

Чернівецький національний університет
імені Юрія Федьковича

Яковина Віталій Степанович

УДК 621.315.592

**ВПЛИВ ІНДУКОВАНИХ ЛАЗЕРНИМ ВИПРОМІНЮВАННЯМ УДАРНИХ ХВИЛЬ НА
СТАН ДЕФЕКТІВ У ВУЗЬКОЩІЛИННИХ ТВЕРДИХ РОЗЧИНАХ $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ТА $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$**

(01.04.10 – фізика напівпровідників і діелектриків)

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Чернівці – 2002

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі напівпровідникової електроніки Національного університету "Львівська політехніка".

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, професор
Берченко Микола Миколайович,
Національний університет "Львівська політехніка",
професор кафедри напівпровідникової електроніки

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник
Паранчич Степан Юрійович,
Чернівецький національний університет,
професор кафедри фізичної електроніки і нетрадиційної енергетики
кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник
Котлярчук Богдан Костянтинович,
Інститут прикладних проблем механіки і математики НАН України,
м. Львів,
провідний науковий співробітник

Провідна установа: Інститут фізики напівпровідників НАН України, м Київ

Захист відбудеться 22 березня 2002 р. о 15⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 76.051.01 при Чернівецькому національному університеті імені Юрія Федьковича за адресою: 58012, м. Чернівці, вул. Коцюбинського, 2.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича (58012, м. Чернівці, вул. Лесі Українки, 23).

Автореферат розісланий 22 лютого 2002 р.

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради _____

Курганецький М.В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Інтенсивний розвиток інфрачервоної фотоелектроніки та її використання в різноманітних сферах людської діяльності (у системах спостереження, оптичному зв'язку, медицині, спеціальній апаратурі та ін.) зумовили новий якісний рівень вирішення задач, пов'язаних з реєстрацією та контролем параметрів навколишнього середовища, досліджуваних процесів і об'єктів. Саме це і стимулювало пошук та розробку нових напівпровідникових матеріалів та структур, фоточутливих в ІЧ-області спектру, зокрема у вікні прозорості атмосфери 8-14 мкм.

Найширше застосування в цьому зв'язку знайшли вузькощілинні напівпровідникові тверді розчини на основі бінарних сполук II-VI та IV-VI. На цей час для названих матеріалів розроблені ефективні технології як вирощування досконалих монокристалів та епітаксійних шарів, так і створення різного типу приладних структур. Залишається актуальним пошук методів та засобів управління параметрами як вихідних матеріалів, так і структур на їх основі, що б дозволило покращити експлуатаційні параметри приладів та їх надійність. Ураховуючи низьку температурну стабільність усіх халькогенідів, особливо слід виділити методи нетермічної активації технологічних процесів, одним з яких і є методи лазерної обробки матеріалів.

Вплив індукованих імпульсом лазерного випромінювання ударних хвиль – лазерних ударних хвиль (ЛУХ) на матеріали завдяки їх зручності у використанні, технологічності та широким можливостям змінювати параметри ЛУХ за допомогою зміни параметрів лазерного випромінювання досить широко досліджували протягом останніх двох десятиліть. Проте основні акценти робили на зміни механічних параметрів металів під дією ЛУХ, а як засіб впливу на напівпровідники ЛУХ ще не знайшли широкого застосування. При цьому в більшості досліджень вивчали комплексний вплив як теплової та світлової дії імпульсів лазерного випромінювання, так і ЛУХ. Отже вплив на напівпровідники саме ЛУХ, без термічної дії лазера залишається практично недослідженим. Особливо це актуально у випадку вузькощілинних напівпровідників, зокрема твердих розчинів $Hg_{1-x}Cd_xTe$, в яких навіть найменший нагрів призводить до суттєвих змін параметрів матеріалу.

Як бачимо, у той час як процеси взаємодії лазерного випромінювання з напівпровідниками, і вузькощілинними зокрема, досить широко і детально досліджені, процеси ударностимульованого дефектоутворення та модифікації властивостей напівпровідників залишають широке поле для досліджень.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалась відповідно до планів наукової діяльності кафедри напівпровідникової електроніки Національного університету "Львівська політехніка" в рамках наукової теми "Вивчення явищ переносу та дефектоутворення в напівпровідникових структурах".

Мета і задачі дослідження. Метою роботи було встановлення основних закономірностей впливу лазерних ударних хвиль на вузькощілинні напівпровідники та границі розділу на їх основі для вивчення можливості управління дефектною структурою та цілеспрямованої модифікації властивостей цих напівпровідників.

Для досягнення мети необхідно було розв'язати такі основні задачі досліджень:

- з'ясувати механізм перебудови системи точкових дефектів монокристалів $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ та епітаксійних шарів $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ під дією ЛУХ;
- вивчити вплив ударної обробки на протяжні дефекти та механічні напруження у цих же вузькощілинних напівпровідниках;
- дослідити механізми перебудови границь розділу анодний оксид – $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$, метал І групи – $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ та $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ – CdTe .

Об'єктом досліджень були об'ємні монокристали $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ n -та p -типів провідності, плівки $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}/\text{CdTe}$ та епітаксійні шари $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}/\text{BaF}_2$.

Предметом дослідження – вплив ЛУХ на електрофізичні, фотоелектричні та механічні характеристики об'ємного та плівкового матеріалу та на властивості й структуру границь розділу на їх основі.

Для досягнення мети використовували такий комплекс експериментальних методів, як вимірювання польових залежностей ефекту Холла, вимірювання часу життя неосновних носіїв заряду (ННЗ) та його температурної залежності, вимірювання мікротвердості та її розподілу по глибині матеріалу, дослідження картин селективного травлення по глибині зразків та дислокаційних розеток навколо відбитка індентора, вимірювання вольт-амперних характеристик гетеропереходів $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ – CdTe , дослідження величини напружень в епітаксійних шарах $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}/\text{BaF}_2$ шляхом вимірювання кутових залежностей магнетоопору.

Наукова новизна одержаних результатів

1. Установлено, що основними процесами при взаємодії ЛУХ з вузькощілинними ТР $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ та $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ є дефектоутворення за Френкелем та ударнохвильовий відпал точкових дефектів.

2. Уперше показано відмінність домінуючого прояву механізму взаємодії ЛУХ зі системою точкових дефектів $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ залежно від одного з двох варіантів ударної обробки, а саме генерації ЛУХ моноімпульсом лазерного випромінювання чи імпульсом, що складається з декількох пічків.

3. Показано, що ударна хвиля зменшує кількість різного типу макронеоднорідностей у матеріалах. Установлено, що ЛУХ є ефективним засобом зменшення відносного об'єму виділень іншої фази, як на основі матеріалів матриці, так і сторонніх атомів.

4. Уперше встановлено основні закономірності перебудови границі розділу анодний оксид – $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ під дією ЛУХ та вплив ударної обробки на термічну стабільність анодного оксиду.

5. Уперше показано зростання механічних напружень як в об'ємних кристалах $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$, так і в епітаксійних шарах $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ після ударної обробки.

Практичне значення одержаних результатів

1. Показано можливість цілеспрямованої нетермічної модифікації електрофізичних та фотоелектричних властивостей вузькощілинних напівпровідників за допомогою ударної обробки.

2. Установлено режими обробки для отримання зміни концентрації носіїв заряду в напрямку як *p-n*, так і *n-p* конверсії в монокристалах $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$.

3. Показано можливість покращання термічної стабільності структур анодний оксид – $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$, які є базовим елементом фоторезистивних приймачів.

4. Установлено, що епітаксійні шари PbTe , отримані методом миттєвого випаровування порівняно зі зразками, отриманими методом "гарячої стінки", мають більшу величину механічних напружень.

5. Підтверджено, що пасивація поверхні структур $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}/\text{BaF}_2$ анодним оксидом, на відміну від захисту шаром BaF_2 , практично не вносить змін у стан деформації матеріалу.

Особистий внесок здобувача. Дисертантом була проведена робота, пов'язана з пошуком та узагальненням наукових публікацій по темі дисертації, зроблена структуризація роботи. У працях [1-17] автор брав участь у постановці задачі, виготовленні зразків та у співдружності зі співавторами провів фізичну інтерпретацію виявлених ефектів та закономірностей. У роботах [1, 2, 5, 9, 10] проводив вимірювання орієнтаційних залежностей магнетоопору, математичну обробку результатів та моделювання. У працях [3, 4, 6, 7, 8, 11-17] проводив ударну обробку зразків, вимірювання гальваномагнітних ефектів, математичну обробку результатів та брав участь у фотоелектричних вимірюваннях [6, 12, 13, 15] та механічних дослідженнях [4], а також проводив анодування та відпал зразків [8].

