження фоточутливості (детектуючої здатності) у результаті направленої термічної та термоакустичної модифікації точково-дефектної структури;

- визначити гранично допустимі концентрації типових ростових макродефектів (дислокацій  $n_D$  та границь субзерен  $n_{sb}$ ) у  $\text{CdHgTe}$ , які принципово (теоретично) обмежують робочі параметри ІЧ-фотоприймачів;

- вивчити вплив профільної неоднорідності гетеропереходів  $\text{CdHgTe}/\text{CdTe}(\text{Se}, \text{Zn})$  на технологічну відтворюваність параметрів епітаксійного шару.

Наукова новизна роботи. Комплексні дослідження процесів фізико-технологічної оптимізації та механізмів обмеження параметрів  $\text{CdHgTe}$  дозволили одержати такі наукові результати, загальні для вузькоцилінричних твердих розчинів:

1. Виявлено ефект підвищення часу життя нерівноважних носіїв заряду в  $n\text{-CdHgTe}$  для вихідного ступеня компенсації матеріалу  $K \approx 0.5$  у результаті низькотемпературного компенсаючого відпалу шляхом введення рекомбінаційно-активних акцепторів (вакансій ртуті).

2. Встановлено, що акустостимульована дифузія точкових дефектів у  $\text{CdHgTe}$  супроводжується процесами генерації або "заліковування" вакансій ртуті у залежності від інтенсивності термоакустичного впливу та вихідної концентрації вакансій.

3. Виявлено значний вплив термоакцепторів на концентраційну залежність електронної рухливості та рівень шуму типу  $I/f$ ; у той же час низькотемпературний хід рухливості електронів визначається непараболічністю енергетичного спектру носіїв заряду у вузькоцилінричних напівпровідниках (різков температурно та концентраційно залежність енергії електронів).

4. Розроблено фізичні моделі та визначено гранично допустимі концентрації типових просторових дефектів (дислокацій, границь субзерен) у фоторезистивному  $\text{CdHgTe}$ . Границі субзерен, як гетери точкових дефектів, підвищують фоточутливість  $\text{CdHgTe}$  при  $n_{sb} < 100 \text{ см}^{-1}$ , у той час як ростові дислокації однозначно знижують рухливість та час життя нерівнова-

жних носіїв заряду з різким падінням fotocутливості при концентраціях, вищих порогової ( $n_D \geq 8 \cdot 10^5 \text{ см}^{-2}$ ).

5. Встановлено, що радіус дії макродефекту, як стоку нерівноважних носіїв заряду, не співпадає з дифузійною довжиною фотоносіїв і залежить лише від конфігурації та розміру просторового дефекту (рекомбінаційно-розмірний ефект).

6. Розроблено методи та експериментально визначено електрофізичні параметри основних і неосновних носіїв заряду, а також власної концентрації носіїв по ділянці аналітично простої (квадратичної) магнітопольової залежності коефіцієнту Холла від'ємного знаку, який реалізується у напівпровідниках "слабкого" p-типу провідності.

7. Визначені умови формування мінімуму поперечної компоненти тензору електропровідності між областями "замагнічування" носіїв заряду одного знаку у багат шарових n-p-структурах на основі напівпровідників типу  $\text{CdHgTe}$ .

8. Встановлено кореляції між структурною досконалістю підкладки, параметрами епітаксійного шару та висотам потенційного бар'єру для ізотипних гетероструктур p-CdHgTe/p-CdTe, яка визначається вмістом і розподілом макродефектів та, як наслідок, формуванням високорухливої електронної компоненти провідності.

#### Практична цінність

1. Комплексні дослідження, узагальнення великої кількості статистичного матеріалу, підвищення точності методів контролю та управління фізичними параметрами дозволили виробити критерії якості фоторезистивних кристалів  $\text{CdHgTe}$ , які були використані підприємством-виготовувачем (АТ "Чисті метали", м.Світловодськ) при відпрацюванні технологічних операцій легування та термовідпалу. Кількісні характеристики впливу просторових дефектів структури (дислокацій, малокутових границь) були використані при формуванні технічних умов одержання цього матеріалу.

2. Оптимізація часу життя нерівноважних носіїв заряду після введення компенсуючих вакансій ртуті або Іх внутрішнього гетерування забезпечила вхід у потрібний для фоторезистивних ІЧ-приймачів діапазон концентрацій електронів та досягнення порогової детектуючої здатності, що підвищило вихід

матеріалу у придатну продукцію.

3. Запропонований спосіб термоакустичної обробки напівпровідників типу  $\text{CdHgTe}$  дозволяє управляти концентрацією точкових дефектів без використання ртутної атмосфери, високих температур та довготривалих процесів термовідпалу.

4. Розроблений метод контролю електрофізичних параметрів напівпровідників "слабкого" р-типу провідності забезпечує надійну відбраковку матеріалу при виготовленні фоторезистивних приймачів; крім цього метод розширює перспективи використання  $\text{CdHgTe}$  "слабкого" р-типу провідності, як конкурентоздатного для виготовлення датчиків слабких магнітних полів.

5. Характеристичні ділянки у магнітопольових залежностях коефіцієнту Холла (точка перегину) і поперечного магнітоопору (насичення  $\Delta\rho/\rho$ ) багатшарових структур на основі напівпровідників типу  $\text{CdHgTe}$  є опорними для розробки методик контролю електрофізичних параметрів носіїв заряду та їх профільної неоднорідності.

6. Встановлення природи формування небажаної електронної компоненти провідності в ізотипних гетеропереходах  $\text{p-CdHgTe/p-CdTe}$  дозволяє підвищити відтвориваність технології вирощування епітаксійних шарів  $\text{CdHgTe}$  та ефективність відбраковки підкладок  $\text{CdTe}$  по спектрах фотолюмінесценції.

7. Методики роздільного визначення електрофізичних параметрів напівпровідників та термоакустичної обробки кристалів телуриду кадмію-ртуті впроваджено на АТ "Чисті метали", як нововведення.

Економічний ефект у 1987 - 1989 роках склав 1120 тис. крб. (\* 224 000).

#### Основні положення, які виносяться на захист

І. У твердих розчинах типу  $\text{CdHgTe}$  реалізуються фізико-технологічні процеси підвищення fotocутливості, які визначаються:

- низькотемпературним відпалом та введенням рекомбінаційних акцепторів при вихідному ступені компенсації матеріалу  $K \geq 0.5$ ;
- акустостимульованою дифузією точкових дефектів у градієнті температури і пружних полів та "заліковуванням" вака-

нсій ртуті;

- очищенням об'єму субзерен малокутовими границями, як гетерами точкових дефектів.

2. Термоакцептори визначають концентраційну залежність рухливості електронів у нелегованому  $n$ - $\text{CdHgTe}$ , а також задають квадратичну залежність рівня шуму типу  $I/f$ ; низькотемпературний хід рухливості електронів визначається непараболічність енергетичного спектру носіїв заряду.

3. Існують критичні концентрації макродефектів різного типу (дислокацій, границь субзерен), вище яких фоточутливість напівпровідникового матеріалу різко падає. Радіус рекомбінаційної активності дислокацій, як стоків нерівноважних носіїв заряду, менше дифузійної довжини матеріалу, а границь субзерен - більше.

4. У напівпровіднику "слабкого"  $p$ -типу провідності реалізується ділянка аналітично простої (квадратичної) магнітопольової залежності коефіцієнту Холла, яка є опорною для одночасного визначення електрофізичних параметрів основних і неосновних носіїв заряду.

5. У багатшарових структурах і однорідних напівпровідниках з кількома сортами носіїв заряду одного знаку мінімум поперечної компоненти тензору електропровідності реалізується лише при умові значної різниці як рухливостей носіїв заряду, так і відповідних компонент провідності.

