

PACS numbers: 61.05.cp, 68.37.Hk, 73.40.Lg, 73.61.Ga.

ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ТА СТРУКТУРНІ ВЛАСТИВОСТІ ГЕТЕРОПЕРЕХОДІВ n -ZnS/ p -CdTe

Д.І. Курбатов¹, Н.М. Опанасюк¹, А.С. Опанасюк¹, В.В. Косяк²

¹ Сумський державний університет,
кафедра прикладної фізики
вул. Римського-Корсакова, 2, 40007, Суми, Україна
E-mail: kurd@ukr.net

² Сумський державний університет,
кафедра електроенергетики
вул. Римського-Корсакова, 2, 40007, Суми, Україна

В роботі проведено дослідження електрофізичних та структурних властивостей плівкових гетеропереходів ZnS/CdTe одержаних методом сублімації в замкненому об'ємі при різних умовах конденсації. В результаті визначені коефіцієнти ідеальності гетеропереходів, струми насичення, висоту потенціальних бар'єрів та механізми струмо-перенесення через гетеросистеми. Структурні дослідження дозволили встановити тип текстури плівок, їх фазовий склад, період кристалічної решітки матеріалів, а також залежність цих параметрів від технологічних умов отримання конденсатів. Показано, що на межі розділу гетеросистем отриманих при температурах підкладки $T_s > 773$ K утворюються тверді розчини з певним хімічним складом.

Ключові слова: ПЛІВКИ СПОЛУК A_2B_6 , ГЕТЕРОПЕРЕХІД, ТВЕРДІ РОЗЧИННИ, КРИСТАЛІЧНА СТРУКТУРА, СКАНУЮЧА ЕЛЕКТРОННА МІКРОСКОПІЯ, КОЕФІЦІЄНТ ІДЕАЛЬНОСТІ, ПОТЕНЦІЙНИЙ БАРЕР, МЕХАНІЗМ СТРУМОПЕРЕНЕСЕННЯ.

(Одержано 18.11.2009, у відредагованій формі – 11.12.2009)

1. ВСТУП

Сульфід кадмію n -типу ($E_g = 2,42$ eV) є традиційним матеріалом вікон плівкових сонячних елементів (СЕ) на базі поглинаючих шарів CIS ($CuInSe_2$), SIGS ($CuIn_{1-x}Ga_xSe_2$) та CdTe [1-3]. На сьогоднішній день максимальний ККД кращих плівкових СЕ на основі гетеропереходів (ГП) n -CdS/ p -CdTe становить 16,5% [4-5], але темпи його зростання суттєво уповільнилися. Вважається, що збільшення ККД СЕ з поглинаючим шаром CdTe, можна досягти шляхом заміни матеріалу оптичного вікна, що стимулювало пошук відповідних широкозонних напівпровідників [2, 6, 7]. Одним з таких перспективних матеріалів є ZnS. Сульфід цинку ($E_g = 3,68$ eV) має суттєво більшу ніж CdS ширину забороненої зони, це дозволяє розширити діапазон fotocутливості перетворювачів та збільшити їх струми короткого замикання. Крім цього завдяки низькому коефіцієнту заломлення шар ZnS може грати роль антивідбиваючого покриття СЕ, що збільшує кількість поглинутих фотонів і, відповідно, ККД фотоперетворювачів. Важливим з екологічної точки зору є те, що

ZnS є нетоксичним («Cd-free») матеріалом завдяки відсутності у складі важких металів. Вищеописані властивості роблять плівки ZnS альтернативою шарам CdS у сучасних СЕ.

Основним недоліком ГП $n\text{-ZnS}/p\text{-CdTe}$ є велика неузгодженість періодів решітки контактуючих матеріалів (~18%), що суттєво знижує КПД СЕ на їх основі. Ефективність існуючих СЕ як правило не перевищує ~ 4 % [2]. Однак завдяки тому, що сульфід цинку має однаковий тип кристалічної решітки з CdTe та утворює з останнім ряд твердих розчинів, можлива компенсація різниці періодів решітки цих матеріалів шляхом утворення на границі розділу напівпровідників перехідних шарів. Ці тверді розчини можуть виникати як природним шляхом в процесі дифузії компонентів сполук протягом часу отримання гетеросистем, так і можуть бути створенні штучно [2].

Важливу роль у стабільній роботі та ефективності перетворювачів сонячного випромінювання відіграють електрофізичні властивості багатошарових структур на базі яких вони створені. Вивченню механізмів струмоперенесення через ГП $n\text{-ZnS}/p\text{-CdTe}$ та основних параметрів, що їх характеризують і присвячена дана робота. Крім цього, в роботі здійснена спроба виявлення умов утворення вищеописаних твердих розчинів та додаткових фаз на межі контактуючих матеріалів в залежності від зміни фізико-технологічних умов отримання гетеросистем.

2. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Плівки халькогенідів (ZnS та CdTe) для створення ГП були отримані методом сублімації у замкненому об'ємі [8]. Як підкладки використовувались очищені скляні пластини як з електропровідним прозорим шаром ІТО ($\text{SnO}_2 + \text{In}_2\text{O}_3$) (рис. 1, а) так і без нього. Було виготовлено дві серії зразків. В першій серії плівки CdTe наносились на шари сульфиду цинку, а в другій навпаки, в якості нижнього шару був використаний телурид кадмію. Температура конденсації матеріалу оптичного вікна (ZnS) зразків першої серії змінювалась в діапазоні $T_s = 483\text{-}785\text{ K}$, $T_e = 1173\text{ K}$. Шари CdTe були нанесені в умовах близьких до термодинамічно рівноважних ($T_s = 823\text{ K}$, $T_e = 893\text{ K}$) [9].

