

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ФІЗИКИ НАПІВПРОВІДНИКІВ

На правах рукопису

КОПШИНСЬКА Олена Петрівна

МОДИФІКАЦІЯ СТРУКТУРИ ТА
ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТВЕРДИХ
РОЗЧИНІВ $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ПРИ НАНОСЕКУНДНОМУ
ЛАЗЕРНОМУ ОПРОМІНЕННІ

01.04.10 - фізика напівпровідників та діелектриків

А в т о р е ф е р а т
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

К и ї в - 1 9 9 7



Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Інституті фізики напівпровідників НАН
України, м.Київ.

Наукові керівники: доктор фізико-математичних наук Мозоль П.О.
кандидат фізико-математичних наук Власенко О.І.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор
Сальков Є.А.
доктор фізико-математичних наук, професор
Гнатенко Ю.П.

Провідна установа: Київський університет ім.Т.Г.Шевченка, м.Київ.

Захист відбудеться “ 30 ” травня 1997 р. о 14.15 год.
на засіданні спеціальної вченої ради Д50.07.01
при Інституті фізики напівпровідників НАН України за
адресою: 252650 МСП, Київ 28, проспект Науки, 45.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Інституту
фізики напівпровідників НАН України.

Автореферат розісланий “ 24 ” квітня 1997 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
Д50.07.01

ИЩЕНКО С. С.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми.

Специфічні властивості лазерного випромінювання (висока інтенсивність, монохроматичність, короткочасність та локальність дії) знаходять все більш широке застосування на практиці для модифікації характеристик матеріалів, в тому числі і напівпровідників. Вивчення впливу лазерного випромінювання на дефектну структуру напівпровідників є частиною фундаментальної проблеми взаємодії потужних потоків енергії з речовиною. Інтерес до процесів лазерного дефектоутворення викликаний також необхідністю з'ясування причин деградації напівпровідникових елементів лазерної техніки і можливістю використання опромінення для направленої зміни параметрів матеріалів.

Велику практичну зацікавленість викликають дослідження взаємодії потужного лазерного випромінювання з кристалами та епітаксійними шарами (ЕШ) твердих розчинів (ТР) $Hg_{1-x}Cd_xTe$ (КРТ), які переважно використовуються в сучасній промисловості для виготовлення фотоприймачів в інфрачервоній (ІЧ) ділянці спектра. Актуальність цих досліджень обумовлена, в першу чергу, підвищенням вимог до просторової впорядкованості компонентів ТР, до вмісту точкових та макродефектів, фоточутливості матеріалу.

Однак перші спроби лазерної модифікації властивостей КРТ були не настільки успішними, як у випадку обробки класичних напівпровідників - германію, кремнію чи арсеніду галію. Одна з основних причин полягає в тому, що променева дія на кристали КРТ може супроводжуватися процесами переважаючого випаровування одного з компонентів (як правило, Hg) з утворенням власних електрично активних дефектів. Не повністю з'ясовано залежність результатів лазерної обробки від вихідної структури напівпровідників, немає однозначності в питаннях щодо накопичення дефектів, променевої стійкості, перерозподілу компонентів сполук при дії імпульсів лазерного випромінювання наносекундної тривалості. Останнє має велике значення у зв'язку з можливістю зміни складу ТР в приповерхневій області. Не без протиріч висвітлюється можливість направленої зміни фотоелектричних властивостей телуридів кадмію-ртуті при наносекундному лазерному опроміненні, хоча вказаний режим обробки дозволяє уникнути прогрівання об'єму матеріалу і трансформує властивості лише тонкого приповерхневого шару.

Дослідження процесів, стимульованих потужним світловим випромінюванням, є важливим для встановлення домінуючих механізмів лазерного дефектоутворення в напівпровідниках, визначення граничних

режимів фотоприймачів на основі КРТ в умовах сильного електромагнітного збудження, вивчення ролі електрично активних дефектів, що при цьому утворюються, у формуванні бар'єрних структур, а також гетеруванні сторонніх домішок та точкових дефектів.

Робота виконувалась згідно з постановами Президії АН України N321 від 29.03.91 р. "Дослідження динаміки нерівноважних дефектів, що обмежують функціональні параметри вузькощілинних напівпровідникових матеріалів та структур в процесі їх природної та стимульованої деградації" та N185д від 24.07.93 р. "Розробка технології виготовлення дослідних зразків радіаційних напівпровідникових приймальних елементів сенсорів УФ, видимого, ІЧ та рентгенівського випромінювання для систем контролю об'єктів у зоні ЧАЕС".

Мета роботи. На основі комплексних досліджень впливу імпульсів лазерного випромінювання наносекундної тривалості на ТР $Hg_{1-x}Cd_xTe$ різної вихідної будови вивчити закономірності дефектоутворення та можливості цілеспрямованої модифікації структури та властивостей досліджуваних матеріалів.

Для досягнення мети ставилися такі задачі:

1. Дослідження впливу дефектів, утворених під дією лазерного випромінювання потужністю як нижче, так і вище порога плавлення матеріалу, на фотоелектричні властивості ТР КРТ.

