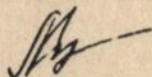


**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ УКРАЇНИ
ХЕРСОНСЬКИЙ ІНДУСТРІАЛЬНИЙ ІНСТИТУТ**

На правах рукопису



КАРАЧЕВЦЕВА ЛЮДМИЛА АНАТОЛІІВНА

**ФІЗИКО-ТЕХНОЛОГІЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ
ІЧ-ФОТОЧУТЛИВИХ КРИСТАЛІВ ТА СТРУКТУР
НА ОСНОВІ ТВЕРДИХ РОЗЧИНІВ CdHgTe**

**(05.27.03 - технологія, обладнання та виробництво
матеріалів і пристроїв електронної техніки)**

АВТОРЕФЕРАТ

**дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук**

Херсон-1996

46 35.267
Дисертація є рукопис

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

Науковий консультант: доктор фізико-математичних наук,
професор ЛЕБЧЕНКО О.В.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
ЛЕВІНЗОН Д.І.
доктор технічних наук, професор
МУЛІНОВА О.І.
доктор фізико-математичних наук,
професор ОДІНЦОВ В.В.

Провідна організація: Інститут прикладної фізики Львівського
університету

Захист відбудеться " " _____ 1996 р. о 13.00 год.
на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 19.01.07 при
Херсонському індустріальному інституті за адресою:
325008, м.Херсон, Бериславське шосе, 24

В дисертації можна ознайомитись в бібліотеці
Херсонського індустріального інституту

Автореферат розісланий " " _____ 1996 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
доктор хімічних наук, професор

НОВІКОВ О.О.

ЛННБ України ім.В.Стефаника



00752244 (O)

ЛНБ ім. В. Стефаника
АН України

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність проблеми. Основною задачею фотоелектроніки є виявлення гранично слабких джерел електромагнітного випромінювання на рівні фоновому. В наш час перспективність цього напрямку визначається прогресом технології виготовлення багатоеlementних матриць або неперервних лінійних фотоприймачів-перетворювачів зображення, а також можливості реалізації граничних фотоелектричних параметрів окремих елементів матриці та всієї структури. Для виявлення світлового сигналу у діапазоні максимальної питомої потужності випромінювання земних об'єктів (300 ± 50 K), зокрема, у вікні прозорості атмосфери 8-14 мкм, сьогодні найбільш перспективним матеріалом є твердий розчин телуриду кадмій-ртуті ($\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, $x = 0.2$), який займає близько 60% загальносвітового ринку ІЧ-фотоприймачів.

Перевагами цього матеріалу є використання у діапазоні власного оптичного поглинання, великі значення рухливості електронів та відношення рухливостей електронів і дірок. Це забезпечує високу фоточутливість та ефективність детектування, близьку до порогової. Незважаючи на велику кількість розробок і досліджень у цьому напрямку, на час початку даної роботи залишалося багато невирішених задач одержання якісних кристалів і структур на основі технологічно складного твердого розчину CdHgTe з прогнозованими електрофізичними та фотоелектричними параметрами. Актуальність цієї проблеми пов'язана, в першу чергу, з підвищенням вимог до просторової упорядкованості компонент твердого розчину, до вмісту точкових та макродефектів, фоточутливості матеріалу, а також зниження значень рівноважної концентрації носіїв заряду до рівні 10^{14} см^{-3} при розробці нових приладів сучасної ІЧ-фотоелектроніки, зокрема, неперервних лінійних фотоприймачів типу SPRITE.

Необхідність зниження рівня стабільно одержуваної концентрації електронів в CdHgTe ($x = 0.2$) з 10^{15} см^{-3} до 10^{14} см^{-3} вимагала вдосконалення традиційних методів термічної обробки телуриду кадмій-ртуті, які б не погіршували ефективності детектування ІЧ-випромінювання. Постає також питання розробки нових прецизійних методів управління параметрами кристалів та структур на основі CdHgTe , альтернативних

довготривалому термовідпалу.

Розвиток методів управління фізичними параметрами CdHgTe потребує вдосконалення методів їх контролю та вироблення критеріїв якості матеріалу з урахуванням порогової ефективності реєстрації інфрачервоного випромінювання. У дисертаційній роботі ці задачі були конкретизовані у зв'язку з протиріччям даних по механізмах рекомбінації та параметрах центрів рекомбінації в CdHgTe , з-за фрагментарності досліджень цього матеріалу з рівноважних концентрацій носіїв заряду, близьких до власної, і, насамкінець, відсутністю критеріїв обмеження параметрів твердого розчину телуриду кадмію-ртуті ростовими макродефектами.

Таким чином, проблема одержання кристалів та структур на основі CdHgTe з прогнозованими властивостями шляхом термічного відпалу цього матеріалу, розробки альтернативних методів оптимізації вихідних параметрів, встановлення кореляційних залежностей між технологічними і фізичними параметрами та досягнення порогових фотоелектричних характеристик телуриду кадмію-ртуті є актуальною для ІЧ-фотоприймального приладобудування.

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, параметричного контролю напівпровідникових багатомасштабних структур для реєстрації та перетворення випромінювання в рентгенівському, оптичному та ІЧ діапазонах спектру"; Програмов ДКНТ України 7.1 "Матеріали електронної техніки" (Постанова ДКНТ України № 19 від 24.07.92 р.); господарським угодою між Інститутом фізики напівпровідників НАН України та АТ "Чисті метали" (м.Світловодськ) № 587 (СТАРТ-1, 1987 р.), № 1673 (СТАРТ-2, 1990 р.) та ін.

Мета роботи включає розробку методів фізико-технологічної оптимізації параметрів кристалів та структур на основі

твердих розчинів телуриду кадмій-ртуті для одержання порогової ефективності детектування Γ -випромінювання. Виконання поставленої мети пов'язане з вирішенням наступних задач:

- відпрацювати режими стабільного одержання n -CdHgTe з рівноважною концентрацією електронів $n_0 = (2-5) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ і пороговою ефективністю реєстрації Γ -випромінювання, обмеженою фоном при 300 K;

- розробити методи контролю параметрів CdHgTe з урахуванням управління рівноважною концентрацією носіїв заряду на рівні $\Delta n_0 = 10^{14} \text{ см}^{-3}$ та неупорядкованість твердого розчину за складом $\Delta x/x = 5 \cdot 10^{-3}$ (2-3%);

- виробити критерії обмеження робочих параметрів (рівноважної концентрації, рухливості та часу життя носіїв заряду) резистивних кристалів CdHgTe ($x \approx 0.2$) ростовими та введеними власними дефектами ґратки;

- вивчити вплив профільної неоднорідності гетеропереходів CdHgTe/CdTe<Se,Zn> на технологічну відтворюваність параметрів епітаксійного шару.

Наукова новизна роботи. Відпрацювання методів прецизійної фізико-технологічної оптимізації та методів контролю параметрів CdHgTe дозволили вперше одержати такі наукові результати, загальні для вузькощілинних твердих розчинів:

1. Виявлено ефект підвищення часу життя нерівноважних носіїв заряду в n -CdHgTe при вихідному ступені компенсації матеріалу $K \geq 0.5$ у результаті низькотемпературного відпалу і введення рекомбінаційно-активних акцепторів (вакансій ртуті).

2. Встановлено, що акустостимульована дифузія точкових дефектів у 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 від їх вмісту електронної рухливості та рівня шуму типу $1/f$ в області температур домішкової провідності. Встановлено, що низькотемпературний хід рухливості електронів визначається непараболічністю енергетичного спектру носіїв заряду у вузькощілинних напівпровідниках (різков температурно та концентраційно залежностями енергії електро-

нів).