Апробація результатів дисертації. Результати досліджень, поданих у дисертації, доповідались на наступних конференціях: "XXVI International School on Physics of Semiconducting Compounds" (Jazsowiec, Польща, 1997), IV International Conference on "Material Science and Material Properties for Infrared Optoelectronics" (Київ, 1998), E-MRS 1999 Spring Meeting (Strasbourg, Франція, 1999), V International Conference on "Material Science and Material Properties for Infrared Optoelectronics" (Київ, 2000), "XXIX International School on Physics of Semiconducting Compounds" (Jazsowiec, Польща, 2000), II Міжнародному Смакуловому симпозіумі "Фундаментальні і прикладні проблеми сучасної фізики" (Тернопіль, 2000), International Conference on Solid State Crystals – Materials Science and Applications (Zakopane, Польща, 2000), International Conference on

Optoelectronic Information Technologies "Optoelectronic Information – Energy Technologies" (Вінниця, 2001), Міжнародній конференції студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики ЄВРІКА-2001 (Львів, 2001), а також на щорічних відкритих конференціях науково-викладацького складу електрофізичного факультету (1998-2001) та семінарах кафедри напівпровідникової електроніки Національного університету "Львівська політехніка" (1997-2001).

Публікації. Основні результати дисертації опубліковані у 8 статтях та 9 тезах конференцій.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків та списку використаних джерел.

Дисертація викладена на 160 сторінках і містить 49 рисунків та 21 таблицю, а також список цитованої літератури зі 203 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обгрунтована актуальність теми досліджень, її зв'язок з науковими програмами, планами і темами, сформульована мета і визначені задачі досліджень, показана наукова новизна і практичне значення одержаних результатів. Там само приведені відомості, пов'язані з апробацією результатів дисертації.

Перший розділ дисертації є оглядовим. Він присвячений стислому літературному огляду власних точкових дефектів у твердих розчинах $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ та $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$, а також електрично активних протяжних дефектів у $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$. Наведені літературні дані щодо взаємодії лазерного випромінювання з напівпровідниками, зокрема впливу ЛУХ на фізичні властивості кристалів. Також розглянуто зміни зонної структури багатодолинних напівпровідників типу $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ під дією одновісної деформації.

У **другому розділі** описано використані експериментальні методики. Описано методику генерування ЛУХ імпульсами випромінювання неодимового лазера тривалістю 30 нс через прозоре конденсоване середовище. Показано, що умови експерименту обрано такими, щоб уникнути теплової дії лазерного випромінювання. Наведено методику вимірювань ефекту Холла, часу життя ННЗ, мікротвердості та виявлення картин селективного травлення, зняття орієнтаційних залежностей магнетоопору та анодного оксидування поверхні $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$. Крім того, у розділі описано модель магнетоопору в кубічних кристалах у випадку порушення кубічної симетрії, за якою в подальшому розраховували значення механічних напружень в плівках $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}/\text{BaF}_2$ на основі вимірювання кутових залежностей магнетоопору.

У **третьому розділі** наведено результати гальваномагнітних, фотоелектричних та механічних властивостей монокристалів $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ після дії ЛУХ. Там само проаналізовано результати

досліджень впливу ЛУХ на структури з макронеоднорідностями, а саме виділеннями іншої фази, та з границями розділу метал І групи – $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$.

Вплив ЛУХ на об'ємні монокристали $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ досліджували на зразках *n*- та *p*-типів провідності складу $x = 0.20 \div 0.25$. Концентрація електронів у зразках *n*-типу провідності становила $(1 \div 6) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ при 77 К, а їх рухливість – $(0.5 \div 2) \cdot 10^5 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. У зразках *p*-типу концентрація дірок становила $(5 \div 10) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, рухливість – $500 \div 600 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ при 77 К. Час життя ННЗ обмежувався механізмом рекомбінації Шоклі – Ріда (зразки *p*-типу) та Оже механізмом (більшість зразків *n*-типу).

Розглянуто два основні режими проходження ЛУХ через кристал. У першому режимі обробки ЛУХ генерувалась моноімпульсним випромінюванням лазера, у результаті чого через кристал проходила одна ударна хвиля. На відміну від першого другий режим спричиняє проходження через зразок декількох (від 2 до 4) ЛУХ з інтервалом між ними $50 \div 100$ мкс. Це досягали опроміненням структури імпульсом лазера, що складався з декількох пічків тривалістю по 30 нс з інтервалом $50 \div 100$ мкс. Усі експерименти з ударної обробки провадили за кімнатної температури.

Насамперед відзначимо пороговий характер змін параметрів кристалів. Крім того, з експериментів випливає, що поріг відчутних змін, взагалі кажучи, є індивідуальним для кожного зразка (можливо навіть для різних зразків, вирізаних з однієї шайби). Хоч узагальнюючи, можна стверджувати, що ЛУХ-обробка з тиском у фронті меншим 0.4 ГПа для будь-якого зразка $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$, не приводить до змін, які можна зафіксувати за допомогою явищ переносу. Таку "індивідуальність" порогу ЛУХ ми пояснюємо відмінностями в структурі протяжних дефектів різних вихідних зразків.

Показано, що проходження через об'ємні монокристали $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ як *n*-, так і *p*-типів однієї ЛУХ приводить до збільшення концентрації електронів у зразку та зменшення концентрації дірок при майже незмінній їх рухливості. Це свідчить про відсутність зміни механізму розсіювання у досліджуваному матеріалі під дією ударної обробки. За такого режиму обробки час життя ННЗ залишається майже незмінним чи слабо зростає (у більшості зразків *n*-типу) або помітно зростає в зразках *p*-типу (від 0.5 до 1.5 мкс і навіть 3.5 мкс після дії ЛУХ). При цьому після ударної обробки не спостерігали зміни механізму рекомбінації ННЗ.

Слід зауважити, що при дослідженнях $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ найпомітніші зміни завжди були у зразках *p*-типу. Цей факт цілком очевидно пояснюється тим, що електрофізичні параметри матеріалу *p*-типу визначаються станом електрично активних власних точкових дефектів, домінуючого впливу на які насамперед і слід очікувати в умовах ударної обробки.

На відміну від описаної ситуації, обробка в багатопічковому режимі роботи лазера спричиняє зменшення концентрації електронів у всіх зразках з одночасним збільшенням концентрації дірок (зі збереженням співвідношення $n_i^2 = n \cdot p$) аж до *n-p* конверсії. Зазначимо, що глибина конверсії сягає

принаймні 100 мкм, що перевіряли пошаровим хімічним травлюванням із наступним вимірюванням ефекту Холла. У зразках, оброблених у такому режимі, спостерігали зменшення часу життя ННЗ (для зразків *p*-типу – вдвічі). При цьому також не спостерігаємо зміни механізму розсіювання носіїв заряду та механізму рекомбінації ННЗ.

Механічні дослідження монокристалів $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ провадили шляхом вимірювання мікротвердості та селективного травлення розеток свіжих дислокацій, утворених при індентуванні кристалів.

У всіх експериментах виявлено зміцнення зразків після дії ЛУХ. Величина зміцнення становить 10.2, 9.4 і 7.2 % для зразків груп **A**, **B** і **B**, які піддавали ударній обробці з тиском у фронті ЛУХ 1.7, 0.8 та 0.5 ГПа відповідно. Таким чином, встановлено, що величина зміцнення корелює з тиском фронту ЛУХ.

Відбитки наносили на поверхню зразків після дії ЛУХ і протравлювали для виявлення картин дислокаційних розеток. Сумарний розмах протилежних променів l у цих умовах становить приблизно 82, 89, 92 мкм у зразках **A**, **B** і **B** відповідно. Отже, встановлена кореляція між довжиною променів розеток і тиском у фронті ЛУХ – чим більший тиск фронту, тим менша довжина променів розетки. Можна стверджувати, що внаслідок дії ударних хвиль створюється такий стан у кристалічній ґратці, за якого затруднюється переміщення дислокацій.