Апробація роботи. Матеріали дисертації доповідалися та обговорювалися на: II-й і III-й Всесоюзних конференціях "Матеріалознавство халькогенідних і кислородсодержащих полупроводников" (Черновці, 1986, 1991), Всесоюзній нараді "Акустооптические и фотоэлектрические методы исследования полупроводников" (Київ, 1988), The 10th International Conference on Noise in Physical Systems (Budapest, 1989), I-й Республіканській конференції "Фізика і хімія поверхні і границь раздела узкощелевых полупроводников" (Алушта, 1990), Всесоюзному семінарі "Многослойные структуры на основе узкозонных полупроводников" (Нукус, 1990), Міжнародній конференції "Фізика в Україні" (Київ, 1993), II Українській конференції "Матеріалознавство і фізика напівпровідникових фаз змінного складу" (Ніжин, 1993), NATO Advanced Study Institutes "For-

mation and Interaction of Topological Defects" (Cambridge, 1994) and "Photonic Band Gap Materials" (Crete, 1995), VIII науково-технічної конференції "Хімія, фізика і технологія халькогенідів і халькогалогенідів" (Ужгород, 1994), IUMRS International Conference on Electronic Materials (Taiwan, 1994), International Conference "Optical Diagnostics of Materials and Devices for Opto-, Micro- and Quantum Electronics" (Kyiv, 1995), 6th Conference of Surface and Interface Analysis (Montreux, 1995), The Third IUMRS International Conference in Asia (Seoul, 1995).

Публікації по роботі. Основний зміст дисертації викладений у 43 публікаціях (у тому числі 34 статтях, 3 авторських свідоцтвах на винаходи).

Обсяг та структура дисертації. Дисертація викладена на 360 сторінках, включаючи 87 рисунків, 21 таблицю та бібліографів з 336 найменувань. Вона складається з вступу, восьми розділів, заключення, загальних висновків та додатку.

Конкретний внесок автора. У роботі узагальнені результати досліджень, які були виконані автором та співробітниками її наукової групи. Дисертанту належить ініціатива у конкретній постановці задач та виборі напрямків досліджень, безпосередня участь у їх виконанні, провідна роль в обробці та інтерпретації результатів експерименту.

#### ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У першому розділі наведено критичний аналіз стану досліджень основних параметрів твердих розчинів  $\text{CdH}_2\text{Te}$ , як приймачів ІЧ-випромінювання, з урахуванням особливостей фазової діаграми та фізико-технологічних процесів управління дефектною структурою.

Показано, що для реалізації перспективного класу безперервних лінійних фотоприймальних структур, які основані на ефекті витягування носіїв заряду, поряд з вимогою високої однорідності по складу твердого розчину необхідне жорстке обмеження значення рівноважної концентрації носіїв заряду, мінімальний вміст просторових дефектів та, як наслідок цього, висока фоточутливість (ефективність детектування).

Розвиток методів управління точково-дефектною структурою  $\text{CdH}_2\text{Te}$  (термічних, акустичних) потребують адекватного

вивчення механізмів обмеження рухливості та часу життя носіїв заряду в умовах довільного виродження електронного газу, у зв'язку з протиріччям даних по механізмах та параметрах центрів рекомбінації, а також з-за фрагментарності результатів для  $\text{Ca}_2\text{Te}$  з рівноважною концентрацією носіїв заряду, близькою до власної.

Висока електрична активність просторових дефектів у матеріалах типу телуриду кадмій-ртуті обумовлює необхідність визначення критеріїв обмеження параметрів фотоприймачів ростовими макродефектами.

Неоднорідність розподілу домішок, дефектів та компонент твердого розчину в епітаксійних структурах на основі телуриду кадмій-ртуті ускладнює проблему технологічної відтворюваності та оптимізації параметрів таких структур, підвищує вимоги до їх контролю в умовах профільної неоднорідності.

У другому розділі проаналізовані та наведені методи контролю зонних параметрів  $\text{Ca}_2\text{Te}$  (ширина забороненої зони, власна концентрація носіїв заряду), "слабкого" р-типу провідності по концентрації та рухливості електронів і дірок; проаналізовані датчики Холла на основі такого матеріалу.

Порівняльний аналіз ряду фізичних методів оцінки ширини забороненої зони і складу твердого розчину  $\text{Ca}_2\text{Te}$  та базового рентгеноструктурного методу (мікроналізатор "Сомебах") показав, що переважачим фактором підвищення похибки контролю цих параметрів телуриду кадмій-ртуті оптичними і фотоелектричними методами є виродження електронного газу (ефект Бурштейна-Мосса) з підвищенням температури і зниженням складу твердого розчину.

Управління концентрацією вакансій ртуті на рівні  $\Delta n_{\text{H}_2} = 10^{14} \text{ см}^{-3}$  створило передумови стабільного одержання матеріалу "слабкого" р-типу провідності (домірні  $n$ - і  $p$ -компоненти провідності). Згідно з проведеними оцінками, такий матеріал є перспективним для виготовлення датчиків слабких магнітних полів в області абсолютного максимуму коефіцієнту Холла. З іншого боку, для напівпровідників з великим відношенням рухливостей електронів та дірок контроль електрофізичних параметрів в умовах змішаної провідності є досить складним. Для окремого визначення концентрації і рухливості електронів та

дірок у такому матеріалі було розроблено метод, який не потребує вимірювання температурних залежностей кінетичних коефіцієнтів та сильних (квантуваних) магнітних полів. Встановлено, що саме для "слабкого" р-типу провідності реалізується участок простої (квадратичної) магнітопольової залежності коефіцієнту Холла нижче точки інверсії його знаку:

$$R_H = R_H^0 \left[ 1 + \left( 1 - \frac{e n_0 \mu_n}{\sigma} \right)^2 \mu_n^2 B^2 \right]^{-1} \quad (1)$$

$R_H^0$  - значення коефіцієнту Холла у слабкому магнітному полі.

Для невідродженої статистики газу носіїв заряду, що є характерним для напівпровідників із змішаною провідністю, параметри носіїв визначаються рівняннями:

$$\begin{aligned} n_0 &= (e R_H^0)^{-1} (1 + A)^{-1}; & \mu_n &= e R_H^0 (1 + A); \\ p_0 &= n_1^2 / n_0; & \mu_p &= \frac{\sigma}{e p_0} (1 + A^{-1}); & A &= \frac{\sqrt{R_H^0 / R_H} - 1}{\sigma R_H^0 B}. \end{aligned} \quad (2)$$

Використання квадратичної ділянки (1) залежності  $R_H(B)$  дозволило вперше експериментально визначити величину власної концентрації носіїв заряду при робочій температурі фотоприймача (77 К, рис.1). При цьому збереглась тенденція, встановлена авторами [1] - перевищення даних експерименту над розрахунком, яке зростає при зниженні температури. Аналіз причин відхилення експериментальних результатів від розрахунку (обробка поверхні, флуктуації складу) вказав на переважний вплив флуктуацій складу на рівні природної (термодинамічної) неупорядкованості  $\text{Si}_2\text{Te}$ . У цілому, відхилення вимірюного значення  $n_1$  від розрахункового характеризує якість твердого розчину.

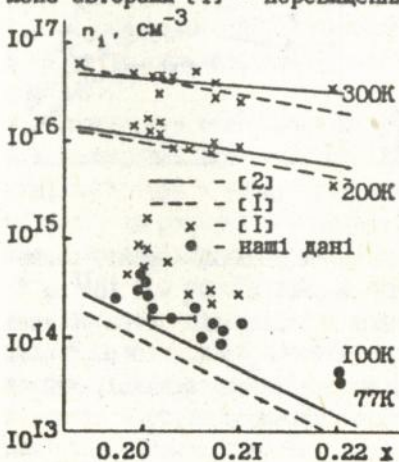


Рис.1

Для кількісної оцінки

електронної компоненти провідності у третьому розділі досліджено кінетичні явища і розраховано температурні, концентраційні та молярні залежності електронної рухливості після легування донорами або компенсації кристалів  $n\text{-CdHgTe}$  акцепторами вакансій ртуті на рівні  $\Delta n_{\text{Hg}} = 10^{14} \text{ см}^{-3}$ .