2. Вивчення змін морфології поверхні та структури ТР КРТ та $Hg_{1-x}Mn_xTe$, підданих дії наносекундних імпульсів лазерного випромінювання в широкому діапазоні густин енергії.

3. Встановлення зв'язку результатів експериментальних досліджень фотоелектричних та електрофізичних властивостей з вихідною дефектною структурою матеріалу при лазерному опроміненні.

4. Вивчення особливостей фотопровідності полікристалічних плівок КРТ, одержаних на альтернативних підкладках із GaAs та сафіру, при високих рівнях лазерного збудження.

5. Аналіз технологічних режимів наносекундної лазерної модифікації властивостей ТР КРТ для оптимізації їх фотоелектричних характеристик.

Об'єкти дослідження.

Для розв'язання поставлених задач об'єктами досліджень були обрані епітаксійні шари та полікристалічні плівки ТР КРТ різного складу, які були вирощені на підкладках з CdTe та альтернативних підкладках із сафіру і GaAs, а також монокристали твердих розчинів $Hg_{1-x}Cd_xTe$ та $Hg_{1-x}Mn_xTe$. Крім того вивченню підлягали полікристалічні плівки CdTe, що були одержані на сафірових підкладках і відрізнялись за товщиною та розміром кристалічних зерен.

Наукова новизна роботи

1. Експериментально визначено порогові густини енергії імпульсів випромінювання рубінового лазера наносекундної тривалості, що призводять до зміни морфології поверхні ТР КРТ та $\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ в залежності від складу зразків.

2. Показано, що обробка ВШ КРТ з комірковою будовою наносекундними лазерними імпульсами, як з допороговою, так і надпороговою інтенсивністю, викликає збільшення fotocутливості матеріалу та модифікацію виду спектра фотопровідності (ФП), що зумовлено відповідно геттеруючими властивостями меж комірок та зміною компонентного складу приповерхневої області ВШ КРТ.

3. Вперше показано роль лазерних ударних хвиль у підвищенні fotocутливості глибинних областей ВШ КРТ.

4. Показано, що лазерне опромінення кристалів HgMnTe п-типа з допороговою густиною енергії змінює фотоелектричні властивості за рахунок модифікації точково-дефектної структури приповерхневої області. Стимульоване лазером дефектоутворення при надпорогових густинах енергії лазерних імпульсів не викликає змін складу ТР HgMnTe на відміну від КРТ, що підтверджує існування більш стійкого зв'язку HgTe в названому матеріалі.

5. Вперше досліджено вплив лазерного випромінювання наносекундної тривалості на інтенсивність $1/f$ -шуму в монокристалах КРТ та встановлено зв'язок між змінами частотних характеристик шуму і переструктурою точково-дефектної структури зразків.

6. Вивчено фотоелектричні властивості полікристалічних плівок КРТ складу $x = 0,28$, вирощених на підкладках із сафіру і підданих збудженню лазерними імпульсами в широкому діапазоні густин енергії.

7. Вперше під час дослідження залежності лазерностимульованої ФП від інтенсивності випромінювання в полікристалічних шарах КРТ, вирощених на підкладках з GaAs , при високих рівнях збудження і лінійній генерації ННЗ виявлено перехід від квадратичного до лінійного каналу рекомбінації, що обумовлено впливом електрично активних границь зерен.

Практичне значення роботи

1. Встановлено залежність результатів лазерного впливу від вихідної дефектної структури ТР КРТ, що дозволило запропонувати спосіб збільшення fotocутливості та керування спектральним розподілом ФП ВШ КРТ з комірковою будовою, який полягає в обробці їх імпульсами лазерного випромінювання наносекундної тривалості в оптимально вибраному діапазоні інтенсивності випромінювання.

2. Вивчено вплив наносекундного лазерного випромінювання на

швидкість поверхневої рекомбінації в ТР КРТ і МРТ. При цьому встановлено, що компонентний склад ТР HgMnTe , на відміну від КРТ, не змінюється. Показано можливість використання лазерної обробки для оптимізації параметрів приповерхневого шару названих кристалів.

3. Показано, що ефект збільшення $1/f$ -шума, обумовлений виникненням точкових дефектів в кристалах n-КРТ після лазерного опромінення, може бути використано для контролю деградації елементів із КРТ в ІЧ-фотоприймачах.

4. Проведено дослідження властивостей полікристалічних шарів КРТ, вирощених на підкладках із сапфіру, які, завдяки високій фоточутливості, перспективні для розробки "теплих" фотоприймачів середнього ІЧ-діапазону.

Основні положення, висунуті на захист

1. Причиною суттєвого підвищення фоточутливості ЕШ КРТ з комірковою будовою при опроміненні їх наносекундними лазерними імпульсами є гетерування електрично активних точкових дефектів на стокі - межі комірок.

2. Зміна фотоелектричних характеристик кристалів КРТ і МРТ після опромінення наносекундними імпульсами рубінового лазера обумовлена трансформацією дефектної структури приповерхневого шару. При цьому для ТР КРТ має місце ефект збільшення ширини забороненої зони внаслідок зміни компонентного складу цієї області.