Зміцнення кристалів $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ внаслідок генерації дислокацій під дією ЛУХ ударної хвилі малоімовірно, тому що для зміцнення кристала на 10÷20 % потрібно збільшення густини дислокацій на кілька порядків. У наших експериментах селективне травлення не виявляє збільшення густини дислокацій, а лише їх блокування.

Для зразків партій **A**, **B** і **B** значення стартового напруження руху дислокацій τ_s (МПа), обчислені з використанням значень l для розеток, одержаних травленням відбитків, нанесених до і після дії ЛУХ, становлять відповідно: 3.81 і 5.26 МПа; 3.45 і 4.42 МПа та 3.57 і 4.15 МПа.

Таким чином, встановлено, що дія ЛУХ спричиняє збільшення стартового напруження руху дислокацій, що корелює з фактом зміцнення матеріалу під дією ЛУХ.

Виходячи зі загальноприйнятих положень щодо стану дефектів у монокристалах $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$, ми вважаємо, що механізм взаємодії ЛУХ зі системою дефектів вузькощілинних твердих розчинів $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ полягає в наступному: під дією надлишкової енергії за флуктуаційним механізмом утворюються власні точкові дефекти френкелівського типу, а існуючі та утворені точкові дефекти набувають енергії, достатньої для їх міграції в об'ємі напівпровідника. При цьому, на відміну від термічної генерації, під флуктуаціями розуміємо не зміну енергії, а варіації стану найближчого оточення дефекту (оточення іншими точковими дефектами, комплекси, наявність поблизу протяжних дефектів, тощо).

Отже, можна стверджувати, що в наших експериментах є принаймні два прояви механізму взаємодії ЛУХ із монокристалами $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ залежно від режимів лазерного опромінення.

Першим проявом цього механізму є *низькотемпературний ударнохвильовий відпал власних точкових дефектів* під впливом надлишкової енергії, переданої від ЛУХ до точкового дефекту. Слід зауважити, що такий відпал вносить помітний вклад в умових обробки моноімпульсом лазера за кімнатної температури, коли більша частина введених точкових дефектів відпалюється. Під впливом надлишкової енергії дефекти на віддалі порядку дифузійної довжини можуть рухатись до стоків. Виявлене зменшення довжини променів дислокаційних розеток є наслідком взаємодії дислокацій з точковими дефектами. Оскільки основним дефектом в $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ є вакансія ртуті, то цей механізм повинен спричиняти зменшення компенсації матеріалу *n*-типу, що узгоджується з нашими експериментами. Крім того, стає зрозумілою індивідуальність порогового значення ЛУХ, після якого відбуваються відчутні зміни параметрів носіїв заряду в досліджуваних зразках – адже менша кількість дислокацій, малокутових границь та іншого роду стоків для точкових дефектів, за інших однакових умов, приведе до меншої кількості відпалених дефектів і, отже, до меншої зміни електрофізичних параметрів напівпровідника.

Другий прояв механізму взаємодії ударної хвилі з монокристалами $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ полягає в *утворенні точкових дефектів під дією ЛУХ*. Особливо сильно повинна взаємодіяти ЛУХ з атомами ртуті, оскільки ртуть, по-перше, найслабше зв'язана в ґратці $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$, а по-друге, ртуть є важчим елементом порівняно з іншими атомами матриці, а ефективність розсіювання ЛУХ на таких центрах значно більша. Цей механізм повинен найсильніше проявлятися в умовах проходження через кристал кількох ЛУХ. Тоді френкелівська пара вакансія ртуті – ртуть у міжвузлі не встигає рекомбінувати, і міжвузловий атом під дією наступної ударної хвилі (а імовірність розсіювання ЛУХ на міжвузловому атомі – дефекті – набагато більша, ніж на атомі у вузлі ґратки) може вийти на стоки. Відтак у кристалі повинна збільшуватись кількість вакансій ртуті, що спричиняє зміну типу провідності на дірковий.

Метою досліджень у наступному підрозділі було вивчення впливу ЛУХ на кристали $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ за наявності макронеоднорідностей, а також вивчення поведінки нерівноважної концентрації домішок, створеної на границі розділу метал І групи – $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ в умовах ударної обробки.

Як структури з макронеоднорідностями використовували плівкову структуру (110) *n*- $\text{Hg}_{0.73}\text{Cd}_{0.27}\text{Te}:\text{Br}/p\text{-CdTe}$. При цьому було вибрано зразок із виділеннями іншої фази, провідність яких значно більша за провідність матриці. Ізольовані виділення такого типу в $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ можна легко виявити з аналізу польових залежностей ефекту Холла при 300 та 77 К.

Результати розрахунків, в яких визначали відносний об'єм виділень *f*, а також параметри (концентрація і рухливість) носіїв заряду для зразка до і після ударної обробки наведені в табл. 1.

Виявлено збільшення питомої електропровідності зразка після ЛУХ обробки. Як добре видно з табл. 1, концентрація носіїв заряду помітно зменшується. Таке зменшення (оскільки концентрація носіїв в зразку визначається електрично активною домішкою бром) ми пов'язуємо з переведенням бром у електрично неактивний стан. Такий процес може відбуватися внаслідок утворення електронейтральних комплексів на основі бром або гетерування домішки на границі розділу плівка – підкладка. Суттєве зростання рухливості носіїв цілком відповідає більшому впорядкуванню в зразку після ударної обробки (зменшення відносного об'єму мікротріщин f – див. табл. 1) та зменшенню центрів розсіювання, пов'язаних з іонізованими домішками.

Крім гальваномагнітних досліджень були зняті вольт-амперні характеристики (ВАХ) структури. Можливість зняття ВАХ обумовлена гетеропереходом $n\text{-Hg}_{0.73}\text{Cd}_{0.27}\text{Te}/p\text{-CdTe}$, утвореним на границі розділу плівка – підкладка. Оскільки така границя розділу є просторовим дефектом великого розміру, слід очікувати суттєвого впливу ЛУХ на її параметри. Опосередковано такий вплив можна побачити на ВАХ при 77 К. Такі характеристики наведено на рис. 1.

Таблиця 1

Параметри носіїв заряду та мікротріщин у зразку $I-100$

Зразок	T, K	$\sigma, \text{Om}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$	n, cm^{-3}	$\mu_n, \text{cm}^2/(\text{B}\cdot\text{c})$	$f, \%$
вихідний	300	14.65	$4.48\cdot 10^{16}$	2 040	5.1
вихідний	77	48.24	$4.88\cdot 10^{16}$	6 180	4.8
після ЛУХ	300	22.18	$3.89\cdot 10^{16}$	3 560	< 0.4
після ЛУХ	77	59.14	$3.80\cdot 10^{16}$	9 720	0.9

Основною відмінністю ВАХ вихідного та обробленого гетеропереходів є зменшення зворотного струму та зростання напруги відсічки за прямого зміщення (рис. 1). Таку картину ми пов'язуємо насамперед зі зменшенням струмів втрат, які у вихідному зразку найімовірніше пов'язані зі шунтуючим впливом тріщин напівметалевої фази та дислокаціями навколо них. Зменшення відносного об'єму таких мікротріщин, яке спостерігали на основі аналізу гальваномагнітних вимірювань, на нашу думку і спричинило зменшення темного струму гетеропереходу. Зростання напруги відсічки (а отже, зростання висоти потенціального бар'єру гетеропереходу) також може бути пов'язано зі зменшенням відносного об'єму таких мікротріщин, а крім того, з упорядкуванням границі розділу плівка – підкладка.

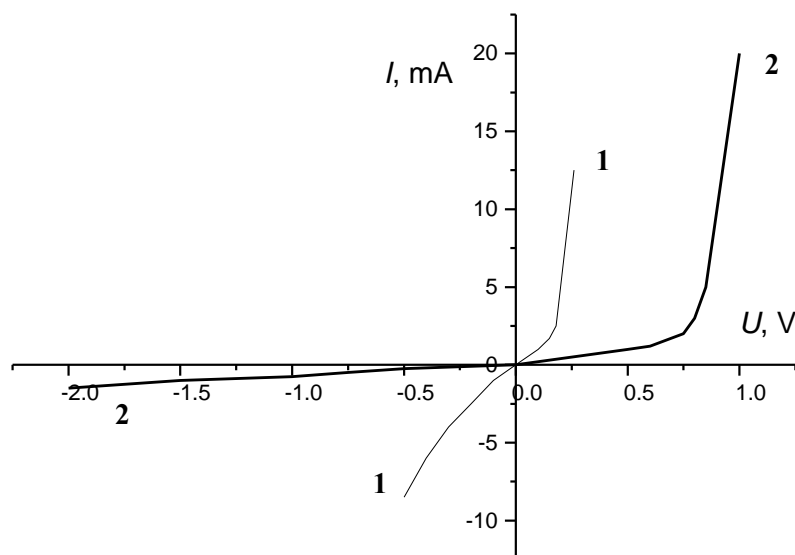


Рис. 1. ВАХ структури I-100 при 77 К до (1) та після (2) ударної обробки

Отже, ЛУХ ефективно впливає на кристали з макродефектами та на границю розділу $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te} - \text{CdTe}$. Тому для детальнішого вивчення цих явищ ми обрали структури у вигляді об'ємних монокристалів з нанесеними не поверхню товстими плівками металів I групи. Мідь та золото були хімічно осаджені на поверхню $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ відновленням міді зі сульфату та золота з хлориду.