Розрахунок температурних залежностей холлівської рухливості проведено для двох груп резистивних кристалів  $\text{CdHgTe}$  (рис.2): з різним вмістом вакансій ртуті у залежності від режиму термовідпалення (а) та з різною концентрацією легуючої донорної домішки  $n$  (б). Холлівську рухливість електронів було розраховано для довільного ступеня виродження електронного газу при визначенні операторів зіткнень для  $\text{CdHgTe}$  варіаційним методом рішення рівняння Больцмана [3]. Підгоночними параметрами теорії були потенціал розсіювання  $\Delta\epsilon$  при розрахунках компоненти розсіювання на неоднорідностях сплаву та концентрація іонів домішок - для домішкової компоненти розсіювання. Встановлено, що коефіцієнт  $\gamma$ , який характеризує

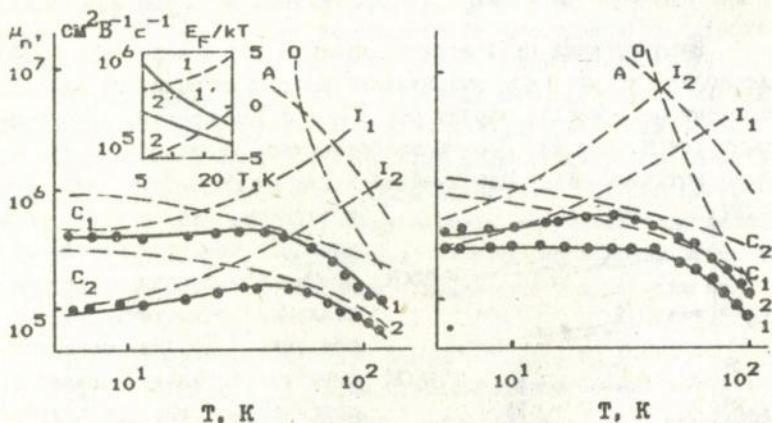


Рис.2. Експериментальні (точки) та теоретичні (криві) температурні залежності  $\mu_n$  кристалів  $\text{CdHgTe}$ : а -  $n_0 = 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$  (1);  $2.4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$  (2), на вставці - відповідні температурні залежності  $\mu_I$  (1,2) та  $E_F$  (1',2'); б -  $n_0 = 4.8 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$  (1),  $8 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$  (2); А - розсіювання на акустичних фононах; О - на оптичних фононах;  $I_1, I_2$  - на іонах домішок;  $C_1, C_2$  - сплавний механізм розсіювання

низькотемпературний хід рухливості електронів ( $\mu_n \sim T^\nu$ ), зростає при введенні акцепторів (вакансій ртуті, рис.2а) та зниженні концентрації донорів (рис.2б). Згідно з проведеним аналізом, головним фактором, який визначає залежність  $\mu_n(\tau)$ , є непараболічність енергетичного спектру носіїв заряду у вузькощілинних напівпровідниках та, як наслідок цього, різка температурна і концентраційна залежність енергії електрону (рівня Фермі, вставка на рис.2а). У той час, як залежність  $\mu_n(n_0)$  визначається вмістом іонів домішок і для реальних кристалів обмежена двозарядними вакансіями ртуті. При цьому слід урахувати також молярну залежність електронної рухливості, флуктуації якої, згідно з проведеними оцінками, досягають 15% (77 K) і 25% - (4.2 K) для рівня природньої (термодинамічної) неупорядкованості твердого розчину  $\Delta x \sim 5 \cdot 10^{-3}$ .

Дані по концентраційній залежності рухливості електронів у  $\text{CdHgTe}$  ( $x \sim 0.2$ ) підтвердили справедливості моделі розсіюючих центрів, яка визначає при 77 K рівень низькочастотного шуму типу  $1/f$ , як альтернативи фононій моделі. Більш того, встановлено, що основне джерело шуму цього типу пов'язане з акцепторами і задовільно апроксимується залежністю  $\alpha \sim n_a^2$  ( $\alpha$  - постійна Хооге).

У четвертому розділі досліджено статистику рекомбінації у вузькощілинному телуридї кадмію-ртуті з контрольованою зміною концентрації одного типу дефектів, зокрема, вакансій ртуті в результаті компенсуючого низькотемпературного відпалу.

Розглянута статистика шоклі-рідівської рекомбінації через двозарядні (вакансії ртуті) та однозарядні (фонові домішки) акцептори в умовах довільної концентрації центрів рекомбінації та ступеня компенсації матеріалу. Розрахунки підтвердили домінування оже-механізму рекомбінації в  $n\text{-CdHgTe}$  ( $x \sim 0.2$ ) при концентраціях електронів, більших за  $10^{15} \text{ см}^{-3}$ . В р-області концентраційна залежність  $\tau$  носить активаційний характер з енергією процесу, яка визначається глибоким акцептором, а для високочутливого  $\text{CdHgTe}$  "слабкого" р-типу провідності переважає рекомбінація через однозарядні рівні акцепторів фонових домішок. Для n-області має місце немонотонна залежність  $\tau(n_0)$ , природу якої розглянемо докладніше.

З урахуванням реальних співвідношень між рекомбінаційними параметрами кристалів  $n\text{-CdHgTe}$  (термічні концентрації  $N_{ca} \gg N_{va}$ ;  $p_0 \ll N_{va}, n_0$ ) загальне вираження для електронного часу життя значно спрощується:

$$\tau_n = \frac{N_a + N_{va}}{C_n n_0 N_a}; \quad (3)$$

звідки слідує, що часом життя нерівноважних електронів (фоточутливістю матеріалу) при фіксованій температурі можна управляти за допомогою двох параметрів: концентраціями рекомбінаційних центрів та електронів. Способів їх варіації може бути декілька в залежності від виду обробки матеріалу. Зміна концентрації донорів з-за малої енергії активації у вузькощілинному  $\text{CdHgTe}$  управляє лише рівноважною концентрацією електронів, внаслідок чого час життя носіїв заряду монотонно росте із зменшенням  $N_d$ . Монотонна залежність  $\tau(n_0)$  має місце і при введенні мілких акцепторів, які не є центрами рекомбінації.

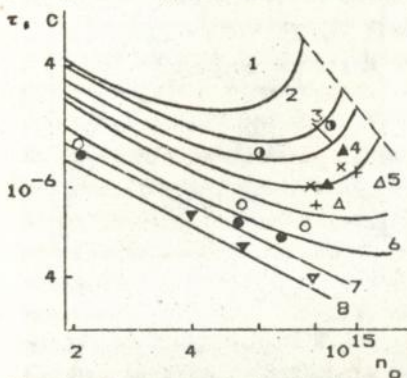
Зміна концентрації глибоких рекомбінаційних акцепторів значно змінює ситуацію (рис.3): в залежності  $\tau(n_0)$  з'являється мінімум. При переході у (3) до однієї змінної (ступінь компенсації) одержуємо:

$$\tau = \frac{C + K}{C_n N_d (1-K)K}; \quad C = \frac{zN_{va}}{N_d}; \quad K = \frac{zN_a}{N_d}. \quad (4)$$

Координати мінімуму визначені для екстремуму функції (4)  $k_{\min} = C \sqrt{1 + 1/C} - 1$  і відповідають  $k \approx 0.5$  у великому діапазоні зміни концентрації донорів. Дослідження двох груп кристалів  $\text{CdHgTe}$ , які відрізняються вихідним ступенем компенсації ( $k < 0.5$  і  $k > 0.5$ ), експериментально підтвердило зростання часу життя фотоносіїв при  $k > 0.5$  та його зниження при  $k < 0.5$  після низькотемпературного відпалу (рис.3, точки). Таким чином, компенсуючий термовідпал може управляти часом життя електронів в обидві сторони, у тому числі підвищувати фоточутливість матеріалу в результаті введення рекомбінаційних акцепторів.

З урахуванням конкуренції двох основних механізмів рекомбінації (Оже та Шоклі-Ріда) проведено аналіз температурних

залежностей часу життя електронів у  $\text{CdHgTe}$  з різним вмістом фонових домішок та вакансій ртуті. Оцінено параметри рекомбінаційних рівнів:



(1) концентрацій по температурі переходу до участка активації  $\tau$ ; (2) переріз захвату електронів по низькотемпературній полці та максимуму залежності  $\tau(T)$ ; (3) енергію активації по участку активації  $\tau$ . Встановлено, що основною причиною розбросу вимірюваної енергії активації рівня рекомбінації є похибка її визначення, пов'язана, по-перше, з впливом оже-компоненти рекомбінації 1, по-друге, з високим вмістом рекомбінаційних центрів.

Рис.3. Експеримент (точки) 1 розрахунок (1-8)  $\tau(n_0)$  для  $n_0$ ,  $10^{-14} \text{ см}^{-3}$ : 1-5, 2-10, 3-15, 4-20, 5-25, 6-30, 7-40, 8-100. Пунктир-оже-компонента рекомбінації

Одержані результати по концентраційних та температурних залежностях часу життя нерівноважних носіїв заряду підтвердили справедливність моделі рекомбінаційного акцептора для  $n\text{-CdHgTe}$ , як альтернативи досить поширеній моделі рекомбінаційного глибокого донора.