3. Перехід від квадратичного до лінійного каналу рекомбінації при високих рівнях збудження і лінійній генерації ННЗ, виявлений в залежностях лазерно-стимульованої ФП від інтенсивності випромінювання в полікристалічних шарах КРТ, вирощених на підкладках із GaAs , пов'язаний із впливом електрично активних міжзеренних границь.

4. Результати впливу наносекундних імпульсів рубінового лазера на ТР КРТ залежать безпосередньо від вихідної структурної досконалості об'єктів дослідження.

Апробація роботи. Матеріали дисертації доповідалися та обговорювалися на 3 республіканських і 11 міжнародних конференціях. У тому числі: Першій і Другій міжвузівських науково-методичних конференціях з проблем природничих наук (Полтава, 1992 і 1994); IV і V Міжнародних конференціях з фізики і технології тонких плівок (Івано-Франківськ, 1993 і 1995); II Українській конференції "Матеріалознавство та фізика напівпровідників змінного складу" (Ніжин, 1993); International Conference on Shallow Level Centers in Semiconductors (Berkley, CA, USA, 1994); First International Conference on Material Science of Chalcogenide and Diamond-Structure Semico-

nductors (Chernivtsi, Ukraine, 1994); The 186th Meeting of The Electrochemical Society, Inc. (Miami Beach, Fl., USA, 1994); IUMRS International Conference on Electronic Materials (Taiwan, 1994); International Symposium "Heterostructures in Science and Technology" (Wurzberg, Germany, 1995); 187 Spring Meeting of The Electrochemical Society, Inc. (Reno, Nevada, USA, 1995); International conference of SPIE (Kiev, 1995); The International School-Conference on Physical Problems in Material Science of Semiconductors (Chernivtsi, Ukraine, 1995); International conference of SPIE (Chernivtsi, Ukraine, 1996).

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 20 робіт, з яких 6 - статті в періодичних виданнях, 14 - тези доповідей на наукових конференціях.

Особистий внесок автора полягає у непосредній участі в проведенні експериментальних та теоретичних досліджень, в обговоренні та аналізі результатів робіт, у постановці спільно з науковими керівниками конкретних задач досліджень. Інші співавтори робіт вирощували кристали або брали участь у проведенні вимірювань.

Структура і об'єм роботи. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків і списку цитованої літератури. Матеріал викладений на 143 сторінках, включаючи 32 малюнки, 1 таблицю та бібліографію з 146 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У вступі обґрунтовується актуальність теми дисертаційної роботи, формулюється мета і задачі досліджень, вказується наукова новизна та практична цінність отриманих результатів, наведені основні наукові положення дисертації, що виносяться на захист. Реферативно викладений зміст дисертації та приведені відомості щодо апробації роботи.

У першому розділі наведено аналіз стану досліджень взаємодії лазерного випромінювання з напівпровідниками. Дається огляд сучасних уявлень про різноманітні механізми дефектоутворення, стимульованого лазерним випромінюванням. Особливий наголос зроблено на питаннях, які неоднозначно висвітлюються в літературі і потребують проведення подальших досліджень.

У другому розділі приводяться результати досліджень фотоелектричних та електрофізичних властивостей ЕШ КРТ, а також зміни структури та морфології поверхні при дії на них наносекундних імпульсів лазерного випромінювання в широкому діапазоні густини енергії E 0.02-0.64 Дж/см². Досліджувані в роботі епітаксійні шари n-типу були вирощені методом випаровування-конденсація-дифузія на підкла-

дках CdTe з областями малої розорієнтації $\sim 20^\circ$, мали ефективну концентрацію електронів $n_{\text{eff}} = 1.2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ і рухливість $\mu_{\text{eff}} = 6 \cdot 10^4 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ при $T = 77 \text{ К}$. Електронно-зондовий мікροаналіз сколу зразків виявив варізонну область товщиною $\sim 70 \text{ мкм}$ і квазіоднорідну $\sim 17 \text{ мкм}$ зі складом $x = 0.28$. Профілі концентрацій Hg, Cd і Te були одержані експериментально та розраховані в рамках теоретичної моделі ізотермічної парофазної епітаксії, основним рівнянням якої є рівняння дифузії. Показано, що шляхом зміни значення градієнту складу ТР можна одержати матеріал, фоточутливий лише в певній ділянці спектрального діапазону у відповідному атмосферному вікні.

Металографічними дослідженнями сколів зразків на глибині $\sim 50 \text{ мкм}$ було знайдено скупчення дефектів, які утворювали зону підвищеної рекомбінації ННЗ, що спричинювало спад фоточутливості в діапазоні 2.7–4.0 мкм спектрів ФП, збуджуваних з боку підкладки. В цих спектрах проявлялися два максимуми, які були зумовлені фоточутливостями перехідної CdTe-КРТ і квазіоднорідної областей. Інтенсивність першої була більша в ~ 5 раз за величину довгохвильової (ДХ) смуги. Спектри ФП ЕШ, освітлюваних з боку КРТ мали о-подібний вигляд, характерний для випадку підвищеної рекомбінації на поверхні.