Зразки досліджували шляхом зняття польових залежностей коефіцієнта Холла, а також вимірюванням мікротвердості по косому шліфу та селективним травленням поверхні шліфа. Косий шліф отримували витягуванням зразків з 0.75 % розчину Br_2 в метанолі. Крім того, були проведені контрольні вимірювання мікротвердості по косому шліфу зразка, підданого дії ЛУХ без плівок металів. Установлено, що такі зразки є однорідними щодо мікротвердості H_V (H_V в межах 479 - 492 МПа) без жодної кореляції з глибиною вимірювання. Отже сама по собі ударна обробка не створює різких змін мікротвердості по глибині зразка та особливостей картин травлення.

Для зразків з осадженою міддю без дії ЛУХ, підданих тривалій витримці за кімнатної температури, спостерігали конверсію типу провідності. Це добре узгоджується з дуже високим (навіть за кімнатної температури) коефіцієнтом дифузії атомів міді в $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ складу $x \approx 0.2$. Однак для всіх зразків, підданих дії ЛУХ, визначена з ефекту Холла концентрація акцепторів майже вдвічі більша за практично сталої рухливості дірок. Це дозволяє стверджувати, що ЛУХ сприяє або введенню більшої кількості міді в підґратку металу, або ж її дифузії вглиб зразка.

Однак аналогічні вимірювання зразків з хімічно осадженим золотом показали, що в межах точності експерименту електричні параметри зразків залишаються незмінними як до, так і після дії ЛУХ. Відсутність змін після дії ЛУХ свідчить про те, що на відміну від атомів міді, атоми золота не

входять у вигляді електрично активної домішки, або ж концентрація домішки (і відповідно глибина конвертованого шару) достатньо мала, щоб не фіксуватися на польових залежностях коефіцієнта Холла.

Для зразків з хімічно осадженим золотом, підданих дії ЛУХ селективне травлення виявляє чітку смугу дрібних преципітатів, яка повністю (і досить різко) зникає на певній глибині. У полі преципітатів H_V становить 518 та 531 МПа для двох досліджуваних зразків, тоді як на глибшій ділянці, вільній від преципітатів, $H_V = 475$ та 483 МПа відповідно.

Отже, ми вважаємо, що під дією ЛУХ відбулося проникнення золота з осадженої плівки в об'єм матеріалу, причому внаслідок великого градієнта тиску у фронті ЛУХ і різко нерівноважного характеру процесу, переважна частина золота входить в електрично неактивному стані як виділення іншої фази. На основі літературних даних ми вважаємо, що, скоріш за все, цією іншою фазою є $AuTe_2$, мікротвердість якого в межах 382÷774 МПа.

Інша картина отримана при дослідженні зразків, на які було осаджено плівку міді. Як показують результати гальваноманітних вимірювань, мідь дифундує в $Hg_{1-x}Cd_xTe$ за кімнатної температури і без дії ЛУХ. Жодних ознак границі розділу в зразках з впровадженою міддю, аналогічних зразкам зі золотом, виявлено не було.

Таку відмінність насамперед ми пов'язуємо з відмінністю процесів дифузії та ЛУХ обробки, пов'язаних з тим, що коефіцієнт дифузії міді набагато більший за коефіцієнт дифузії золота в $Hg_{1-x}Cd_xTe$. Отже ЛУХ обробка зразків із нанесеним шаром міді відбувалась за умови, що велика частина міді вже продифундувала в кристал. Відтак, у випадку зразків, легуваних міддю, дія ЛУХ насамперед повинна бути пов'язана з руйнуванням комплексів і асоціатів на основі міді, та, меншою мірою, з дифузією нових порцій домішки.

Це ілюструється великою кількістю порівняно великих мікропористих виділень (діаметром до 60 мкм) з малою мікротвердістю та дрібнозернистою структурою, які спостерігали на зразках, підданих ударній обробці. На нашу думку ці мікропористі виділення – залишки великих комплексів та асоціатів на основі міді, які були зруйновані ЛУХ. Адже на контрольному зразку таких виділень не помічено. Крім того, руйнування виділень іншої фази зі зменшенням їх відносного об'єму підтверджується результатами, отриманими на структурі *I-100* (див. вище).

Іншою характерною особливістю групи зразків, в які дифундувала мідь, є наявність великої кількості виділень іншої фази, мікротвердість яких $H_V \approx 353 \div 392$ МПа. Виділення іншої фази ми пов'язуємо насамперед (аналогічно випадку зі золотом) з утворенням телуриду міді.

Четвертий розділ присвячено вивченню впливу ЛУХ на границю розділу анодний оксид – $Hg_{1-x}Cd_xTe$ та термічну стабільність анодного оксиду.

Тут вивчали вплив ЛУХ на структури $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ з анодним оксидом за допомогою явищ переносу. Досліджували структури на основі зразків p -типу провідності, вирізаних з однієї шайби складу $x \approx 0.20 \div 0.22$, з вихідною концентрацією дірок $p \approx (6 \div 8) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

Досліджували три групи зразків, які нумерували як A , BA та $УХА$. Нумерація зразків відповідно означає, що зразки в цих групах були піддані наступним операціям обробки: група A – анодування + відпал без дії ЛУХ; група BA – анодне оксидування + ударна обробка зі зворотної поверхні + відпал; група $УХА$ – анодування + ударна обробка зі сторони оксиду + відпал. Відпал провадили за температури $150 \text{ }^\circ\text{C}$ на повітрі. Тривалість відпалу становила $1 \div 9$ год.

У першому підрозділі наведено основні дані щодо властивостей границі розділу анодний оксид – $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$, її модель та склад анодного оксиду. Там само розглянуто термічну стабільність границі розділу анодний оксид – $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ та описано механізм p - n конверсії приповерхневого шару напівпровідника при відпалі структур з анодним оксидом.

Наступний підрозділ присвячено вивченню впливу ЛУХ на границю розділу анодний оксид – $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$.

На початку наведено результати підготовчих досліджень. Установлено, що без відпалу анодний оксид створює тільки фіксований заряд і немає залишкового шару n -типу в об'ємі напівпровідника. Виявлено, що для вихідних зразків, не захищених шаром анодного оксиду, відпал на повітрі навіть протягом 9 год. при $150 \text{ }^\circ\text{C}$ змінює концентрацію дірок в напівпровіднику приблизно з $6 \cdot 10^{15}$ до $8 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, що при аналізі польових залежностей практично не впливає на визначення концентрації електронів.

Було виявлено, що ЛУХ обробка та наступне зняття шару оксиду також не змінює вигляду польової залежності коефіцієнта Холла, тобто проходження ЛУХ впливає тільки на фіксований заряд і не створює залишкового шару n -типу в об'ємі напівпровідника.

Величина зведеної до одиничної товщини концентрації електронів після ЛУХ обробки може як зменшуватись, так і збільшуватись.

Одержані результати пояснюємо насамперед впливом ЛУХ на вбудований заряд. Можна вважати, що після ЛУХ-обробки встановлюється певне значення вбудованого заряду в межах $(6.0 \pm 1.0) \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ і залежить скоріш за все від стану поверхні та дефектів кожного окремого зразка, незважаючи на те, що вони були оксидовані в одному процесі і вже потім оксидовану частину шайби різали на зразки. Ми вважаємо, що це значення відповідає певній рівновазі на границі розділу для конкретного зразка, причому наближення до цього "рівноважного" значення фіксованого заряду може спричиняти як його зменшення, так і зростання. Крім того, ударна обробка не змінює рухливості електронів, що добре узгоджується з відсутністю конвертованого шару в зразках з анодним оксидом, підданих ударній обробці, але без наступного термічного впливу, і

свідчить, що ці носії є тими ж "квазідвовимірними" електронами в інвертованому шарі, що створив анодний оксид і до ЛУХ обробки.

