

ЧЕРНІВЕЦЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ім. Ю. ФЕДЬКОВИЧА

---

НА ПРАВАХ РУКОПISУ

**ЗАГНЕЙ**

Аполлінарій Олексійович

**ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ НЕРІВНОВАЖНОГО  
СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ І МОДИФІКАЦІЇ ВЛАСТИВОСТЕЙ  
НАПІВПРОВІДНИКОВИХ КРИСТАЛІВ ТЕЛУРИДУ КАДМІЮ І РТУТІ ПІД  
ДІЄЮ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ**

Спеціальність 01.04.10 - фізика напівпровідників  
і діелектриків

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата фізико-математичних наук

АВ 29.990

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Інституті прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С.Підстригача АН України, м.Львів

Науковий керівник - кандидат фізико-математичних наук,  
старший науковий співробітник  
КОТЛЯРЧУК БОГДАН КОСТЯНТИНОВИЧ

Науковий консультант - доктор фізико-математичних наук,  
професор  
САВИЦЬКИЙ ВОЛОДИМИР ГРИГОРОВИЧ

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук,  
професор  
РАРЕНКО ІЛІРІЙ МИХАЙЛОВИЧ  
доктор технічних наук,  
доцент  
ДРУЖИНІН АНАТОЛІЙ ОЛЕКСАНДРОВИЧ

Провідна установа - Інститут фізики напівпровідників  
АН України, м.Київ

Захист відбудеться 27 травня 1994 р. о 15 год.  
на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 068. 16. 01  
в Чернівецькому держуніверситеті  
(274012, м.Чернівці, вул.Коцюбинського, 2)

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотечі  
Чернівецького держуніверситету  
(274012, м. Чернівці, вул. Л.Українки, 23)

Автореферат розісланий 26 квітня 1994 року

Вчений секретар спеціалізованої  
вченої ради КУРГАНЕЦЬКИЙ М.В.

ЛНБ України ім.В.Стефаника



00810502 (G)

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Лазерні методи обробки матеріалів знаходять все більш широке застосування в процесах виготовлення мікроелектронних приладів. Широкі діапазони зміни енергетичних і просторово-часових характеристик випромінювання оптичних квантових генераторів (ОКГ), простота спряження лазерного обладнання з вакуумним технологічним устаткуванням дозволяє проводити обробку надзвичайно широкого класу матеріалів в умовах високого вакууму.

Особливо інтенсивно вивчаються фізичні механізми і практичні аспекти нерезонансного впливу лазерного випромінювання на напівпровідникові матеріали. Така зацікавленість викликана тим, що під впливом висококонцентрованого випромінювання лазера в матеріалах виникають фізичні процеси і явища, які призводять до модифікації структури і електрофізичних властивостей. В першу чергу суди слід віднести:

- імпульсний лазерний відпал іонно-імплантованих напівпровідників;
- одержання омичних контактів;
- лазерне легування і формування бар'єрних структур;
- створення в кристалах гетерних шарів;
- структурні перетворення (аморфізація або кристалізація матеріалів) під впливом випромінювання;
- досягнення умов, за яких розчинність легуючої домішки значно перевищує рівноважну;

Велику практичну зацікавленість викликають дослідження взаємодії потужного лазерного випромінювання з кристалами та епітаксійними шарами (CdHg)Te (КРТ) у зв'язку з проблемами відпаду радіаційних дефектів в іонно-імплантованих шарах, формуванням бар'єрних структур і модифікацією електрофізичних властивостей цих матеріалів. Однак перші спроби в цьому напрямку були не настільки успішні, як у випадку обробки класичних напівпровідників - германію, кремнію чи арсеніду галію. Основна причина полягає в тому, що променева дія на кристали КРТ може супроводжуватися процесами переважачого випаровування одного з компонентів (як правило, Hg) з утворенням власних електрично активних дефектів. З іншого боку, дослідження цих процесів, стимульованих потужним світловим випромінюванням, є важливим для визначення граничних режимів фотоприймачів на основі КРТ в умовах сильного електромагнітного збурення, визначення ролі електрично активних дефектів, які при цьому утворюють-

ся, у формуванні бар'єрних структур, а також гетерування сторонніх домішок та точкових дефектів.

Об'єктами досліджень були обрані:

- монокристалічні зразки телуриду ртуті  $n$  і  $p$  типу провідності;
- власнодефектні монокристалічні зразки та епітаксійні шари  $(CdHg)Te$  складу  $0,19 < x < 0,46$   $n$  і  $p$  типу провідності;
- власнодефектні і леговані сріблом монокристалічні зразки телуриду кадмію різної кристалографічної орієнтації.