Методами оптичної та електронної мікроскопії показано, що обробка ЕШ КРТ з $E < E_p \approx 0.16 \text{ Дж/см}^2$ не призводить до порушень поверхні. При опроміненні з $E > E_p$ розвивається процес плавлення тонкого поверхневого шару. Кількісний рентгеноспектральний аналіз показав, що склад x на поверхні опроміненних з $E > E_p$ зразків змінюється у бік зменшення HgTe. В спектрах комбінаційного розсіювання світла з'являються смуги, що відповідають кристалічному телуру. Виділення надлишкового Te, який являє собою тонку ($\sim 30 \text{ нм}$) плівку, відбувається внаслідок збіднення приповерхневої області ТР ртуттю.

Обробка ЕШ імпульсами лазерного випромінювання з густиною енергії, що спричиняє плавлення поверхні, призводить до наступних змін у спектрах ФП, збуджуваних з боку КРТ: 1) зростання сигналу ФП в ~ 25 раз у максимумі спектра; 2) зсув максимуму і ДХ краю в короткохвильовий (КХ) бік на $\sim 26 \text{ мєВ}$; 3) підняття КХ крила з тенденцією до формування плато на ділянці спектру 2.0–4.5 мкм. В спектрах зразків, освітлюваних зі сторони підкладки, таке опромінення викликає подальше зростання ДХ смуги і переважання її над інтенсивністю КХ смуги.

Польова залежність коефіцієнта Холла $R(H)$ при опроміненні ЕШ не змінюється, залишаючись типовою для n-КРТ. Слабка залежність ефективної концентрації від температури в області низьких T вказує на сильно легований КРТ, в якому переважає домішкова провідність.

Лазерне опромінення ЕШ з допороговою густиною енергії практично не впливає на величину і характер $n_{\text{eff}}(T)$ і $\mu_{\text{eff}}(T)$. Збільшення E призводить до зменшення концентрації і росту рухливості, які при $E = 0.64 \text{ Дж/см}^2$ досягають значень $n_{\text{eff}} = 1.5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ і $\mu_{\text{eff}} = 2.4 \cdot 10^5 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ ($T=77 \text{ К}$). Падіння концентрації може бути обумовлено двома причинами. Перша пов'язана з гетеруючими властивостями меж комірок і стимульованою лазером сегрегацією електрично активних домішок та власних точкових дефектів на стоки, якими є області малої розорієнтації, з наступною деактивацією дефектів (рекомбінацією). Друга причина зменшення n_{eff} обумовлена тим, що в результаті поглинання лазерного випромінювання відбувається термічна і акустична активація меж комірок, що спричинює генерацію на них і в прилеглих до них областях вакансій ртуті. Останні є акцепторами і призводять до компенсації донорних центрів на межах комірок.

Модифікація електрофізичних параметрів внаслідок лазерності-мультимодальної десорбції і сегрегації на стоки міжвузлової ртуті, а також в результаті зміни електронного стану меж комірок через генерацію вакансій ртуті є основною причиною росту ФП при опроміненні ЕШ лазерними імпульсами з густиною енергії вище порогу плавлення матеріалу. КХ зсув максимумів і ДХ краю спектрів ФП ЕШ КРТ, як показали розрахунки, не може спричинюватись лише утворенням приповерхневого шару з більшою шириною забороненої зони, пов'язаного зі зміною складу ТР та виникненням напруг в пружно деформованих областях. В результаті стимульованої лазером активації меж комірок відбувається підвищення фоточутливості глибинних шарів з більшою E , на що вказує незмінність положення ДХ краю і фоточутливості при стравлюванні опромінених зразків на глибину до 9 мкм. Теоретично доведено, що максимально активізуються ті області ЕШ, в яких зформувався передній фронт лазерних ударних хвиль.

Рентгенівськими дифрактометричними і топографічними дослідженнями встановлено зв'язок описаних вище змін властивостей ЕШ КРТ з перебудовою реальної структури приповерхневої області при лазерній обробці. В залежності від дози опромінення відбувалася модифікація кривих дифракційного качання, зумовлена зміною складу і структурної досконалості ТР. Лазерне опромінення з різною густиною енергії не змінює структуру КРТ на глибині ~ 20 мкм, а на топограмах, сформованих з глибини з ~ 3 мкм призводить до модифікації виду меж комірок, зміні їх контрасту, появі недифрагуючих областей. Це пов'язується з процесами сегрегації точкових дефектів до меж комірок і на інші протяжні дефекти, покращенням однорідності комірок, зняттям деформаційних полів. Відсутність значних змін структури і "вуалі" на

топограмах ЕШ після опромінення свідчать про збереження кристалічної фази на досліджуваній глибині ЕШ. Перекристалізація відбувається в області менше 1 мкм.