Після відпалу зведена концентрація електронів в усіх зразках зменшувалась, а їх рухливість зростала.

Зростання рухливості цілком логічно пояснюється тим, що після відпалу у виміряну концентрацію електронів входять концентрація квазідвовимірних електронів, розміщених в тонкому шарі, утвореному вбудованим зарядом в анодному оксиді, і рухливість яких не перевищує $25\ 000\ \text{см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, та концентрація об'ємних носіїв у шарі n -типу, що виник внаслідок дифузії ртуті з границі розділу анодний оксид – $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ з рухливістю носіїв в ньому не значно меншою від "нормальної" рухливості електронів для цих зразків.

Оскільки інтерпретація результатів у цьому разі досить утруднена через внесок у польові залежності коефіцієнта Холла принаймні трьох типів носіїв (а саме важких дірок, електронів у конвертованому шарі та квазідвовимірних електронів), це утруднює точне визначення параметрів кожного з них. Тому для коректності аналізу результатів на останньому етапі шар оксиду було знято з усіх груп зразків, і результати після відпалу порівнювали для зразків зі знятим анодним оксидом.

На рис. 2 показана зміна зведеної концентрації N електронів в зразках залежно від часу відпалу. Крива 1 для зразків групи A (без ударної обробки) якісно узгоджується з літературними даними, тобто зростає, виходить на максимум, а при подальшому збільшенні часу відпалу зменшується, як прийнято вважати внаслідок виснаження джерела вільної ртуті. У випадку ударної обробки з тильної (не оксидованої) поверхні зразка спостерігаємо незначне зменшення концентрації електронів та зміщення точки максимуму в сторону нижчих температур (зразки групи BA , крива 2 на рис. 2). Ті самі ефекти, але значно сильніше, проявляються за обробки ЛУХ зі сторони анодного оксиду (крива 3, рис. 2, зразки групи $УХА$). Вже при найменшому часі відпалу (1 год.), хоча конверсія поверхневого шару й відбувається, але зведена концентрація є на порядок меншою. Це дозволяє нам стверджувати, що глибина конверсії також є значно меншою. Зі зростанням тривалості відпалу до 2 год. 15 хв. N ще зростає, як і на кривих 1, 2, але вже при часі відпалу 4 год. спостерігаємо зменшення концентрації, яке бачимо на кривих 1, 2 за значно більших тривалостей відпалу.

Найімовірнішим вважаємо такий механізм взаємодії ЛУХ з границею розділу анодний оксид – $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$: при проходженні ЛУХ через границю розділу анодний оксид – $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ відбувається перебудова останньої, а саме:

- * елементарна ртуть та пов'язаний з нею заряд відтісняється від границі розділу з шару CdTeO_3 у вище розміщений шар;
- * відбувається утворення комплексів типу $(\text{HgTe} + \text{вакансія кисню})$ під дією ЛУХ;
- * HgTe акумулюється на границі розділу.

Відтак, утворення нових комплексів, по-перше, збільшує вбудований заряд (найімовірнішою ми вважаємо ситуацію, коли рухомий заряд відтісняється вглиб оксиду, тому залежно від співвідношення відведеного / утвореного заряду може відбуватись як збільшення, так і зменшення остаточного вбудованого заряду, який фіксуємо гальваноманітними дослідженнями), по-друге, перешкоджає дифузії елементарної ртуті з вище розташованого шару. Переміщення елементарної ртуті від границі розділу і є основною причиною зменшення концентрації електронів після відпалу в зразках підданих дії ЛУХ порівняно зі зразками без такого впливу. Деяке зменшення вбудованого заряду після відпалу, що може впливати на зменшення вимірної зведеної концентрації електронів, ми пов'язуємо з дифузією кисню з атмосфери в оксид.

Суттєву відмінність поведінки концентрації електронів після відпалу в зразках груп *ВА* і *УХА* ми пояснюємо тим, що при проходженні ЛУХ через усю товщину зразка (зі зворотної поверхні до границі розділу анодний оксид – $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ – зразки групи *ВА*) має місце затухання її амплітуди та, крім того, градієнт тиску напрямлений в протилежну сторону, що може впливати на переміщення ртуті чи утворення потенціального бар'єру.

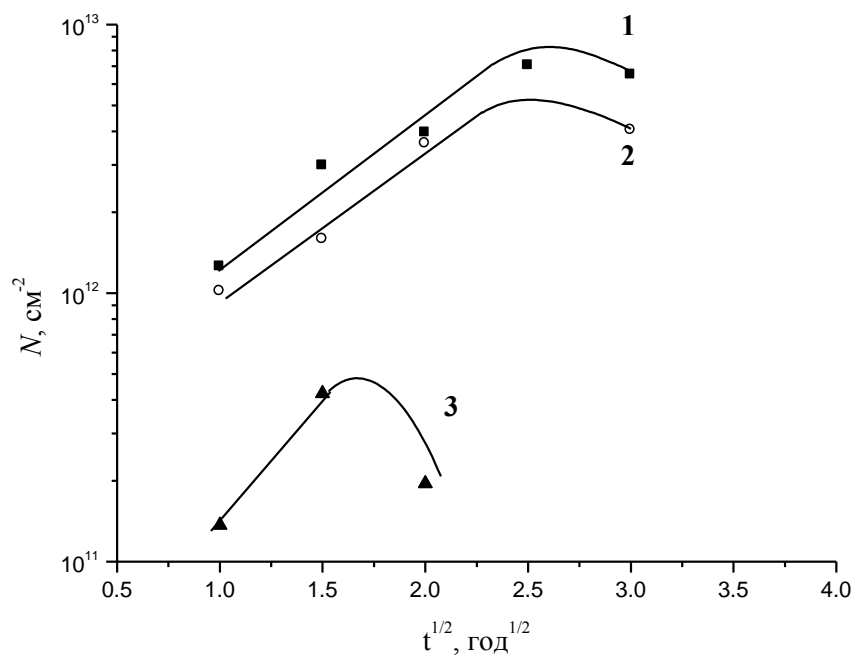


Рис. 2. Залежність зведеної концентрації електронів від часу відпалу для зразків груп *A* – крива 1; *ВА* – крива 2 та *УХА* – крива 3.

У п'ятому розділі наведено результати досліджень механічних напружень у вихідних плівках $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}/\text{BaF}_2$ з різними варіантами захисного покриття, яке також вносить зміни в стан напружень плівки, так і зміна цього стану під дією ЛУХ. В останньому разі однак, як і у дослідженнях $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$, треба було врахувати вплив ЛУХ і на точкові дефекти.

У цьому розділі досліджували зразки PbTe та $\text{Pb}_{0.213}\text{Sn}_{0.787}\text{Te}$ *n*- і *p*-типів провідності стандартної холлівської конфігурації завтовшки від 1.9 до 3.33 мкм. Епітаксійні шари були виготовлені методом миттєвого випаровування на свіжосколотих підкладках BaF_2 . Використовували також зразки, покриті шаром анодного оксиду та зі захисним шаром BaF_2 . Концентрація електронів у зразках *n*-типу становила $(0.75 \div 3.4) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ та їх рухливість $900 \div 1150 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ при 300 К. Провідність зразків PbTe *n*-типу визначалась станом електрично активних власних точкових дефектів, зразки $\text{Pb}_{0.213}\text{Sn}_{0.787}\text{Te}$ *n*-типу були леговані індієм в процесі росту. Параметри дірок за кімнатної температури у зразках $\text{Pb}_{0.213}\text{Sn}_{0.787}\text{Te}$ *p*-типу становили: $p = (3.5 \div 5.0) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, $\mu_p = 750 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ у власних та $150 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ у легованих талієм зразках.

Насамперед слід зазначити, що значення компоненти тензора деформації, які розраховували в цьому розділі на основі дослідження явищ переносу, носять скоріше відносний, ніж абсолютний характер. Це пов'язано з впливом геометричного магнетоопору, внеском розсіювання на неупорядкованостях у твердому розчині та з іншою симетрією зонної структури в матеріалі *p*-типу, що не враховується у використаній моделі. Однак, оскільки насамперед нас цікавили зміни механічних напружень у матеріалі під дією зовнішніх факторів, ця методика є цілком придатною для досліджень.

