

©2011 р. Ю.К. Обедзинський, А.Й. Савчук, Т.А. Мельничук,  
В.М. Стребезев, Б.М. Грицюк, І.М. Юрійчук

Чернівецький національний університет ім. Юрія Федьковича, Чернівці

## ЕЛЕМЕНТИ З ГЕТЕРОПЕРЕХОДАМИ НА ОСНОВІ ТОНКИХ ПЛІВОК І ЕПІТАКСІЙНИХ ШАРІВ CdSb, Cd<sub>1-x</sub>Zn<sub>x</sub>Sb, МОДИФІКОВАНИХ ЛАЗЕРНОЮ ОБРОБКОЮ

Отримані плівкові гетероепітаксійні елементи CdSb/Cd<sub>1-x</sub>Zn<sub>x</sub>Sb. Методом растрової електронної мікроскопії вивчена їх структура до і після модифікації лазером, створені фоточутливі детектори ІЧ-випромінювання.

**Ключові слова:** епітаксія, тонкі плівки, CdSb, лазерна обробка, детектори.

Получены пленочные гетероэпитаксиальные элементы CdSb/Cd<sub>1-x</sub>Zn<sub>x</sub>Sb. Методом растровой электронной микроскопии изучена их структура до и после модификации лазером, созданы фоточувствительные детекторы ИК-излучения.

**Ключевые слова:** эпитаксия, тонкие пленки, CdSb, лазерная обработка, детекторы.

CdSb-Cd<sub>1-x</sub>Zn<sub>x</sub>Sb heteroepitaxial thin films elements were obtained. The structure of the elements before and after laser treatment was studied by scanning electron microscope method. Photosensitive detectors of IR-radiation on their base were designed.

**Keywords:** epitaxy, thin films, CdSb, laser treatment, detectors.

### Вступ

Розвиток сучасних тонкоплівкових технологій в сукупності з лазерними технологіями робить перспективним створення на базі різноманітних напівпровідників, у тому числі на антимоніді кадмію CdSb і його твердих розчинах Cd<sub>1-x</sub>Zn<sub>x</sub>Sb, гетероперехідних структур з активною областю у вигляді тонкої плівки або епітаксійного шару. Монокристали сполук групи  $A^2B^5$  CdSb і ZnSb, що належать до анізотропних напівпровідників ромбічної сингонії, володіють шириною забороненої зони 0,48 і 0,55 еВ, відповідно, знайшли практичне застосування у термоелектриці і в ІЧ-техніці в якості імерсійних лінз, абсорбційних фільтрів і фоточутливих елементів [1,2]. Водночас в літературі недостатно відображені як наукові дослідження, так і практичні застосування тонких плівок і епітаксійних шарів цих сполук.

У даній праці для отримання тонких плівок і епітаксійних шарів CdSb були застосовані метод напилення з капілярних випарників [3] і метод рідиннофазної епітаксії [4] з наступною обробкою поверхні гетерострук-

тур мілісекундним лазером. Покращення структури і електрофізичних характеристик гетероперехідних елементів CdSb/Cd<sub>1-x</sub>Zn<sub>x</sub>Sb лазерною обробкою за різних режимів є основою для створення нових і оптимізації існуючих приладів на базі сполук групи  $A^2B^5$ .

### Експериментальні дослідження і результати

Для досліджень використовувалися дві групи гетероперехідних елементів, одна з яких виготовлена вакуумним осадженням з капілярних випарників тонких плівок CdSb, а друга – нарощуванням методом рідиннофазної епітаксії шарів CdSb на підкладки з Cd<sub>1-x</sub>Zn<sub>x</sub>Sb ( $x=0,1-0,3$ ). Після нанесення цих плівок і шарів проводилася обробка їх поверхні лазерним випромінюванням з різною густиною енергії.

Вакуумне напилення тонких плівок CdSb проводилося з використанням сконструйованих у процесі виконання дослідження капілярних випарників, в яких встановлюється стаціонарний потік пари з капілярної трубки, який конденсується у вигляді плівок стехіометричного складу [3]. Товщини плівок,

виміряні інтерферометром МІІ-11, були в межах 0,5–0,9 мкм.