4. Розроблені фізичні моделі та визначені гранично допустимі концентрації типових просторових дефектів (дислокацій, границь субзерен) у фоторезистивному CdHgTe . Границі субзерен, як гетери точкових дефектів, підвищують фоточутливість CdHgTe при $N_{\text{ab}} < 100 \text{ см}^{-1}$, у той час як ростові дислокації однозначно знижують рухливість та час життя носіїв заряду з різким падінням фоточутливості при концентраціях, вищих за порогову ($N_D > 8 \cdot 10^5 \text{ см}^{-2}$).

5. Встановлено, що радіус дії макродефекта, як стока нерівноважних носіїв заряду, не співпадає з дифузійною довжиною неосновних носіїв заряду і залежить лише від конфігурації та розміру макродефекта.

6. Розроблено метод контролю концентрації та рухливості електронів і дірок, а також власної концентрації носіїв заряду n_1 у напівпровідниках із змішаною провідністю з урахуванням аналітично простої (квадратичної) магнітопольової залежності коефіцієнта Холла. Встановлено, що відхилення експериментально виміряного значення n_1 від розрахункового визначається переважно флуктуаціями складу твердого розчину.

7. Доведено, що у багатомарових структурах та однорідних напівпровідниках з кількома сортами носіїв заряду одного знаку мінімум холлівської компоненти тензора електропровідності формується лише за умов значної різниці як рухливості, так і відповідних компонент провідності носіїв заряду.

8. Встановлена кореляція між структурною досконалістю підкладки, параметрами епітаксiального шару та висотою потенційного бар'єру для ізотипних гетероструктур $p\text{-CdHgTe}/p\text{-CdTe}$, яка визначається вмістом і розподілом макродефектів та, як наслідок, формуванням високорухливої електронної компоненти провідності.

Практична цінність.

1. Одержано напівпровідниковий матеріал $p\text{-CdHgTe}$ ($x = 0.2$), для якого в результаті введення рекомбінаційних термоміжцентрів (вакансій ртуті) час життя фотоносіїв зростає (А.с. № 1723962), що підвищило стабільність та відтворюваність резистивного CdHgTe , забезпечило досягнення при робочій температурі ІЧ-фотоприймача 77 К порогової ефективності детектування, обмеженої фоном при 300 К (апертура 180°);

підвищено вихід у годну продукцію дорогоцінного матеріалу.

2. Розроблено метод термоакустичної обробки напівпровідникових пластин CdHgTe (А.с. № 1556436), який дозволив прецизійно управляти об'ємною концентрацією точкових дефектів на рівні $\Delta N = 10^{14} \text{ см}^{-3}$, підвищувати фоточутливість матеріалу без використання ртутної атмосфери, високих температур та багаточасових процесів, характерних для термовідпалу. Метод впроваджено на АТ "Чисті метали" як нововведення для зростання якості та виходу CdHgTe у годну продукцію.

3. Розроблений метод контролю електрофізичних параметрів напівпровідникових пластин "слабкого" р-типу провідності (А.с. № 1554679) забезпечив відбраковування матеріалу р-типу провідності при виготовленні фоторезистивних ІЧ-приймачів. Підвищення точності контролю параметрів напівпровідників в результаті використання магнітних полів, менших 1.5 Тл (промислові електромагніти), експресність контролю дозволила впровадити метод на АТ "Чисті метали".

4. Обґрунтовані режими одержання максимальної магніточутливості датчиків слабких магнітних полів на основі твердого розчину CdHgTe , для яких вольтова чутливість в області абсолютного максимума коефіцієнта Холла у два рази перевищує магніточутливість датчиків на основі сполук A^3B^5 (InSb).

5. Обґрунтовані методи контролю профільної неоднорідності п-р-структур на основі напівпровідників типу CdHgTe по характеристичних ділянках магнітопольових залежностей коефіцієнта Холла (мінімум холлівської компоненти тензора електропровідності) та поперечного магнітоопору (насичення $\Delta\rho/\rho$).

6. Вироблені комплексні критерії якості р-шару фотодіодних структур на основі епітаксіальних плівок CdHgTe по спектрах фотолюмінесценції підкладок CdTe , висоті потенціального бар'єру на границі р- CdHgTe /р- CdTe та по величині надлишкової електронної компоненти провідності епітаксіального шару.

7. В результаті впровадження на АТ "Чисті метали" (м. Світловодськ) нової продукції МІ (фоторезистивних кристалів п- CdHgTe з наперед заданим вузьким інтервалом рівноважної концентрації електронів) підвищена якість і вихід продукції при використанні розроблених у даній роботі методів одержання та обробки CdHgTe , методів контролю та критеріїв якості матеріалу по концентрації, рухливості та часу життя

носіїв заряду з урахуванням вмісту власних термоакцепторів та макродефектів (границь субзерен, дислокацій). Економічний ефект у 1987-1989 роках склав 1120 тис.крб. (\$224 000).

На захист виносяться способи фізико-технологічної оптимізації параметрів кристалів та структур на основі твердого розчину CdHgTe :

1. Спосіб відтворюваного одержання напівпровідникового матеріалу $n\text{-CdHgTe}$ ($x = 0.2$) шляхом введення рекомбінаційно-активних акцепторів (вакансій ртуті) та підвищення його фоточутливості при вихідному ступені компенсації $K \geq 0.5$.

2. Спосіб термоакустичної обробки напівпровідникових пластин CdHgTe та підвищення їх фоточутливості в результаті впливу ультразвуку та акустостимульованої модифікації точково-дефектної структури матеріалу шляхом "заліковування" вакансій ртуті.

3. Методи промислового контролю готової продукції по концентрації та рухливості електронів і дірок, а також власної концентрації носіїв заряду з використанням ділянки аналітично простої (квадратичної) магнітопольової залежності коефіцієнта Холла у твердих розчинах CdHgTe із змінною провідністю.

4. Критерії обмеження робочих параметрів (рівноважної концентрації, рухливості, часу життя носіїв заряду) резистивних кристалів CdHgTe ($x = 0.2$) ростовими та введеними власними дефектами ґратки:

- нестехіометричними точковими дефектами з урахуванням немонотонної (з мінімумом) залежності часу життя фотоносіїв та квадратичної залежності рівня шуму типу $1/f$ від концентрації термоакцепторів (вакансій ртуті);

- ростовими макродефектами (границями субзерен, дислокаціями) з пороговими концентраціями і відповідними радіусами рекомбінаційної активності, які не співпадають з дифузійною довжиною неосновних носіїв заряду і залежать від конфігурації та розміру макродефекта.

5. Характеристичні ділянки у магнітопольових залежностях коефіцієнта Холла (мінімум холлівської компоненти тензора електропровідності) і поперечного магнітоспору (насичення $\Delta\rho/\rho$) n - p -структур на основі напівпровідників типу CdHgTe , які є опорними для контролю профільної неодноріднос-

ті розподілу електрофізичних параметрів.

6. Практичне використання розроблених способів одержання та обробки телуриду кадмій-ртуті, методів контролю та критеріїв якості для виготовлення нової продукції - фоторезистивного матеріалу CdHgTe і структур на його основі; підвищення виходу в годну продукції дорогоцінного матеріалу.