Показано, що значення деформації у досліджуваних зразках більші за літературні дані, отримані за цією ж методикою на зразках, вирощених методом гарячої стінки. Пояснення більшого значення напружень у наших зразках насамперед пов'язано з меншими товщинами плівок. Іншим чинником є відмінність технологій виготовлення. У методі миттєвого випаровування, на відміну від методу гарячої стінки, ріст відбувається швидше і в більш нерівноважних умовах, що і спричиняє появу додаткових напружень у плівці.

У шарах $n\text{-Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ за кімнатної температури деформація є трохи більшою, ніж в $n\text{-PbTe}$ ($\varepsilon_{11} = 46 \cdot 10^{-4}$). При цьому решта параметрів близькі до параметрів бінарної сполуки (за винятком коефіцієнта анізотропії K , значення якого зменшується, що добре узгоджується зі зонною структурою $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$, де із наближенням до безщілинного стану анізотропія зон зменшується).

Досліджували також зразки, на які були напилені плівки BaF_2 , які виконують в приладах функцію захисного покриття. З наших результатів однозначно видно, що покриття BaF_2 збільшує величину напружень у зразку (за кімнатної температури $\varepsilon_{11} = 67 \cdot 10^{-4}$). Охолодження спричиняє в таких зразках сильніші зміни деформації, ніж для зразків без захисного покриття.

Дослідження зразків, покритих шаром анодного оксиду різної товщини, показали, що такий вид пасивації поверхні не має помітного впливу на величину деформації в основному матеріалі, що добре узгоджується зі склоподібною структурою анодного оксиду.

У наступному підрозділі розглянуто вплив ЛУХ на електрофізичні параметри матеріалу *n*- та *p*-типів. У зразку *n*-типу спостерігаємо зростання концентрації електронів після ЛУХ обробки на

величину порядку $2.4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Після цього концентрація електронів релаксує в процесі витримки зразка на повітрі за кімнатної температури, але не досягає попереднього значення. Графік релаксації концентрації електронів після ударної обробки наведено на рис. 3. У зразку *p*-типу (легованому талієм) після ЛУХ обробки спостерігаємо аналогічні зміни, а саме – концентрація дірок зменшується на величину $\approx 2.0 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Однак релаксації параметрів носіїв заряду в цьому зразку не спостерігали. Отже, ударна обробка збільшує концентрацію електронів у зразках *n*-типу та зменшує концентрацію дірок в *p*-PbTe. Зразки *n*-типу це віддаляє від стехіометричного складу, а *p*-типу наближає. Тому зразки *n*-типу помітно релаксують з часом, а зразки *p*-типу майже ні.

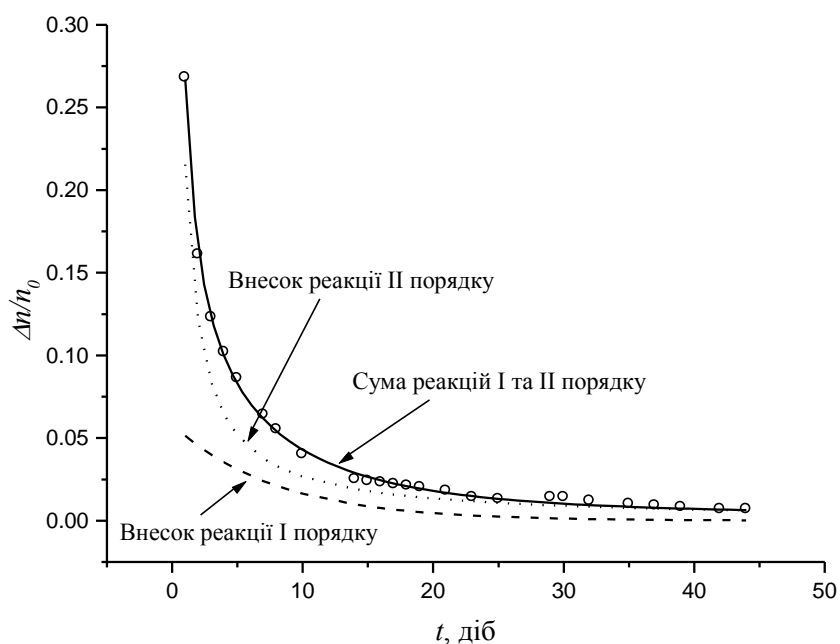


Рис. 3. Графік залежності $n / n_0 = f(t)$ релаксації концентрації електронів у зразку ПТ-314 після дії ЛУХ. Лінії – розрахунок за сумою реакцій I та II порядку та внесок кожного процесу

Рухливість носіїв заряду в зразках обох типів провідності майже не змінюється після ударної обробки.

Зміни параметрів носіїв заряду у зразку *p*-типу за відносною величиною невеликі і є в межах похибки вимірювання. Однак, як вже зазначалось, приблизно рівні абсолютні зміни параметрів носіїв заряду в зразках *n*- та *p*-типів дозволяють стверджувати, що і механізм дефектоутворення в них однаковий.

Зміни параметрів носіїв заряду в досліджуваних зразках ми насамперед пов'язуємо з дефектоутворенням за Френкелем, що у випадку телуриду свинцю спричиняє переважаючий вплив дефектів донорного типу. Ці процеси добре узгоджуються зі запропонованим механізмом дефектоутворення в $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ під дією ЛУХ (див. Розділ 3).

Релаксаційна крива (рис. 3) добре описується залежністю

$$\frac{\Delta n}{n_0} = A_1 \cdot \exp(-K_1 \cdot t) + \frac{A_2}{1 + K_2 \cdot t},$$

тут n_0 та Δn – початкова концентрація та зміна концентрації носіїв заряду, t – час відпалу, коефіцієнти K_i характеризують швидкість реакцій та пропорційні коефіцієнтам дифузії дефектів, A_i – сталі.

На рис. 3 наведено сумарну криву, а також окремо внесок експоненційної та гіперболічної складових, що описують кінетику першого та другого порядку відповідно. Як бачимо, за малих часів відпалу основний внесок дають процеси відпалу другого порядку, а починаючи від тривалості відпалу порядку 5 діб помітним стає внесок експоненційної складової.

Зауважимо, що процеси відпалу нерівноважної концентрації дефектів, створених ЛУХ, охоплюють всі можливі варіанти, а саме: рекомбінацію френкелівських пар металу і халькогену та міграцію міжвузлових атомів обох типів на різного роду стоки та пастки (міграцією вакансій внаслідок малого їх коефіцієнта дифузії можна знехтувати). Але оскільки рекомбінація пари металу ніяким чином не впливає на концентрацію носіїв заряду (рекомбінує донор і акцептор), а коефіцієнт дифузії телуру настільки малий, що його дифузійна довжина навіть за час $t > 60$ діб становить мізерну частку мікрона ($L = 0.02$ мкм), то такі процеси практично не впливатимуть на вимірювану концентрацію електронів.

Отже, ми вважаємо, що основний вплив на експериментальні результати мають наступні процеси: міжвузловий свинець мігрує на різного типу стоки (відпал першого порядку), а френкелівська пара халькогену рекомбінує (відпал другого порядку), що і проявляється на релаксації носіїв заряду. Зрозумілим стає і внесок реакції відпалу кожного порядку в загальну кінетику: в перші моменти відпал іде шляхом рекомбінації найближчих сусідів – френкелівської пари, а за збільшення тривалості відпалу зростає дифузійна довжина свинцю і внесок виходу міжвузлових атомів на стоки стає все суттєвішим. Відсутність помітних релаксаційних процесів в $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ після дії ЛУХ (див. третій розділ) пов'язуємо насамперед із набагато більшими коефіцієнтами самодифузії компонент.

Безпосередньо після дії ЛУХ значення деформації у зразку зростають від $33.5 \cdot 10^{-4}$ до $37.0 \cdot 10^{-4}$. На нашу думку, це пов'язано як з динамікою точкових дефектів (адже у випадку PbTe як вакансії – внаслідок кулонівської взаємодії – так і міжвузлові атоми спричиняють розтяг кристалічної ґратки матеріалу), так і з процесами неповної релаксації ґратки після дії потужного імпульсу стиску – ЛУХ. Слід зазначити, що після витримки за кімнатної температури напруження не релаксують, як можна було б очікувати, а навпаки збільшуються – $\epsilon_{11} = 38.5 \cdot 10^{-4}$. Таку поведінку напружень розтягу в досліджуваних зразках ми пов'язуємо з процесами стоку точкових дефектів на поверхню плівки та на границю розділу плівка – підкладка, а також із більшою кількістю дефектів в об'ємі

плівки (зазначимо, що концентрація електронів не релаксує до свого початкового значення, а отже, певна кількість нерівноважних дефектів залишається невідпаленою).

