

УДК 621.315.592

В.С. Яковина, М.М. Берченко,**Г.А. Ільчук*, Н.А. Українець***

Національний університет "Львівська політехніка"

кафедра напівпровідникової електроніки

*кафедра фізики

УДАРНА ОБРОБКА СТРУКТУР $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}/\text{CdTe}$

© Яковина В.С., Берченко М.М., Ільчук Г.А., Українець Н.А., 2003

Yakovyna V.S., Berchenko N.N.,**Ilchuk G.A., Ukrajinets N.A.****SHOCK WAVE TREATMENT OF $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}/\text{CdTe}$ STRUCTURES**

© Yakovyna V.S., Berchenko N.N., Ilchuk G.A., Ukrajinets N.A. 2003

На прикладі структури $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te} / \text{CdTe}$ розглянуто результати досліджень впливу лазерних ударних хвиль на вузькощілинні напівпровідники за наявності великої кількості макронеоднорідностей, а також на границю розділення епітаксійний шар – підкладка. Встановлено, що ударна обробка є ефективним засобом зменшення відносного об'єму виділень іншої фази в напівпровідниках, а сама методика є перспективною в сенсі створення технологічного методу низько-температурної модифікації параметрів напівпровідникових приладних структур.

On the example of $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te} / \text{CdTe}$ structure the results of study laser shock wave affect on the narrow-gap semiconductors with high density of inhomogenities as well as on epitaxial layer substrate interface are presented. It is found that shock wave treatment is an effective way to reduce the relative volume of precipitates in semiconductors. While the technique is very promising for developing a low-temperature tool for modification device structures parameters.

Вступ. Незважаючи на неперервний пошук альтернативних матеріалів та приладних структур типу надграток та бар'єрів Шотткі, твердий розчин $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ та його аналоги є тепер і ще упродовж тривалого часу буде залишатись основним матеріалом для створення фотоприймачів в області 8-14 мкм [1-3]. Крім того ці матеріали володіють і надзвичайно цікавими фізичними властивостями [4].

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 [5-7]. 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 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$, в яких навіть найменше нагрівання призводить до суттєвих змін параметрів матеріалу.

Нами встановлені основні закономірності дефектоутворення під дією ударної хвилі в високоякісних зразках $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ та $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ [8, 9]. При цьому було встановлено, що найінтенсивніше ЛУХ взаємодіє з напівпровідниками за наявності в них великої кількості дефектів. Тому метою подальших досліджень було вивчення впливу ЛУХ на кристали КРТ за наявності просторових неоднорідностей, а також вивчення поведінки приладних структур за дії ударної обробки.

Методика експерименту та зразки. Як модельну приладну структуру зі значною кількістю неоднорідностей вибирали плівкову структуру $n\text{-Hg}_{0.73}\text{Cd}_{0.27}\text{Te} / p\text{-CdTe}$. Товщина плівки 125 мкм. Епітаксійні шари були вирощені методом ХТР з вертикальним варіантом перенесення через парову фазу. Ріст відбувався в системі $\text{HgCdTe-NH}_4\text{Br}$. Джерелом був використаний гомогенізований порошок $\text{Hg}_{0.7}\text{Cd}_{0.3}\text{Te}$, а підкладки – монокристалічний (110) CdTe . При цьому було вибрано зразок із виділеннями іншої фази, провідність яких значно більша за провідність матриці. Такі виділення досить часто виникають в $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ внаслідок того, що при термообробці в парах ртуті преципітати телуру перетворюються на включення, близькі за складом до HgTe [10]. Такий вибір об'єкта досліджень зумовив і вибір методів дослідження. Насамперед це гальваномагнітні вимірювання. Оскільки, як показано в [11], ізольовані виділення такого типу в КРТ можна легко виявити з аналізу польових залежностей ефекту Холла при 300 та 77 К.

У разі виділень сферичної форми коефіцієнт Холла задається як [12]:

$$R_H(f, B) = \frac{\mu_n}{\sigma} \cdot \left(1 - \frac{9 \cdot f}{1 + \mu_n^2 \cdot B^2} \right), \quad (1)$$

де $f = N \cdot (V_0 / V)$ – частина об'єму, яку займають виділення, а N – загальна кількість виділень об'ємом V_0 в загальному об'ємі зразка V (припускається, що всі виділення мають однаковий об'єм). Реальні експериментальні криві є сумою внесків як від включень, так і від Холл-фактора. На рис. 1 показано типову польову залежність нормованого коефіцієнта Холла для цього випадку, суцільна крива побудована з рівняння (1).