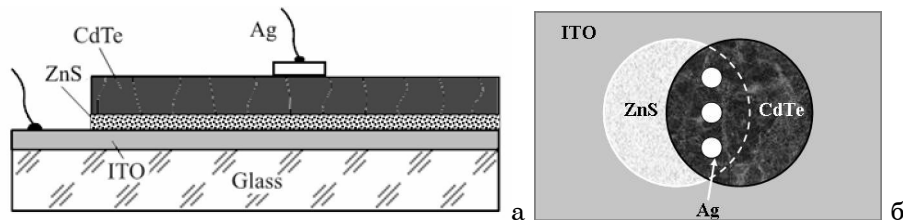


Рис. 1 – Поперечний переріз (а) та планарна геометрія (б) досліджуваних зразків першої серії

Нанесення плівок CdTe одночасно здійснювалося як на скляну підкладку так і на підшар ZnS (рис. 1, б). Це дало можливість провести порівняльний аналіз структурних характеристик конденсатів CdTe отриманих безпосередньо на склі та на підшарі ZnS. Верхні струмоз'ємні контакти до багатошарової структури були виготовлені з срібла, шляхом термічного нанесення у вакуумі.

Для проведення дифрактометричних досліджень, з метою усунення ліній від підшару ІТО, використовувалися обернені структури скло/CdTe/ZnS, де шари CdTe наносилися в умовах вказаних вище, а плівки ZnS при $T_s = 523-823$ К (друга серія).

Морфологія поверхні плівок халькогенідів вивчалася методом скануючої електронної мікроскопії. Для забезпечення стоку заряду з поверхні під час цих досліджень на шар ZnS наносилася тонка плівка срібла. Середній розмір зерен (d) в конденсатах знаходився методом Джефріса. Товщина плівок вимірювалася фрактографічно. Структурні дослідження конденсатів були виконані на рентгенодифрактометрі ДРОН 4-07 у Ni-фільтрованому K_α випромінюванні мідного анода. Фазовий склад, період решітки, текстура у конденсатах ZnS, CdTe знаходилися за методикою описаною в [9-10].

Дослідження темнових вольт-амперних характеристик (ВАХ) ГП проводилося з використанням високостабільного джерела живлення «АІР В5 120/0,75» при різних температурах вимірювання ($T = 293-333$ К) у вакуумі. Контроль та регулювання температури здійснювалися за допомогою автоматичного ПІД-регулятора «ОВЕН-10М». Далі шляхом аналізу ВАХ за стандартною методикою [11] визначалися особливості струмоперенесення та знаходилися основні електрофізичні параметри ГП ZnS/CdTe.

3. ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

3.1 Структурні дослідження

У попередніх роботах [9,12] нами було досліджено вплив фізико-технологічних умов конденсації у КЗО на структурні та субструктурні характеристики тонких плівок телуриду кадмію і визначені оптимальні режими отримання шарів з найкращими з точки зору використання у СЕ властивостями (однофазність, висока текстурованість, великі розміри стовпчастих кристалітів та ОКР, малий рівень мікродеформацій, низька концентрація дислокацій, тощо): $T_s = 823$ К, $T_e = 893$ К. Ці режими і були використані при нанесенні плівок CdTe.

Шари ZnS конденсувалися, як при низьких температурах підкладки ($T_s = 523$ К) коли дифузиею в процесі нанесення на підшар CdTe можна було знехтувати, так і при високих ($T_s = 773-823$ К), коли ці процеси повинні бути більш інтенсивними.

На рис. 2 представлені типові електронно-мікроскопічні знімки поверхні утворюючих ГП плівок CdTe, ZnS та перехідної області між ними. Для дослідження морфології конденсатів використовувалися зразки 1-ї серії.

Аналіз мікроструктури показав, що плівки CdTe на підшарі ZnS складаються з зерен різних фракцій, як мілких (2-3 мкм) так і значно крупніших (до 20 мкм). На поверхні крупних кристалітів добре розрізняються сходинки росту (рис. 2 в). Середній розмір зерен плівок CdTe складає ~ 7 мкм. Останні значення є суттєво більшими за розмір кристалітів у структурах CdTe/скло, отриманих при тих же технологічних умовах [10, 12]. Це може свідчити про певну орієнтуючу роль плівок сульфїду цинку. Плівки ZnS мають більш однорідну кристалічну структуру (рис. 2, а), середній розмір кристалітів яких є значно меншим ніж у плівок CdTe і становить ~ 1 мкм [13].

Товщина отриманих плівок CdTe складала $l \sim 10$ мкм, конденсати ZnS мали меншу товщину $l = (2-3)$ мкм, оскільки вони повинні добре пропускати сонячне випромінювання до поглинаючого шару з телуриду кадмію. Слід відмітити достатню добру адгезію між плівками, що утворюють ГП, незважаючи на деяку різницю коефіцієнтів лінійного розширення матеріалів ($6,14 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ – ZnS, $4,9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ – CdTe) [14].

На рис. 2, б показана перехідна область між плівкою ZnS та CdTe. Як видно з рисунка, спостерігається певне збільшення розміру кристалітів CdTe у напрямі руху ZnS \rightarrow CdTe. Це можна пояснити зростанням товщини цього халькогеніду. З фрактограми ГП (рис. 2, г) видно, що плівки телуриду кадмію мають виражену стовпчасту структуру росту, в той же час шари ZnS складаються з ряду зерен розташованих одне над одним. На межі розділу матеріалів простежується деякий прошарок зі зміненою структурою, який на нашу думку обумовлений утворенням твердих розчинів між халькогенідами.