Апробація роботи. Матеріали дисертації доповідалися та обговорювалися на II-й і III-й Всесоюзних конференціях "Матеріалознавство халькогенідних і кислородсодержащих напівпровідників" (Чернівці, 1986, 1991), Всесоюзній нараді "Акустооптические и фотоэлектрические методы исследования напівпровідників" (Київ, 1988), The 10th International Conference on Noise in Physical Systems (Budapest, 1989), I-й Республіканській конференції "Фізика і хімія поверхності і границь раздела узкозонных напівпровідників" (Алушта, 1990), Всесоюзному семінарі "Многослойные структуры на основе узкозонных напівпровідників" (Нукус, 1990), Міжнародній конференції "Фізика в Україні" (Київ, 1993), II-й Українській конференції "Матеріалознавство і фізика напівпровідникових фаз змінного складу" (Ніжин, 1993), NATO Advanced Study Institute "Formation and Interaction of Topological Defects" (Cambridge, 1994), VIII науково-технічній конференції "Хімія, фізика і технологія халькогенідів і халькогалогенідів" (Ужгород, 1994), IUMRC International Conference on Electronic Materials (Taiwan, 1994), International Conference "Optical Diagnostics of Materials and Devices for Opto-, Micro- and Quantum Electronics" (Київ, 1995), 6th Conference on 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 367 сторінках, включаючи 89 рисунків, 23 таблиці та бібліографії 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 II наукової групи. Дисертанту належить ініціатива у кон-

кретній 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 (обзорному) наведено критичний аналіз стану досліджень фізико-технологічних процесів управління основними параметрами твердого розчину CdHgTe , як матеріалу для виготовлення сучасних приймачів ІЧ-випромінювання. Підкреслено, що реалізація перспективного класу неперервних лінійних фотоприймальних структур типу SPRITE, які ґрунтуються на ефекті витягування носіїв заряду, ставить підвищені вимоги до якості CdHgTe по однорідності за складом твердого розчину, потребує зниження рівноважної концентрації електронів до значень, близьких до власної (n_1), мінімального вмісту просторових дефектів та, як наслідок цього, досягнення високої фоточутливості (ефективності детектування). У зв'язку з цим в розділі проаналізовано сучасний стан розвитку традиційних методів управління параметрами CdHgTe , які ґрунтуються на термовідпалі. Розглянуто новий перспективний метод ультразвукової обробки CdHgTe . Відмічено, що попередні дослідження впливу ультразвуку на телурид кадмію-ртуті проведені без урахування точково-дефектної структури матеріалу. Тому принципове для розробки акустичної методики обробки CdHgTe питання, за рахунок яких дефектів відбувається зміна параметрів матеріалу, не було вирішено. У першому розділі наведені також основні фізико-хімічні властивості телуриду кадмію-ртуті, які визначають його робочі характеристики при виготовленні ІЧ-фотоприймачів: особливості фазової діаграми, зонної структури, процесів розсіювання та рекомбінації носіїв заряду, точково- та макродефектної структури. Для розробки методів вихідного контролю CdHgTe , адекватних підвищенням вимог до його якості, підкреслена необхідність комплексних матеріалознавчих досліджень цього матеріалу з урахуванням рівня природної (термодинамічної) неупорядкованості твердого розчину 2-3 %, домірної концентрації фонових домішок. Розглянуті також питання технологічної стабільності одержання, управління та контролю робочих параметрів р-шару при виготовленні ІЧ-фотодіодів на основі епітаксіальних плівок CdHgTe .

Другий розділ присвячений розробці методів промислового контролю зонних параметрів CdHgTe (ширина забороненої зони, власна концентрація носіїв заряду), "слабкого" р-типу провідності (домірні n- і р-компоненти провідності) по концентрації та рухливості електронів і дірок; проаналізовані параметри датчиків слабких магнітних полів на основі такого матеріалу.

Проведено порівняльний аналіз ряду фізичних методів оцінки ширини забороненої зони і складу твердого розчину CdHgTe та базового рентгеноспектрального метода (мікроаналізатор "Сомебах"). Встановлено, що точність контролю ширини забороненої зони та складу твердого розчину CdHgTe оптичними та фотоелектричними методами (у тому числі і промисловим методом оптичного поглинання) підвищується при зменшенні температури вимірювання фізичної величини, яка використовується для контролю, та при зростанні складу твердого розчину. Переважаючим фактором підвищення похибки контролю E_g та x до 8-12 % є виродження електронного газу (ефект Бурштейна-Мосса) в результаті зростання рівноважної концентрації носіїв заряду.

Для CdHgTe "слабкого" р-типу провідності в концентраційній залежності коефіцієнта Холла (R_H^0) реалізується два екстремуми, положення і величина яких визначаються відношенням рухливостей носіїв заряду $b = \mu_n / \mu_p$. В абсолютному максимумі значення R_H^0 вище в $(3\sqrt{3})/16$ рази, ніж у матеріалі з власною концентрацією носіїв заряду. З урахуванням цього ідентифікація р-типу провідності в CdHgTe для діапазона концентрацій $n_1 < p_0 < n_1 \sqrt{3}$ здійснюється перевіркою нерівності $(eR_H^0)^{-1} < n_1$. А в діапазоні концентрацій дірок $n_1 \sqrt{3} < p_0 < n_1 b$ р-тип визначається за допомогою нерівності $R_H^0 \sigma < \mu_n$ (σ - електропровідність матеріалу). В області абсолютного максимуму коефіцієнта Холла телурид кадмію-ртуті є перспективним для виготовлення датчиків слабких магнітних полів з високою чутливістю, удвічі вищою у порівнянні з сполуками $\text{A}^{3\text{B}5}$ (InSb).

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 був розроблений метод, який не потребує вимірювання температурних залежностей кінетичних коефіцієнтів та сильних (квантових) магнітних полів. Встановлено (А.С. № 1554679), що саме для "слабкого" р-типу провідності реалізується участок простої (квадратичної) залежності коефіцієнта Холла нижче точки інверсії його знаку:

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

Для невідродженої статистики газу носіїв заряду, що має місце в області змішаної провідності, параметри носіїв визначаються рівняннями:

$$n_0 = (e R_H^0)^{-1} (1 + A)^{-1}; \quad \mu_n = e R_H^0 (1 + A); \quad (2)$$

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

Підвищення точності контролю у порівнянні з попередніми методами, експресність, можливість роботи з промисловими електромагнітами ($B < 1.5$ Тл) дозволило впровадити цей метод на АТ "Чисті метали", як нововведення.

Експериментально визначена власна концентрація носіїв заряду при робочій температурі фотоприймача ($T = 77$ К, рис. I), використовуючи квадратичну ділянку (I) залежності R_H . При цьому збереглась тенденція, встановлена іншими авторами [1] - перевищення даних експеримента над розрахунком, яке зростає при зниженні температури. Аналіз причин відхилення експериментальних результатів від розрахунку (обробка поверхні, флуктуації складу) вказав на переважний вплив флуктуації складу навіть на рівні природньої (термодинамічної)

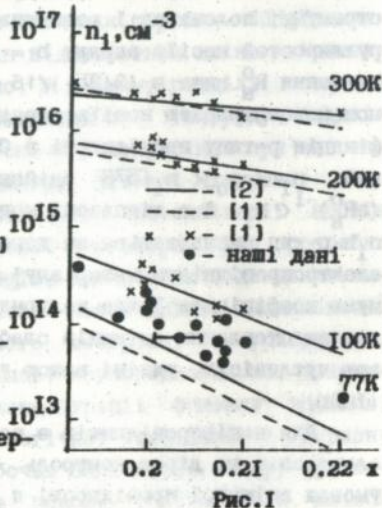


Рис. I

неупорядкованості CdHgTe 2-3 %. У цілому, відхилення виміряного значення n_1 від розрахункового є характеристикою якості твердого розчину.