У п'ятому розділі приведено комплексні експериментальні та теоретичні результати досліджень рекомбінаційних та електрофізичних характеристик телуриду кадмій-ртуті у залежності від вмісту типових ростових просторових дефектів: малокутових границь та дислокацій.

**МАЛОКУТОВІ ГРАНИЦІ.** Досліджено пластини  $\text{CdHgTe}$  складу  $x = 0.2 - 0.22$ , для яких вимірювана концентрація електронів дорівнює (1-7)  $\cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ , лінійна густина малокутових границь змінюється від  $n_{\text{sb}} = 5 \text{ см}^{-1}$  до  $300 \text{ см}^{-1}$ . При цьому було вивчено кристали  $\text{CdHgTe}$ , вирізані з однієї пластини, в якій концентрація малокутових границь змінювалася в діапазоні  $n_{\text{sb}} = 5 - 100 \text{ см}^{-1}$ . При дослідженні рекомбінаційних процесів вимірювались також спеціально відібрані пластини з  $n_{\text{sb}} = 200 - 300 \text{ см}^{-1}$ .

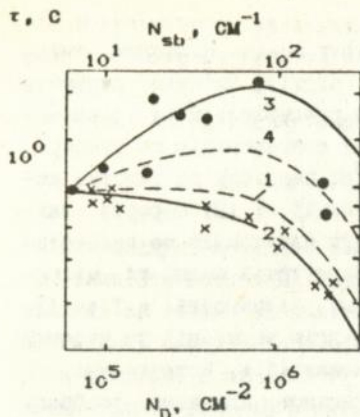


Рис.4. Залежність  $\tau$  від  $N_{sb}$  (●)  $N_D$  (×) при 77К; 1,2 - відповідні розрахунки; 3,4-розрахунок  $\tau$  з урахуванням зниження  $n_a$

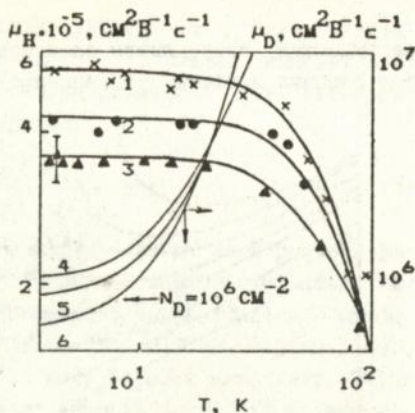


Рис.5. Температурні залежності  $\mu_H$  (1-3) і  $\mu_D$  (4-6) для  $N_D$ : 1-8.  $10^4 \text{ cm}^{-2}$ , 2-3.  $10^5$ , 3- $10^6$ ;  $n_a \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ ; 4-5, 5-10, 6-25

В рамках полікристалічної моделі оцінено параметри малокутових границь. При цьому в некомпенсованих кристалах зміна електрофізичних параметрів з ростом  $N_{sb}$  відповідає моделі з високоомними границями субзерен, а для компенсованих кристалів "працює" полікристалічна модель з провідними границями.

Вимірюваний час життя для некомпенсованих кристалів змінюється слабо при  $N_{sb} = 5 - 100 \text{ cm}^{-1}$ . Для компенсованих кристалів  $\tau$  зростає з підвищенням концентрації границь субзерен до  $100 \text{ cm}^{-1}$  (рис.4) наймовірніше внаслідок гетеруючої дії границі субзерна у процесі стехіометризуючого відпалу. Об'ємний характер зростання часу життя підтвердили залежності  $\tau(T)$ . При більших концентраціях малокутових границь ( $200 - 300 \text{ cm}^{-1}$ )  $\tau$  спадає незалежно від значення рівноважної концентрації електронів.

ДИСЛОКАЦІЇ. Для одержання зразків з різною концентрацією ростових дислокацій ( $N_D$ ) досліджені пластини  $\text{Sn}_2\text{Te}$  було спеціально оброблено. Неоднорідність розподілу дислокацій від  $N_D > 10^5 \text{ cm}^{-2}$  до  $N_D < 10^6 \text{ cm}^{-2}$  досягалася шляхом відпалу пластин в насиченій парі ртуті у градієнті температур 880 -

890 К, тобто в умовах, при яких має місце переповерхання дислокація. Потім проводилася низькотемпературна стехіометризу-ча обробка для одержання матеріалу  $n$ -типу провідності.

Електропровідність та коефіцієнт Холла кристалів  $\text{CdHgTe}$  з різним вмістом ростових дислокацій практично не змінюється при температурі рідкого азоту з підвищенням  $n_D$  до  $2 \cdot 10^6 \text{ см}^{-2}$ . При цьому коефіцієнт Холла не залежить від температури та концентрації дислокацій. Отже, після високотемпературного відпалу у градієнті температури та низькотемпературного стехіометризуючого відпалу домішкові та власні дефекти достатньо рівномірно розподілені в обробленій пластині незалежно від вмісту дислокацій. І тільки при  $T < 50 \text{ К}$  зростання концентрації дислокацій більше, ніж на порядок, призводить до зниження рухливості у 1.5 рази (рис.5). Розрахунок  $\mu_n(T)$  проведено з урахуванням розсіювання на заряджених дислокаціях [4] (рис.5, суцільні криві), що узгоджується з експериментальними даними для двократно зарядженого оборваного зв'язку дислокації. Розрахункова залежність сумарної рухливості носіїв у  $\text{CdHgTe}$  від кута  $\theta$  між направленням дислокацій і струму виявила, що найбільша зміна рухливості при перпендикулярному направленні струму до осі дислокаційної трубки не перевищує двократного зниження  $\mu_n$ .

Ростові дислокації обмежують час життя нерівноважних носіїв заряду з різким падінням fotocутливості при  $n_D \sim 8 \cdot 10^5 \text{ см}^{-1}$  (рис.4), що підтверджено також температурним ходом  $\tau$  як в області домішкової рекомбінації, так і оже-гасіння.

Для кількісної оцінки рекомбінаційної активності макродефектів була використана математична модель, яка враховує поряд з міжзонним та домішковим механізмами рекомбінації обмеження  $\tau$  просторовими дефектами, як стоками фотоносіїв [5]. Різниця між рекомбінаційними параметрами об'єму кристалів та геометричної границі макродефекту створює дифузійний потік нерівноважних носіїв заряду (ННЗ), який характеризується швидкістю поверхневої рекомбінації на границі "дефект-матриця". Рішення відповідних рівнянь неперервності описує спад ННЗ за допомогою модифікованих функцій Бесселя  $K_0(x)$  і  $I_0(x)$  для циліндричної поверхні рекомбінації.

З розглянутих моделей рекомбінаційно-активних макродефе-

ктів виходить розмірний ефект - залежність характеристичної довжини спаду ННЗ  $L^*$  від конфігурації та розміру дефекту  $r_c$  (рис.6). Встановлено, що  $L^* < L$  ( $L$  - дифузійна довжина ННЗ) для дефектів з випуклою поверхнею (сферичні вклучення, дислокаційні трубки), у той же час  $L^* > L$  для дефектів з вогнутою поверхнею (граничі субзерен).

З урахуванням теоретичних та експериментальних концентраційних залежностей  $\tau$  (рис.4) визначені радіус рекомбінаційної активності ростових дислокацій у  $\text{CdHgTe}$  ( $r_c \sim 0.4$  мкм) і швидкість поверхневої рекомбінації на границі "дефект-матриця" ( $\approx 10^5$  см/с). Критичні концентрації дислокацій, які характеризують якість  $n\text{-CdHgTe}$  по  $\tau$ , відповідають міждислокаційній відстані  $R = L^* =$



Рис.6

$0.2L$ , що підтверджує рекомбінаційно-розмірний ефект.

У шостому розділі досліджено механізми акустичної модифікації точково-дефектної структури кристалів телуриду кадмій-ртуті, які відрізняються вихідною концентрацією вакансій ртуті.