Для виготовлення епітаксійних гомо- і гетероструктур нами застосована оригінальна методика рідиннофазної епітаксії шарів CdSb з розчину–розплаву у Ві [5]. Як підкладки використовувалися вирізані у кристалографічній площині (001) оптично поліровані пластини CdSb і Cd<sub>1-x</sub>Zn<sub>x</sub>Sb, товщиною 0,8–1 мм, діаметром 10 мм, вихідні кристали для яких вирощувалися методом Чохральського і методом зонної плавки. Концентрація носіїв у нелегованих кристалах CdSb для підкладок складала  $(3 \div 5) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$  при 77 К; використовувалися також леговані Te, In, Ga підкладки з концентрацією носіїв  $(2 \div 4) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  (77 К). При нарощуванні легованих шарів у розплав вводили до 1 ат% домішок In, Te, Ag, Ga. Товщини нарощених епітаксійних шарів знаходилися в інтервалі 5–30 мкм.

Наступний технологічний етап полягав у модифікації поверхні отриманих зразків розфокусованим випромінюванням імпульсного мілісекундного рубінового лазера ГОР-100М (довжина хвилі  $\lambda=0,694 \text{ мкм}$ , тривалість імпульсів  $\tau=1,2 \text{ мс}$ , повна енергія імпульсу 100 Дж) з густиною енергії  $E=0,5\text{--}3 \text{ Дж/см}^2$ . Для визначення густини енергії лазера, яка діє на зразок при заданому положенні лінзи і певній віддалі до мішені, використовувався прилад ИКТ-1М.

Структура отриманих плівок і шарів CdSb до і після опромінення лазером, вивчалася в електронному растровому мікроскопі РЕМ-100У в режимі спостереження у "вторинних" електронах при прискорюючій напрузі 15 і 30 кВ, струмі електронного зонда  $3 \cdot 10^{-12}$ – $2 \cdot 10^{-9} \text{ А}$ , збільшенні до 30000 крат. Електроннограми тонких плівок CdSb отримували в електроннографі ЕГ-100 при  $U=75 \text{ кВ}$ .

Відповідно до результатів комплексних електронномікроскопічних і електроннографічних досліджень (рис.1), було встановлено, що після обробки лазером з густиною енергії  $E=0,6\text{--}0,8 \text{ Дж/см}^2$  структура плівки CdSb змінюється від полікристалічної з

дрібними зернами (рис.1а) до більш впорядкованої текстурованої (рис.1б). При збільшенні енергії до  $1,5\text{--}2 \text{ Дж/см}^2$  у плівці відбуваються фазові перетворення і деградація. У таких плівках була зафіксована двофазна острівкова структура (рис.1в).

Дія лазерного опромінення (ЛО) з  $E=2\text{--}5 \text{ Дж/см}^2$  на епітаксійні шари CdSb [6] характеризувалася зміною блочної східчастої морфології поверхні, типової для рідинної епітаксії (рис.2а), на більш планарну, монокристалічну (рис.2б). Така планарна морфологія, як відомо, є кращою для формування приладних структур з промислово придатними