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ

1. Досліджено вплив ЛУХ на систему дефектів та механічні напруження у вузькощілинних твердих розчинах $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ та $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$, а також на різного типу границі розділу на їх основі.

2. Запропоновано механізм перебудови дефектної системи об'ємних монокристалів $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ та епітаксійних шарів $\text{PbTe} / \text{BaF}_2$ під дією ЛУХ, який полягає в наступному: під дією надлишкової енергії відбувається флуктуаційне дефектоутворення за Френкелем, а існуючі та утворені власні точкові дефекти набувають енергії достатньої для їх міграції в об'ємі напівпровідника. Досліджено кінетику відпалу при 300 К нерівноважних дефектів, утворених ЛУХ у $\text{PbTe} / \text{BaF}_2$.

3. Встановлено, що залежно від режиму ЛУХ обробки цей механізм має два домінуючі прояви, а саме:

- низькотемпературний ударнохвильовий відпал точкових дефектів (у $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ переважно вакансій ртуті) за обробки в моноімпульсному режимі, що спричиняє тенденцію до *p-n* конверсії в твердих розчинах $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$;

- утворення точкових дефектів за Френкелем під дією ЛУХ (за обробки в багатопічковому режимі), що, внаслідок дифузії міжвузлової ртуті на стоки, спричиняє *n-p* конверсію в твердих розчинах $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$.

4. Установлено збільшення деформації розтягу, спричиненої утворенням точкових дефектів, в епітаксійних шарах $\text{PbTe} / \text{BaF}_2$ (від $33.5 \cdot 10^{-4}$ до $37.0 \cdot 10^{-4}$) після ударної обробки з наступною їх релаксацією до $38.5 \cdot 10^{-4}$ за витримки зразка при 300 К. Виявлено створення напруженого стану в твердих розчинах $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ після ЛУХ обробки, пов'язане з блокуванням руху дислокацій точковими дефектами.

5. Показано, що ударна хвиля зменшує кількість різного типу макронеоднорідностей у матеріалах. Установлено, що ЛУХ є ефективним засобом зменшення відносного об'єму виділень іншої фази, на основі не тільки матеріалів матриці, але й сторонніх атомів.

6. Показано можливість стимульованої ЛУХ дифузії домішок з осадженого на поверхні напівпровідника шару металу. Підтверджено, що при дифузії великої концентрації швидкокодифундуючих домішок I групи відбувається утворення нових сполук.

7. Підтверджено, що, якщо пасивація поверхні структур $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}/\text{BaF}_2$ шаром кристалічного BaF_2 збільшує напруження в плівці, то анодний оксид, який є склоподібним, практично не вносить змін в стан деформації матеріалу.

8. Установлено зміну вбудованого додатного заряду на границі розділу анодний оксид – $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ під дією ЛУХ. Показано, що концентрація електронів в конвертованому шарі n -типу, який утворюється в p - $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ після відпалу структур з анодним оксидом, зменшується на порядок для зразків, підданих ударній обробці порівняно зі зразками без такої. Запропоновано механізм перебудови границі розділу анодний оксид – $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ під дією ЛУХ, який полягає головним чином у витісненні елементарної ртуті від границі розділу та утворенні комплексів типу ($\text{HgTe} + \text{вакансія кисню}$) під дією ЛУХ.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. N.N. Berchenko, O.A. Dobriansky, A.V. Korovin, A.Yu. Nikiforov, V.S. Yakovyna and H. Zogg Substrate-induced strain in epitaxial lead chalcogenides by galvanomagnetic effect rotational dependence // *Acta physica polonica A.* – Vol. 92 (1997), № 4. – P. 715-718.

2. В.С. Яковина Дослідження деформаційних ефектів в епітаксійних шарах $\text{A}^{\text{IV}}\text{B}^{\text{VI}}$ на BaF_2 : вплив на зонну структуру // *Фізика і хімія твердого тіла.* – Т. 1 (2000), № 2. – С. 221-228.

3. Y. Nikiforov, V. Yakovyna, N. Berchenko Laser shock waves as a tool of changing the strains in materials // *Materials science and engineering A.* – Vol. 288 (2000), № 2. – P. 173-176.

4. Курило І.В., Яковина В.С. Вплив лазерно-індукованих ударних хвиль на дефектну структуру кристалів $\text{Hg}_{0,8}\text{Cd}_{0,2}\text{Te}$ // *УФЖ.* – Т. 46 (2001), № 11. – С. 1148-1153.

5. N.N. Berchenko, V.S. Yakovyna, A.Yu. Nikiforov, H. Zogg Strain analysis of epitaxial multivalley semiconductor films using the galvanomagnetic effects rotational dependence // *Proc. SPIE.* – Vol. 3890 (1999). – P. 217-220.

6. N.N. Berchenko, V.S. Yakovyna, Yu.N. Nikiforov, I.S. Virt On control the properties of bulk $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ by laser-induced shock waves // *Proc. SPIE.* – Vol. 4355 (2001). – P. 200-203.

7. Яковина В.С., Нікіфоров Ю.М., Берченко М.М. Вплив лазерно-індукованих ударних хвиль на електрофізичні параметри $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x=0.2$) // *Вісник Державного університету "Львівська політехніка" Електроніка.* – № 397 (2000). – С. 87-91.

8. V.S. Yakovyna, N.N. Berchenko, Yu.N. Nikiforov The impact of laser shock waves on anodic oxide – compound semiconductor interface // *Semiconductor physics, quantum electronics and optoelectronics.* – Vol. 4 (2001), № 4. – P. 283-286.

9. N.N. Berchenko, O.A. Dobriansky, A.Yu. Nikiforov, V.S. Yakovyna, H. Zogg Substrate-induced strain in epitaxial lead chalcogenides studied by the galvanomagnetic effect rotational dependence // *XXVI International school on physics of semiconducting compounds Jaszowiec'97, Ustron-Jaszowiec, Poland, 1997, p. 41.*

10. N.N. Berchenko, V.S. Yakovyna, A.Yu. Nikiforov, H. Zogg Strain analysis of epitaxial multivalley semiconductor films using the galvanomagnetic effects rotational dependence // IV International conference on Material science and material properties for infrared optoelectronics, Kyiv, Ukraine, 1998, p. 68.

11. Y. Nikiforov, V. Yakovyna, N. Berchenko Laser shock waves as a tool of changing the strains in materials // E-MRS Spring meeting, Strasbourg, France, 1999, p. H-8.

12. N.N. Berchenko, V.S. Yakovyna, Yu.N. Nikiforov, I.S. Virt On control the properties of bulk $Hg_{1-x}Cd_xTe$ by laser-induced shock waves // Fifth International conference Material science and material properties for infrared optoelectronics, Kyiv, Ukraine, 2000, p. 79.

13. N.N. Berchenko, V.S. Yakovyna, Yu.N. Nikiforov, I.S. Virt Laser induced shock waves: changing the defect structure of bulk $Hg_{1-x}Cd_xTe$ // XXIX International school on the physics of semiconducting compounds Jaszowiec 2000, Ustron-Jaszowiec, Poland, 2000, p. 74.

14. М.М. Берченко, Ю.М. Нікіфоров, В. Яковина Трансформація дефектної підсистеми кристалів КРТ під дією лазерних ударних хвиль // II міжнародний Смакуловий симпозіум Фундаментальні і прикладні проблеми сучасної фізики, Тернопіль, Україна, 2000, с. 131.

15. N.N. Berchenko, V.S. Yakovyna, Yu.N. Nikiforov, I.S. Virt Influence of laser induced shock waves on electrical and photoelectric properties of bulk $Hg_{1-x}Cd_xTe$ // International conference on solid state crystals – materials science and applications, Zakopane, Poland, 2000, p. 92.

16. Яковина В.С. Ударна обробка як метод контролю параметрів монокристалів $Hg_{0.8}Cd_{0.2}Te$: механічні дослідження // Міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених, аспірантів та студентів "Оптоелектронні інформаційно-енергетичні технології", Вінниця, Україна, 2001, с. 130.