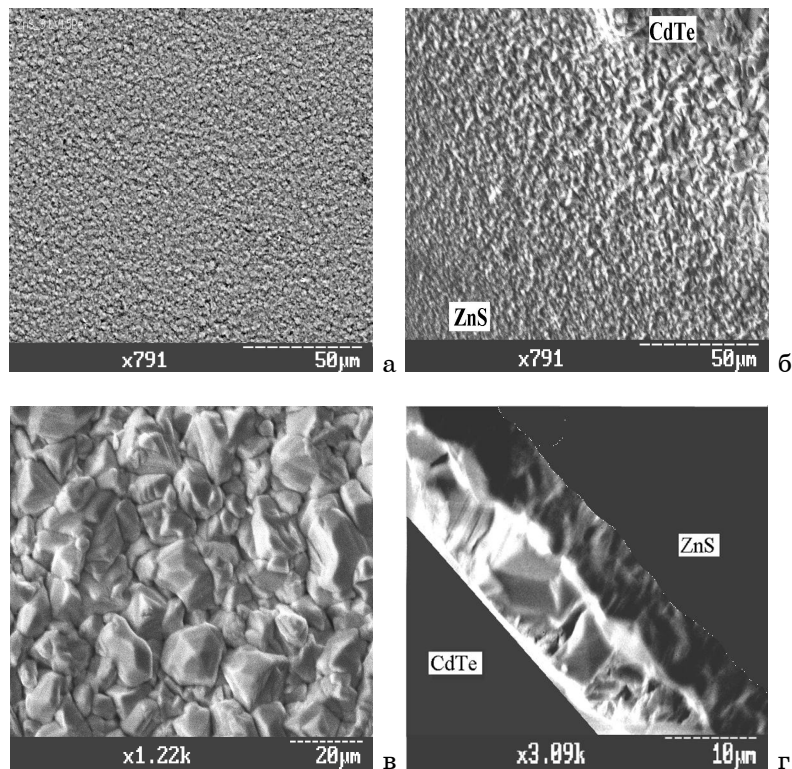


Рис. 2 – Мікроструктура поверхні плівок ZnS на склі (а) і CdTe на ZnS (в); перехідна область між плівкою ZnS і CdTe (б); фрактограма ГП ZnS/CdTe. Режими конденсації ZnS: $T_e = 1173 \text{ K}$, $T_s = 785 \text{ K}$; CdTe: $T_e = 893 \text{ K}$, $T_s = 823 \text{ K}$.

Типові дифрактограми отримані від плівок ZnS на склі та гетероструктури ZnS/CdTe наведені на рис. 3. Для рентгенографічних досліджень використовувалися зразки 2-ї серії. Аналіз рентгенограм показав, що плівки ZnS одержані у інтервалі температур з $T_s < 573$ К на скляних підкладках мають кубічну структуру сфалериту. Гексагональна фаза в таких конденсатах рентгенографічно не виявляється [15].

Як правило, на дифрактограмах реєструються відбивання від площин (111), (311), (222), (331) кубічної фази. При цьому домінуючими за інтенсивністю у більшості випадків є піки (111), що свідчить про наявність у плівках яскраво вираженої текстури. При $T_s > 573$ К в плівках ZnS з'являються сліди гексагональної фази (вюрциту), кількість якої збільшується при зростанні температури конденсації (рис. 3, а).

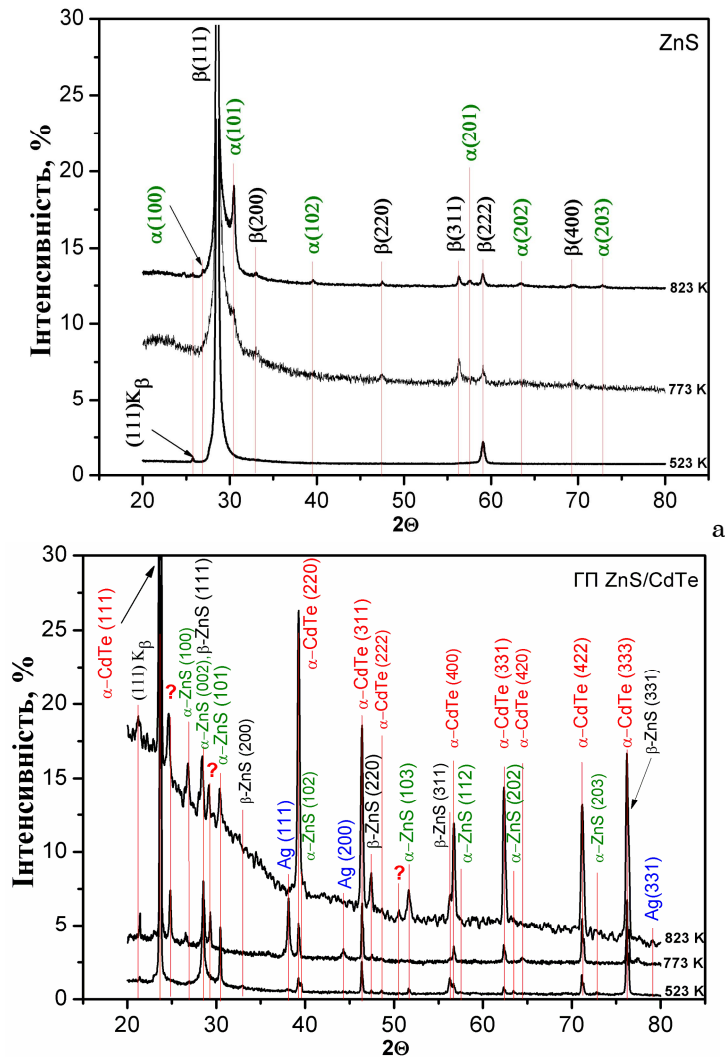


Рис. 3 – Дифрактограми від плівок ZnS на склі (а) та підшарі CdTe (б) отриманих при різних температурах конденсації