У третьому розділі вироблені критерії обмеження рухливості електронів у фоторезистивному CdHgTe ($x = 0.2$) після легування донорною домішкою (In) та введення термоакцепторів (вакансій ртуті) на рівні $\Delta N = 10^{14} \text{ см}^{-3}$ шляхом термовідпалу з шогом $\Delta T = 1-2^\circ \text{C}$. Оцінено ступінь компенсації матеріалу і флуктуації рухливості електронів по експериментальних та розрахункових температурних, концентраційних і молярних залежностях μ_n .

Холлівську рухливість електронів було розраховано для довільного ступеня виродження електронного газу при визначенні операторів зіткнень для CdHgTe варіаційним методом рішення рівняння Вольфмана [3]. Підгонючими параметрами теорії були потенціал розсіювання ΔE при розрахунках компоненти розсіювання на мікронеоднорідностях твердого розчину та концентрація іонів домішок - для домішкової компоненти розсіювання. Встановлено, що коефіцієнт r , який характеризує низькотемпературний хід рухливості електронів ($\mu_n \sim T^r$), зростає при введенні акцепторів (вакансій ртуті) та зниженні концентрації донорів. Згідно з проведенням аналізу головним фактором, який визначає $\mu_n(T)$ при низьких температурах, є непараболічність енергетичного спектру носіїв заряду у вузькоцилиндрових напівпровідниках та, як наслідок цього, різка температурна і концентраційна залежність енергії електрона (рівня Фермі). Концентрація іонів домішок впливає лише на абсолютну величину рухливості носіїв заряду і задає сильну концентраційну залежність рухливості при введенні двозарядних вакансій ртуті. Цей результат був використаний для оцінки ступеня компенсації $n\text{-CdHgTe}$ з різним вмістом термоакцепторів, розрахунку молярної залежності рухливості електронів і визначення флуктуацій μ_n , які досягають 15% (77K) та 25% (4.2K) для рівня природньої (термодинамічної) неупорядкованості твердого розчину $\Delta x = 5 \cdot 10^{-3}$.

Для оцінки якості фоторезистивного CdHgTe з різним вмістом вакансій ртуті, придатного для виготовлення ІЧ-фотоприймачів, виміряно рівень низькочастотного шуму типу I/f : $\alpha = 10^{-6} - 10^{-4}$ (α - постійна Кооге). Встановлена обернена залеж-

ність постійної α від значення рухливості електронів і квадратична залежність - від концентрації акцепторів (вакансій ртуті). Одержані дані підтвердили справедливості моделі розсіюючих центрів, яка визначає при 77 К рівень шуму типу $1/f$ в CdHgTe ($x = 0.2$), як альтернативи фононній моделі.

У четвертому розділі розроблені режими одержання фоторезистивного CdHgTe ($x = 0.2$) шляхом компенсуючого термовідпалу з вихідним значенням рівноважної концентрації електронів $(2-5) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ без погіршення ефективності детектування ІЧ-випромінювання. Для вирішення цієї задачі були досліджені рекомбінаційні процеси у телуриді кадмій-ртуті з контрольованою зміною концентрації вакансій ртуті.

З урахуванням реальної схеми глибоких рівнів у CdHgTe ($x = 0.2$) 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-CdHgTe при концентраціях електронів, більших за 10^{15} см^{-3} . В р-області концентраційна залежність τ носить активаційний характер з енергією процесу, яка визначається глибоким акцептором. Для високочутливого CdHgTe "слабкого" р-типу провідності переважає рекомбінація через однозарядні рівні акцепторів фонових домішок. В n-області має місце немонотонна залежність $\tau(n_0)$, природу якої розглянемо докладніше.

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

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

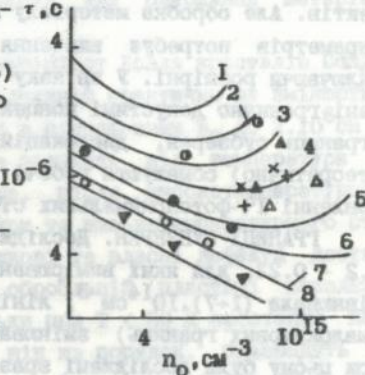
звідки слідує, що часом життя нерівноважних електронів (фоточутливість матеріалу) при фіксованій температурі можна управляти за допомогою двох параметрів: концентраціями рекомбінаційних центрів та електронів. Способів їх варіації може бути декілька в залежності від виду обробки матеріалу. Зміна концентрації донорів з-за малої енергії активації в CdHgTe управляє лише рівноважною концентрацією електронів. Внаслідок

док цього час життя носіїв заряду монотонно росте із зниженням N_d . Монотонна залежність $\tau(n_0)$ має місце і при введенні малих акцепторів, які не є центрами рекомбінації.

Зміна концентрації глибоких рекомбінаційних акцепторів значно змінює ситуацію (рис.2): в залежності $\tau(n_0)$ з'являється мінімум. При переході у (3) до однієї змінної (ступінь компенсації) одержуємо:

$$\tau = \frac{C + K}{C_n N_d (1-K) K}; \quad C = \frac{2N_{va}}{N_d}; \quad K = \frac{2N_a}{N_d}. \quad (4)$$

Координати мінімуму визначені для екстремума функції (4) $K_{\min} = C(4I + I/C - I)$ і відповідають $K = 0.5$ у великому діапазоні зміни концентрації донорів. Дослідження двох груп кристалів $CdHgTe$, які від-
різняються вихідним ступенем компенсації ($K < 0.5$ і $K > 0.5$) експериментально підтвердило зростання часу життя фотоносіїв при вихідному $K > 0.5$ та зменшення τ при $K < 0.5$ після низькотемпературного термовідпалу (рис.2, значки). Таким чином, термовідпал може управляти часом життя електронів в обидві сторони, у тому числі, підвищувати фоточутливість матеріалу в результаті введення розрахунків (1-8) $\tau(n_0)$ для рекомбінаційних акцепторів - $N_d \cdot 10^{-14} \text{ см}^{-3}$: 1-5, 2-10, 3-15, 4-20, 5-25, 6-30, 7-40, 8-100



Оцінка ступеня компенсації матеріалу проводилася по значеннях рухливості електронів (третій розділ), по номограмах залежностей $\tau(n_0)$ (рис.2), а також за допомогою залежностей $\tau(T)$ шляхом визначення концентрації акцепторів (центрів рекомбінації) по температурі переходу до участка активації τ . Оцінені також переріз захвату електронів по низькотемпературній полці та максимуму залежності $\tau(T)$ і енергія активації рекомбінаційного центра по участку активації τ . Встановлено, що основною причиною розбросу вимірюваної енергії активації рівня рекомбінації є похибка її визначення, пов'я-

зана, по-перше, з впливом оже-компоненти рекомбінації 1, по-друге, з високим вмістом рекомбінаційних центрів.

Встановлений у роботі ефект підвищення часу життя фотоносіїв дозволив розробити новий спосіб одержання резистивного $n\text{-CdHgTe}$ (А.с. № 1723962) шляхом термовідпалу з урахуванням вихідного ступеня компенсації матеріалу. Спосіб забезпечив стабільне одержання телуриду кадмію-ртуті у діапазоні рівноважної концентрації електронів $(2-5) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, необхідної для виготовлення неперервних (а також багатоселементних) ІЧ-фотоприймачів, що підвищило вихід у годну продукцію дорожчого матеріалу.