Крім гальваномагнітних досліджень були зняті вольт-амперні характеристики (ВАХ) структури при 77 К. Можливість зняття ВАХ зумовлена гетеропереходом $n\text{-Hg}_{0.73}\text{Cd}_{0.27}\text{Te}/p\text{-CdTe}$, утвореним на границі розділення плівка – підкладка.

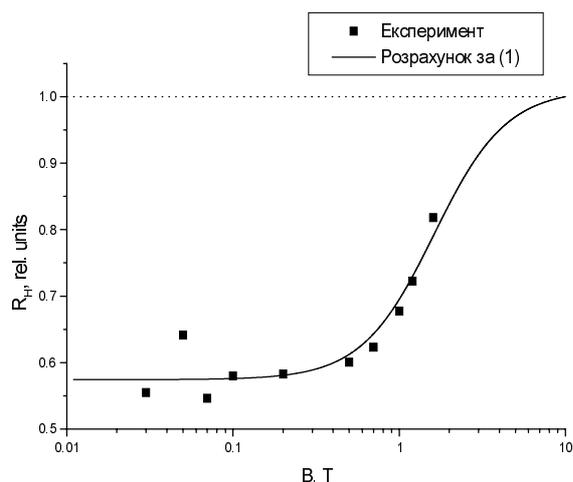


Рис. 1. Типова польова залежність нормованого коефіцієнта Холла при 77 К для зразка з мікровключеннями

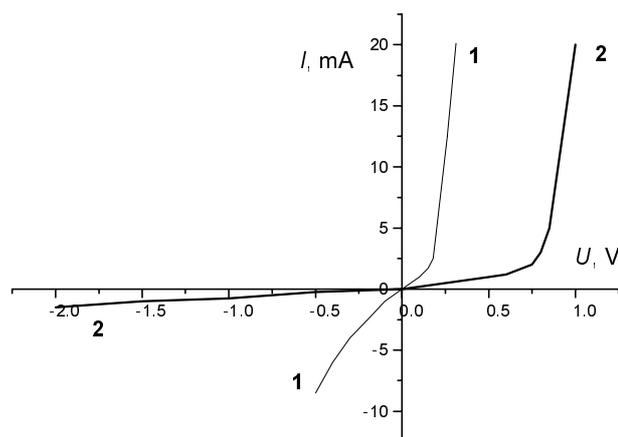


Рис. 2. Вольт-амперні характеристики структури при 77 К до (1) та після (2) ударної обробки

Результати і обговорення. Результати розрахунків за рівнянням (1), в яких визначався відносний об'єм включень f , а також параметри (концентрація і рухливість) носіїв заряду для зразка до і після ударної обробки наведені в табл. 1.

Як вже зазначалось цей зразок був легований бромом під час росту, з чим і пов'язані високі концентрації носіїв заряду і практична незалежність їх від температури (адже для матеріалу цього складу власна концентрація навіть при 300 К дорівнює $5.84 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, що на порядок менше концентрації домішки і тому практично не впливає на вимірювану концентрацію носіїв). Саме цим, а крім того наявністю виділень пояснюється мала рухливість носіїв заряду.

Таблиця

Параметри носіїв та мікровключень у зразку

Зразок	$T, \text{ K}$	$\sigma, \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$	$n, \text{ см}^{-3}$	$\mu_n, \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	$f, \%$
вихідний	300	14.655	$4.48 \cdot 10^{16}$	2 040	5.1
вихідний	77	48.241	$4.88 \cdot 10^{16}$	6 180	4.8
оброблений	300	22.188	$3.89 \cdot 10^{16}$	3 560	< 0.4
оброблений	77	59.142	$3.80 \cdot 10^{16}$	9 720	0.9

Розглянемо зміни, які відбулися в зразку за дії ЛУХ. Насамперед слід зазначити, що при 300 К після ударної обробки польова залежність коефіцієнта Холла практично зникає (в межах похибки вимірювань), що свідчить про зменшення відносного об'єму мікровиділень. Дійсно, навіть якщо вважати, що розкид точок зумовлений не похибкою, а польовою залежністю, то розрахунки за моделлю сферичних виділень дають значення відносного об'єму виділень $f < 0.4 \%$, що досить слабо впливає на польову залежність коефіцієнта Холла за кімнатної температури. Так, розраховане відношення коефіцієнта Холла при 0.01 Тл до значення при 10 Тл становить лише > 0.96 , що означає, що точність вимірювання повинна бути набагато кращою за $\pm 2 \%$, щоб чітко зафіксувати цю залежність. А в діапазоні