В дисертаційній роботі ставилося за мету на основі комплексних досліджень нерівноважних процесів нагріву, плавлення і кристалізації приповерхневих шарів кристалів системи  $CdTe-HgTe$  імпульсами лазерного випромінювання мілісекундної та наносекундної тривалості встановити закономірності структуроутворення, еволюції дислокаційної субструктури і зміни електрофізичних властивостей кристалів в зоні впливу, прогнозувати шляхи практичного використання нерівноважних процесів і станів, стимульованих лазерним випромінюванням, для цілеспрямованої модифікації структури і властивостей досліджуваних матеріалів.

Для досягнення цієї мети:

- проведені експериментальні дослідження динаміки імпульсного променевого нагріву, плавлення і кристалізації монокристалічного телуриду ртуті;
- методами рентгенівської фотоелектронної і оже-спектроскопії досліджені зміни хімічного складу і встановлені співвідношення компонентів в приповерхневих шарах опромінених зразків  $HgTe$ ,  $CdTe$  і твердих розчинів на їх основі;
- досліджені процеси дефектоутворення, еволюції дислокаційної субструктури монокристалів телуриду ртуті, телуриду кадмію і твердих розчинів  $(CdHg)Te$  та зміна мікротвердості цих зразків після імпульсної лазерної обробки (ІЛЮ);
- досліджені спектри фотолумінесценції та криві термостимульованого струму в опромінену телурид кадмію;
- досліджені електрофізичні властивості приповерхневих шарів  $(CdHg)Te$ , що піддавалися впливу лазерних імпульсів, та  $p$ - $n$  структура на основі КРТ, отриманих лазерною обробкою;
- розроблено нові способи формування інверсних шарів у власнодефектному телуриді кадмію-ртуті та методи інтенсифікації і оптимізації технологічних процесів виготовлення напівпровідникових структур з застосуванням лазерної технології.

### Наукова новизна роботи

1. Вивчені закономірності процесів плавлення-кристалізації легко дисоціюючих сполук телуриду ртуті і твердих розчинів телуриду кадмію-ртуті під дією імпульсного лазерного випромінювання. Встановлений механізм утворення комірчатих структур та дендритної кристалізації опромінених шарів при густинях енергії вище порогових.

2. Досліджені зміни співвідношення компонентів в приповерхневих шарах HgTe - CdTe до і після ІЛЮ. Встановлені термодинамічні умови, енергетичні та часові режими ІЛЮ, що забезпечують збереження стехіометрії та структурної досконалості опромінених шарів.

3. Досліджена еволюція дислокаційної субструктури на поверхні і по глибині зони впливу ІЛЮ на кристали системи HgTe-CdTe. Показана принципова можливість та встановлені умови керування товщиною зони з підвищеною густиною дефектів з метою створення гетерних шарів.

4. Вперше встановлено кореляції між характером змін мікротвердості, низькотемпературними спектрами фото- і термостимульованої люмінесценції та розподілом дислокацій, генерованих лазерним опроміненням в кристалах КРТ.

Практичне значення роботи полягає в створенні нових лазерних методів формування якісних, fotocутливих в ІЧ-області спектру бар'єрних структур на основі КРТ та гетерних шарів заданої товщини.

В тому числі:

- Запропонований спосіб створення інверсних шарів у власнодефектному телуриді кадмію-ртуті, який об'єднує в єдиний технологічний цикл ізотермічний відпал в насичених парах ртуті та ІЛЮ.

- Запропоновані способи керування глибиною термічного впливу лазерного випромінювання, що поєднують лазерну обробку з дією прикладеного температурного, магнітного і електричного полів, опромінення при падінні променя ОКГ під різними кутами до поверхні.

Новизна розроблених методик захищена трьома авторськими свідоцтвами на винаходи.

На захист виноситься:

1. Фізичні закономірності кінетики імпульсного лазерного нагріву, плавлення і кристалізації приповерхневих шарів монокристалів HgTe та твердих розчинів (CdHg)Te.

2. Фізико-технологічні закономірності формування в кристалах (CdHg)Te імпульсним лазерним випромінюванням областей з підвищеною концентрацією дислокацій.

3. Фізична модель і методика формування р-п структур в монокристалах і епітаксієвих шарах власнодефектних твердих розчинів (CdHg)Te під дією імпульсного лазерного випромінювання.

