

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ In-CdS<sub>x</sub>Te<sub>1-x</sub>-Si-In-СТРУКТУРЫ

И.Б. Сапаев

Физико-технический институт Академия наук Узбекистана (Ташкент)  
Узбекистан

Поступила в редакцию 12.04.2013

Изготовлено гетеропереходы  $n/Si-n/CdS_xTe_{1-x}$  методом вакуумного напыления пленки твердого раствора  $CdS_xTe_{1-x}$  на поверхность монокристаллического  $n/Si$ . Исследованы основные электрические и фотоэлектрические свойства гетеропереходов. Определены значения постоянной кристаллической решетки твердого раствора  $CdS_xTe_{1-x}$  на границе гетероструктуры  $n/Si-n/CdS_xTe_{1-x}$ .

**Ключевые слова:** твердый раствор, пленка, спектр, фоточувствительность.

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ І ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ In-CdS<sub>x</sub>Te<sub>1-x</sub>-Si-In-СТРУКТУРИ

І.Б. САПАЄВ

Виготовлено гетеропереходи  $n/Si-n/CdS_xTe_{1-x}$  методом вакуумного напилювання плівки твердого розчину  $CdS_xTe_{1-x}$  на поверхню монокристалічного  $n/Si$ . Досліджено основні електричні та фотоелектричні властивості гетеропереходів. Визначено значення постійних кристалічних ґраток твердого розчину  $CdS_xTe_{1-x}$  на границі гетероструктури  $n/Si-n/CdS_xTe_{1-x}$ .

**Ключові слова:** твердий розчин, плівка, спектр, фоточутливість.

## RESEARCH OF ELECTRIC AND PHOTO-ELECTRIC PROPERTIES In-CdS<sub>x</sub>Te<sub>1-x</sub>-Si-In STRUCTURES

I.B. Sapayev

It is made heterojunction  $n/Si-n/CdS_xTe_{1-x}$  by a method of a vacuum dusting of a film of firm solution  $CdS_xTe_{1-x}$  on a surface monocrystalline  $n/Si$ . The basic electric and photo-electric properties of heterojunction are investigated. Values of a constant crystal lattice of firm solution  $CdS_xTe_{1-x}$  on heterostructure border  $n/Si-n/CdS_xTe_{1-x}$  are defined.

**Keywords:** solid solution, film, spectrum, photosensitivity.

### ВВЕДЕНИЕ

Представляет научный и практический интерес получения гетероперехода на основе кремния (Si) и полупроводниковыми соединениями  $A^2B^6$  и  $A^3B^5$ . Это позволило бы более эффективно использовать потенциальные возможности кремния и полупроводниковых соединений  $A^2B^6$  и  $A^3B^5$  в твердотельной электронике, фотовольтаике и фотоэнергетике. В данной работе рассматриваются определенные конструктивные вопросы в технологии получения эффективного гетероперехода на основе Si и теллурида кадмия CdTe без поверхностных состояний. Однако известно [1], что постоянные кристаллических решеток кремния ( $\alpha = 5,43 \text{ \AA}$ ) и теллурида кадмия CdTe ( $\alpha = 6,477 \text{ \AA}$ ) резко отличаются, поэтому, чтобы создать эффективный гетеропереход между этими полупроводниковыми материалами необходимо использовать про-

межуточный полупроводниковый материал, который согласовал бы, их постоянные кристаллических решеток. Таким материалом может быть твердый раствор (ТР)  $CdS_xTe_{1-x}$ , который является непрерывным и в нем постоянные решетки изменяется от значения  $\alpha = 5,84 \text{ \AA}$  сульфида кадмия до  $\alpha = 6,477 \text{ \AA}$  теллурида кадмия. В этом твердом растворе можно найти такой состав, в котором постоянная решетка соответствовал бы постоянной решетки кремния. С этой целью на поверхности кремния формировали ТР  $CdS_xTe_{1-x}$  различного состава. Для этого в кварцевый тигель помещали порошки CdS и CdTe в весовых отношениях 10:1 и напыляли на поверхность кремния в вакууме  $10^{-5}$  торр. При этом источник – тигель нагревался в пределах  $950 \text{ }^\circ\text{C} - 1100 \text{ }^\circ\text{C}$ , а подложка (Si) находилась при температуре  $150 - 250 \text{ }^\circ\text{C}$ .