доступних магнітних полів (до 1.6 Тл) треба виконувати вимірювання з похибкою набагато меншою 1 %, щоб встановити наявність чи відсутність польової залежності, що практично нереально. Отже, як бачимо насамперед під дією ЛУХ значно (з 5.1 % до < 0.4 % при 300 К) зменшився відносний об'єм виділень іншої фази, які дають внесок в ефект Холла. Дані вимірювань за азотної температури повністю узгоджуються з результатами, отриманими при 300 К. Після ударної обробки польова залежність коефіцієнта Холла при 77 К не зникає і залишається якісно такою ж як і до обробки, що свідчить про те, що основний внесок дають ті ж самі мікрovidілення. Але як добре видно з таблиці значення відносного об'єму мікрovidілень значно зменшилось (з 4.8 до 0.9 %), і добре узгоджується з дослідженнями за кімнатної температури. Такі результати добре узгоджуються з висновками роботи [13], в якій досліджували вплив ударної обробки на динамічну міцність сталі і зроблено висновок, що підвищення динамічної міцності в основному пов'язано зі зменшенням кількості твердіших та крихкіших областей в матеріалі після дії ударної хвилі.

Отже, можна вважати встановленим фактом, що ударна хвиля зменшує кількість різного типу макронеоднорідностей в матеріалах, таких як напівпровідники і метали.

Розглянемо тепер зміну електрофізичних параметрів досліджуваного зразка після ударної обробки. Виявлено збільшення питомої електропровідності зразка після ЛУХ обробки. Очевидно, що таке збільшення може бути зумовлене збільшенням рухливості чи концентрації носіїв. Але, як добре видно з таблиці, концентрація носіїв заряду помітно зменшується. Таке зменшення (оскільки, як вже зазначалося, концентрація носіїв у зразку визначається електрично активними домішками) ми пов'язуємо з переведенням бром у електрично неактивний стан. Такий процес може відбуватися внаслідок утворення електронейтральних комплексів на основі бром у або гетерування домішки на границі розділення плівка – підкладка. Суттєве зростання рухливості носіїв (з 2 040 до 3 560 $\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ при 300 К та з 6 180 до 9 620 $\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ при 77 К) цілком відповідає більшому впорядкуванню в зразку після ударної обробки (зменшення відносного об'єму мікрovidілень) та зменшенню центрів розсіювання, пов'язаних з іонізованими домішками (переведення домішок в електрично неактивний стан, сегрегація їх на границі розділення плівка – підкладка).

Як вже було зазначено ВАХ структури знімали завдяки гетеропереходу, утвореному на границі розділення плівка – підкладка. Оскільки така границя розділення являє собою просторовий дефект великого розміру, слід очікувати суттєвого впливу ЛУХ на її параметри. Опосередковано такий вплив можна побачити на ВАХ при 77 К. Такі характеристики показано на рис. 2.

Основною відмінністю ВАХ вихідного та обробленого гетеропереходів є зменшення зворотного струму та зростання напруги відсічки за прямого зміщення (рис. 2). Це ми пов'язуємо насамперед зі зменшенням струмів втрат, які у вихідному зразку найімовірніше пов'язані зі шунтуючим впливом виділень напівметалевої фази та дислокаційною структурою навколо них. Зменшення відносного об'єму таких мікрovidілень, яке спостерігали на основі аналізу гальваномангнітних 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 такого роду мікрovidілень, а крім того, з упорядкуванням границі розділення плівка – підкладка.

Подібні явища спостерігали в роботі [14], де досліджували характеристики p - n переходів в матеріалах з подібними виділеннями напівметалевої фази за високого (до 15 кбар) гідростатичного тиску та гелієвих температур. Отримані результати пояснювали переходом напівметалевої фази в напівпровідникову за цих умов. Оскільки в нашій роботі ударна обробка полягала в дії великого градієнта тиску, а також зафіксовано зменшення відносного об'єму мікрovidілень із високою питомою електропровідністю, ми вважаємо цілком коректним проводити певні аналогії при аналізі ВАХ гетеропереходу.