Дифрактограми від двошарових структур ZnS/CdTe є значно складнішими ніж від одношарових, що затрудняє фазовий аналіз зразків. Як видно з рис. 3, б, на цих дифрактограмах фіксуються піки від кристалографічних площин кубічних фаз ZnS та CdTe, а при підвищених температурах конденсації T_s і гексагональної фази сульфиду цинку. Детальна розшифровка рентгенограми від ГП де шар ZnS отриманий при $T_s = 823$ К за даними JCPDS [16] наведена у табл.1.

Слід звернути особливу уваги на те, що при зростанні температури конденсації сульфиду цинку до $T_s = 773$ К на рентгенограмах з'являються додаткові піки на кутах $2\theta = 24,60^\circ$ та $29,12^\circ$. При подальшому підвищенні температури осадження конденсатів ($T_s = 823$ К) інтенсивність вказаних піків дещо зростає, у той самий час фіксується поява нового піку на кутах $2\theta = 50,50^\circ$.

Таблиця 1 – Фазовий аналіз гетеросистеми CdTe-ZnS (жирним шрифтом виділені піки від ймовірного твердого розчину сполук)

Досліджуваний зразок				JCPDS		α -CdTe	β -ZnS	α -ZnS	TP
Пік	d , нм	2θ	I	2θ	I				
1	0,37511	23,70	100	23,76	100	(111)	-	-	-
2	0,36157	24,60	5,16			-	-	-	?
3	0,33261	26,78	4,42	27,08	100	-	-	(100)	-
4	0,31421	28,38	5,62	28,56 (28,69)	100	-	(111)	(002)	-
5	0,30639	29,12	2,85			-	-	-	?
6	0,29397	30,38	3,59	30,70	100	-	-	(101)	-
7	0,22937	39,24	27,35	39,28	60	(220)	-	-	-
8	0,19560	46,38	24,03	46,43	30	(311)	-	-	-
9	0,19171	47,38	4,05	47,51	51	-	(220)	-	-
10	0,18056	50,50	1,57			-	-	-	?
11	0,17698	51,60	3,68	51,90	100	-	-	(103)	-
12	0,16334	56,27	3,59	56,29	30	-	(311)	-	-
13	0,16220	56,70	12,43	56,77	6	(400)	-	-	-
14	0,14876	62,37	22,84	62,40	10	(331)	-	-	-
15	0,13237	71,17	21,45	71,21	10	(422)	-	-	-
16	0,12915	73,22	1,10	73,32	40		-	(203)	-
17	0,12483	76,20	29,93	76,27	4	(333), (511)	-	-	-
18	0,12457	76,42	1,20	76,8	9	-	(331)	-	-

Аналіз дифрактограм свідчить, що лінії на вказаних кутах не пов'язані з відбиваннями від кристалографічних площин халькогенідів ZnS і CdTe, а також інших сполук, що могли утворитися внаслідок окислення зразків на повітрі (ZnO, CdO, TeO₂ тощо). В зв'язку з цим можна зробити припущення про утворення на межі розділу двох халькогенідів твердих розчинів змінного хімічного складу, наприклад, Cd_xZn_{1-x}S, Cd_xZn_{1-x}Te або CdS_xTe_{1-x}, ZnS_xTe_{1-x}. Виходячи з цього, факт зростання інтенсивності «невдомих» піків зі збільшенням T_s стає зрозумілим – адже при конденсації півки ZnS на CdTe при високих температурах відбувається більш інтенсивна взаємна дифузія атомів

напівпровідників, що з більшою ймовірністю може привести до виникнення нових фаз. Враховуючи те, що коефіцієнти дифузії металів у сполуках A_2B_6 значно більші ніж халькогену [17] на межі розділу в першу чергу слід очікувати утворення твердих розчинів виду $Cd_xZn_{1-x}S$ або $Cd_xZn_{1-x}Te$. В подальшому нами зроблена спроба визначити приблизний склад цих розчинів за їх періодом решітки та відомими літературними даними про залежність a від x .

Прецизійне визначення періодів кристалічної решітки шарів ZnS та CdTe було проведено нами за допомогою екстраполяційних методів Бредлі-Джея та Нельсона-Рілі [18]. Отримані результати наведені у табл. 2. Як видно з таблиці значення a , c знайдені двома різними методами непогано корелюють між собою. Однак, оскільки значення періоду решітки отримані за методом Нельсона-Рілі є більш точними в подальшому будемо обговорювати саме їх.

Експериментальні значення сталої решітки сфалериту у плівках ZnS ($a = 0,54085-0,54173$ нм) та CdTe ($a = 0,64804-6,64843$ нм) непогано співпадають з даними JCPDS ($a = 0,54060$ нм – ZnS, $a = 0,64820$ нм – CdTe). При цьому помітна тенденція до зменшення періодів решітки обох матеріалів при зростанні температури осадження ZnS.

Для гексагональної фази плівок ZnS отримані такі значення параметрів кристалічної решітки $a = 0,3806-0,3830$ нм та $c = 0,6227-0,6266$ нм ($c/a = 1,64$). Ці величини також досить добре корелюють з даними наведеними в JCPDS: $a = 0,3811$ нм; $c = 0,6234$ нм ($c/a = 1,64$).