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ**

Гетеропереходы  $n/Si-n/CdS_xTe_{1-x}$  нами были созданы путем напыления индия в вакууме  $\sim 10^{-5}$  Торр с толщиной  $\sim 400 - 500 \text{ \AA}$  на поверхность высокоомных пленок  $n$ -типа проводимости с удельным сопротивлением  $\rho \approx 10^5 - 10^6 \text{ \Omega}\cdot\text{см}$  с толщиной  $\sim 4 \text{ \mu м}$ .

Полученные гетероструктуры имеют наиболее приемлемые параметры: напряжение холостого хода и ток короткого замыкания при температуре  $t_s = 400 \text{ }^\circ\text{C}$ . Структуры  $n/Si-n/CdS_xTe_{1-x}$ , полученные при  $t_s = 465 \text{ }^\circ\text{C}$ , имеют электрофизические характеристики, в частности вольтамперные характеристики, как у  $n-i-n$ - структур с длинной базой, где  $d/L = 14 - 55$  (толщина  $i$ -слоя,  $L$  – длина диффузии неосновных носителей тока).

С увеличением температуры  $t_s$  толщина слоя  $CdS_xTe_{1-x}$  возрастает, а выходные параметры гетероструктур  $n/Si-n/CdS_xTe_{1-x}$  ухудшаются. Поэтому в данной структуре исследования проведены при  $t_s = 400$  и  $465 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Фазовый состав твердого раствора  $CdS_xTe_{1-x}$  исследовали с помощью фотоэлектрического метода. Спектральное распределение фоточувствительности измерено в вентильном режиме на монохроматоре ЗМР-3 при комнатной температуре. Источником излучения служила ксеноновая лампа типа ДКСШ-1000 со световым потоком  $53000 \text{ лм}$ , яркостью до  $120 \text{ Мкд/м}^2$  с центральным световым пятном, работающим в режиме минимально допустимой мощности. Излучение отградуировано в абсолютных единицах при помощи термоэлемента с кварцевым окошком РТЭ-9. Лампа ДКСШ-1000 в УФ- и видимой областях имеет сплошной спектр, а в ближней ИК-области ( $800 - 820 \text{ нм}$ ) – мощные линии излучения. В этом методе большое значение имеет установление размеров входных и выходных щелей и разрешающей способности монохроматора, позволяющие корректно измерять параметры образца. Проведенная оценка показала [2], что ширина щели должна составлять  $\sim 10 \text{ мкм}$ . Однако в эксперименте была установлена более широкая щель, чтобы обеспечить достаточную фоточувствительность исследуемого образца, сохраняя при этом возможность исследования тонких явлений. При этом разрешающая способность

монохроматора не превышает 3% в исследуемой области спектра.

**РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ**

Одним из важных вопросов является исследование состава твердого раствора  $CdS_xTe_{1-x}$ . На рис. 1а и 1б показаны спектральные распределения фоточувствительности гетероструктур  $n/Si-n/CdS_xTe_{1-x}$ , полученные для структур, выращенных при температурах подложки  $t_s = 400$  и  $465 \text{ }^\circ\text{C}$ . В спектральном распределении фоточувствительности между краями собственного поглощения  $CdS$  и  $CdTe$  для гетероструктуры  $n/Si-n/CdS_xTe_{1-x}$ , полученной при температуре  $t_s = 400 \text{ }^\circ\text{C}$ , наблюдаются явные пики  $\lambda_{1\text{max}} = 0,735 \text{ мкм}$  и  $\lambda_{2\text{max}} = 0,930 \text{ мкм}$  (рис. 1а). В спектральном распределении фоточувствительности гетероструктуры  $n/Si-n/CdS_xTe_{1-x}$ , полученной при