4. Фізичні закономірності впливу температурного, магнітного і електричного полів на ефективність лазерної обробки монокристалів системи HgTe-CdTe та характер модифікації структури і властивостей цих матеріалів під дією лазерного випромінювання.

#### Апробація результатів роботи

Основні результати дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на Всесоюзних науково-технічних конференціях: "Застосування лазерів в науці і техніці" (Ленінград, 1980, 1981, 1988, 1989 р.р.), IV Всесоюзній конференції "Потрійні напівпровідники та їх застосування" (Кишинів, 1983 р.), Всесоюзній нараді "Фізика та технічне застосування напівпровідників  $A_2B_6$ " (Вільнюс, 1983 р.), VII Всесоюзній конференції з процесів росту і синтезу напівпровідникових кристалів і плівок (Новосибірськ, 1986 р.), Всесоюзному симпозиумі "Напівпровідники з вузькою забороненою зоною і напівметали" (Львів, 1986 р.), Всесоюзному семінарі з фізики і хімії напівпровідників (Павлоград, 1987 р.), III Всесоюзній конференції "Застосування лазерів в технології та системах передачі і обробки інформації" (Таллін, 1987 р.), III Всесоюзній конференції "Застосування лазерів в народному господарстві" (Шатура, 1989 р.), Республіканській конференції "Фізика і хімія поверхні і границь розділу вузькощілинних напівпровідників" (Львів, 1990 р.).

Матеріали, що ввійшли в дисертацію, доповідалися на наукових семінарах Інституту прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача АН України та Інституту прикладної фізики Львівського державного університету ім. І.Я. Франка.

Публікації. Результати дисертаційної роботи опубліковані в 27 друкованих працях. Список публікацій, що відображають основний зміст досліджень, наведений в кінці автореферату.

Об'єм і структура дисертаційної роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, шести розділів, висновків і списку цитованої літератури (121 найменування). Зміст роботи викладено на 166 сторінках машинописного тексту, включаючи 52 малюнки і 1 таблицю.

У вступі обґрунтована актуальність дисертаційної роботи, вказана її мета і основні завдання: зформульована наукова новизна і практична цінність отриманих результатів, наведені основні наукові положення дисертації, що виносяться на захист. Коротко розкрито основний зміст розділів.

В першому розділі наводиться огляд літературних даних по взаємодії імпульсного лазерного випромінювання з напівпровідниковими матеріалами. Обговорюється адиабатичне та дифузійне наближення теплової моделі, а також роль атермічних факторів при лазерному відпалі. Зроблено висновок про те, що домінуючим механізмом, який визначає характер змін властивостей напівпровідникових матеріалів при дії потужного імпульсного випромінювання лазера, є нагрів речовини (теплова модель). Наведені результати теоретичних та експериментальних досліджень процесів, що протікають при лазерному відпалі іонно-імплантованих шарів в напівпровідниках, аналізуються відомі шляхи практичного застосування лазерної обробки напівпровідникових матеріалів з метою формування бар'єрних структур, омичних контактів та створення гетерних шарів.

В другому розділі описана методика підготовки зразків, схема стенду для лазерної обробки напівпровідникових кристалів і дослідження динаміки процесів нагріву, плавлення і кристалізації. Структура і морфологія поверхні до і після опромінення досліджувалася методами рентгенографії, оптичної і електронної спектроскопії. Для дослідження елементного складу поверхні та приповерхневих областей застосовувалися методи рентгенівської фотоелектронної спектроскопії, електронної оже-спектроскопії, електронно-зондового та рентгенівського мікроаналізів з використанням найсучаснішої апаратури: спектрометра HP-5950A; скануючого електронного мікроскопа Japm-10s; електронно-зондового мікроаналізатора Camebax та рентгеноспектрального мікроаналізатора Superprobe-773 фірми Jeol. Наведений опис лабораторних стендів, апаратури та методик дослідження фотолумінесцентних, електрофізичних, фотоелектричних та механічних властивостей приповерхневих шарів до і після опромінення, а також вимірів термостимульованих струмів в них.

В третьому розділі наводяться результати експериментальних досліджень динаміки імпульсного термопроменевого нагріву, плавлення і кристалізації монокристалічного телуриду ртуті. Експериментально встановлені величини порогу оптичної стійкості ( $E_p$ ) досліджуваних зразків. Показано, що  $E_p$  залежить від якості підготовки поверхні, її орієнтації і має значення: 1,5-1,7 Дж/см<sup>2</sup> для HgTe; 2,4 - 2,5 Дж/см<sup>2</sup> для (CdHg)Te (x=0,2) і 2,8-2,9 Дж/см<sup>2</sup> для CdTe.