Таблиця 2 – Результати прецизійного визначення періоду решітки ZnS та CdTe методами Бредлі-Джея та Нельсона-Рілі

T_s, K	Фаза	a , нм	c , нм	a , нм	c , нм	JCPDS
		$a(c) - \cos^2\theta$	$a(c) - 1/2\cos^2\theta(1/\sin\theta + 1/\theta)$			
523	CdTe	0,64777	-	0,64843	-	$a = 0,64820$
	β -ZnS	0,54083	-	0,54173	-	$a = 0,54060$
	α -ZnS	0,3825	0,6258	0,3830	0,6266	$a = 0,3811,$ $c = 0,6234$
773	CdTe	0,64750	-	0,64836	-	$a = 0,64820$
	β -ZnS	0,53866	-	0,54091	-	$a = 0,54060$
823	CdTe	0,64700	-	0,64804	-	$a = 0,64820$
	β -ZnS	0,53859	-	0,54085	-	$a = 0,54060$
	α -ZnS	0,3754	0,6141	0,3806	0,6227	$a = 0,3811,$ $c = 0,6234$

Крім цього, здійснена спроба визначення періоду решітки твердого розчину, що за припущенням виникає на межі поділу халькогенідів. При цьому вважалось, що пік на кутах $2\theta = 24,60^\circ-24,70^\circ$ належить цим розчинам і є найбільш інтенсивним з усіх, які належать цьому матеріалу. З літературних джерел відомо, що трикомпонентна сполука $Cd_xZn_{1-x}Te$ в основному існує у формі сфалериту, в той час як сполука $Cd_xZn_{1-x}S$ – вюрцититу [14, 19, 20]. Тоді пік на кутах $2\theta = 24,600-24,700$ може належати або кубічній фазі $Cd_xZn_{1-x}Te$ і є відбиванням від площини (111) або гекса-

гональній фазі $Cd_xZn_{1-x}S$ і є відбиванням від площини (100). У першому випадку період решітки матеріалу становить у різних зразках $a = 0,62215-0,62625$ нм, у другому – $a = 0,4175-0,41477$ нм, $c = 0,6786-0,6830$ нм. Вважаючи, що залежність сталих кристалічної решітки твердих розчинів від їх складу описується законом Вегарда, можна розрахувати приблизне значення x [19-20]. В результаті розрахунків встановлено, що відбивання на вказаних раніше кутах можуть давати розчини типу $Cd_xZn_{1-x}Te$ з $x = 0,76-0,80$ зі структурою сфалериту. Твердих розчинів $Cd_xZn_{1-x}S$ зі структурою вюрциту та розрахованим періодом решітки в природі не існує.

3.2 Електрофізичні дослідження

Прямі гілки темнових ВАХ гетероструктур $Ag/p-CdTe/n-ZnS/ITO$ (серія 1) побудовані у напівлогарифмічному масштабі наведені на рис. 4. Точками на графіках позначені експериментальні дані, прямі лінії проведені методом найменших квадратів за допомогою програмного пакету для чисельного аналізу Origin Pro. Тип провідності конденсатів, отриманих в ідентичних технологічних умовах визначений нами в попередніх дослідженнях [12, 21]. Було встановлено, що плівки ZnS мають електронну провідність, а плівки CdTe – діркову.

Як показали дослідження, прямі гілки ВАХ при низьких напругах зміщення ($U < 1,5$ В) описуються експоненціальною залежністю, в той час як при високих зовнішніх напругах ($U > 20$ В) вони є суперлінійними у подвійних логарифмічних координатах, що є звичайним для інжекційних струмів. Такі особливості залежностей струм-напруга є характерними для ГП з високим послідовним опором, коли при підвищенні напруги зміщення контактні механізми струмоперенесення замінюються об'ємними [22-23].

На ВАХ ГП наведених у напівлогарифмічному масштабі спостерігаються дві ділянки з різними кутами нахилу до осі напруги. При нижчих напругах зміщення ($U < 0,5$ В) для всіх досліджених зразків кут нахилу I - V -залежностей зменшується при зростанні температури вимірювання. Ця особливість є характерною для термоактиваційних механізмів проходження струму через межу ГП. Навпаки, незалежність кута нахилу ВАХ до осі напруг від температури вимірювання, що спостерігається при $U > 0,5$ В, є ознакою нетеплових механізмів струмоперенесення через структури [11,22-23]. Відомо [11], що у випадку термоактиваційних механізмів струмоперенесення ВАХ описується наступною залежністю:

$$I = I_s \exp(qU / nkT), \quad (1)$$

де I – струм, що проходить через ГП; I_s – струм насичення; q – заряд електрону; U – напруга зміщення прикладена до структури; n – коефіцієнт ідеальності ГП; k – стала Больцмана; T – температура вимірювання.

В свою чергу струм насичення може бути знайдений з виразу:

$$I_s = I_{0s} \exp(qU_{k0} / nkT), \quad (2)$$

де U_{k0} – висота потенціального бар'єра на переході при відсутності зовнішньої напруги.