Наведені результати були одержані для кристалів CdHgTe з домірним фоном домішок і свідомо низьким вмістом макродефектів. Але обробка матеріалу для оптимізації його вихідних параметрів потребує вивчення всього комплексу дефектів, включаючи розмірні. У зв'язку з цим у п'ятому розділі визначені гранично допустимі концентрації типових макродефектів (границь субзерен, дислокацій) у CdHgTe , які принципово (теоретично) обмежують робочі параметри матеріалу при виготовленні ІЧ-фотоприймальних структур.

ГРАНИЦІ СУБЗЕРЕН. Досліджені пластини CdHgTe складу $x = 0.2 - 0.22$, для яких вимірювана концентрація електронів до-рівнювала $(1-7) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, лінійна густина границь субзерен (малокутових границь) змінювалась від $N_{\text{sb}} = 5$ до 300 см^{-1} . При цьому були досліджені зразки CdHgTe , вирізані з однієї пластини, в якій концентрація границь субзерен змінювалась в діапазоні $5-100 \text{ см}^{-1}$. При дослідженні рекомбінаційних процесів вимірювались також спеціально відібрані пластини з $N_{\text{sb}} = 200 - 300 \text{ см}^{-1}$.

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 незначно змінюється при $N_{\text{sb}} = 5 - 100 \text{ см}^{-1}$. Для компенсованих кристалів τ зростає з підвищенням концентрації границь субзерен до 100 см^{-1} і зниження (згідно з розрахунками) концен-

трації центрів рекомбінації. Цей ефект пов'язаний з гетеручою дією границі субзерна у процесі стехіометризувочого відпалу. Об'ємний характер зростання часу життя підтвердили залежності $\tau(T)$. При більших концентраціях малокутових границь ($200 - 300 \text{ см}^{-1}$) τ спадає незалежно від значення рівноважної концентрації електронів.

ДИСЛОКАЦІЇ. Для одержання зразків з різною концентрацією ростових дислокацій (N_D) досліджені пластини CdHgTe були спеціально оброблені на АТ "Чисті метали". Неоднорідність розподілу дислокацій від $N_D > 10^5 \text{ см}^{-2}$ до $N_D < 10^6 \text{ см}^{-2}$ досягалася шляхом відпалу пластин в насиченій парі ртуті у градієнті температур $880-890 \text{ K}$, тобто в умовах, при яких має місце переповнення дислокацій. Потім проводилася низькотемпературна стехіометризувоча обробка для одержання матеріалу n-типу провідності.

Електропровідність та коефіцієнт Холла кристалів CdHgTe з різним вмістом ростових дислокацій практично не змінюються 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 стехіометризувочого відпалу домішкові та власні дефекти достатньо рівномірно розподілені в обробленій пластині незалежно від вмісту дислокацій. І тільки при $T < 50 \text{ K}$ зростання концентрації дислокацій більше, ніж на порядок, призводить до зниження рухливості у 1.5 рази. Розрахунок $\mu_n(T)$ проведено з урахуванням розсіювання на заряджених дислокаціях [4], що узгоджується з експериментальними даними для двократно зарядженого оборваного зв'язку дислокації. Розрахункова залежність сумарної рухливості носіїв у CdHgTe від кута θ між направленням дислокацій і струму виявила, що найбільша зміна рухливості при перпендикулярному направленні струму до осі дислокаційної трубки не перевищує двократного зниження μ_n .

Ростові дислокації обмежують час життя нерівноважних носіїв заряду з різким падінням fotocутливості при $N_D \sim 8 \cdot 10^5 \text{ см}^{-2}$, що підтверджено також температурним ходом τ 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 механізмом рекомбінації обмеження і просторовими дефектами, як стоками фотонів (5). Рівняння між рекомбінаційними параметрами об'єму кристалів та геометричної границі макродефекта створює дифузійний потік нерівноважних носіїв заряду (ННЗ), який характеризується швидкістю поверхневої рекомбінації на границі "дефект-матриця". Рівняння відповідних рівнянь неперервності описує спад ННЗ за допомогою модифікованих функцій Бесселя $K_0(x)$ і $I_0(x)$ для циліндричної поверхні рекомбінації. Встановлено, що характеристична довжина спаду ННЗ L^* залежить лише від конфігурації та розміру дефекту r_c : $L^* < L$ (L - дифузійна довжина неосновних носіїв заряду) для дефектів з випуклою поверхнею (сферичні вклучення, дислокаційні трубки), $L^* > L$ для дефектів з вгнутою поверхнею (границі субзерен).

З урахуванням теоретичних та експериментальних концентраційних залежностей і визначені радіус рекомбінаційної активності ростових дислокацій у CdHgTe ($r_c \sim 0.4$ мкм) та швидкість поверхневої рекомбінації на границі "дефект-матриця" ($s \sim 10^5$ см/с). Критичні концентрації дислокацій, які характеризують якість $n\text{-CdHgTe}$ по τ , відповідають міждислокаційній відстані $R = L^* = 0.2L$, тобто менші за дифузійну довжину неосновних носіїв заряду.

У шостому розділі наведений метод термоакустичної обробки кристалів телуриду кадмію-ртуті, як альтернативний довготривалому термовідпалу.

Попередні результати обробки CdHgTe ультразвуком 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 прецизійної методики оптимізації параметрів телуриду кадмію-ртуті в результаті обробки ультразвуком. Тому були досліджені кристали CdHgTe з різною вихідною концентрацією вакансій ртуті. Залежності нормованих по 4-5 зразках відносних значень концентрації та рухливості електронів від інтенсивності ультразвукової обробки наведені на рис.3. Для некомпенсованих кристалів (I) концентрація електронів з ростом енергії ультразвуку практично не змінюється, рухливість зростає, проходить через максимум і потім спадає. Для ком-

пенсованих 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 за допомогою варіаційним методом свідчать про зниження концентрації донорів та акцепторів на ділянці зростання μ_n в результаті акустичної обробки. А при інтенсивностях ультразвуку, які знижують рухливість, окрім збільшення концентрації іонів домішок має місце зростання розсіюючого потенціалу для сплавного механізму розсіювання внаслідок росту мікрофлуктуацій компонент твердого розчину.

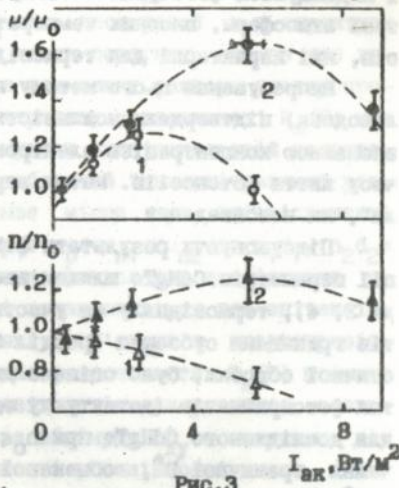


Рис.3

Концентраційні залежності часу життя електронів після термоакустичної обробки відрізняються від результатів низькотемпературного компенсуючого відпаду: якщо в останньому випадку $\tau(n_0)$ змінюється практично по ізоконцентраційних (відносно донорів) лініях (рис.2), 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 [6]. Обробка ультразвуком призводить до локального нагріву по периметру субзерен (тому обробка була названа термоакустичною), акустостимульованої дифузії домішок та надлишкових компонент твердого розчину та відповідної зміни параметрів напівпровідника. Динаміка зміни абсолютних величин і температурного ходу рухливості та концентрації електронів, а також концентрації центрів розсіювання дозволила зробити висновок про те, що основними процесами є генерація та "заліковування" вакансій ртуті в залежності від інтенсивності термоакустичного впливу та вихідної концентрації вакансій.