Встановлено, що плавлення поверхневого шару починається з затримкою ~0,5 мс після початку дії лазерного імпульсу, а розплав існує ще до ~3 мс після її закінчення. Одержані експериментальні дані дали можливість оцінити швидкості термопроменевого нагріву і

кристалізації приповерхневого шару кристалів системи  $\text{HgTe-CdTe}$ , які становлять відповідно  $\sim 1,2 \cdot 10^6$  К/с та  $(0,5-0,7) \cdot 10^{-2}$  м/с.

При лазерній обробці кристалів  $\text{HgTe}$  розплавлений приповерхневий шар завжди збагачений телуrom за рахунок втрат більш летючої компоненти - ртуті. Відхилення від стехіометрії призводить до кристалізації в інтервалі температур, яка в нерівноважних умовах (високі швидкості охолодження) викликає концентраційне переохолодження розплаву. Завдяки виникненню концентраційної нестійкості на границі розділу твердої і рідкої фаз, фронт кристалізації має комірчасту структуру. Границі комірок внаслідок сегрегаційних процесів збагачуються телуrom. При аміні режимів опромінення в сторону зменшення градієнтів температури і швидкості кристалізації, спостерігається збільшення розмірів комірок, що дає можливість досягнути умов, за яких кристалізація відбувається без утворення комірчастої структури.

При падінні лазерного випромінювання під кутами, які відрізняються від нормальних, і густинах енергії  $\sim (1,5-1,8)$  Дж/см<sup>2</sup> на перекристалізованій поверхні  $\text{HgTe}$ , внаслідок інтерференційних явищ, спостерігаються лінійні періодичні структури з характерним масштабом, близьким до довжини хвилі ОКГ. Низький енергетичний поріг утворення таких структур дає перевагу  $\text{HgTe}$  над іншими матеріалами при формуванні на них дифракційних ґраток.

Збільшення густини енергії лазерного випромінювання до 5 Дж/см<sup>2</sup> і вище, призводить, окрім плавлення, до інтенсивного випаровування. Такі процеси, в свою чергу, стимулюють термопроменево травлення поверхні і збільшення швидкості кристалізації розплаву за рахунок охолодження поверхні при випаровуванні. Комірчастий ріст змінюється на дендритний - утворюються так звані "стовпчаті" структури.

Методами рентгенівської фотоелектронної та оже-спектроскопії досліджено зміни хімічного складу і співвідношення компонентів приповерхневих шарів в опромінених зразках. З аналізу отриманих спектрів випливає, що окрім основних елементів, на поверхні зразків до і після опромінення завжди присутній вуглець у вигляді адсорбованих атомів. При лазерній перекристалізації на повітрі поверхня частково окислена з утворенням, переважно, двоокису телуру. Відзначено, що здатність поверхні до адсорбції відносно вуглецю знижується після лазерної обробки в порівнянні з хімічно полірованою поверхнею, чи природніми сколами на  $\sim 60-70\%$ .

На поверхні зразків КРТ після хімічного травлення в бром-метанолі, а також після опромінення КРТ і  $\text{CdTe}$  лазерними імпульсами

наносекундної тривалості, незалежно від виду попередньої підготовки, спостерігається утворення півки телуру товщиною до 1,5 нм, завдяки стимульованим їю процесам дисоціації матеріалу, дифузії та десорбції атомів Hg і Cd. Лазерне опромінення цих матеріалів в режимі вільної генерації не призводить до такого ефекту.

Металографічні дослідження та рентгеноспектральний мікроаналіз поперечних сколів перекристалізованих мілісекундними лазерними імпульсами в вакуумі зразків КРТ виявили області з різною структурою та співвідношенням компонентів. Поверхневий шар розупорядкований до глибини 5-8 мкм, а утворенням, при цьому, аморфної та полікристалічної фаз і характеризується значним (до 15%) надлишком телуру та кадмію при відповідній втраті ртуті. За ним розміщений шар глибиною до 70 мкм з такими ж параметрами елементарної кристалічної ґратки, як і до опромінення.

При опроміненні в насичених парах ртуті (Т=500-600 К) процеси розкладання сполуки, втрати ртуті і розупорядкування приповерхневого шару не відбуваються.

Рекристалізація приповерхневих шарів КРТ лазерними імпульсами наносекундної тривалості, на відміну від опромінення в режимі вільної генерації, не призводить до змін елементного складу.