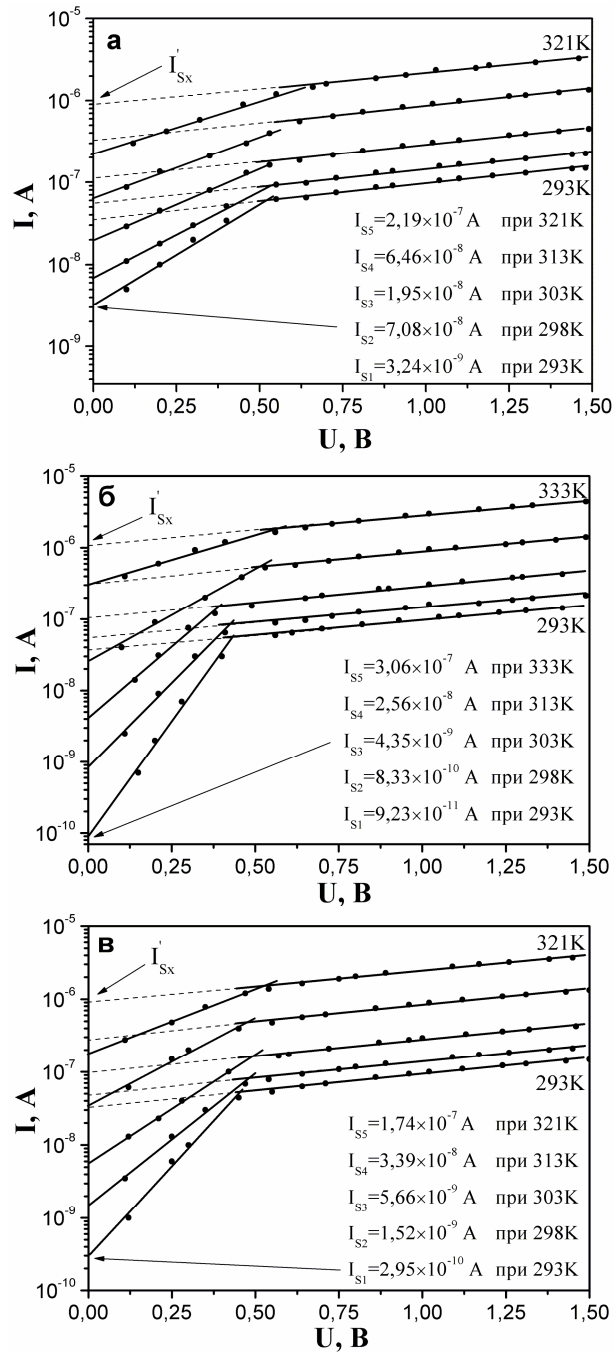


Рис. 4 – Прямі гілки ВАХ ГП $n\text{-ZnS}/p\text{-CdTe}$, отримані при різних температурах вимірювання. Режими конденсації ZnS : $T_s = 483$ К (а); $T_s = 623$ К (б); $T_s = 785$ К (в)

У випадку нетеплових механізмів струмоперенесення через ГП пряма гілка ВАХ описується виразом [11]:

$$I = I_s \exp(\alpha U), \quad (3)$$

де

$$I_s = I_{0s} \exp(\beta T), \quad (4)$$

тут I_{0s} , α , β – константи, які не залежать від U та T .

Слід зазначити, що механізм струмоперенесення через ГП в значній мірі визначається станом межі поділу напівпровідників. Відомо [11, 17, 22-23], що при неспівпаданні сталих решіток матеріалів, що утворюють гетеросистему, яке перевищує 4 %, електричні властивості ГП повністю визначаються поверхневими станами.

Для визначення основних електрофізичних параметрів гетеросистем температурно-залежні ділянки ВАХ лінеаризувалися в координатах $\text{Lg}I_s - 1/T$ в той час як температурно-незалежні – в координатах $\text{Lg}I_s - T$ (рис. 5). Далі з використанням співвідношень (2) та (4) з отриманих прямих за їх нахилом та значеннями, що відсікалися на осі струмів, знаходилися конкретні значення сталих n , U_{k0} , α і β .