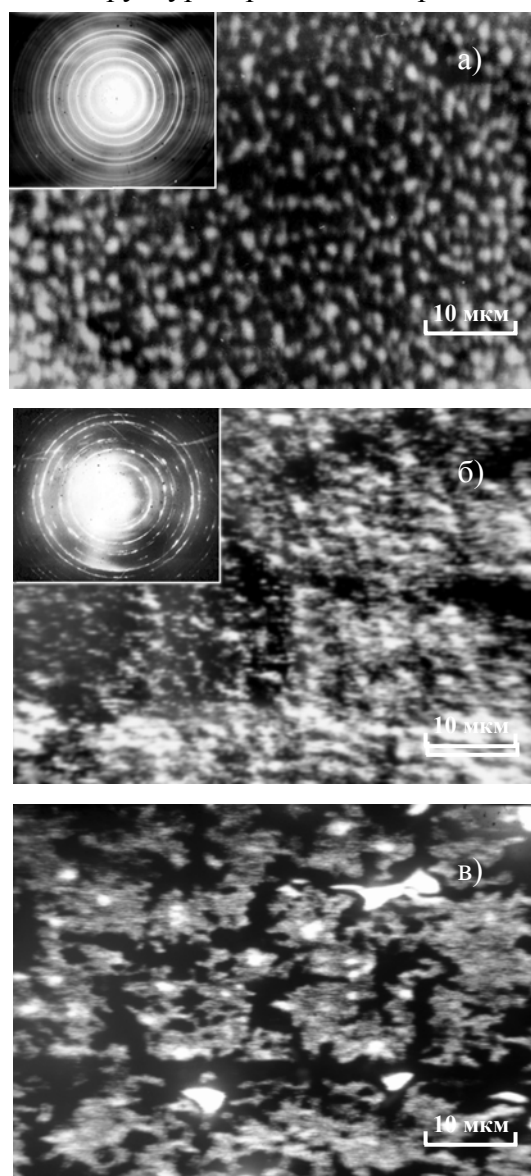


Рис. 1. Структура тонкої плівки CdSb: без ЛО (а), після ЛО з  $E=0,7 \text{ Дж/см}^2$  (б), після ЛО з  $E=2,0 \text{ Дж/см}^2$  (в).

характеристиками. Поперечні сколи епітаксійних гетероструктур вивчалися методом потенціального контрасту в РЕМ при прикладанні напруги у прямому і в зворотному напрямках (рис.3). Конфігурація і розміри локальних мікробластей розподілу потенціалу в області гетеромежі візуалізуються в РЕМ і визначають зміщення положення електричної і металургійної границі у базових елементах. Було встановлено, що лазерна обробка гетероструктур  $\text{CdSb}/\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Sb}$  в інтервалі енергій  $2,4 \div 3$  Дж/см<sup>2</sup> веде до вирівнювання положення електричної і металургійної границі гетероперехода і відповідно до покращення електрофізичних параметрів.

Виготовлені тонкоплівкові гетерострук-

тури  $\text{CdSb}/\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Sb}$  і гетероструктури на основі епітаксійних шарів є фоточутливі в ІЧ-діапазоні при кімнатній температурі. Вимірювання фотопровідності напилених тонких плівок  $\text{CdSb}$ , легованих  $\text{In}$  або  $\text{Te}$ , показало, що вони є фоточутливими в діапазоні  $\lambda=0,8 \div 2,0$  мкм при  $T=295$  К. Для порівняння нами проведені виміри спектрального розподілу фотоЕРС Дембера для монокристалів  $n$ -типу  $\text{CdSb}$ , легованих  $\text{In}$  до  $6 \cdot 10^{15}$  см<sup>-3</sup> при  $T=295$  К, які показали, що зі зниженням температури до 150 К в області слабого поглинання значно зростає фотоЕРС і спостерігається довгохвильовий максимум, який можна пов'язати з анізотропними приповерхневими бар'єрами. Спектральний діапазон фоточутливості таких монокристалів складає  $\lambda=$