Попередні результати акустичної обробки  $\text{CdHgTe}$  були одержані для зразків з різною, часто не фіксованою, структурою точкових та просторових дефектів і не відповідали на основне питання: яким чином та за рахунок яких дефектів відбуваються такі зміни? Рішення цієї проблеми важливе при відпрацюванні керованої методики оптимізації параметрів телуриду кадмій-ртуті у результаті термоакустичної обробки, як альтернативи довготривалому низькотемпературному відпалу. Для цього були відібрані кристали  $\text{CdHgTe}$  з різною вихідною концентрацією вакансій ртуті. Залежності нормованих по 4-5 зразках відносних значень концентрації та рухливості електронів від інтенсивності ультразвукової обробки наведено на рис.7. Для некомпенсованих кристалів (I) концентрація електронів з ростом енергії ультразвуку практично не змінюється, рухливість зростає, проходить

через максимум і потім спадає. Для компенсованих кристалів (з великим вихідним вмістом вакансій ртуті) характерні немонотонні, з максимумом, залежності концентрації та рухливості електронів (2).

Експериментальні температурні залежності електронної рухливості та їх розрахунок варіаційним методом свідчать про зниження концентрації донорів та акцепторів на ділянці зростання  $\mu_n$  в результаті акустичної обробки. А при інтенсивностях ультразвуку, які знижують рухливість, окрім збільшення концентрації іонів домішок має місце зростання розсіювального потенціалу для сплавного механізму розсіювання внаслідок росту мікрофлуктуацій компонент твердого розчину.

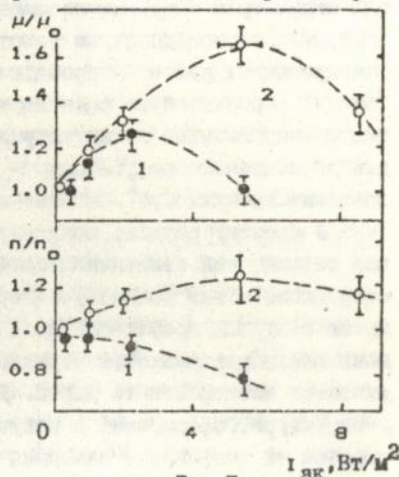


Рис. 7

Концентраційні залежності часу життя електронів після термоакустичної обробки відрізняються від результатів низькотемпературного компенсуючого відпалу: якщо в останньому випадку  $\tau(n_0)$  змінюється практично по ізоконцентраційних (відносно донорів) лініях (рис.3), то термоакустична обробка супроводжується як зниженням, так і підвищенням концентрації донорів.

Для інтерпретації результатів термоакустичної обробки використано механізм взаємодії ультразвукової хвилі з дислокаційними стінками границь субзерен [7]. Обробка ультразвуком призводить до локального нагріву по периметру субзерен (тому обробка була названа термоакустичною). Результатом цього найвірогідніше є акустостимульована дифузія домішок та надлишкових компонент твердого розчину з області просторового дефекту в об'єм субзерен та відповідна зміна параметрів напівпровідника. Динаміка зміни абсолютних величин і температурного ходу рухливості та концентрації електронів, а також концентрації центрів розсіювання дозволила зробити вис-

новок про те, що основними процесами є генерація та "залікування" вакансій ртуті в залежності від інтенсивності термомеханічного впливу та вихідної концентрації вакансій.

Підсумовуючи результати фізико-технологічної оптимізації параметрів  $\text{CdHgTe}$  шляхом введення вакансій ртуті (розділи 3, 4), термовідпалу за участі процесу гетерування дефектів границями субзерен (розділ 5) і, насамкінець, термоакустичної обробки, було оцінено динаміку порогових характеристик фотоприймачів (детектуючу здібність  $D^*$ ). Встановлено, що для дослідженого  $\text{CdHgTe}$  при  $n_0 \leq 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$  реалізуються значення граничної  $D^*$ , обмеженої фоном при 300 К.

У цьому розділі розглянуто особливості магнітопольових залежностей кінетичних коефіцієнтів (поперечний магнітоопір, коефіцієнт Холла) у багатошарових структурах  $\text{CdHgTe}$  з метою контролю профільної неоднорідності, зокрема, епітаксійних напівпровідникових структур з великим відношенням рухливостей електронів та дірок. Досліджено також модельні  $n-p$ -структури, сформовані в результаті термічної, механічної обробки та імпульсним лазерним випромінюванням.

В  $n-p-n$ -структурах на основі кристалів  $\text{CdHgTe}$  ( $\alpha = 0.22$ ) має місце немонотонний (з точкою перегину) спад коефіцієнту Холла від'ємного знаку. Аналогічна залежність характерна для кристалів  $p\text{-CdHgTe}$  з великою товщиною порушеного шару (рис.8), видалення якого призводить до зростання коефіцієнта Холла з класичною залежністю  $R_H(B)$  в однорідному матеріалі. Для епітаксійних шарів  $p\text{-CdHgTe}$  з приповерхневим  $n$ -шаром конденсату аномальної залежності  $R_H(B)$  не було виявлено.

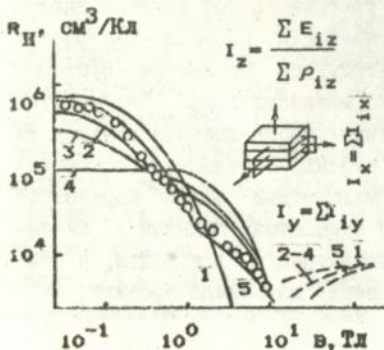


Рис.8. Залежність  $R_H(B)$  для  $n-p$ -структури при відносній товщині  $n$ -шару  $d_1/d = 0.1$  ( $n_1 = 4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$  ( $1-\mu_{n1} = 10^3 \text{ см}^2/\text{В.с.}$ ,  $2-5 \cdot 10^3$ ,  $3-10^4$ ,  $4-5 \cdot 10^5$ );  $5-n_1 = 10^{15}$ ,  $\mu_{n1} = 10^3 \text{ см}^2/\text{В.с.}$  Параметри  $p$ -шару:  $p_0 = 1.4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ,  $\mu_p = 150 \text{ см}^2/\text{В.с.}$ ,  $n_2 = 4.6 \cdot 10^{12}$ ,  $\mu_{n2} = 1.3 \cdot 10^5$

Теоретичний аналіз умов формування точки перегину проведено з використанням моделі паралельного електричного з'єднання для компонент провідності носіїв різного сорту в структурах з профільною неоднорідністю (рис.8, вставка).

Результати розрахунку  $R_H$  для двшарової  $n-p$ -структури (рис.8) підтвердили існування точки перегину, але не для якого набору параметрів. Аналіз компонент тензору електропровідності засвідчив, що точка перегину у залежності  $R_H(B)$  має місце лише при наявності мінімуму у магнітопольовій залежності  $\sigma_{xy}$ , тобто при розділенні областей "замагнічування" різного сорту носіїв заряду, що має місце при співвідношенні параметрів двшарової структури:  $\mu_p \ll \mu_{n1} \ll \mu_{n2}$  та  $n_1 d_1 \approx n_2 d_2^* (\mu_{n2} B)^{-2}$  ( $\sigma_1 < \sigma_2$ ). Ці умови виконуються для досліджених  $n-p$ -структур з порушеним шаром і не виконуються для епітаксійних структур. Дійсно, компонента, пов'язана з високопровідними електронами, для проявлення у залежностях  $R_H(B)$  повинна переважати над компонентою провідності менш рухливих електронів (рис.8). Умови формування мінімуму  $\sigma_{xy}$  можуть бути використані також для дослідження процесів переносу в напівпровідниках за участю легких та важких носіїв заряду (локалізація носіїв, провідність по домішквовій зоні).

Польові залежності поперечного магнітоопору  $n-p$ -структур носять ступінчастий характер. Области насичення залежать від співвідношення компонент провідності носіїв різного сорту і являються характеристичними для роздільного контролю електрофізичних параметрів кількох сортів носіїв заряду. При цьому для  $T = 77$  K і класично сильних магнітних полів фактор, пов'язаний з різницею рухливостей носіїв різного сорту, значно сильніше впливає на величину  $R_H$  та  $\Delta\rho/\rho$  ніж поправки, які пов'язані з неупорядкованістю твердого розчину або непараболічністю енергетичного спектру носіїв заряду.

Модифікація точково-дефектної структури високопровідного приповерхневого  $n$ -шару (конденсат) в епітаксійних плівках  $p-SiMnTe$  шляхом обробки сильнопоглинаючим лазерним випромінюванням при допорогових дозах опромінення ( $0.1$  Дж/см<sup>2</sup>) аналогічна зняттю цього шару методом хімічного травлення. При збільшенні дози опромінення до  $2.4$  Дж/см<sup>2</sup> формується двшарова  $p^+-p$ -структура. При цьому знакопостійна магнітопо-

льова залежність коефіцієнту Холла має точку перегину на ділянці зростання  $\mu_n(B)$  додатного знаку, що пов'язане з "замагнічуванням" високо рухливої електронної компоненти у р-шарі.