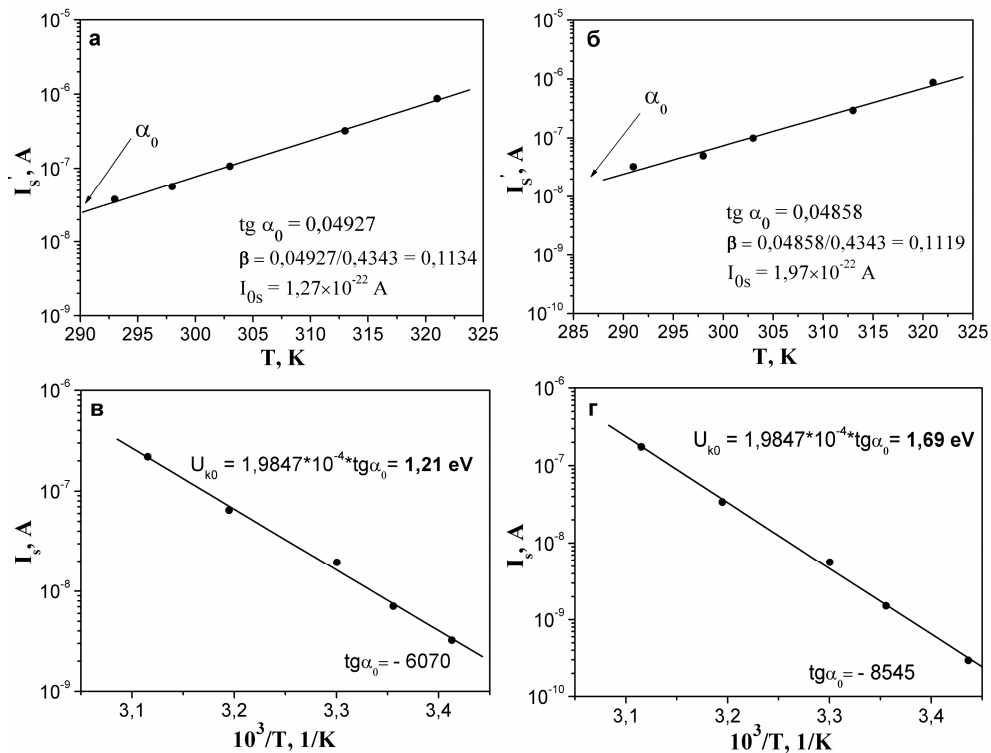


Рис. 5 – Типові температурні залежності струму насичення I_s для $U > 0,5 \text{ В}$ (а, б) та $U < 0,5 \text{ В}$ (в, г). Режимы конденсації плівок ZnS: $T_s = 483 \text{ К}$ (а, в); $T_s = 785 \text{ К}$ (б, г)

Результати розрахунків систематизовані у таблиці 3. Як видно з таблиці, коефіцієнт ідеальності досліджених ГП змінюється в діапазоні $n = 2,70-7,04$. Найнижче значення коефіцієнт ідеальності переходу $n = 2,70$ набуває в системах отриманих при $T_s = 623$ К. Ці результати співпадають з отриманими авторами [24].

Таблиця 3 – Основні електрофізичні параметри ГП $n\text{-ZnS}/p\text{-CdTe}$

Температура конденсації шару ZnS T_s, K	Коефіцієнт ідеальності n	Висота потенційного бар'єру U_{k0}, eV	Параметр α	Параметр β
483	7,04	1,21	0,954	0,1134
623	2,7	1,57	0,951	0,0840
785	3,5	1,69	1,032	0,1119

Знайдені з ВАХ значення висоти потенціального бар'єра на ГП $U_{k0} = (1,21-1,69)$ еВ непогано корелюють з розрахованими теоретично: U_{k0} (теор.) = $\Phi_{\text{ZnS}} - \Phi_{\text{CdTe}} = 7,0-5,7 = 1,30$ еВ (де Φ – робота виходу електрона) [25, 26]. При цьому спостерігається збільшення U_{k0} при підвищенні температури осадження плівки ZnS. Це може бути обумовлено зміною фазового складу шару сульфиду цинку та стану межі поділу напівпровідників.

Параметри α та β від фізико-технологічних режимів отримання ГП залежали слабо, змінюючись в інтервалі $\alpha = 0,951-1,032$ та $\beta = 0,084-1134$. Спільний аналіз ВАХ, температурної залежності струму насичення I_s та сталих, що характеризують струмоперенесення в структурі свідчать, що в ГП $n\text{-ZnS}/p\text{-CdTe}$ при напругах зміщення $U < 0,5$ В реалізується емісійно-рекомбінаційний механізм перенесення носіїв струму, який при $U > 0,5$ В змінюється тунельно-рекомбінаційним.

4. ВИСНОВКИ

В широкому діапазоні фізико-технологічних умов конденсації методом сублимації в замкненому об'ємі отримані ГП $n\text{-ZnS}/p\text{-CdTe}$. Вивчено фазовий склад компонентів гетероструктури, встановлено тип їх текстури та періоди кристалічної решітки матеріалів. Показано, що присутність підшару ZnS приводить до збільшення розміру кристалітів конденсатів CdTe, нанесених в квазірівноважних умовах. Це свідчить про часткове гетероепітаксіальне наростання шару CdTe на підшарі ZnS. Підтверджена можливість утворення на межі розділу матеріалів при високих температурах конденсації плівок твердих розчинів. В результаті проведених розрахунків встановлено, що в системі ZnS/CdTe утворюються тверді розчини типу $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{Te}$ де $x = 0,76-0,80$ зі структурою сфалериту.

Дослідження темнових ВАХ гетеросистем при різних температурах вимірювання дозволили визначити коефіцієнти ідеальності ГП, їх струми насичення, висоту потенціальних бар'єрів та механізми струмоперенесення. Встановлено, що при напругах зміщення $U < 0,5$ В реалізується емісійно-рекомбінаційний механізм перенесення носіїв струму, який при $U > 0,5$ В змінюється тунельно-рекомбінаційним.

ELECTROPHYSICAL AND STRUCTURAL CHARACTERISTICS OF
n-ZnS/*p*-CdTe HETEROJUNCTIONS

D.I. Kurbatov¹, N.M. Opanasyuk¹, A.S. Opanasyuk¹, V.V. Kosyak²

¹ Sumy State University,
Department of Applied Physics
2, Rimsky-Korsakov Str., 40007, Sumy, Ukraine
E-mail: kurd@ukr.net

² Sumy State University,
Department of Electroenergetics
2, Rimsky-Korsakov Str., 40007, Sumy, Ukraine

Electrophysical and structural characteristics of ZnS/CdTe film heterojunctions obtained by close-spaced vacuum sublimation technique at different growth conditions has been studied in this work. Results of these studies enabled to determine ideality factors, saturation currents, potential barriers and current-transfer mechanisms of these heterostructures. Structural investigations enabled to determine texture type of the films; theirs phase composition, lattice parameters and dependence of these parameters on the growth conditions. As a result, shown that on heterosystems boundary obtained at substrates temperatures $T_s > 773$ K arise solid solutions with a definite chemical composition.

Keywords: II-VI FILMS, HETEROJUNCTION, SOLID SOLUTIONS, CRYSTAL STRUCTURE, SCANNING ELECTRON MICROSCOPY, IDEALITY FACTOR, POTENTIAL BARRIER, CURRENT-TRANSFER MECHANISM.