Відпрацювання метода термоакустичної обробки напівпровідникових пластин CdHgTe (А.с. № 1556436) дозволило управляти концентрацією точкових дефектів на рівні $\Delta N = 10^{14} \text{ см}^{-3}$ і підвищувати фоточутливість матеріалу без використання ртутної атмосфери, високих температур та багаточасових процесів, які характерні для термовідпалу.

Випробування цього методу на АТ "Чисті метали" (м.Світловодськ) підтвердили можливість прецизійного управління рівноважною концентрацією електронів і одночасного зростання часу життя фотоносіїв. Метод впроваджено на АТ "Чисті метали", як нововведення.

Підсумовуючи результати фізико-технологічної оптимізації параметрів 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 CdHgTe при $n_0 < 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ реалізуються значення граничної D^* , обмеженої фоном при 300 К (апертура 180°).

У цьому розділі обґрунтовані методи контролю профільної неоднорідності CdHgTe на прикладі модельних п-р-структур, сформованих в результаті термічної, механічної обробки та імпульсним лазерним випромінюванням.

Встановлено, що для п-р-структур на основі кристалів CdHgTe ($x = 0.22$) має місце немонотонний (з точкою перегину) спад коефіцієнта Холла від'ємного знаку (рис.4). Для епітаксійних шарів р-CdHgTe з приповерхневим п-шаром конденсату аномальної залежності $R_H(B)$ не було виявлено.

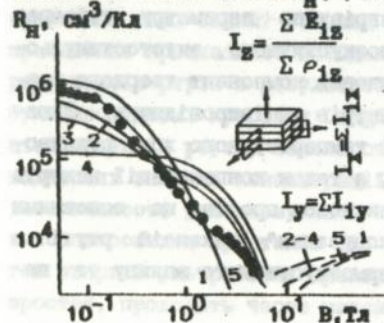


Рис.4. Залежність $R_H(B)$ для п-р-структури при відносній товщині п-шару $d_1/d = 0.1$ і $n_1 = 4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ($I - \mu_{n1} = 10^3 \text{ см}^2/\text{В.с.}$, $2-5 \cdot 10^3$, $3-10^4$, $4-5 \cdot 10^5$); $5 - n_1 = 10^{15}$, $\mu_{n1} = 10^3 \text{ см}^2/\text{В.с.}$ Параметри р-шару: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

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.4, вставка).

Результати розрахунку R_H для двохарової n-p-структури (рис.4) підтвердили існування точки перегину, але не для якого набору параметрів. Аналіз компонент тензора електропровідності засвідчив, що точка перегину у залежності $R_H(B)$ має місце лише при наявності мінімуму у магнітопольовій залежності σ_{xy} , тобто при розділенні областей "замagnetичування" різного сорту носіїв заряду, що має місце при співвідношенні параметрів двохарової структури: $\mu_p \ll \mu_{n1} \ll \mu_{n2}$ та $n_1 d_1 \sim n_2 d_2^*$ ($\mu_{n2} B$)⁻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.4). Умови формування мінімуму σ_{xy} є спорними для контролю профільної неоднорідності у напівпровідниках, а також можуть бути використані для дослідження процесів переносу в однорідних напівпровідниках за участі легких та важких носіїв заряду (локалізація носіїв, провідність по домішковій зоні).

Польові залежності поперечного магнітосопротивлення 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 $\Delta\rho/p$ 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-CdHgTe шляхом обробки сильнопоглинаючим лазерним випромінюванням при допорогових дозах опромінення (0.1 Дж/см²) аналогічна зняттю цього шару методом хімічного травлення. При збільшенні дози опромінення до 2.4 Дж/см² формується

двошарова p^+-p -структура. При цьому знакопостійна магнітопольова залежність коефіцієнта Холла має точку перегину на ділянці зростання $R_H(B)$ додатного знаку, що пов'язане з "замігнічуванням" високорухливої електронної компоненти у p -шарі.

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

Досліджено епітаксіальні шари CdHgTe ($x \sim 0.2$) p - та змішаної провідності, вирощені на підкладках CdTe , "чистих" та з 4% компонент Se або Zn . Епітаксіальні шари товщиною 25-30 нм були вирощені методом рідиннофазної епітаксії в замкнутому об'ємі із збагачених телуrom розчинів-розплавів на B -поверхні [III] підкладок CdTe (виготовлені на АТ "Чисті метали").

Епітаксіальні шари змішаного типу провідності відрізняються більшим вмістом дислокацій, включень телура, а також комірковою структурою перехідного шару порівняно з епішарами p -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 варізонної області.

В спектрах фотолюмінесценції підкладок CdTe зареєстрована донорно-акцепторна смуга з $\lambda_m = 875$ нм, інтенсивність якої різко підвищується із зростанням електронної компоненти провідності в епітаксіальному шарі (відповідно у підкладці) і в даному технологічному просторі є характеристикою структурної досконалості CdTe . Природа донорів пов'язана з відхиленням від стехіометрії переважно внаслідок формування преципітатів 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 потенціальний бар'єр. Висота бар'єру (до 0.5 еВ) істотно залежить від вмісту макродефектів структури: при підвищенні їх концентрації, коли зникає опір перехідного шару, потенціальний бар'єр невисокий або відсутній.

Таким чином, відтворюваність параметрів р-шару при виготовленні ІЧ-фотодіодів на основі гетероструктур р-CdHgTe/р-CdTe визначається, головним чином, вмістом та розподілом просторових дефектів та контролюється у даному технологічному просторі (1) інтенсивністю донорно-акцепторної смуги фотолюмінесценції підкладки CdTe, (2) висотою потенційного бар'єру у перехідному шарі та (3) вмістом електронної компоненти провідності в епітаксійному шарі.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ

Розробка режимів фізико-технологічної оптимізації параметрів CdHgTe дозволила вирішити актуальну науково-технічну проблему одержання кристалів та структур на основі телуриду кадмій-ртуті з прогнозованими властивостями шляхом прецизійного управління електрофізичними та фотоелектричними параметрами CdHgTe і підвищення ефективності детектування ІЧ-випромінювання. В рамках вирішення цієї проблеми одержані слідуючі наукові та практичні результати:

1. Розроблено метод одержання напівпровідникового матеріалу п-CdHgTe шляхом термовідпалу та відтвореної зміни вмісту рекомбінаційних акцепторів (вакансій ртуті), що призводить до немонотонної (з мінімумом при $K \sim 0.5$) концентраційної залежності часу життя нерівноважних носіїв заряду і забезпечує зростання фоточутливості в результаті введення вакансій ртуті при вихідному ступені компенсації матеріалу $K > 0.5$. Компенсація вакансіями Hg дозволяє досягти при робочій температурі ІЧ-фотоприймача 77 К порогової ефективності детектування, обмеженої фоном при 300 К (апертура 180°).

2. Розроблено, випробувано та впроваджено метод термоакустичної обробки телуриду кадмій-ртуті, який забезпечує зниження концентрації вакансій ртуті в результаті акустостимульованої модифікації точково-дефектної структури матеріалу. Рівень "очищення" CdHgTe залежить від інтенсивності ультразвука та від вихідної концентрації вакансій ртуті.

3. Вироблені кількісні критерії обмеження рухливості електронів у CdHgTe в результаті низькотемпературного компенсаючого відпалу з урахуванням довільного виродження електронного газу при розв'язанні рівняння Больцмана варіаційним методом. Непараболічність енергетичного спектру носіїв заряду у вузькозонних напівпровідниках 1, як наслідок цього, рі-

ака температурна та концентраційна залежність енергії електронів задають низькотемпературний хід рухливості. Встановлена квадратична залежність рівня шуму типу I/f від концентрації вакансій ртуті.