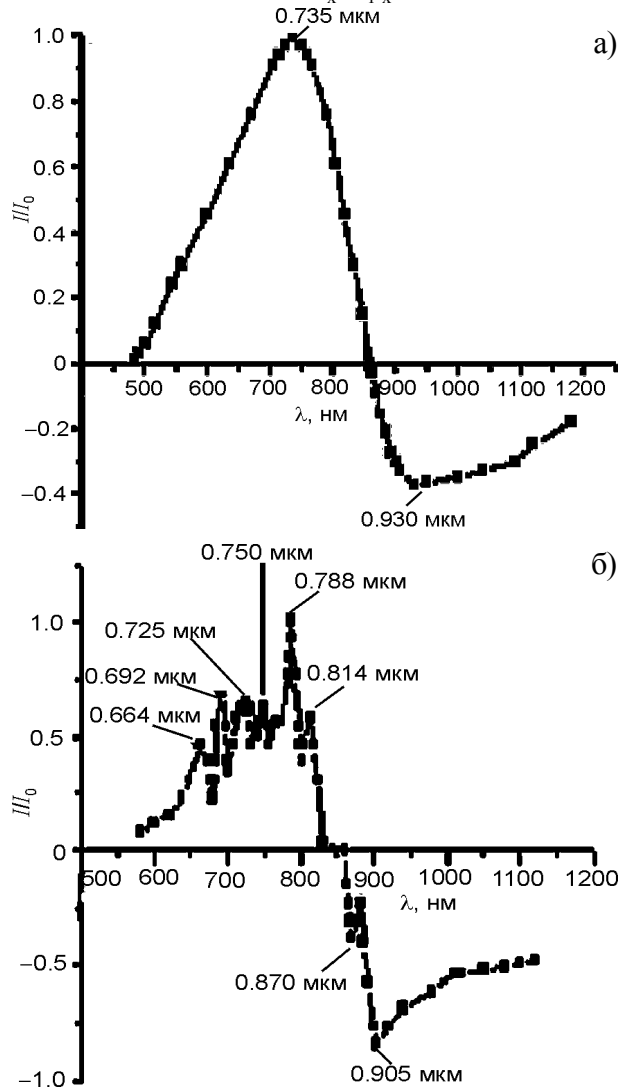


Рис. 1. Спектральное распределение фоточувствительности гетеропереходов  $n/Si-n/CdS_xTe_{1-x}$ , выращенных при температуре  $t_s = 400$  (а) и  $465 \text{ }^\circ\text{C}$  (б).

температуре  $t_s = 465$  °С, имеются несколько пиков при  $\lambda_1^{\max} = 0,664$  мкм,  $\lambda_2^{\max} = 0,692$  мкм,  $\lambda_3^{\max} = 0,725$  мкм,  $\lambda_4^{\max} = 0,750$  мкм,  $\lambda_5^{\max} = 0,788$  мкм,  $\lambda_6^{\max} = 0,814$  мкм,  $\lambda_7^{\max} = 0,870$  мкм и  $\lambda_8^{\max} = 0,905$  мкм (рис. 1б).

Для обнаруженных пиков в спектральной зависимости распределения fotocувствительности определены соответствующие края фундаментального поглощения  $\lambda_{c.f.a}$  с помощью экстраполяции длинноволнового края максимумов fotocувствительности на ось  $\lambda$ . Используя значения краев фундаментального поглощения для обнаруженных пиков в спектре fotocувствительности, определены ширины запрещенных зон  $E_g$  твердых растворов (ТР), формируемых на гетерогранице  $n/Si-n/CdS_xTe_{1-x}$ .