У третьому розділі представлені результати лазерного опромінення імпульсами наносекундної тривалості монокристалів ТР КРТ складу $x=0.2$ та ТР $\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ ($x=0.11$), що мали n-тип провідності. Експериментально визначена порогова густина енергії лазерного випромінювання для кристалів КРТ названого складу, була близькою до значення, вказаного для ЕШ КРТ, і складала $E_{\text{п}}=0.14$ Дж/см². Плавлення поверхні зразків МРТ відбувалось при вищих густинах енергії ($E > 0.18$ Дж/см²), що говорить про більшу променеву стійкість цього матеріалу. Лазерна обробка монокристалів КРТ при допорогових густинах енергії ($E_{\text{п}} \approx 0.05$ Дж/см²) модифікувала структуру приповерхневої області, про що свідчило зниження швидкості поверхневої рекомбінації: для вихідних зразків швидкість рекомбінації на поверхні складала $s_1=3.5 \cdot 10^9$ с⁻¹, після опромінення їх з енергією E_1 значення цієї величини знизилось до $s_2=8.3 \cdot 10^2$ с⁻¹. При густинах енергії, близьких до порогового значення ($E_2 \approx 0.12$ Дж/см²), відбувалось зменшення сигналу ФП та зміщення максимуму і ДХ краю спектра в бік коротких хвиль, обумовлене зміною складу ТР за рахунок зменшення вмісту HgTe та ущільненням приповерхневих шарів лазерно-стимульованими ударними хвилями. Про збільшення числа точкових дефектів (за припущенням вакансій Hg) свідчило також зростання інтенсивності $1/f$ шуму, який описувався співвідношенням Хоуге, та зміщення його характеристик в сторону більш високих частот.

Опромінення кристалів МРТ імпульсами лазера з допороговою густиною енергії збільшувало фотопровідність в КХ області. Це пояснювалось лазерним очищенням поверхні від окисних плівок, відпалом залишкових структурних недосконалостей, що приводило, в свою чергу, до зменшення швидкості поверхневої рекомбінації. У випадку, коли енергія лазерних імпульсів перевищувала поріг плавлення матеріалу ($0.18 < E < 2.32$ Дж/см²), спостерігалось поступове зниження сигналу ФП на всьому проміжку fotocутливості (майже в 10 раз). Положення максимуму та ДХ краю спектра ФП при цьому залишалось сталим на відміну від кристалів та ЕШ КРТ.

З поведінкою сигналу ФП корелюють температурні залежності часу життя ННЗ τ . При опроміненні кристалів МРТ з допороговими енергіями температурна характеристика мало відрізняється від такої для вихідних зразків, де в області власної провідності спостерігалась задовільний збіг експериментально визначеного та теоретично розрахованого часу життя для процесу Оже-рекомбінації, а в області

низьких температур ($T < 190$ К) рекомбінація відбувалась через домішковий акцепторний рівень з енергією активації $E_a \approx 12$ меВ. Після опромінення зразків зі зверхпороговими густинами енергії спостерігалось зменшення в середньому на півпорядка та зміщення його температурної залежності в області власної провідності в сторну низьких температур. Це свідчило про збільшення лазерностимульованих дефектів, в тому числі дислокацій, та про зростання концентрації ННЗ. Швидкість поверхневої рекомбінації, порівняно з допороговим опроміненням, зростала на порядок.

В четвертому розділі розглянуто залежність фотоелектричних властивостей від особливостей структури полікристалічних (ПК) шарів КРТ, вирощених на альтернативних підкладках із сапфіру та GaAs, при високих рівнях лазерного збудження. Додатково вивчався характер ФП ПК плівок CdTe, які використовуються як буферні шари при епітаксiальному вирощуванні КРТ.

Дослідження спектрів ФП ПК шарів КРТ n-типу ($x=0.28$), одержаних на підкладках із сапфіру, показало, що fotocутливість зразків по порядку величини є аналогічною до кристалів і ЕШ КРТ того ж складу. Різкий ДХ край спектрів при $T = 77$ К та 300 К свідчив про високу однорідність шарів. В той же час область біля підкладки досконаліша за структурою, на що вказував підйом КХ частини та подвійне розширення спектральних кривих при збудженні з боку підкладки. Це викликано різницею між швидкостями рекомбінації на поверхні та в районі дифузійної границі КРТ/CdTe.

Вивчення люкс-амперних характеристик (ЛАХ) ПК шарів КРТ при обох варіантах збудження імпульсами Nd-лазера показало, що при невисоких інтенсивностях лазера ЛАХ зразків лінійні, а за умов високої інтенсивності збудження ($I > 10^{20}$ см⁻²·с⁻¹) ЛАХ стає сублінійною з нахилом $\sim 1/3$, характерним для механізму Оже-рекомбінації.