4. Вироблені критерії обмеження робочих параметрів (рівноважної концентрації, рухливості та часу життя електронів) у резистивному CdHgTe границями субзерен і ростовими дислокаціями при порогових концентраціях і відповідних радіусах рекомбінаційної активності, які залежать лише від конфігурації та розміру макродефекта. Вперше встановлено, що границі субзерен підвищують fotocутливість CdHgTe при $N_{ab} < 100 \text{ см}^{-1}$, виступаючи як гетери точкових дефектів. Дислокації однозначно знижують час життя нерівноважних носіїв заряду з рівним 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. Розроблено та впроваджено метод роздільного контролю концентрації та рухливості електронів і дірок, а також власної концентрації носіїв заряду n_i у напівпровідниках із змішаною провідністю з урахуванням аналітично простої (квадратичної) магнітопольової залежності коефіцієнта Холла. Встановлено, що відхилення експериментально виміряного значення n_i від розрахункового визначається переважно флуктуаціями складу і характеризує якість твердого розчину.

6. Встановлено, що твердий розчин CdHgTe є перспективним для розробки датчиків слабких магнітних полів завдяки високій рухливості електронів та великому значенню відношення рухливостей носіїв заряду ($\mu_n/\mu_p > 10^2$). При цьому вольтова чутливість в області абсолютного максимуму концентраційної залежності коефіцієнта Холла удвічі перевищує магнітоточливість датчиків на основі сполук A^3B^5 (InSb).

6. Встановлено, що характеристичні ділянки магнітопольових залежностей коефіцієнта Холла (мінімум холлівської компоненти тензору електропровідності) та поперечного магнітоспору (насичення $\Delta\rho/\rho$) є опорними для контролю електрофізичних параметрів багатозарядних n-p-структур на основі напівпровідників типу CdHgTe:

- У багатозарядних структурах та однорідних напівпровідниках з кількома сортами носіїв заряду одного знаку мінімум

холодильської компоненти тензора електропровідності формується лише за умов значної різниці як рухливостей, так і відповідних компонент провідності носіїв.

- Полюсові залежності поперечного магнітоопору p - p -структур мають ступінчастий характер; при цьому область насичення $\Delta\rho/p$ залежить лише від співвідношення компонент провідності носіїв різного сорту.

8. Основною причиною технологічної нестабільності p -шарів у фотодіодних структурах на основі епітаксійних плівок CdHgTe є макродефекти, які формують надлишкову електронну компоненту провідності. Встановлена кореляція між вмістом макродефектів, типом провідності епітаксійних шарів CdHgTe , інтенсивністю спектрів фотолімінесценції підкладок CdTe та величиною потенційного бар'єру у вузькій області максимального градієнту складу твердого розчину, яка приймає до металургійної границі.

9. Розроблені способи одержання, прецизійної обробки та контролю параметрів твердого розчину CdHgTe , а також критерії його якості забезпечили підвищення виходу в годну продукції дорогоцінного матеріалу, досягнення порогової ефективності реєстрації ІЧ-випромінювання при виготовленні фотоприймальних структур, впровадження на АТ "Чисті метали" нової продукції МІ - фоторезистивних кристалів $n\text{-CdHgTe}$ ($x = 0.2$).

ОСНОВНІ 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 Д.Л. Определение собственной концентрации носителей заряда в твердых растворах $\text{Cd}_{1-x}\text{Hg}_x\text{Te}$ // Вопросы оборон. техники.- 1987.- сер. II, N 4.- С. 11-19.
3. Лукинский Д.Л., Карачевцева Л.А., Рябиков В.М. Определение зависимости ширины запрещенной зоны от состава $\text{Cd}_{1-x}\text{Hg}_x\text{Te}$. - Вопросы оборон. техники.- 1988. - Сер. II, N 4.- С.17-19.
4. Карачевцева Л.А., Либченко А.В., Лукинский Д.Л. Рекомбинация через компенсированные акцепторные состояния в кристаллах CdHgTe p -типа в области смешанной проводимости //

- Вопросы оборон. техники.- 1988.- Сер. II, N 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, N 3.- С. 571-573.
 6. Горлея П.Н., Демина И.К., Карачевцева Л.А. и др. Низкотемпературная зависимость подвижности электронов в кристаллах $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ // Укр. физ. журн.-1989.- Т.34, N 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 $n\text{-Cd}_{0.2}\text{Hg}_{0.8}\text{Te}$ // Вопросы оборон. техники.- 1989.- Сер. II, N 2.- С.24-29.
 8. Ергаков В.К., Карачевцева Л.А., Курбанов К.Р., Любченко А.В. Влияние компенсирующего низкотемпературного отжига на электрофизические параметры $n\text{-Cd}_{0.2}\text{Hg}_{0.8}\text{Te}$ // Вопросы оборон. техники.- 1989.- Сер. II, N 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, N 3.- С.468-472.
 10. Друзь Б.Л., Карачевцева Л.А., Лукьяненко В.И. и др. Дефекты структуры и электрофизические свойства гетероэпитаксиальных пленок $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, выращенных из газовой фазы в изотермических условиях // Неорганические материалы.- 1990.- Т.26, N 3.- С. 433-434.
 11. Горлея П.Н., Карачевцева Л.А., Кушнир Н.Я. и др. Влияние акустического воздействия на точно-дефектную структуру $n\text{-Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ // Электрон. техника, сер. Материалы.- 1990.- Вып. 8/253.- 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 $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ // 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 $n\text{-CdHgTe}$ // Физика и техника полупроводн.- 1991.- Т.25, N 3.- С. 464-466.
 14. Григорьев Н.Н., Ергаков В.К., Карачевцева Л.А. и др. Электронное время жизни в кристаллах $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ с разной

- плотностью малоугловых границ // Физика и техника полупроводн.-1991.- Т.25, N 9.- С. 1649-1652.
15. Бакши И.С., Карачевцева Л.А., Любченко А.В. и др. Влияние компенсирующего сдвига на $1/f$ шум в $\text{Cd}_{1-x}\text{Hg}_x\text{Te}$ // Физика и техника полупроводн.- 1992.- Т.26, N 1.- С.173-176.
 16. Карачевцева Л.А., Любченко А.В., Маловичко Э.А. Особенности магнитопольных зависимостей кинетических коэффициентов в двухслойных структурах $\text{Cd}_{1-x}\text{Hg}_x\text{Te}$ // Физика и техника полупроводн.- 1992.- Т.26, N 3.- С.535-538.
 17. Карачевцева Л.А., Любченко А.В. К вопросу о собственной концентрации носителей заряда в твердых растворах CdHgTe // Физика и техника полупроводн. - 1992.- Т.26, N 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 $\text{Cd}_{1-x}\text{Hg}_x\text{Te}$ // Оптоэлектроника и полупроводн. техника.- 1992.- Вып.22.- С.40-43.
 19. Карачевцева Л.А., Любченко А.В. Энергия активации рекомбинационных центров в компенсированных кристаллах 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 $\text{Cd}_{1-x}\text{Hg}_x\text{Te}$ со смешанной проводимостью // Укр. физ. журн.- 1992.- Т.37, N 6.- С.924-929.
 21. Гнатик В.А., Карачевцева Л.А., Мозоль П.Е. Влияние импульсного лазерного облучения на точечно-дефектную структуру пленок $\text{Cd}_{1-x}\text{Hg}_x\text{Te}$ // 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 $\text{Cd}_{1-x}\text{Hg}_x\text{Te}$ // Укр. физ. журн. - 1993.- Т.38, N 7.- С.1071-1075.
 23. Горлей П.Н., Карачевцева Л.А., Кушир Н.Я. и др. Влияние ростовых дислокаций на величину холловской подвижности в $\text{p-Cd}_{1-x}\text{Hg}_x\text{Te}$ // 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 $\text{p-Cd}_{1-x}\text{Hg}_x\text{Te}$ // Оптоэлектроника и полупро-