17. Яковина В.С., Берченко М.М., Курило І.В., Нікіфоров Ю.М. Вплив ударнохвильової обробки на стан дефектів у кристалах $Hg_{0.8}Cd_{0.2}Te$ // Міжнародна конференція студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики ЄВРІКА-2001, Львів, Україна, с. 210

АНОТАЦІЯ

Яковина В.С. Вплив індукованих лазерним випромінюванням ударних хвиль на стан дефектів у вузькощілинних твердих розчинах $Hg_{1-x}Cd_xTe$ та $Pb_{1-x}Sn_xTe$. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.10 – фізика напівпровідників і діелектриків. – Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, Чернівці, 2002.

Дисертація присвячена експериментальному вивченню впливу індукованих лазером ударних хвиль на електрофізичні, фотоелектричні та механічні параметри вузькощілинних твердих розчинів $Hg_{1-x}Cd_xTe$ та $Pb_{1-x}Sn_xTe$ та границь розділу на їх основі. Запропоновано механізм перебудови

дефектної системи твердих розчинів $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ та $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ під дією ударних хвиль. Показано відмінність домінуючого прояву цього механізму стосовно $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ в залежності від одного з двох варіантів ударної обробки, а саме генерації ударних хвиль моноімпульсом лазерного випромінювання чи імпульсом, що складається з декількох пічків.

Досліджено вплив ударних хвиль на матеріал з макронеоднорідностями. Установлено, що така обробка є ефективним засобом зменшення відносного об'єму виділень іншої фази.

Шляхом вимірювання орієнтаційних залежностей магнетоопору досліджено зміни зонної структури в гетероепітаксійних шарах $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te} / \text{BaF}_2$ до та після ударної обробки, а також покритих різного типу пасивантами. Показано, що пасивація поверхні шаром кристалічного BaF_2 збільшує напруження в плівці, а анодний оксид практично не вносить змін в стан деформації матеріалу.

Досліджено термічну стабільність анодного оксиду $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ без дії ударних хвиль та після ударної обробки. Установлено, що термічна стабільність структур анодний оксид – $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ суттєво покращується після проходження ударної хвилі. Виявлено зміну вбудованого додатного заряду на границі розділу анодний оксид – $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ після ударної обробки. Запропоновано механізм перебудови границі розділу анодний оксид – $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ під дією ударних хвиль.

Ключові слова: ударна хвиля, телурид кадмію-ртуті, границя розділу, анодний оксид.

АННОТАЦИЯ

Яковина В.С. Влияние индуцированных лазерным излучением ударных волн на состояние дефектов в узкощелевых твердых растворах $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ и $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – физика полупроводников и диэлектриков. – Черновицкий национальный университет имени Юрия Федьковича, Черновцы, 2002.

Работа посвящена изучению влияния индуцируемых импульсами излучения неодимового лазера (длина волны излучения 1.06 мкм, длительность импульса 30 нс) ударных волн (ЛУВ) на подсистему дефектов в узкощелевых твердых растворах (ТР) $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ и $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$. При этом методика эксперимента выбрана так, чтобы избежать термического воздействия излучения лазера на полупроводник. Проведены гальваномагнитные (удельная проводимость, полевые зависимости эффекта Холла), фотоэлектрические (время жизни неравновесных носителей заряда и его температурные зависимости) и механические (микротвердость, селективное травление дислокационных розеток около отпечатка индентора) исследования.

Особое внимание уделено двум режимам индуцирования ЛУВ в ТР $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$, а именно: облучение моноимпульсом лазерного излучения и импульсом, состоящим из нескольких пичков,

длительностью 30 нс каждый и интервал между пичками составлял $50 \div 100$ мкс. При этом в первом режиме через кристалл проходила одна ЛУВ, а во втором – несколько ($2 \div 4$ в зависимости от количества пичков) с интервалом $50 \div 100$ мкс. Показано принципиальное отличие остаточных изменений свойств материала при каждом режиме обработки. Установлено, что прохождение через кристалл узкощелевого ТР $Hg_{1-x}Cd_xTe$ одной ЛУВ имеет тенденцию к *p-n* конверсии, в то время как обработка несколькими ЛУВ приводит к *n-p* конверсии материала. При этом механизмы рекомбинации и рассеяния носителей заряда остаются без изменений. Предложен обобщенный механизм взаимодействия ЛУВ с исследуемыми материалами, который включает все описанные проявления.

Исследовано влияние ударной обработки на кристаллы с макродефектами такими как включения другой фазы. Показано, что ударная обработка является эффективным методом уменьшения удельного объема таких включений. Выявлено некоторое упорядочивание границы раздела в пленочных структурах $Hg_{1-x}Cd_xTe / CdTe$. Описана возможность диффузии примесей первой группы под действием ЛУВ из пленки металла, осажденной на поверхность кристалла.

Методом измерения ориентационных зависимостей магнетосопротивления определены изменения зонной структуры и соответствующие механические напряжения в гетероэпитаксиальных слоях $Pb_{1-x}Sn_xTe / BaF_2$. Показано, что пассивация поверхности $Pb_{1-x}Sn_xTe$ слоем кристаллического BaF_2 увеличивает механические напряжения в пленке, в то время как анодный оксид в силу своей стеклообразной природы не приводит к видимым изменениям напряженного состояния материала. Показано идентичность механизмов ударноволнового дефектообразования в ТР $Hg_{1-x}Cd_xTe$ и $Pb_{1-x}Sn_xTe$. Кроме того в образцах $PbTe/BaF_2$ обнаружена релаксация концентрации неравновесных носителей заряда после ударной обработки. Математически описан отжиг неравновесных дефектов и проведена его физическая интерпретация. Отсутствие видимых релаксационных процессов в ТР $Hg_{1-x}Cd_xTe$ связано с намного более высокими коэффициентами самодиффузии компонент.

Проведены исследования термической стабильности анодного оксида (АО) $Hg_{1-x}Cd_xTe$ в том числе после воздействия ЛУВ. Обнаружено влияние ЛУВ на встроенный положительный заряд на границе раздела АО – $Hg_{1-x}Cd_xTe$ и его стабилизацию до значения $(6.0 \pm 1.0) \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$, которое зависит от исходной дефектности и состояния поверхности образца. Показано значительное улучшение термической стабильности структур АО – $Hg_{1-x}Cd_xTe$ после ударной обработки. Так, концентрация электронов в конвертированном *n*-слое, образованном после отжига структур, уменьшается на порядок в образцах, подвергнутых воздействию ЛУВ. Предложен механизм перестройки границы раздела АО – $Hg_{1-x}Cd_xTe$ в результате ударной обработки.

Ключевые слова: ударная волна, теллурид кадмия-ртути, граница раздела, анодный оксид.

SUMMARY

Yakovyna V.S. Influence of laser irradiation induced shock waves on defects state in narrow-gap $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ and $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ alloys. – Manuscript.

Thesis for scientific degree of candidate of physical and mathematical sciences on speciality 01.04.10 – Physics of Semiconductors and Dielectrics. Chernivtsi National University by Yuriy Fedkovich, Chernivtsi, 2002.

The thesis is dedicated to experimental investigation of laser-excited shock waves impact on electrical, photoelectric and mechanical parameters of narrow-gap $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ and $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ alloys and their based interfaces. The mechanism of defect structure rebuilding in the alloys under laser shock waves effect is proposed. The difference in main manifestation of the mechanism depending on the mode of laser irradiation, namely exciting shock wave either by monopulse of irradiation or by pulse consisted of several spikes, is shown.

The affect of laser shock waves on material with macroinhomogeneties is investigated. It is determined that the shock wave treatment is an effective tool to reduce the precipitates volume.

The changes of band structure in epitaxial $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ / BaF_2 layers before and after shock wave treatment as well as in layers passivated in different way are studied. It is shown that the surface passivation by thin BaF_2 overcap increases the film strains while the anodic oxide does not affect the strains.

The $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ anodic oxide thermal stability and the impact of laser shock waves on it is investigated. It is determined that anodic oxide – $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ thermal stability is substantially improved after shock wave influence. Changes of fixed charge at the interface after shock wave processing are found. The mechanism of interface rebuilding under laser shock waves affect is proposed.

Key words: shock wave, mercury cadmium telluride, interface, anodic oxide.