Четвертий розділ присвячений дослідженню процесів дефektоутворення і еволюції дислокаційної субструктури в кристалах HgTe, CdTe і (CdHg)Te, підданих імпульсній лазерній обробці. Показано, що при густинах енергій близьких до порога оптичної стійкості кристалів, недосконалості їх кристалічної будови та просторово-часова неоднорідність випромінювання призводять до генерації в приповерхневому об'ємі дислокацій з концентрацією до  $10^6$  см<sup>-2</sup>, монотонно спадаючою з глибиною. Утворення дислокацій обумовлюється термомеханічними напруженнями, що виникають внаслідок значних градієнтів температури (до 10 К/мкм) та нерівномірного теплового розширення кристалу в зоні впливу лазерного випромінювання. Механічні напруження, при певних величинах густини енергії лазерного випромінювання, можуть перевищити межу міцності матеріалу і призвести до порушення цілісності зразків. Розтріскування йде по кристалографічно орієнтованих площинах. Попередній підігрів зразків перед опроміненням до температури пластичної деформації практично усуває процеси тріщиноутворення.

Методами селективного травлення, оптичної і електронної мікроскопії сколів та поперечних шліфів, оплавлених лазерним випромінюванням кристалів КРТ, виявлена приповерхнева область глибиною

до 10 мкм з постійною густиною дислокацій  $\sim 10^8 \text{ см}^{-2}$ . За нею розміщена область сильної пластичної деформації з монотонним зниженням концентрації дислокацій до вихідної. Товщина її зростає до 70 мкм з ростом густини енергії і температури попереднього підігріву.

Лінійні дефекти структури не генеруються лазерними імпульсами наносекундної тривалості, а товщина переплавленої зони при цьому режимі опромінення не перевищує  $\sim 1,5$  мкм.

Зміна енергетичних режимів ІЛЮ і температури попереднього підігріву кристалів дає можливість ефективно і цілеспрямовано керувати глибиною залягання збуреного приповерхневого шару з підвищеною концентрацією дефектів з метою створення гетерних шарів та зміною глибини залягання інверсних структур, що формуються. Створений після дії лазерного випромінювання шар з підвищеною густиною дислокацій в CdTe:Ag в процесі відпаду на протязі 72 годин при 600 К призводить до суттєвого перерозподілу концентрації атомів срібла по товщині шару - з  $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  до  $3,1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$  в незбуреній частині кристалу.

Непрямим підтвердженням гетеруючої дії збуреного шару є суттєве, до трьох разів, збільшення мікротвердості поверхні CdTe:Ag, опроміненого при 600 К. "Атмосфера Котрелла", утворена з атомів срібла, утруднює міграцію дислокацій під дією зконцентрованого навантаження і зміцнює вихідний матеріал.

Досліджено спектри фотолюмінесценції та криві термостимульованого струму в опроміненіх зразках CdTe. Підтверджено чіткий взаємозв'язок інтенсивностей піків (1,4-1,42) еВ при 77 К та 1,47 еВ при 4,2 К з концентрацією дислокацій, індукованих лазерною дією. Характер кривих термостимульованого струму вказує на те, що в зразках CdTe після опромінення змінюється механізм захоплення носіїв на енергетичних рівнях в забороненій зоні.

При опроміненні зразків HgTe-CdTe без попереднього підігріву мікротвердість приповерхневих областей зростає в середньому на 20-30%, внаслідок генерації підвищеної густини лінійних дефектів і, починаючи з глибини 5-8 мкм залишається практично незмінною. У попередньо підігрітих до опромінення кристалів розподіл мікротвердості по глибині від поверхні за своїм характером аналогічний розподілу густини дислокацій - спостерігається монотонний спад з усьредненим градієнтом  $\sim 0,6 \cdot 10^7 \text{ Па/мкм}$ . З аналізу температурних залежностей мікротвердості визначені температури крихко-пластичних переходів для досліджуваних зразків. При лазерній обробці HgTe, (CdHg)Te ( $x=0,1-0,2$ ) і CdTe, підігрітих перед опроміненням відпо-

відно до 400, 400-450 і 500-600 К, тріщиноутворення практично не спостерігається.

П'ятий розділ присвячений дослідженню електрофізичних властивостей приповерхневих шарів після ІЛЮ і бар'єрних структур на основі (CdHg)Te.

Експериментально встановлено, що додаткова концентрація акцепторів в приповерхневому шарі зростає зі збільшенням густини енергії лазерного випромінювання і досягає значень  $10^{17} - 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . При цьому в кристалах КРТ з електронним типом провідності можна досягнути інверсії типу провідності.