На основе зависимости между составом ТР и шириной запрещенной зоны  $E_g(x)$  [3] определен состав ТР  $CdS_xTe_{1-x}$  для найденных значений  $E_g$ . Определение значения края фундаментального поглощения  $\lambda_{c.f.a}$ , ширина запрещенной зоны  $E_g$ , состав  $x$  ТР для всех обнаруженных пиков на спектре fotocувствительности при  $t_s = 400$  и  $465$  °С приводятся в табл. 1. Значение постоянной кристаллической решетки  $a_0(x)$  для обнаруженных ТР  $CdS_xTe_{1-x}$ , которые оценены по эмпирической формуле  $a_0(x) [Å] = 0,6477 - 0,0657x$  [3], также приводятся в табл. 1.

Следует отметить, что при определении состава ТР  $CdS_xTe_{1-x}$  с  $E_g = 1,44$  эВ по эмпирической формуле  $E_g [эВ] = 1,74x^2 - 1,01x + 1,51$  [4] получается значение для  $x$  в виде двух положительных величин. Для других значений  $E_g$  ТР получается только одна

Таблица 1

Зависимость постоянной решетки  $a_0(x)$ , средней ширины запрещенной зоны  $E_g^{av}$ , а также края фундаментального поглощения  $\lambda_{c.f.a}$  твердого раствора  $CdS_xTe_{1-x}$

$\lambda_{\max}$ , нм	$\lambda_{c.f.a}$ , нм	$E_g$ , эВ	$x$	$a_0(x)$ , Å
664	680	1,82	0,8	5,95
692	718	1,73	0,75	5,98
725	755	1,64	0,69	6,02
750	780	1,59	0,65	6,05
788	802	1,546	0,61	6,13
814	830	1,53	0,56	6,158
735	858	1,44	0,5	6,192
			0,28	6,3174
870	881	1,407	0,45	6,2

положительная величина для  $x$ . По-этому в табл. 1 для ТР с  $E_g = 1,44$  эВ приводятся два значения состава, а для других  $E_g$  одно значение состава  $x$ .

ТР с составом  $x = 0,8$  более близок по составу к слоям CdS, а ТР с составом  $x = 0,28$  – к слоям CdTe. Оценка показывает, что величина  $a_0(x)$  для Si и ТР с составом  $x = 0,8$  отличаются на 8%, а  $a_0(x)$  для пленок CdS и ТР с  $x = 0,8$  отличаются всего на 2%.

Исследованы распределения химических элементов по поверхности полученных слоев. Анализы выполнены на микроаналитическом комплексе Jeol-JXA-8900 с помощью ЭДС LINK ISIS (энерго-дисперсионный спектрометр); погрешность  $\pm 2,0\%$ . Условия съемки:  $V = 20$  кВ,  $I = 10$  нА. Эталоны: самородные Cd, Te и Si, для S – синтетический FeS.

Результаты измерений и микрофотография приведены на рис. 2а) и б).