При вивченні фотоелектричних і електрофізичних властивостей ПК шарів КРТ складу $x=0.8$, які були вирощені методом випаровування-конденсація-дифузія на підкладках із GaAs з попередньо нанесеним буферним шаром CdTe, одержані наступні результати. Розподіл компонентів ТР по товщині шару КРТ був неоднорідним, про що говорить поява характерного для CdTe максимуму та похилий ДХ край спектра ФП. З метою дослідження механізмів протікання струму аналізувались температурні залежності ефективних концентрації n_{eff} та рухливості μ_{eff} , а також електропровідності σ та сталої часу релаксації фотоструму $\tau(T)$. В області високих температур залежності $n(T)$ і $b(T)$ мають активаційний характер з однаковою енергією активації $E_a = 112$ меВ. При зниженні температури енергія активації $n(T)$ зменшується

до $E_g = 32$ меВ, а провідність задовільно описується співвідношенням Мотта, характерним для сильнолегованих напівпровідників. Локалізовані стани поблизу рівня Фермі в нашому випадку можуть утворюватися дефектами структури (границями зерен). Розбіжності в температурних залежностях n і o пояснюються тим, що електропровідність визначається механізмом перенесення струму по міжзеренній границі, а концентрація, визначена з ефекту Хола, відображає механізм протікання струму по зернам. Температурні залежності рухливості та часу релаксації не носять активаційного характеру, що може вказувати на бар'єрний механізм ФП ПК шарів КРТ. Існуванням потенційних бар'єрів на границях зерен можна пояснити наявність довготривалих релаксацій ФП на сублінійних ділянках ЛАХ, вимірених при збудженні ПК шарів КРТ імпульсами рубінового лазера при $T = 300$ К. При високих рівнях збудження і лінійній генерації ННЗ виявлено перехід від квадратичної до лінійної рекомбінації. Зміна механізмів рекомбінації та одночасне різке зниження τ свідчить про зняття міжзеренних бар'єрів, які при невисоких рівнях збудження обмежували процеси генерації-рекомбінації ННЗ в межах зерен. Зняття бар'єрів дозволяє носіям струму рекомбінувати на міжзеренних границях. Зміна каналів рекомбінації та збільшення ФП може відбуватися за рахунок значного підвищення концентрації та частково рухливості ННЗ.

При вивченні спектрів ФП та ЛАХ полікристалічних плівок $CdTe$, які були вирощені на підкладках із сапфіру і мали розміри зерен від 0.2 до 50 мкм, виявлено вплив розміру зерен полікристалів на фотоелектричні характеристики. Підвищення фоточутливості при лазерному опроміненні світлом із області власного поглинання спостерігалось для зразків обох типів.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

У роботі вивчено вплив імпульсів випромінювання рубінового лазера тривалістю 20 нс на дефектну структуру ТР $Hg_{1-x}Cd_xTe$ різної вихідної будови. Досліджено зміни фотоелектричних та електрофізичних властивостей, які обумовлені модифікацією системи точкових дефектів при лазерному опроміненні ТР. Згідно з науковими положеннями, висунутими на захист, на основі представленого експериментального матеріалу і теоретичних розрахунків можна зробити такі узагальнення і висновки.

1. Порогова густина енергії лазерних імпульсів наносекундної тривалості для ТР КРТ ($x \approx 0.2-0.3$), що призводить до порушення морфології поверхні, плавлення і зміни складу приповерхневого шару, складає $E_n \approx 0.16$ Дж/см².

2. Плавлення і перекристалізація ТР КРТ при обробці наносекун-

ндними імпульсами лазерного випромінювання з $E > E_n$ відбувається у приповерхневій області товщиною менше 1 мкм. При цьому на поверхні утворюється тонка (~ 30 нм) плівка телура.

3. Дія наносекундних імпульсів випромінювання рубінового лазера на ЕШ КРТ з комірковою будовою викликає збільшення fotocутливості, обумовлене сегрегацією дефектів на області малої розорієнтації та зміною електронного стану границь комірок.

4. Обробка наносекундними лазерними імпульсами ТР КРТ призводить до зміщення максимуму та ДХ краю спектра ФП в КХ сторону, що свідчить про збільшення ширини забороненої зони приповерхневої області внаслідок зміни її складу до зменшення HgTe.

5. Лазерна активація та перебудова дефектної структури опромінених ЕШ на глибині, що значно перевищує глибину поглинання лазерного випромінювання і довжину теплової дифузії, викликана переважною дією лазерно-стимульованих ударних хвиль.

6. Лазерне опромінєння більш досконалих за структурою кристалів КРТ і $Hg_{1-x}Mn_xTe$ ($x \approx 0.1$) з допороговими густинами енергії не змінє fotocутливості зразків та сприяє покращенню стану їх поверхні, що проявляється в зниженні швидкості поверхневої рекомбінації та збільшенні часу життя ННЗ.

7. Під дією лазерного випромінювання з пороговою густиною енергії в кристалах КРТ генеруються дефекти (за припущєнням вакансії ртуті), які є причиною посилення $1/f$ шуму.

8. Обробка кристалів МРТ з густинами енергії $E > E_n$ модифікує дефектну структуру, що проявляється у зменшенні часу життя ННЗ та зміні характеру його температурних залежностей. Наслідком цього є зниження fotocутливості матеріалу. Незмінність положєння максимуму та ДХ краю спектра ФП говорить про збереження складу ТР.