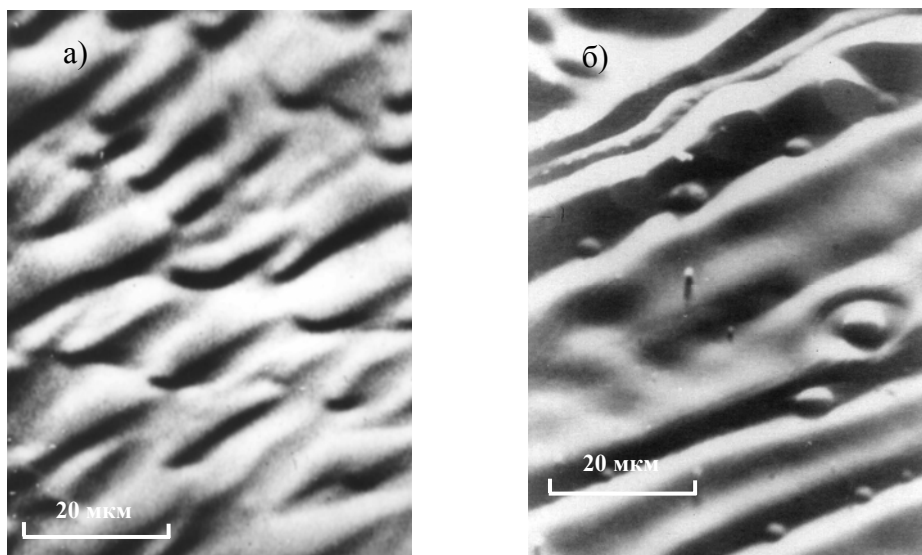


Рис. 2. Морфологія епітаксійних шарів  $\text{CdSb}$ : до ЛО (а), після ЛО з  $E=3,0$  Дж/см<sup>2</sup> (б). Дослідження в РЕМ.

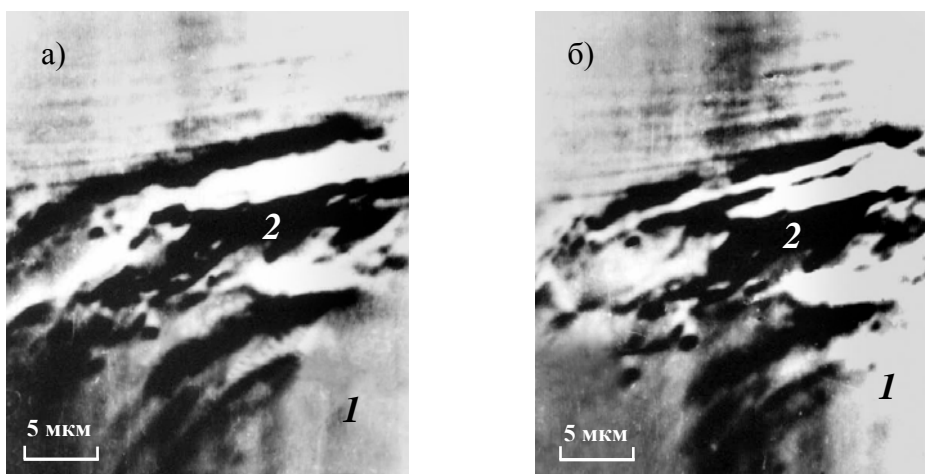


Рис. 3. Поперечний скол гетероструктури епішару  $\text{CdSb}$  (2) – підкладка  $\text{Cd}_{0,7}\text{Zn}_{0,3}\text{Sb}$  (1) в режимі потенціального контрасту в РЕМ: зворотне включення (а), пряме включення (б).

=1,5÷2,6 мкм (рис.4а). На температурній залежності fotocутливості максимальне зростання величини фотоЕРС спостерігається при  $T=190$  К (рис.4б), але сигнал фотовідгуку порівняно малий для практичного використання таких елементів.

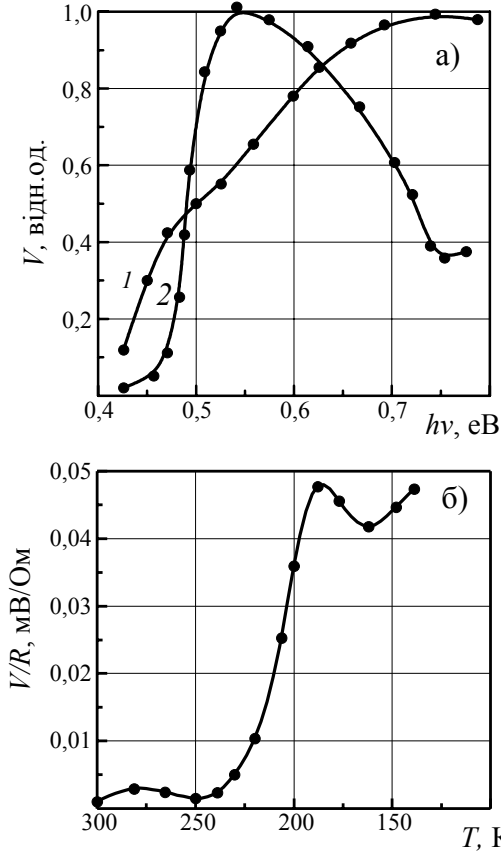


Рис. 4. Спектральний розподіл фотоЕРС в монокристалі  $n$ -CdSb при  $T=295$  К (1) і  $T=150$  К (2) (а). Температурна залежність фотоЕРС монокристала  $n$ -CdSb (б).