Найбільш ймовірним механізмом інверсії типу провідності приповерхневих шарів власнодефектних твердих розчинів (CdHg)Te при ІЛЮ є генерація власних електрично активних дефектів структури і загартування їх нерівноважної високотемпературної концентрації в зоні впливу лазерного випромінювання. Цей процес протікає переважно за рахунок іонізації існуючих в кристалі нейтральних комплексів (типу атом телуру - вакансія ртуті - атом телуру), генерацією нових пар вакансія - міжвузловий атом, а також швидкоплинного процесу дифузії вакансій ртуті з поверхні в об'єм кристалу.

Запропоновано спосіб формування інверсних шарів у власнодефектному телуриді кадмію-ртуті. Процес створення n і p-областей в напівпровідниковій пластині з довільною вихідною концентрацією власних електрично активних дефектів проводиться в єдиному технологічному циклі у два етапи. На першому етапі тривалістю 50-100 годин проводиться ізотермічний відпал в насичених парах ртуті при температурі 520-720 К, що забезпечує одержання n-типу провідності по всьому перерізу пластини. Після цього, імпульсним лазерним випромінюванням поверхня пластини перегрівається на 100-200 К вище температури ізотермічного відпалу. Такий режим ІЛЮ не призводить до генерації дислокацій в приповерхневому шарі. Процес завершується охолодженням контейнера у воді. При опроміненні поверхні (2-ий етап) в приповерхневому шарі формується область p-типу провідності за рахунок загартування високотемпературної концентрації власних електрично активних дефектів (вакансій ртуті), що є результатом особливостей P-T-X діаграми станів власнодефектних твердих розчинів (CdHg)Te.

Вольт-амперні характеристики зформованих p-n структур мають вигляд типових діодних ВАХ, а характер залежностей ємності від величини зворотнього зміщення вказує на різкий профіль розподілу концентрації носіїв на межі p-n переходу. Пробій в зформованих p-n

переходах визначається в основному тунельним механізмом.

Глибина залягання р-п переходів, визначена за характером розподілу термо-е.р.с. по поверхні 7-градусних косих шліфів, становить 7-10 мкм для режиму вільної генерації та ~1,5 мкм для режиму модульованої добротності.

Зформовані структури є фоточутливими в ІЧ-області спектру, а максимумами фоточутливості відповідають складу матеріалу до опромінення.

Характер розподілу термо-е.р.с., результати дослідження концентраційних профілів методом ефекту поля в електролітах та аналіз донорно-акцепторних станів вказують на те, що при опроміненні в умовах, які призводять до генерації підвищеної концентрації дислокацій, але зменшують вихід ртуті, утворюються приповерхневі структури типу n-p'-p (для p-KPT) або n-p'-n (для n-KPT).

В шостому розділі наведено результати досліджень впливу зовнішніх полів (електричного і магнітного) та геометрії опромінення на процеси модифікації властивостей кристалів системи CdTe-HgTe і ефективність лазерної обробки матеріалів.

Показано, що використовуючи ефект квантування енергії електронів і збільшення ширини забороненої зони вузькозонних напівпровідників у сильному магнітному полі, можна суттєво змінювати коефіцієнт поглинання кристалів KPT ( $x < 0,25$ ) на довжині хвилі CO<sub>2</sub>-лазера (10,6 мкм), наприклад, від  $\sim 10^5 \text{ см}^{-1}$  ( $x=0,17$ ,  $H=0$ ) до  $10^2 \text{ см}^{-1}$  (при  $H=120 \text{ кЕ}$ ), що відповідає зміні глибини проникнення випромінювання від  $10^{-5}$  до  $10^{-2} \text{ см}$ .

Прикладене до зразка електричне поле ( $10^3$ - $10^5 \text{ В/см}$ ), в залежності від його напрямку, збільшує, або зменшує приповерхневу концентрацію носіїв за рахунок викривлення енергетичних зон (ефект поля). Зміна напруженості і напрямку електричного поля дає можливість керувати не тільки розігрівом широкозонного KPT довгохвильовим (10,6 мкм) лазерним випромінюванням, але й глибиною області термічного впливу випромінювання. Енергію випромінювання, що поглинається, можна концентрувати в приповерхневому шарі, на випадок необхідності проведення відпаду іонно-імплантованих шарів, або локальність впливу зменшувати, що необхідно для запобігання ерозії поверхні при ІЛЮ сполук, які легко дисоціюють.

Встановлено, що лазерна обробка напівпровідникових пластин, при падінні променя під кутом 10-70 градусів до поверхні, забезпечує "надлишковий" нагрів мішені, що дає можливість зменшити енергозатрати та керувати глибиною залягання р-п переходів.