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ И СТРУКТУРНЫЕ СВОЙСТВА ГЕТЕРОПЕРЕХОДОВ
n-ZnS/*p*-CdTe

Д.И. Курбатов¹, Н.Н. Опанасюк¹, А.С. Опанасюк¹, В.В. Косяк²

¹ Сумский государственный университет,
кафедра прикладной физики,
ул. Римского-Корсакова, 2, 40007, Сумы, Украина
E-mail: kurd@ukr.net

² Сумский государственный университет,
кафедра электроэнергетики,
ул. Римского-Корсакова, 2, 40007, Сумы, Украина

В работе проведено исследование электрофизических и структурных свойств пленочных гетеропереходов ZnS/CdTe полученных методом сублимации в замкнутом объеме при разных условиях конденсации. В результате определены коэффициенты идеальности гетеропереходов, токи насыщения, высоту потенциальных барьеров и механизмы токопереноса через гетеросистемы. Структурные исследования позволили установить тип текстуры пленок, их фазовый состав, период кристаллической решетки материалов, а также зависимость этих параметров от технологических условий получения конденсатов. Показано, что на границе раздела гетеросистем полученных при температурах подложки $T_s > 773$ К образуются твердые растворы с определенным химическим составом

Ключевые слова: ПЛЕНКИ СОЕДИНЕНИЙ A_2B_6 , ГЕТЕРОПЕРЕХОД, ТВЕРДЫЕ РАСТВОРЫ, КРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА, СКАНИРУЮЩАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ МИКРОСКОПИЯ, КОЭФФИЦИЕНТ ИДЕАЛЬНОСТИ, ПОТЕНЦИАЛЬНЫЙ БАРЬЕР, МЕХАНИЗМ ТОКОПЕРЕНОСА.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. D. Hariskos, S. Spiering, M. Powalla, *Thin Solid Films* **480-481**, 99 (2005).
2. I.O. Olageji, L. Chow, C.S. Ferekides, V. Viswanathan, Z. Zhao, *Sol. Energ. Mat. Sol. Cel.* **61**, 203 (2000).
3. W.K. Metzger, I.L. Repins, M.A. Contreras, *Appl. Phys. Lett.* **93**, 022110 (2008).
4. A. Bosio, N. Romeo, S. Mazzamuto, V. Canevari, *Prog. Cryst. Growth. Ch.* **52**, 247 (2006).
5. X. Wu, *Sol. Energy* **6**, 803 (2004).
6. G. Contreras-Puente, O. Vigil, M. Ortega-Lopez, *Thin Solid Films* **361-362**, 378 (2000).
7. R. Venugopal, B.K. Reddy, D.R. Reddy, *Mat. Chem. Phys.* **55**, 36 (1998).
8. Y.P. Venkata Subbaiah, P. Prathap, M. Devika, *Physica B* **365**, 240 (2005).
9. D. Kurbatov, V. Kosyak, A. Opanasyuk, *Integr. Ferroelectr.* **103**, 32 (2008).
10. D. Kurbatov, A. Opanasyuk, H. Khlyap, *phys. status solidi (a)* **206**, 1549 (2009).
11. Б.Л. Шарма, Р.К. Пурохит, *Полупроводниковые гетеропереходы* (М: Советское радио: 1979).
12. V.V. Kosyak, M.M. Kolesnik, A.S. Opanasyuk, *J. Mater. Sci.-Mater. El.* **19**, S375 (2008).
13. D. Kurbatov, A. Opanasyuk, A. Kramchenkov, *Semiconductor Phys. Quantum Electron. Optoelectron.* **11**, 252 (2008).
14. Н.Н. Берченко, В.Е. Кревс, В.Г. Средин, *Полупроводниковые твердые растворы и их применение: Справочные таблицы* (М.: Воениздат: 1982).
15. A.G. Balogh, S.M. Duvanov, D.I. Kurbatov, *Photoelectronics* **17**, 134 (2008).
16. *Selected powder diffraction data for education straining (Search manual and data cards)* (Published by the International Centre for diffraction data, USA, 1988).
17. И.П. Калинин, В.Б. Алесковский, *Эпитаксиальные пленки соединений A_2B_6* (Ленинград: Изд-во ЛГУ: 1978).
18. В.Е. Warren, *X-ray Diffraction* (New York: Dover: 1990).
19. Ф.Е.Н. Hassan, B. Amrani, F. Bahoun, *Physica B* **391**, 363 (2007).
20. J.H. Lee, W.C. Song, J.S. Yi, K.J. Yang, W.D. Han, J. Hwang, *Thin Solid Films* **431-432**, 349 (2003).
21. D. Kurbatov, V. Kosyak, A. Opanasyuk, V. Melnik, *Physica B* **404**, 5002 (2009).
22. А.В. Симашкевич, *Гетеропереходы на основе полупроводниковых соединений A_2B_6* . (Кишинев: Штиинца: 1980).
23. А. Фаренбрук, Р. Бьюб, *Солнечные элементы. Теория и эксперимент* (М.: Энергоатомиздат: 1987).
24. S.K.J. Al-Ani, A.Kh. Ba-Yashoot, M.N. Makadsi, *Turk. J. Phys.* **31**, 259 (2007).
25. X.S. Fang, Y. Bando, G.Z. Shen, C.H. Ye, U.K. Gautam, P.M.F.J. Costa, C.Y. Zhi, C.C. Tang, D. Golberg, *Adv. Mater.* **19**, 2593 (2007).
26. Alnajjar, S. Abdul Jawad, and N. Yusuf, *Renew. Energ.* **27** No3, 417 (2002).