Восьмий розділ присвячений дослідженням впливу профільної неоднорідності розподілу структурних та фізичних характеристик гетеропереходів  $p\text{-CdHgTe}/p\text{-CdTe}\langle\text{Se,Zn}\rangle$  на технологічну стабільність параметрів епітаксійних шарів  $\text{CdHgTe}$ .

Досліджено епітаксійні шари  $\text{CdHgTe}$  ( $x \sim 0.2$ ) р- та небажаної змішаної провідності, вирощені на підкладках  $\text{CdTe}$ , "чистих" та з 4% компонент  $\text{Se}$  або  $\text{Zn}$ . Епітаксійні шари товщиною 25-30 мкм були вирощені методом рідиннофазної епітаксії в замкнутому об'ємі із збагачених телуrom розчинів-розплавів на В-поверхні (III) підкладок  $\text{CdTe}$  (виготовлено на АТ "Чисті метали").

Епітаксійні шари змішаного типу провідності відрізняються більшим вмістом дислокацій, включень телура, а також комірковою структурою перехідного шару порівняно з епішарами р-типу, які містять лише сітку дислокацій невідповідності в області металургійної границі. Окрім цього плівки змішаного типу провідності неоднорідні по товщині і містять закорочувачий високопровідний n-шар, який прилягає до перехідної вартзонної області.

В спектрах фотолумінесценції підкладок  $\text{CdTe}$  зареєстрована донорно-акцепторна смуга з  $\lambda_m = 875$  нм, інтенсивність якої різко підвищується із зростанням електронної компоненти провідності в епітаксійному шарі (відповідно в підкладці) і в даному технологічному просторі є характеристикою структурної досконалості  $\text{CdTe}$ . Природа донорів пов'язана з відхиленням від стехіометрії переважно внаслідок формування преципітатів  $\text{Te}$  і відповідного зниження телурової компоненти.

В ізотипних гетероструктурах  $p\text{-CdHgTe}/p\text{-CdTe}$  у вузькій області максимального градієнту складу твердого розчину, яка прилягає до металургійної границі, формується потенційний бар'єр. Висота бар'єру (до 0.5 eV) істотно залежить від вмісту макродефектів структури: при підвищенні їх концентрації, коли знижується опір перехідного шару, потенційний бар'єр невисокий або відсутній.

Таким чином, відтворваність параметрів гетероструктур на основі  $\text{Cd}_{1-x}\text{Te}$  визначається, головним чином, вмістом та розподілом просторових дефектів та контролюється у даному технологічному просторі (1) інтенсивністю донорно-акцепторної смуги фотолумінесценції підкладки  $\text{CdTe}$ , (2) висотом потенційного бар'єру у перехідному шарі та (3) вмістом електронної компоненти провідності в епітаксіальному шарі.

## О С Н О В Н І В И С Н О В К И

Пошук та обґрунтування фізико-технологічних процесів оптимізації параметрів  $\text{Cd}_{1-x}\text{Te}$  дозволили виявити нові способи підвищення фоточутливості цього матеріалу, встановити механізми і виробити фізичні критерії обмеження параметрів ІЧ-фотоприймачів на основі кристалів та гетероструктур  $\text{Cd}_{1-x}\text{Te}$  з нестехіометричними точковими і просторовими дефектами:

1. Управління рівноважком електронною концентрацією  $n$   $\text{Cd}_{1-x}\text{Te}$  шляхом зміни вмісту рекомбінаційних акцепторів (вакансій ртуті) призводить до немонотонної (з мінімумом для ступеня компенсації  $K \sim 0.5$ ) концентраційної залежності часу життя нерівноважних носіїв заряду та підвищення фоточутливості при  $K > 0.5$ . Компенсація вакансіями  $n_0$  дозволяє досягти порогової ефективності детектування, обмеженої фоном при 300 К.

2. Термоакустична обробка телуриду кадмію-ртуті знижує концентрацію вакансій ртуті в результаті стимульованої ультразвуком дифузії точкових дефектів у градієнті температури і пружних полів. Рівень "очищення" матеріалу залежить від інтенсивності акустичного впливу на границі субзерен та вихідної концентрації вакансій.

3. Вироблено кількісні критерії обмеження рухливості електронів  $\text{Cd}_{1-x}\text{Te}$  в результаті низькотемпературного компенсаційного відпалу з урахуванням довільного виродження електронного газу при розв'язанні рівняння Больцмана варіаційним методом. Непараболічність енергетичного спектру носіїв заряду у вузькозонних напівпровідниках і, як наслідок цього, різка температурна та концентраційна залежність енергії електронів задають низькотемпературний хід рухливості. А на концентраційну залежність рухливості електронів та рівень шуму

типу I/т суттєво впливають термоакцептори (вакансії ртуті).

4. Розроблені, розраховані та експериментально підтверджені моделі, рекомбінації та розсіювання електронів границями субзерен і дислокаціями в  $\text{CdHgTe}$ :

- Встановлено, що границі субзерен високоомні в некомпенсованих кристалах  $\text{CdHgTe}$  і низькоомні - в компенсованому матеріалі. Вони підвищують fotocутливість  $\text{CdHgTe}$  при  $n_{\text{ab}} < 100 \text{ см}^{-1}$ , виступаючи як гетери точкових дефектів.

- Дислокації однозначно знижують час життя нерівноважних носіїв заряду з різким падінням fotocутливості при  $n_D > 8 \cdot 10^5 \text{ см}^{-2}$ . Дислокаційна компонента розсіювання знижує рухливість електронів лише в області температур  $T < 50 \text{ K}$ .

5. Обмеження часу життя нерівноважних носіїв заряду просторовими дефектами визначається як їх концентрацією, так і радіусом рекомбінаційної активності. При цьому радіус дії макродефекта ( $L^*$ ) як стока нерівноважних носіїв заряду залежить від його конфігурації та розміру: для дефектів з випуклою поверхнею рекомбінації (дислокаційні трубки, сферичні вклучення)  $L^* < L$ , а для дефектів з вогнутою поверхнею (границі субзерен)  $L^* > L$ .

6. У напівпровідниках із змішаною провідністю з урахуванням аналітично простої (квадратичної) магнітопольової залежності коефіцієнта Холла визначені електрофізичні параметри основних та неосновних носіїв заряду, а також власна концентрація носіїв  $n_i$ . При цьому відхилення експериментально виміряного значення  $n_i$  від розрахункового визначається переважно флуктуаціями складу і характеризує якість твердого розчину.

7. Обґрунтовано доцільність використання твердих розчинів телуриду кадмій-ртуті, завдяки високій рухливості електронів та великому значенню відношення рухливостей носіїв заряду ( $\mu_n/\mu_p > 10^2$ ), для розробки датчиків слабких магнітних полів. Показано, що чутливість в екстремумі концентраційної залежності коефіцієнта Холла суттєво перевищує магніточутливість датчиків на основі сполук  $\text{A}^3\text{B}^5$ .

8. У багатшарових структурах та однорідних напівпровідниках з кількома сортами носіїв заряду одного знаку мінімум поперечної компоненти тензора електропровідності формується

лише при умові значної різниці як рухливостей, так і відповідних компонент провідності носіїв. При цьому в знакопостійній магнітопольовій залежності коефіцієнта Холла формується характерна область з точкою перегину, яка розділяє участки "замагнічування" носіїв різного сорту.

9. Встановлена кореляція між розподілом просторових дефектів, типом провідності епітаксійних шарів  $\text{Cd}_{1-x}\text{Hg}_x\text{Te}$ , інтенсивністю спектрів фотолумінесценції підкладок  $\text{CdTe}$  та величиною потенційного бар'єру на границі  $\text{Cd}_{1-x}\text{Hg}_x\text{Te}-\text{CdTe}$ . Показано, що основною причиною технологічної нестабільності ізотипних гетеропереходів  $p\text{-Cd}_{1-x}\text{Hg}_x\text{Te}-p\text{-CdTe}$  є макродефекти, які формують небажану електронну компоненту провідності.