На основі одержаних результатів досліджень запропоновано способи лазерної обробки напівпровідникових пластин в магнітному та електричному полях.

Приведено схеми реалізації запропонованих способів.

#### Основні результати і висновки

В дисертаційній роботі вивчено нерезонансний вплив потужного імпульсного лазерного випромінювання мілісекундної та наносекундної тривалості на структуру і електрофізичні властивості монокристалів та епітаксійних шарів телуриду ртуті, телуриду кадмію і твердих розчинів (CdHg)Te.

Досліджено динаміку нагріву, плавлення і кристалізації, процеси структуроутворення, еволюцію дислокаційної субструктури, морфології поверхні, механічні та електрофізичні властивості модифікованих лазерним випромінюванням шарів.

На основі одержаного експериментального матеріалу можна зробити наступні узагальнення та висновки.

1. Для твердих розчинів системи HgTe-CdTe існують три характерні інтервали густин енергії лазерного випромінювання мілісекундної тривалості, які відрізняються характером термопроменевого впливу та особливостями формування структури опроміненого приповерхневого шару кристалу:

- а - очистка поверхні і генерація електрично активних дефектів акцепторного типу;
- б - плавлення і кристалізація приповерхневого шару з утворенням комірчатої або 'стовпчатої' структури;
- в - дисоціація сполуки, випаровування та світлотермічне травлення поверхні.

2. Генерація дислокацій в приповерхневому шарі кристалу (густиною до  $10^8$  см<sup>-2</sup>) і їх розподіл тісно пов'язані з недоскональностями кристалічної будови вихідного матеріалу та термомеханічними напруженнями, що наводяться лазерним випромінюванням на межі збуреного та незбуреного шарів і вихідного матеріалу.

3. Тріщиноутворення в опроміненому шарі можна позбутися шляхом попереднього підігріву зразків до температури пластичної деформації, завдяки релаксації термомеханічних напружень.

4. Утворення комірчатих структур на перекристалізованій лазером поверхні досліджуваних зразків HgTe зумовлене появою надлишкового телуру і концентраційним переохолодженням розплавленого шару в умовах високих (до  $0,7 \cdot 10^{-2}$  м/с) швидкостей кристалізації. На межах комірок в наслідок сегрегаційних явищ матеріал збагачується телуром.

5. Конфігурація комірчатої структури поверхні HgTe залежить від густини енергії лазерного випромінювання та вихідної температури зразків. При інтенсивностях випромінювання вище  $5 \text{ Дж/см}^2$  комірчатий ріст змінюється на дендритний, супроводжуючись утворенням "стовпчатих" структур та ростом крихкості матеріалу за рахунок значних втрат ртуті.

6. Перекристалізований в вакуумі приповерхневий шар КРТ розупорядкований до глибини 5 - 8 мкм і характеризується суттєвим (до 15%) надлишком Te та Cd при відповідній втраті ртуті. Лазерна обробка зразків в насичених парах ртуті при ідентичних умовах лазерного опромінення блокує процеси дисоціації та втрати ртуті.

7. Кристалізація розплаву, утвореного при дії на КРТ лазерних імпульсів наносекундної тривалості не супроводжується генерацією додаткової концентрації лінійних дефектів і в об'ємі епітаксію перекристалізованого шару не спостерігається зміна елементного складу.

8. Додаткова концентрація акцепторів в опромінених зразках КРТ досягає значень  $10^{17}$ - $10^{18} \text{ см}^{-3}$ . При цьому в кристалах n-КРТ відбувається інверсія типу провідності приповерхневого шару з утворенням p-n структур, максимум fotocутливості яких відповідає складу вихідного матеріалу.

9. При фіксованій густині енергії лазерного випромінювання поєднання ІЛЮ з дією прикладеного температурного, електричного чи магнітного полів дає можливість керувати товщиною модифікованого шару з високою густиною лінійних дефектів.

10. Утворений в зоні лазерної дії шар з високою густиною лінійних дефектів є ефективним стоком для гетерування 'фонових' домішок в телуриді кадмію.

Основні результати дисертації опубліковані в роботах:

1. Загине́й А. А., Котля́рчук Б. К., Курило И. В., Пляцко Г. В., Савицкий В. Г. Изменение структуры и морфологии поверхности кристаллов теллурида ртути в зоне действия импульсов лазерного излучения // Поверхность. Физика, химия, механика. - 1986. - №. - С. 76-83.
2. Загине́й А. А., Котля́рчук Б. К., Курило И. В., Кушнир З. О., Савицкий В. Г. Морфологические особенности кристаллов теллурида ртути при импульсном лазерном отжиге // Известия АН СССР. Неорганические материалы. - 1987. - Т. 23. - №1. - С. 42-47.