Хоча, з іншого боку, не виключено й інше трактування отриманих експериментальних фактів, а саме: зростання потенціального бар'єру до майже 0.8 eV (рис. 2, крива 2) може свідчити про зміщення p - n переходу в область CdTe. Оскільки n -тип провідності плівки визначається домішкою брону, це свідчить про дифузію домішки вглиб зразка під дією ударної хвилі. Цей результат корелює з отриманими нами раніше свідченнями про дифузію домішок першої групи в кристалах КРТ під впливом ЛУХ [15]. Це припущення дозволяє пояснити зменшення концентрації електронів у зразку після ударної обробки без притягання концепції переводу домішки в електрично неактивний стан, адже тепер кількість електрично активної домішки не змінилась, а просто відбувся її перерозподіл. Отже, як бачимо для остаточного вирішення цього питання потрібні подальші дослідження, але у будь-якому разі отримані результати, є цікавими і перспективними в плані створення низькотемпературного технологічного методу модифікації параметрів напівпровідникових приладних структур.

Висновки. Під дією значного градієнта тиску у фронті ЛУХ відбувається руйнування виділень іншої фази в твердому тілі внаслідок ефективно розсіювання ЛУХ на границі поділу матриця – виділення. Окрім того відбувається дифузія проти градієнта концентрації (т.зв. “висхідна дифузія”) атомів виділення в об'єм матеріалу в полі напружень ЛУХ. Отже, зменшується відносний об'єм виділень іншої фази в напівпровіднику і досягається впорядкованіша структура дефектів і домішкових атомів внаслідок дифузії атомів домішки у полі напружень ударної хвилі.

Отже, можна вважати встановленим, що ЛУХ є ефективним засобом зменшення відносного об'єму виділень іншої фази в напівпровідниках.

Показано перспективність методики ударної обробки як технологічного засобу для нетермічної цілеспрямованої модифікації напівпровідників та приладних структур.

1. *Infrared photodetectors* / A. Rogalski Editor. – SPIE Optical Engineering Press, Bellingham. – 1995.

2. Н.П. Гавалешко, П.Н. Горлей, В.А. Шендеровский Узкозонные полупроводники. Получение и физические свойства. – К.: Наукова Думка, 1984. – 288 с.

3. А.В. Любченко, Е.А. Сальков, Ф.Ф. Сизов Физические основы полупроводниковой инфракрасной фотозлектроники. – К.: Наукова думка, 1984. – 256 с.

4. A. Rogalski *Infrared detectors*. – Gordon and Breach, Amsterdam. – 2000.

5. Y.K. Zhang, C.L. Hu, L. Cai et al. // *Appl.Phys. A*. – Vol. 72 (2001). – P. 113-116.

6. А. Байдуллаева, А.И. Власенко, Б.Л. Горковенко, П.Е. Мозоль // *ФТП*. – Т. 33 (1999), № 11. – С. 1303-1306.

7. P. Peyre, P. Merrien, H.P. Lieurade, R. Fabbro // *Surf. Eng.*, Vol. 11 (1995), No 1. – P. 47-52.

8. V. Yakovyna, N. Berchenko, K. Kurbanov, et al. // *phys. stat. sol. (c)*. – Vol. 0 (2003), No 3. – P. 1019-1023.

9. В.С. Яковина, Д.М. Заячук, Н.Н. Берченко // *ФТП* (2003) – в друці.

10. Anderson P.L., Shaake H.F., Tregilgas J.H. // *J.Vac.Sci.Technol.* – Vol. 21 (1982), № 1. – P. 125-128.

11. N.N. Berchenko, K.R. Kurbanov, A.Yu. Nikifirov, A.V. Korovin // *Materials Sci. Eng. B.* – Vol. 44 (1997). – P. 274-277.

12. R.K. Willardson, A.C. Beer *Semiconductors and semimetals* // *Academic Press, New York, 1975, Vol. 10, 312 p.*

13. М.В. Сильников, А.И. Михайлин, А.В. Петров и др. // *Письма в ЖТФ*. – Т. 26 (2000), № 16. – С. 77-82.

14. Л.А. Бовина, Н.Б. Брандт, А.А. Дружинин и др. // *УФЖ*. – Т. 22 (1977), № 7. – С. 1211-1215.

15. Яковина В.С. // *Дис... канд. фіз.-мат. наук: 01.04.10 – Львів, 2001.*