9. Досліджено властивості нового матеріалу - полікристалічних шарів КРТ, вирощєних на підкладках із сапфіру, які можуть бути використані для виробництва "теплих" фотоприймачів середнього ІЧ-діапазону.

10. Перехід від квадратичної до лінійної рекомбінації при високих рівнях лазерного збудження і лінійній генерації ННЗ, виявлений при вивченні ЛАХ полікристалічних шарів КРТ/GaAs, пов'язаний з наявністю електрично активних міжзеренних границь і обумовлений зміною каналів рекомбінації ННЗ.

11. Виявлено вплив розміру зерен полікристалів на фотоелектричні характеристики вихідних та опромінєних лазерними імпульсами полікристалічних плівок CdTe, вирощєних на сапфірових підкладках.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ ОПУБЛІКОВАНІ У РОБОТАХ:

1. Власенко А. И. , Гнатюк В. А. , Копишинская Е. П. и др. Влияние особенностей структуры эпитаксиальных слоев $Cd_xHg_{1-x}Te$ на электрофизические и фотоэлектрические свойства при лазерном облучении// Физ. и техн. полупроводников. 1993. -Т. 28. -N 11/12. -С. 1820-1829.
2. Власенко А. И. , Гнатюк В. А. , Копишинская Е. П. и др. Изменения структуры и морфологии слоев $Cd_xHg_{1-x}Te$ при наносекундном лазерном облучении// Поверхность. Физ. Хим. Механика. 1994. N 2. С. 60-66.
3. Mozol P. E. , Borsch V. V. , Kopishynskaya E. P. et al. Photoelectrical properties of $Cd_xHg_{1-x}Te$ epitaxial layers irradiated by nanosecond laser pulses// Semiconductor Science and Technology. 1995. -V. 10. -N. 1. -P. 61-64
4. Власенко А. И. , Гнатюк В. А. , Копишинская Е. П. и др. Фотоэлектрические свойства поликристаллических слоев $Cd_xHg_{1-x}Te$ на сапфире // Неорганические материалы. - 1995. - Т. 31. - N 10. - С. 1335-1337.
5. Kopishynskaya E. P. , Gnatyuk V. A. , Mozol P. E. , Vlasenko A. I. Effect of nanosecond laser irradiation on defect structure and surface morphology of $Cd_xHg_{1-x}Te$ epitaxial layers// Proc. IUMRS Int. Conf. on Electronic Materials (D). -Taiwan, 1994. P. 132-137.
6. Babentsov V. N. , Mozol P. E. , Vlasenko A. I. , Kopishynskaya E. P. A complex diagnostic of CdTe after under threshold laser irradiation by photoluminescence, photoconductivity and electrophysical methods// Proceed. SPIE. Kiev, Ukraine. -1995. -Vol. 2648. P. 369-376.
7. Власенко А. И. , Гнатюк В. А. , Копишинская Е. П. и др. Влияние мощного лазерного излучения на дефектную структуру и свойства слоев $Cd_xHg_{1-x}Te$ //Матер. IV Междунар. конф. "Физика и технология тонких пленок". Украина, Ивано-Франковск. -1993. -Ч. 1. -С. 107
8. Борщ В. В. , Гнатюк В. А. , Копишинська О. П. и др. Вплив потужного лазерного опромінення на морфологію поверхні та структуру епітаксіальних шарів $Cd_xHg_{1-x}Te$ //Тези допов. II Української конф. "Матеріалознавство та фізика напівпровідників змінного складу". Ніжин. 1993. Ч. II. С. 145.
9. Власенко А. И. , Гнатюк В. А. , Копишинская Е. П. и др. Влияние процессов взаимного легирования на фотоэлектрические свойства слоев $Cd_xHg_{1-x}Te$, выращенных на подложках GaAs// Тези допов. II Української конф. "Матеріалознавство та фізика напівпровідників змінного складу". Ніжин. 1993. Ч. II. С. 242
10. Борщ В. В. , Гнатюк В. А. , Копишинська О. П. Фотопровідність полікристалічних шарів $Cd_xHg_{1-x}Te/GaAs$ при високих рівнях збудження// Матер. II міжвуз. наук. -методич. конф. з проблем природничих наук.