3. Загине́й А. А. , Котля́рчук Б. К. , Курило И. В. , Кушнир З. О. , Савицкий Г. В. Особенности структурообразования слоев теллурида ртути при воздействии импульсов лазерного излучения // Физическая электроника. Респ. научно-техн. сборник. - Львов: Вища школа. - 1987. - Вып. 35. - С. 87-94.
4. Загине́й А. А. , Котля́рчук Б. К. , Савицкий В. Г. , Сторчун О. П. Электронно - зондовые методы исследования слоев  $Cd_xHg_{1-x}Te$ , перекристаллизованных лазерным излучением // Известия АН СССР. Серия физическая. - 1989. - Т. 53. - №4. - С. 745-748.
5. Загине́й А. А. , Котля́рчук Б. К. , Пляцко Г. В. , Савицкий В. Г. Особенности импульсной светолучевой перекристаллизации слоев теллурида кадмия-ртути // Известия АН СССР. Неорганические материалы. - 1989. - Т. 25. - №7. - С. 1108-1112.
6. Загине́й А. А. Светотермический отжиг и перекристаллизация поверхностных слоев  $HgTe$  // Материали IX конференції молодих учених Інститута прикладних проблем механіки і математики АН УРСР. - Львов. - 1984. - Деп. в ВІНИТИ, N 7196-84. - С. 78-82.
7. А. с. 762623 СССР, МКИ H 01 L 31/18. Способ создания p-n переходов в собственноефектном  $Cd_xHg_{1-x}Te$  / В. Г. Савицкий, Г. В. Пляцко, Л. И. Алексеенко, Б. К. Котля́рчук, А. А. Загине́й, И. З. Малинич. - 1979. - 6 с.
8. А. с. 1097129 СССР, МКИ H 01 L 21/04. Способ изготовления p-n переходов / Б. К. Котля́рчук, С. Г. Кияк, Г. В. Пляцко, А. А. Загине́й, Д. И. Попович. - 1982. - 6 с.
9. А. с. 1162342 СССР, МКИ H 01 L 21/268. Способ лучевой обработки полупроводниковых материалов на основе  $Cd_xHg_{1-x}Te$  ( $x < 0,25$ ) / В. В. Гафийчук, А. А. Загине́й, С. Г. Кияк, Б. К. Котля́рчук, Г. В. Пляцко, Г. В. Савицкий. - 1983. - 9 с.
10. Гафийчук В. В. , Загине́й А. А. , Котля́рчук Б. К. Особенности лазерной обработки полупроводников в электрическом и магнитном полях // Создание и использование лазерной техники и технологии в машиностроении и приборостроении: Тезисы докл. Респ. конф. - Киев. - 1985. - С. 105.
11. Савицкий В. Г. , Котля́рчук Б. К. , Сторчун О. П. , Загине́й А. А. Дефекты структуры в твердых растворах системы  $HgTe-CdTe$ , стимулированные лазерным излучением // Примеси и дефекты в узкозонных полупроводниках: Матер. Всесоюз. семинара по физике и химии полупроводников. - Павлоград. - 1987. - С. 157-160.
12. Загине́й А. А. , Савицкий В. Г. , Котля́рчук Б. К. , Мацко М. Г. , Сторчун О. П. Анализ структурных дефектов в модифицированном лазер-

- ным излучением теллуриде кадмия // Лазерная технология: Респ. научно-техн. сборник.- Вильнюс.- 1988.- Вып. 6.- С. 211.
13. Загиней А.А., Котлярчук Б.К., Савицкий В.Г., Сторчун О.П., Соколовский Б.С. Магнитоконцентрационный эффект в кристаллах теллурида кадмия-ртути, модифицированных лазерным излучением // Лазерная технология: Респ. научно-техн. сборник.- Вильнюс.- 1988.- Вып. 6.- С. 212.
14. Яфясов А.М., Перепелкин А.Д., Савицкий В.Г., Сторчун О.П., Котлярчук Б.К., Загиней А.А. Применение метода эффекта поля в электролитах к исследованию приповерхностных слоев облученного лазером КРТ // Физика и химия поверхности и границ раздела узкощелевых полупроводников: Тез. докл. Респ. конф. - Львов. - 1990.- С. 19.

*Велич*