- водн. техника.- 1993.- Вып.26.- С.52-56.
25. Карачевцева Л.А., Маловичко Э.А., Нужная Т.П. и др. Структурно-морфологические особенности эпитаксиальных слоев CdHgTe р- 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 магнитополевых зависимостей коэффициента Холла в сэндвич-структурах $\text{Cd}_{1-x}\text{Hg}_x\text{Te}$ // Матер. Всес. семинара: Многослойные структуры на основе узкозонных полупроводников.- Нукус, 1990.- С.65-67.
 27. Bakshee I.S., Grin V.P., Karachevtseva L.A. et.al. Influence of Defect Concentration on 1/f Noise in $\text{n-Cd}_{1-x}\text{Hg}_x\text{Te}$ // 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 $\text{n-Cd}_{1-x}\text{Hg}_x\text{Te}$ // 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 $\text{Cd}_{1-x}\text{Hg}_x\text{Te}/\text{CdTe}$. - Матер. II Української конф.: Матеріалознавство і фізика напівпровідникових фаз змінного складу. - Ніжин, 1993.- Ч. I, с.35-37.
 31. Карачевцева Л.А., Кладько В.П., Маловичко Э.А., Нужная Т.П. Структурно-морфологические особенности эпитаксиальных слоев $\text{Cd}_{1-x}\text{Hg}_x\text{Te}$ р- и смешанного типов проводимости.- Матер. II Української конф.: Матеріалознавство і фізика напівпровідникових фаз змінного складу.- Ніжин, 1993.- Ч. I, с.140-142.
 32. Karachevtseva L.A., Lyubchenko A.V., Sobolev V.D. Potential Barrier Formation in $\text{HgCdTe}/\text{CdTe}$ Heterojunctions.- Proc. IUMRS Int. Conf. on Electronic Materials (D).- Taiwan, 1994.- P.125-131.
 33. Karachevtseva L.A., Lyubchenko A.V., Hilimova 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. N 1554679 (СССР). МКИ⁴ H 01 L 21/463. Способ контроля электрофизических параметров полупроводников / Л.А. Карачевцева, А.В.Любченко, Е.А.Сальков и др.- Заяв. 02.11.87 г.
 36. А.с. N 1556436 (СССР), МКИ⁴ H 01 L 21/463. Способ управления электрофизическими параметрами полупроводниковых соединений типа A^2B^6 / Л.А.Карачевцева, А.В.Любченко, Я.М.Олих и др.- Заяв. 29.07.88 г.
 37. А.с. N 1723962 (СССР). МКИ⁴ H 01 L 31/0296. Способ получения полупроводникового материала $p\text{-Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ / Л.А.Карачевцева, А.В.Любченко, Э.А.Маловичко.-Заяв.07.08.89 г.
 38. Карачевцева Л.А., Любченко А.В., Ергачев В.К. и др. Время жизни электронов в $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ с различной плотностью малоугловых границ // Сб. "Физика и химия поверхности и границ раздела узкозонных полупроводников".-1990.- С.25-26.
 39. Карачевцева Л.А., Любченко А.В., Маловичко Э.А. Магнитополевые зависимости кинетических коэффициентов в многослойных $p\text{-}r$ -структурах $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ // Матер. III Всес. конференции: Материаловедение халькогенидных полупроводников.- Черновцы, 1991.- Ч.II.- С.28.
 40. Карачевцева Л.А., Кушнир Н.Я., Горлей П.Н., Скирко А.М. Ростовые дислокации и подвижность в $p\text{-Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ // 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 Analy-

sis.- Montreux, 1995.- P.37.

43. Karachevtseva L.A., Lyubchenko A.V., Olikh Ya.M. Thermoacoustic Cleaning of Multicompound 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. Вармационный 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.М., Гаврилик Ю.Н., Латуа В.З. и др. Время жизни в кристаллах $Cd_{1-x}Hg_xTe$, ограниченное флуктуациями состава и выделениями второй фазы // Письма в журн. техн. физики.- 1979.- Т.5, N 16.- С. 1013-1017.
6. 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. Physico-Technological Parameters Optimization of IR-photosensitive Crystals and Structures on the Base of CdHgTe Alloy.

The thesis for scientific doctor's degree in technics on speciality 05.27.03-Technology, Equipment and Manufacture of Materials and Electron Technique Devices, Kherson Industrial Institute, Ministry of Education of Ukraine, Kherson, 1996.

40 scientific works and 3 inventor's certificates are defended. For encrease of IR-radiation detection efficiency there were developed the production, working and parameter control methods and quality criteria of crystals and structures on the base of CdHgTe alloy. New methods of photosensitivity elevation in the result of mercury vacancies addition and thermoacoustic working were designed and reduced.

There were developed and substantiated electrophysical parameter control methods of mercury-cadmium telluride with mixed conductivity and n-p-structures on the base of CdHgTe . There were worked out criteria of principal (theoretical) limitation of CdHgTe threshold photoelectrical characteristics by nonstoichiometric point and extended defects. Developed regimes of physico-technological CdHgTe parameter optimization supplied threshold IR-radiation detectivity for production of the photoreceiver structures, increasing of good-to-bad material ratio, manufacture and adoption of new production - photoresistance CdHgTe crystals.

Караченцева Л.А. Физико-технологическая оптимизация параметров ИК-фоточувствительных кристаллов и структур на основе твердых растворов CdHgTe .

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.27.03 - технология, оборудование и производство материалов и устройств электронной техники, Херсонский индустриальный институт, Министерство образования Украины, Херсон, 1996.

Защищается 40 научных работ и 3 авторских свидетельства, в которых разработаны методы получения, обработки, контроля параметров и критерии качества кристаллов и структур на основе твердого раствора CdHgTe для повышения эффективности регистрации ИК-излучения. Разработаны и внедрены новые методы повышения фотоувствительности CdHgTe в результате введения вакансий ртути и термоакустической обработки. Разработаны и обоснованы методы контроля электрофизических параметров теллурида кадмия-ртути со смешанной проводимостью, а также n-p-структур на основе CdHgTe . Выработаны критерии принципиального (теоретического) ограничения пороговых фотовольтрических характеристик CdHgTe нестехиометрическими точечными и протяженными дефектами. Разработанные режимы физико-технологической оптимизации параметров CdHgTe обеспечили достижение пороговой эффективности обнаружения ИК-излучения при изготовлении фотопримемных структур, увеличение выхода в годную продукцию дорогостоящего материала, получение и внедрение новой продукции - фоторезистивных кристаллов CdHgTe .

Ключові слова: телурид кадмію-ртуті, твердий розчин, вакансії ртуті, термовідпал, ультразвук, фоточутливість

АВ 35.267

Підп. до друку 24.07.85. Формат 60,1x41/16. Папір офс. Друк. офс.
Друк. офс. Умовн. друк. арк. 1,6. Обл.-вид. арк. 1,2 Тир. 100
Зам. 6-1488.

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