- Полтава. 1993. С. 16-18
11. Borshch V. V. , Gnatyuk V. A. , Kopishynskaya E. P. et al. Spectroscopic studies of laser-irradiated ZnSe crystals// Abstr. Booklet of The Inter. Conf. on Shallow Level Centers in Semiconductors. Berkley, CA, USA. 1994. P. 117.
 12. Борщ В. В. , Гнатюк В. А. , Копишинская Е. П. , Мозоль П. Е. Роль областей малой разориентации в процессе лазерного фотоочувствления эпитаксиальных слоев $Cd_xHg_{1-x}Te$ // Abstr. of The First Intern. Conf. on Material Science of Chalcogenide and Diamond-Structure Semiconduct. Chernivtsi. Ukraine. 1994. Vol. II. P. 115.
 13. Borshch V. V. , Gnatyuk V. A. , Kopishynskaya E. P. Photoelectrical parameters formation in $Cd_xHg_{1-x}Te$ layers by laser pulses// Extend. Abstracts of 186th Meet. of The Electrochem. Soc. , Inc. The Second Intern. Symp. on Long Wavelength Infrared Detect. and Arrays: Phys. and Appl. Miami Beach, Fl. USA. 1994. Vol. 94-1. Abst. No 223. P. 282-283.
 14. Babentsov V. N. , Kletskii S. V. , Kopishynskaya E. P. et al. Complex defects generated in VPE HgCdTe/CdTe heterostructures during growth and laser annealing// Proceed. Int. Symp. "Heterostructures in Sci. and Techn.". Wurzburg, Germany. - 1995. - P. 74-75.
 15. Borshch V. V. , Gnatyuk V. A. , Kopishynskaya E. P. Photoelectrical application of laser irradiation for control of $Cd_xHg_{1-x}Te$ semiconductor parameters //Extend. Abstr. of Spring Meeting of The Electrochem. Society, Inc. Reno, Nevada, USA. 1995. Vol. 95-1. Abst. No 143. P. 226-227.
 16. Mozol P. E. , Kopishynskaya E. P. , Gnatyuk V. A. , Vlasenko A. I. Modification of defect structure and photoelectrical properties of VPE $Hg_{1-x}Cd_xTe/CdTe$ layer under nanosecond laser irradiation //Abstr. Intern. School-Conf. on Physical Problems in Mater. Sci. of Semiconductors. Chernivtsi, Ukraine. 1995. P. 122.
 17. Borshch V. V. , Gnatyuk V. A. , Kopishynskaya E. P. Influence of laser-induced shock waves on photoelectrical properties of epitaxial $Cd_xHg_{1-x}Te$ films// Матер. V Міжнар. конф. з фізики і технології тонких плівок. Івано-Франківськ, Україна. 1995. Ч. II. С. 199.
 18. Власенко А. И. , Гнатюк В. А. , Копишинская Е. П. и др. Особенности фотопроводимости поликристаллических слоев $Cd_xHg_{1-x}Te$ и пленок CdTe при импульсном лазерном возбуждении// Матер. V Міжнар. конф. з фізики і технології тонких плівок. Івано-Франківськ, Україна. 1995. Ч. II. С. 232.
 19. Babentsov V. N. , Kopishynskaya E. P. , Mozol P. E. et al. Structural defects of VPE HgCdTe/CdTe heterostructures created and laser

annealed// Матер. V Міжнар. конф. з фізики і технології тонких плівок. Івано-Франківськ, Україна. 1995. Ч. I. С. 85.

20. E. P. Kopishynskaya, P. Y. Mozol, A. I. Vlasenko, I. M. Rarenko. Influence of nanosecond laser irradiation on photoelectrical properties of $Hg_{1-x}Mn_xTe$ // Spie-The Intern. for optical engineering "Material science and material properties for infrared optoelectronics". Uzhgorod, Ukraine. 1996. P. 129.

Копишинская Е. П. Модификация структуры и фотоэлектрических свойств твердых растворов $Hg_{1-x}Cd_xTe$ при наносекундном лазерном облучении. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 - физика полупроводников и диэлектриков, Институт физики полупроводников НАН Украины, Киев, 1997 г.

Защищается 20 научных работ, в которых приводятся результаты исследования влияния импульсов излучения рубинового лазера длительностью 20 нс на дефектную структуру ТР $Hg_{1-x}Cd_xTe$ различного состава и исходного структурного совершенства. Изучены изменения фотоэлектрических и электрофизических свойств, обусловленные модификацией системы точечных дефектов при лазерном облучении. Показаны возможные пути оптимизации фотоэлектрических характеристик ТР КРТ методом наносекундной лазерной обработки.

Kopishynska O. P. Modification of Structure and Photoelectric Properties of $Hg_{1-x}Cd_xTe$ Solid Solutions under Nanosecond Laser Irradiation. The thesis for scientific candidate's degree in physics and mathematics on speciality 01.04.10 - semiconductor and insulator physics, Institute of Semiconductor Physics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 1997.

20 scientific works are defending. The influence of ruby laser pulses of 20 ns duratuion on the defect structure of $Hg_{1-x}Cd_xTe$ Solid Solutions with different initial perfection is investigated. The changes of photoelectric and electrophysic properties caused by laser modification of the point defects structure are studied. The possibilities for optimisation of the $Hg_{1-x}Cd_xTe$ alloys photoelectric characteristics by means of laser treatment are showed.

Ключові слова: телурид кадмію-ртуті, лазерне випромінювання, густина енергії, фоточутливість, фотопровідність

Е. П. Копишинська

Підписано до друку 09.04.97р. Формат 60x84/16.
Ум. друк. арк. 1,0. Обл.-вид. арк. 1,0.
Наклад 100. Зам. 114.

Відділ оперативної поліграфії
Центру Міжнародної освіти
227-12-75, 227-37-86

435527

AB 37.418