10. Потенційний бар'єр в ізотипних гетеропереходах  $p\text{-Cd}_{1-x}\text{Hg}_x\text{Te}/p\text{-CdTe}$  формується у вузькій області максимального градієнту складу твердого розчину, яка прилягає до металургійної границі. Висота бар'єру суттєво залежить від вмісту просторових дефектів; при підвищеній концентрації макродефектів, які знижують опір перехідного шару, потенційний бар'єр відсутній.

#### ОСНОВНИ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ ОПУБЛІКОВАНІ У РОБОТАХ:

1. Карачевцева Л.А., Либченко А.В., Хижняк В.И. Определение параметров носителей заряда в полупроводниках с большим отношением подвижностей методом импульсного эффекта Холла // Физическая электроника. - 1987. - Вып.35. - С.122-127.
2. Елизаров А.И., Карачевцева Л.А., Лукинский Ю.Л. Определение собственной концентрации носителей заряда в твердых растворах  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  // Вопросы оборон. техники. - 1987. - Сер. II, н 4. - С. II-19.
3. Лукинский Ю.Л., Карачевцева Л.А., Рябиков В.М. Определение зависимости ширины запрещенной зоны от состава  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ . - Вопросы оборон. техники. - 1988. - Сер. II, н 4. - С. I7-19.
4. Карачевцева Л.А., Либченко А.В., Лукинский Ю.Л. Рекомбинация через компенсированные акцепторные состояния в кристаллах  $\text{Cd}_{1-x}\text{Hg}_x\text{Te}$  p-типа в области смешанной проводимости // Вопросы оборон. техники. - 1988. - Сер. II, н 4. - С. 20-23.
5. Бакши И.С., Гринь В.Ф., Карачевцева Л.А. и др. Влияние дефектов структуры на интенсивность  $1/f$  шума в  $n\text{-Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$

- // Физика и техника полупроводн.- 1989.- Т.23, н 3.- С. 571-573.
6. Горлей П.Н., Демина И.К., Карачевцева Л.А. и др. Низкотемпературная зависимость подвижности электронов в кристаллах  $Cd_xHg_{1-x}Te$  // Укр. физ. журн.- 1989.- Т.34, н 12.- С.1861-1865.
  7. Ергаков В.К., Карачевцева Л.А., Курбанов К.Р., Любченко А.В. Влияние компенсирующего низкотемпературного отжига на время жизни электронов в  $n-Cd_{0.2}Hg_{0.8}Te$  // Вопросы оборон. техники.- 1989. - Сер. II, н 2.- С.24-29.
  8. Ергаков В.К., Карачевцева Л.А., Курбанов К.Р., Любченко А.В. Влияние компенсирующего низкотемпературного отжига на электрофизические параметры  $n-Cd_{0.2}Hg_{0.8}Te$  // Вопросы оборон. техники.- 1989.- Сер. II, н 3.- С.23-26.
  9. Карачевцева Л.А., Любченко А.В., Мысливец К.А., Олих Я.М. Особенности акустического воздействия на кристаллы  $CdHgTe$  с разным содержанием собственных акцепторов // Укр. физ. журн.- 1990.- Т.35, н 3.- С.468-472.
  10. Друзь Б.Л., Карачевцева Л.А., Лукьяненко В.И. и др. Дефекты структуры и электрофизические свойства гетероэпитаксиальных пленок  $Cd_xHg_{1-x}Te$ , выращенных из газовой фазы в изотермических условиях // Неорганические материалы.- 1990.- Т.26, н 3.- С. 433-434.
  11. Горлей П.Н., Карачевцева Л.А., Кушнир Н.Я. и др. Влияние акустического воздействия на точечно-дефектную структуру  $n-Cd_xHg_{1-x}Te$  // Электрон. техника, сер. Материалы.- 1990.- Вып. 8/253/ДСП.- С.32-34.
  12. Bakshee I.S., Karachevtseva L.A., Lyubchenko A.V. et al. Superposition of Burst Noises as the Origin of 1/f Noise due to Grain Boundaries in  $Cd_xHg_{1-x}Te$  // Phys. Stat. Sol. (a).- 1990.- V.117, N 1.- P.К37-К39.
  13. Григорьев Н.Н., Карачевцева Л.А., Курбанов К.Р. Влияние ростовых дислокаций на время жизни электронов в  $n-CdHgTe$  // Физика и техника полупроводн.- 1991.- Т.25, н 3.- С. 464-466.
  14. Григорьев Н.Н., Ергаков В.К., Карачевцева Л.А. и др. Электронное время жизни в кристаллах  $Cd_xHg_{1-x}Te$  с разной плотностью малоугловых границ // Физика и техника полупроводн.- 1991.- Т.25, н 9.- С. 1649-1652.

15. Бакши И.С., Карачевцева Л.А., Любченко А.В. и др. Влияние компенсирующего отжига на  $1/f$  шум в  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  // Физика и техника полупроводн.- 1992.- Т.26, н 1.- С.173-176.
16. Карачевцева Л.А., Любченко А.В., Маловичко Э.А. Особенности магнитопольевых зависимостей кинетических коэффициентов в двухслойных структурах  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  // Физика и техника полупроводн.- 1992.- Т.26, н 3.- С.535-538.
17. Карачевцева Л.А., Любченко А.В. К вопросу о собственной концентрации носителей заряда в твердых растворах  $\text{CdHgTe}$  // Физика и техника полупроводн. - 1992.- Т.26, н 7.- С.1342-1346.
18. Демина И.К., Ергаков В.К., Карачевцева Л.А. и др. К вопросу об электрической активности малоугловых границ в твердых растворах  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  // Оптоэлектроника и полупроводн. техника.- 1992.- Вып.22.- С.40-43.
19. Карачевцева Л.А., Любченко А.В. Энергия активации рекомбинационных центров в компенсированных кристаллах  $\text{CdHgTe}$  // Оптоэлектроника и полупроводн. техника.-1992.-Вып.22.- С.43-46.
20. Карачевцева Л.А., Любченко А.В., Соболев В.Д. Гальваномагнитные эффекты в многослойных структурах  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  со смешанной проводимостью // Укр. физ. журн.- 1992.- Т.37, н 6.- С.924-929.
21. Гнатюк В.А., Карачевцева Л.А., Мозоль П.Е. Влияние импульсного лазерного облучения на точечно-дефектную структуру пленок  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  // Оптоэлектроника и полупроводн. техника.- 1992.- Вып.23.- С.53-56.
22. Карачевцева Л.А., Любченко А.В., Соболев В.Д. Рекомбинация через акцепторные состояния в компенсированных кристаллах  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  // Укр. физ. журн. - 1993.- Т.38, н 7.- С.1071-1075.
23. Горлей П.Н., Карачевцева Л.А., Кушнир Н.Я. и др. Влияние ростовых дислокаций на величину холловской подвижности в  $n\text{-Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  // Укр. физ. журн.- С.1076-1080.
24. Карачевцева Л.А., Ергаков В.К., Курбанов К.Р. Влияние компенсации собственными акцепторами на время жизни в твердых растворах  $n\text{-Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  // Оптоэлектроника и полупроводн. техника.- 1993.- Вып.26.- С.52-56.

25. Карачевцева Л.А., Маловичко Э.А., Нужная Т.П. и др. Структурно-морфологические особенности эпитаксиальных слоев  $Cd_xHg_{1-x}Te$  p- и смешанного типов проводимости // Оптоэлектроника и полупроводн. техника.- 1995.- Вып.29.- С.14-18.
26. Карачевцева Л.А., Любченко А.В., Вирт И.П., Елизаров А.И. Особенности магнитопольевых зависимостей коэффициента Холла в сэндвич-структурах  $Cd_xHg_{1-x}Te$  // Матер.Всес.семинара: Многослойные структуры на основе узкозонных полупроводников.- Нукус, 1990.- С.65-67.
27. Bakshee I.S., Grin V.F., Karachevtseva L.A. et.al. Influence of Defect Concentration on 1/f Noise in n- $Cd_xHg_{1-x}Te$  // Mat. of 10th International Conference on Noise in Physical Systems - Budapest.- 1989.- P.239-241.
28. Карачевцева Л.А., Любченко А.В., Мысливец К.А., Олих Я.М. Акустостимулированные изменения электрофизических параметров кристаллов  $n-Cd_xHg_{1-x}Te$  // Сб."Акустоэлектрические и фотоакустические методы исследования полупроводников".- Киев.-1989.- С.89-92.
29. Lyubchenko A.V., Karachevtseva L.A. Electron Lifetime and Macrodefects in Semiconductor Alloy Systems.- Solid State Physics: Proc. Contributed Papers of Intern. Conf. "Physics in Ukraine".- Kyiv.- 1993.- P. 127-128.
30. Карачевцева Л.А., Любченко А.В., Меринов В.Н., Соболев В.Д. Потенциальный барьер в переходном слое гетероструктур  $Cd_xHg_{1-x}Te/CdTe$ .- Матер.ІІ Української конф.: Матеріалознавство і фізика напівпровідникових фаз змінного складу.- Ніжин, 1993.- Ч.І, с.35-37.
31. Карачевцева Л.А., Кладько В.П., Маловичко Э.А., Нужная Т.П. Структурно-морфологические особенности эпитаксиальных слоев  $Cd_xHg_{1-x}Te$  p- и смешанного типов проводимости.- Матер.ІІ Української конф.: Матеріалознавство і фізика напівпровідникових фаз змінного складу.- Ніжин, 1993.- Ч.І, с.140-142.
32. Karachevtseva L.A., Lyubchenko A.V., Sobolev V.D. Potential Barrier Formation in  $HgCdTe/CdTe$  Heterojunctions.- Proc. IUMRS Int.Conf. on Electronic Materials (D).-Taiwan, 1994.-P.125-131.
33. Karachevtseva L.A., Lyubchenko A.V., Hiliiova N.S. Struc-