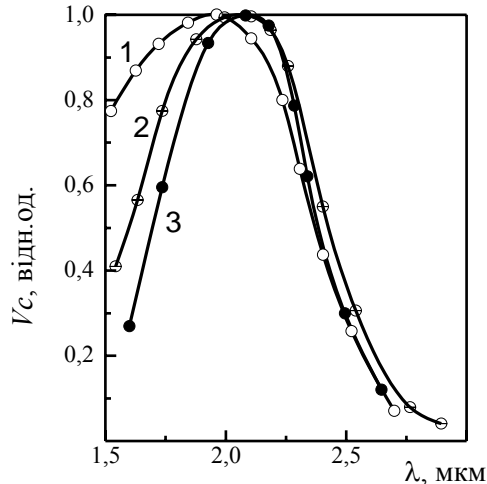


Рис. 5. Спектральний розподіл фотоЕРС епітаксійних структур на CdSb. Підкладки леговані: 1 – Te, 2 – In, 3 – Ga.  $T=295$  К.

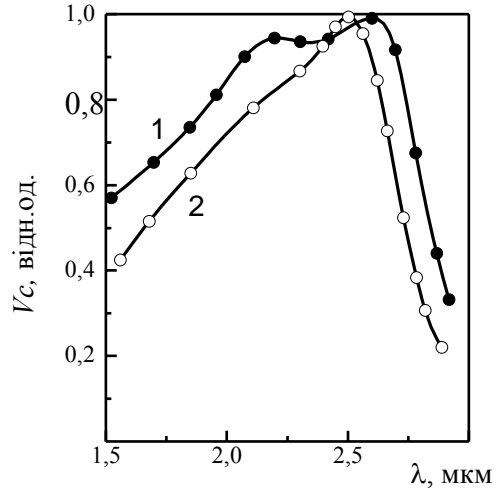


Рис. 6. Спектральний розподіл фотоЕРС епітаксійних гетероструктур  $n$ -CdSb/ $p$ -Cd <sub>$x$</sub> Zn <sub>$1-x$</sub> Sb при  $T=295$  К ( $x=0,7$  – крива 1,  $x=0,87$  – крива 2).

Характеристики фотоелементів (інерційність, виявна здатність) покращуються при використанні  $p$ - $n$ - та гетеропереходів. Як показали проведені дослідження, леговані гомоепітаксійні структури на основі CdSb, виготовлені рідиннофазною епітаксією, fotocутливі у діапазоні  $\Delta\lambda=1,5\div 2,6$  мкм і характеризуються вольтовою чутливістю  $S=6\cdot 10^3$  В/Вт і виявною здатністю  $D^*=2,2\cdot 10^9$  см $\cdot$ Гц<sup>1/2</sup> $\cdot$ Вт<sup>-1</sup> при охолодженні до 180 К. Для гомоперехідних структур з підкладками CdSb, легованими різними домішками  $n$ -типу (Te, In, Ga) і епітаксійним шаром CdSb  $p$ -типу, спостерігається зсув положення максимуму fotocутливості в інтервалі  $1,9\div 2,1$  мкм, залежно від типу домішки, а в короткохвильовій області найбільші значення фотоЕРС мають структури, леговані Te (рис.5).

Вивчення температурної залежності розподілу фотоЕРС гомоструктур на CdSb, показало, що, як і для монокристалів, максимальний сигнал  $U=200$  мВ спостерігається при температурах  $T=180\text{--}200$  К, а розподіл fotocутливості по спектру і температурне зміщення її довгохвильової границі узгоджуються з даними оптичних досліджень CdSb [1].