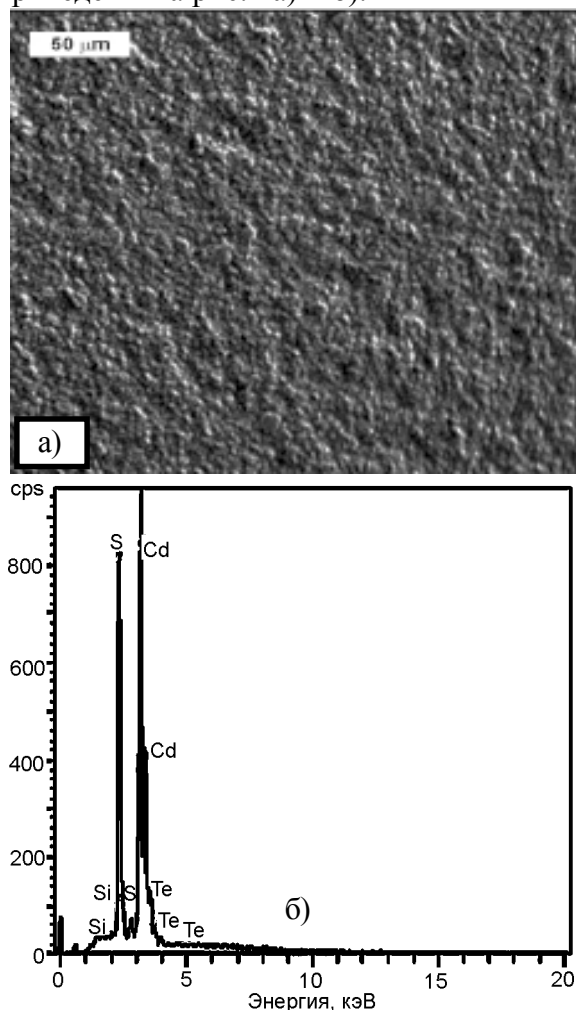


Рис. 2. Микроснимок с поверхности слоев а) и распределения химических элементов по поверхности слоев б).

Количественный анализ химических компонентов поверхности слоев ( $n/Si-CdS_xTe_{1-x}-n/CdS$ )

Elmt	Spect. type	Element %	Atomic %	Elmt	Spect. type	Element %	Atomic %	Elmt	Spect. type	Element %	Atomic %
SiK	ED	0.07*	0.20*	SiK	ED	0.07*	0.17*	SiK	ED	0.03*	0.09*
SK	ED	20.31	47.05	SK	ED	22.34	50.14	SK	ED	22.53	50.56
CdL	ED	78.62	49.33	CdL	ED	77.06	49.33	CdL	ED	76.74	49.14
TeL	ED	1.35	0.79	TeL	ED	0.64	0.36	TeL	ED	0.39	0.22
Total	–	100.35	100.00	Total	–	100.10	100.00	Total	–	99.69	100.00

Как видно из рис. 2б интенсивности вторичных электронных эмиссий элементов кадмия и сульфида выбитых с поверхности слоев, максимальные. Это означает, что поверхность пленок в основном состоит из сульфида кадмия. Следующий слой состоит из твердого раствора сульфида кадмия и теллурида кадмия далее слой теллурида кадмия и твердого раствора теллурида кадмия и кремния.

На рис. 3а) и б) приведены микроснимки, сделанные со скола слоев, а также зависимости распределения химических элементов от толщины слоев. Измерение проводилось по нескольким точкам. Результаты исследований зависимости химических элементов от толщины показывают, что во всех измеренных направлениях распределение химических элементов почти одинаковые и средний разброс не более ~5%. Из рис. 3б), также видно каков ход зависимостей слоев по толщине пленок. Самый верхний микроснимок соответствует кремниевой подложке. Следующие микроснимки показывают распределения химических элементов сульфида, кадмия и теллурида в слоях. Из рис. 3 также можно оценить соответствующие толщины каждого состава. Например, толщина сульфида кадмия примерно составляет одну треть толщины теллурида кадмия (бугорок третий микроснимок начиная с верхнего). Плато соответствует слою теллурида кадмия (снизу второй микроснимок с левой стороны после бугорка).

Из рис. 3б) также можно оценить примерную толщину твердых растворов (спады).

Анализ полученных результатов показывают, что между кремнием и теллуридом кадмия, а также теллуридом кадмия и сернистым кадмием образуется твердый раствор с толщиной примерно до 2 мкм и до 1 мкм