- tural Morphology Features and Photoluminescence Spectroscopy of IR-Photosensitive CdHgTe/CdTe.- Proc. Int.Conf.: Optical Diagnostics for Opto-, Micro- and Quantum Electronics.- Kiev, 1995.- P.316-319.
34. Karachevtseva L.A., Lyubchenko A.V. Thermostimulate Optimization of CdHgTe IR-photodetector Parameters.- Ibid.- P.702-710.
  35. А.с. н I554679 (СССР). МКИ<sup>4</sup> н о 1 L 2I/463. Способ контроля электрофизических параметров полупроводников / Л.А. Карачевцева, А.В.Любченко, Е.А.Сальков и др.- Зарег. 02.II.87 г.
  36. А.с. н I556436 (СССР), МКИ<sup>4</sup> н о 1 L 2I/463. Способ управления электрофизическими параметрами полупроводниковых соединений типа  $A^2B^5$  / Л.А.Карачевцева, А.В.Любченко, Я.М.Олих и др.- Зарег. 29.07.88 г.
  37. А.с. н I723962 (СССР). МКИ<sup>4</sup> н о 1 L 3I/0296. Способ получения полупроводникового материала  $n-Cd_xHg_{1-x}Te$  / Л.А.Карачевцева, А.В.Любченко, Э.А.Маловичко.-Зарег.07.08.89 г.
  38. Карачевцева Л.А., Любченко А.В., Ергачов В.К. и др. Время жизни электронов в  $Cd_xHg_{1-x}Te$  с различной плотностью малоугловых границ // Сб. "Физика и химия поверхности и границ раздела узкощелевых полупроводников".-1990.- С.25-26.
  39. Карачевцева Л.А., Любченко А.В., Маловичко Э.А. Магнитополевые зависимости кинетических коэффициентов в многослойных  $n-p$ -структурах  $Cd_xHg_{1-x}Te$  // Матер. III Всес. конференции: Материаловедение халькогенидных полупроводников.- Черновцы, 1991.- Ч.II.- С.28.
  40. Карачевцева Л.А., Кушнир Н.Я., Горлей П.Н., Скичко А.И. Ростовые дислокации и подвижность в  $n-Cd_xHg_{1-x}Te$  // Матер. III Всес. конференции: Материаловедение халькогенидных полупроводников.- Черновцы, 1991.- Ч.II.- С.31.
  41. Карачевцева Л.А., Любченко А.В., Маловичко Э.А. Структурно-морфологические особенности и потенциальный барьер в изотипных гетеропереходах  $CdHgTe/CdTe$ .- Матер. VIII научно-технической конференции: Химия и технология халькогенидов и халькогалогенидов.- Ужгород, 1994.- С.56.
  42. Karachevtseva L.A. Lyubchenko A.V., Sobolev V.D. Interface Structure and Current Flow in Isotype HgCdTe/CdTe .- 6th

Conference on Application of Surface and Interface Analysis.- Montreux, 1995.- P.37.

43. Karachevtseva L.A., Lyubchenko A.V., Olikh Ya.M. Thermoacoustic Cleaning of Multicomponent CdHgTe Type Semiconductors.- The Third IUMRS International Conference in Asia.- Seoul, 1995.- P.33.

#### ЦИТОВАНА ЛИТЕРАТУРА

1. Hansen G.L., Schmit J.L. Calculation of Intrinsic Carrier Concentration of  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  // J. Appl. Phys.- 1983.- V.54, N 3.- P.1639-1640.
2. Finkman F. Intrinsic Carrier Concentration in  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  // J. Appl. Phys.- 1983.- V.54, N 12.- P. 8107-8111.
3. Горлея П.Н., Шендеровский В.А. Вариационный метод в кинетической теории.- Киев: Наук. думка, 1992.- 294 с.
4. Oszwaldowski M. Scattering of Electrons by Charged Dislocations in InSb-type Semiconductors // J. Phys. Chem. Solids.- 1985.- V.46, N 7.- P. 791-796.
5. Власенко А.И., Гаврилюк Ю.Н., Латуца В.З. и др. Время жизни в кристаллах  $Cd_xHg_{1-x}Te$ , ограниченное флуктуациями состава и выделениями второй фазы // Письма в журн. техн. физики.- 1979.- Т.5, N 16.- С. 1013-1017.
6. Вирт И.С., Григорьев Н.Н., Любченко А.В. Ограничение времени жизни сферическими дефектами структуры в фоточувствительных полупроводниках // Физика и техника полупроводн.- 1988.- Т.22, N 3.- С.- 409-411.
7. Любченко А.В., Олик Я.М. Электрические эффекты, стимулированные колебательной деформацией в полупроводниковых кристаллах // Физика твердого тела. - 1985.- Т. 27, N 8.- С. 2505-2506.

Karachevtseva L.A. IR-photosensitive CdHgTe Alloy: Physico-technological Optimization of Parameters and Defect Structure  
The thesis for scientific doctor's degree in physics and mathematics sciences on speciality 01.04.10 - physics of semiconductors and dielectrics, Institute of Semiconductor Physics, NAS of Ukraine, Kyiv, 1996.

40 scientific works and 3 inventor's certificates are defended. For increase of IR-radiation detection efficiency physico-technological processes of CdHgTe parameter's optimization were substantiated. There were established that for CdHgTe type alloy the mechanisms of photosensitivity elevation were realized and predetermined by (1) mercury vacancies addition, (2) acousto-stimulated diffusion and (3) point defect gettering by low angle boundaries. So there were worked out criteria of principal (theoretical) limitation of CdHgTe threshold photoelectrical characteristics by nonstoichiometric point and extended defects.

Карачевцева Л.А. ИК-фоточувствительные твердые растворы CdHgTe: физико-технологическая оптимизация параметров и дефектной структуры.

Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.10 - физика полупроводников и диэлектриков, Институт физики полупроводников НАН Украины, г.Киев, 1996.

Защищается 40 научных работ и 3 авторских свидетельства, в которых обоснованы физико-технологические процессы оптимизации параметров  $\text{CdHgTe}$  для повышения эффективности обнаружения ИК-излучения. Установлено, что в твердых растворах типа  $\text{CdHgTe}$  реализуются механизмы фоточувствления, определяемые (1) введением вакансий ртути, (2) акустостимулированной диффузией и (3) геттерированием точечных дефектов малоугловыми ми границами. В связи с этим выработаны критерии принципиального (теоретического) ограничения пороговых фотоэлектрических характеристик  $\text{CdHgTe}$  нестехиометрическими точечными и протяженными дефектами.

Ключові слова: телурид кадмію-ртуті, твердий розчин, ІЧ-фоточутливість, явища переносу, рекомбінація.

АВ 34.333  
**АВ 34.333**

Підп. до друку *6.03.96* Формат *60x84/16* Папір *офс* Друк. офс.  
Друк. офс. Умовн. друк. арк. *1.6* Обл.-вид. арк. *1.1* Тир. *120*  
Зам. *6-1189*

---

Київська книжкова друкарня наукової книги. Київ, Б. Хмельницького, 19.