Спектральний розподіл фотоЕРС для гетероструктур шар  $n$ -CdSb на підкладці твердого розчину Cd<sub>0,87</sub>Zn<sub>0,13</sub>Sb характеризується максимумом fotocутливості в більшій довгохвильовій області 2,5 мкм (рис.6), ніж

у гомопереходах на CdSb (рис.5). Цій довжині хвилі відповідає енергія 0,49 еВ, що можна пов'язати з фотогенерацією носіїв у підкладці. При зміні складу підкладки з монокристалу твердого розчину  $Cd_xZn_{1-x}Sb$  від  $x=0,87$  до  $x=0,7$  відбувається зміна положення як довгохвильового, так і короткохвильового краю кривої фоточутливості. Для складу  $x=0,7$  крива має вигляд плато з двома максимумами при 2,15 і 2,6 мкм, що є характерним для гетеропереходів і пояснюється генерацією носіїв у широкозонному і вузькозонному матеріалах. Це зумовлює розширення до  $\Delta\lambda=1,5-3,0$  мкм спектральних характеристик гетеропереходів  $CdSb/Cd_xZn_{1-x}Sb$  у порівнянні із гомопереходами на CdSb. Важливо, що гетеропереходи проявляють фоточутливість при кімнатній температурі. Застосовуючи підкладки  $Cd_xZn_{1-x}Sb$  з різним складом  $x$ , можна отримувати фоточутливі структури з різним положенням максимумів фоточутливості.

### Висновки

В результаті проведеної лазерної корекції структури тонких плівок і епітаксійних шарів CdSb встановлено, що при оптимальних значеннях густини ЛО покращується структура плівок, перехідної області гетеропереходів і планарність епішарів. Досліджена спектральна область  $\Delta\lambda$  фоточутливості, отриманих епітаксійних  $p-n$ -переходів, яка складає для гомоепітаксійних структур  $(p)CdSb/(n)CdSb$   $\Delta\lambda=1,5-2,5$  мкм, для гетероепітаксійних структур  $CdSb/Cd_xZn_{1-x}Sb$   $\Delta\lambda=1,5-3,0$  мкм. Причому сильним легуванням  $p$ - і  $n$ -областей домішками In, Te, Ga досягається висока фоточутливість при  $T=295$  К. Максимальний сигнал фоточутливості спостерігається при охолодженні до  $T=190-200$  К. Створені на основі епітаксійних структур фоточутливі елементи ІЧ-випромінювання характеризуються вольтовою чутливістю  $S=6 \cdot 10^3$  В/Вт і виявною здатністю  $D^*=2,2 \cdot 10^9$  см $\cdot$ Гц $^{1/2} \cdot$ Вт $^{-1}$  при 180 К.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Полупроводниковые соединения группы  $A^{III}B^V$  / В.Б.Лазарев, В.Я.Шевченко, Я.Х.Гринберг, В.В.Соболев / Под ред. И.В.Танаева. М.:Наука. 1978. 256 с.
2. Ащеулов А.А., Грицюк Б.Н., Стребежев В.Н. Инфракрасные отрезающие фильтры на основе монокристаллов CdSb, ZnSb для оптофотоэлектронных устройств // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2009. Т.79, №1. С.34.
3. Грицюк Б.Н., Ляхов А.А., Мельничук С.В., Стребежев В.М. Получение тонких пленок полупроводниковых соединений с применением капиллярных испарителей // ЖТФ. 2001. Т. 71, В.9. С. 54.
4. Gritsyuk V.M., Galochkin O.V., Strebegev V.M., Rarenko A.I. IR-photodetectors on CdSb,  $In_4Se_3$ ,  $In_4Te_3$ -epitaxial barrier structures // Proceedings of the SPIE. 2003. V. 5065. P.139.
5. Гертович Т.С., Грицюк Б.Н., Стребежев В.Н., Товстюк К.Д. Свойства  $p-n$  переходов в CdSb, полученных методом жидкостной эпитаксии // УФЖ. 1982. Т.27, №10. С.1583.
6. Vorobets G.I, Vorobets O.I., Strebegev V.N. Laser manipulation of clusters, structural defects and nanoaggregates in barrier structures on silicon and binary semiconductors. // Applied Surface Science. 2005. V. 247, P.590.