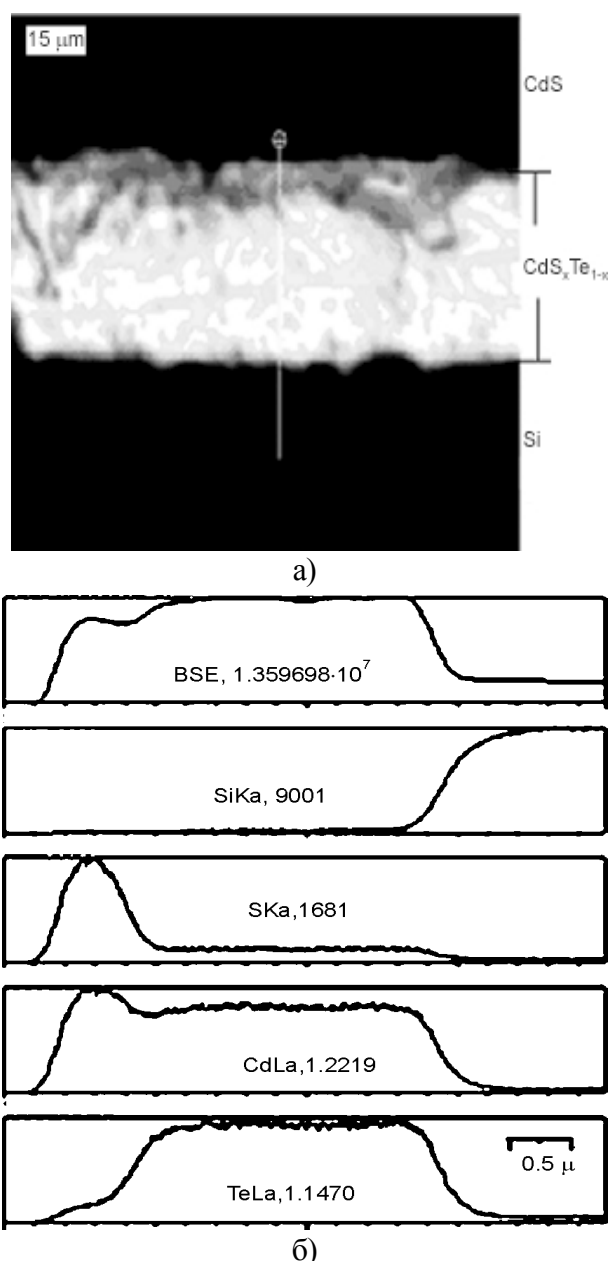


Рис. 3. Микроснимки, сделанные со скола слоев а) и ход зависимостей распределения химических элементов от толщины пленок б).

соответственно (рис. 3). По данным авторов [1], на основе соединений  $A^2B^6$  в системах  $A^2B^6$  образуются области твердых растворов

(области гомогенности), протяженность которых может быть значительно больше, чем у соединений  $A^3B^5$ . Составом твердых растворов на основе соединений  $A^2B^6$  можно управлять, задавая условия их получения или обработки. Физические и физико-химические свойства твердых растворов меняются с изменением состава, причем характер изменения может быть как линейным, так и более сложным.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Горелик С.С., Дашевский М.Я. Материаловедение полупроводников и диэлектриков. – М.: МИСИС, 2003.
2. Лабораторные оптические приборы/ Под ред. А.А. Новицкого. – М.: Машиностроение, 1979. – 448 с.
3. Ohata K., Sarate J., Tanaka T.//Jpn. J. Appl. Phys. – 1973. – № 12. – С. 1641.
4. Bonnet D., Rabenhorst H.//Proc. Int. Conf. Physics and Chemistry of Semiconductor Heterojunction and Layer Structure. Hungary, Budapest, Akademiai Kiado. – 1971. – Vol. 1. – P. 119.

#### LITERATURA

1. Gorelik S.S., Dashevskij M.Ya. Materialovedenie poluprovodnikov i di'elektrikov. – М.: МИСИС, 2003.
2. Laboratornye opticheskie pribory/Pod red. A.A. Novickogo. – М.: Mashinostroenie, 1979. – 448 s.
3. Ohata K., Sarate J., Tanaka T.//Jpn. J. Appl. Phys. – 1973. – № 12. – S. 1641.
4. Bonnet D., Rabenhorst H.//Proc. Int. Conf. Physics and Chemistry of Semiconductor Heterojunction and Layer Structure. Hungary, Budapest, Akademiai Kiado. – 1971. – Vol. 1. – P. 119.