Uzbek Journal of Physics

Vol.22(№3) 2020 PP.151-156

ЭЛЕКТРОННАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ НАНОСТРУКТУР CdMeTe, СОЗДАННЫХ НА ПОВЕРХНОСТИ CdTe МЕТОДОМ ИОННОЙ БОМБАРДИРОВКИ

Б.Е. Умирзаков, Ё.С. Эргашов, Ш.Ф. Худойберганова, Д.А. Мирзаев

Ташкентский государственный технический университет, 100095 Ташкент, Узбекистан
yergashev@mail.ru
(Получена 09.10.2019)

Иккиламчи ва фотоэлектрон спектроскопия усулларидан фойдаланган ҳолда CdMeTe наноструктураларнинг электрон тузилиши ўрганилди. Жумладан, биринчи марта CdZnTe пленкаларнинг ўтказувчанлик зонасида E_v га нисбатан 3.5 ва 4.4 эВ энергияларда эркин электрон ҳолатларини максимумлари мавжудлиги кўрсатилди.

С использованием методов вторичной и фотоэлектронной спектроскопии изучена электронная структура наноструктур CdMeTe. В частности, впервые показано, что в зоне проводимости пленки CdZnTe при энергиях 3.5 и 4.4 эВ относительно E_v имеются максимумы свободных электронных состояний.

The electronic structure of CdMeTe nanostructures was studied by techniques of secondary and photoelectron spectroscopy. Particularly, for the first time it has been shown that in the conductivity band of the CdZnTe films there are maximum peaks of free electronic states with energies 3.5 and 4.4 eV relative to E_v.

I. ВВЕДЕНИЕ

Многослойные тонкопленочные структуры на основе полупроводниковых соединений A^2B^6 широко используются в создании различных оптоэлектронных устройств, в том числе приборов солнечной энергетики. Поэтому в настоящее время хорошо изучены состав, кристаллическая структура и оптические свойства пленок CdTe, CdZnTe и HgCdTe и изменения этих свойств при различных воздействиях [1-6]. Показано, что совершенства и свойства этих пленок во многом зависят от метода синтеза, от их толщины и от свойств приконтактного (переходного) слоя, формирующегося на границе раздела пленка-подложка. В последние годы метод низкоэнергетической ионной имплантации часто используется для получения наноразмерных структур на поверхности и в приповерхностной области полупроводников и диэлектрических пленок [7-10]. В частности, имплантацией ионов Ba^+ в CdTe в сочетании с отжигом получены нанопленки типа $Cd_{0.5}Ba_{0.5}Te$ [10]. Установлено, что плотность состояний валентных электронов и ширина запрещенной зоны нанопленок CdBaTe при $d \leq 25-30$ Å зависят от толщины пленок.

Данная работа посвящена определению параметров энергетических зон и изучению плотности электронных состояний в валентной зоне и в зоне проводимости трехкомпонентных нанопленок $Cd_{1-x}Me_xTe$, полученных имплантацией ионов Ba и Zn в CdTe.

II. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве объектов исследования использованы хорошо полированные и обработанные в травителе монокристаллы CdTe(100) *n*-типа с размерами 10×10×1 мм^3. Основные исследования проводили при вакууме не хуже 10^{-7} Па с использованием методов оже-электронной спектроскопии (ОЭС), ультрафиолетовой фотоэлектронной спектроскопии (УФЭС), характеристических потерь энергии электронов (ХПЭЭ) и измерением энергетических зависимостей коэффициентов вторичной электронной эмиссии (ВЭЭ) и интенсивности проходящего через образец света. Морфологию и степень шероховатости поверхности изучали с использованием методов растровой электронной микроскопии (РЭМ) и атомно-силовой микроскопии (АСМ). Профили распределения атомов по глубине определяли методом ОЭС в сочетании с ионным травлением. Ионную бомбардировку проводили перпендикулярно к поверхности мишени при вакууме не хуже 10^{-6} Па. Перед ионной имплантацией образцы CdTe обезгаживали прогревом до T=1100 К в сочетании с мягким травлением ионами Ar^+ при вакууме не хуже 10^{-7} Па. Варьируя энергии ионов Ba^+ и Zn^+ в пределах 0.5–5 кэВ, получены трехкомпонентные наноразмерные структуры толщиной 20–50 нм. В табл. 1 приведены оптимальные режимы ионной имплантации и отжига для получения нанокристаллов (НК) и нанопленок (НП) CdMeTe/CdTe(100).

Таблица 1. Оптимальные режимы формирования трехкомпонентных наноструктур CdMeTe/CdTe(100).

Ионы	E_0, кэВ	D, см$^{-2}$	T_0, К	Структура	Примерный состав	Толщина пленки d, Å
Ba	1	10^{15}	900	НК	$Cd_{0.6}Ba_{0.4}Te$	35–40
		6×10^{16}	1000	НП	$Cd_{0.5}Ba_{0.5}Te$	35–40
	3	10^{15}	900	НК	$Cd_{0.7}Ba_{0.3}Te$	50–60
		8×10^{16}	1000	НП	$Cd_{0.5}Ba_{0.5}Te$	50–60
Zn	1	10^{15}	850	НП	$Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te$	40–45
	1	8×10^{16}	800	НК	$Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te$	-

III. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 приведены спектры фотоэлектронов для чистого CdTe(100) и для CdTe(100) с нанопленкой $Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te$, снятые при $h\nu$=10.8 эВ. Из рис. 1 видно, что структура спектров, т.е. плотность состояний валентных электронов матрицы и пленки, резко отличаются друг от друга. Наличие пиков, соответствующих E_1, E_2 и E_3 в спектре CdTe могут быть связаны с гибридизацией 5*p* и 5*s* электронов Te с 5*s* и 4*d* электронами Cd. В случае трехкомпонентной пленки в гибридизации электронов, наряду с электронами Cd и Te, будут участвовать 3*d* и 4*s* электроны Zn, вследствие чего происходит перераспределение плотности состояний валентных электронов. Кроме этих пиков, в спектрах содержатся пики, связанные с наличием поверхностных состояний ($E_{пс}$) и примесных уровней ($E_{пр}$). Ширина спектра ΔE пленки на 0.2–0.3 эВ меньше, чем ΔE матрицы.

Фотоэлектронную работу выхода, т.е. положение потолка валентной зоны E_v относительно вакуума, можно определить по формуле $\Phi=E_v=h\nu-\Delta E$.

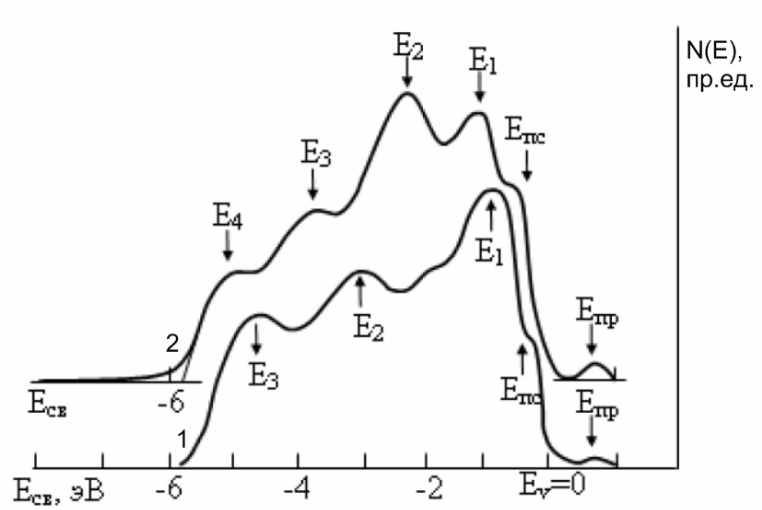


Рис. 1. Фотоэлектронные спектры чистого CdTe(100) (кривая *1*) и с нанопленкой $Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te$ (кривая *2*) образцов, снятые при $h\nu$=10.8 эВ.

Расчеты показывают, что для CdTe $\Phi\approx$5.4 эВ, а для $Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te$ – 5.6 эВ. Положения пиков в спектре фотоэлектронов, снятые при невысокой энергии фотонов ($h\nu\leq$15–20 эВ), соответствуют максимумам плотности энергии электронов валентной зоны [11]. Важное научное и практическое значение имеет получение информации о положении максимумов плотности электронных состояний в зоне проводимости. Экспериментально это можно осуществить снятием энергетических спектров истинно-вторичных электронов $N(E_2)$ при низких энергиях первичных электронов E_p материала, контролируемо снижая работу выхода поверхности [12].

На рис. 2 приведены спектры $N(E_2)$, снятые при E_p=5 эВ, для чистого CdTe и CdTe с субмонослойной ($\theta\approx$0.2) пленкой Cs. E_2 – энергия вторичных электронов. Нуль на оси E соответствует уровню вакуума пленки CdTe.

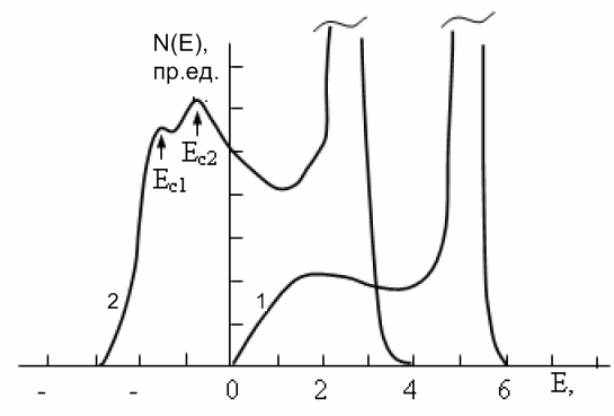


Рис. 2. Спектры $N(E_2)$, снятые при E_p=5 эВ для чистого CdTe (кривая *1*) и CdTe с субмонослойной ($\theta\approx$0.2) пленкой Cs (кривая *2*).

Из рис. 2 видно, что после напыления Cs выход истинно-вторичных электронов $N(E_2)$ в вакуум увеличивается, а начало спектра смешается в сторону меньших энергий на ~2.6 эВ, т.е. потенциальный барьер (сродство к электрону χ) уменьшается на 2.6 эВ. В этой части спектра обнаруживаются особенности при энергиях $E_{c1} = -1$ и $E_{c2} = -1.9$ эВ. Положения этих особенностей соответствуют максимумам плотности электронных состояний в зоне проводимости. Увеличивая толщины пленки Cs до 0.5–0.6 монослоев можно уменьшить χ на ~3–3.5 эВ. Однако начиная с θ~0.4–0.5 монослоев в спектре появляются особенности, связанные с атомами Cs.

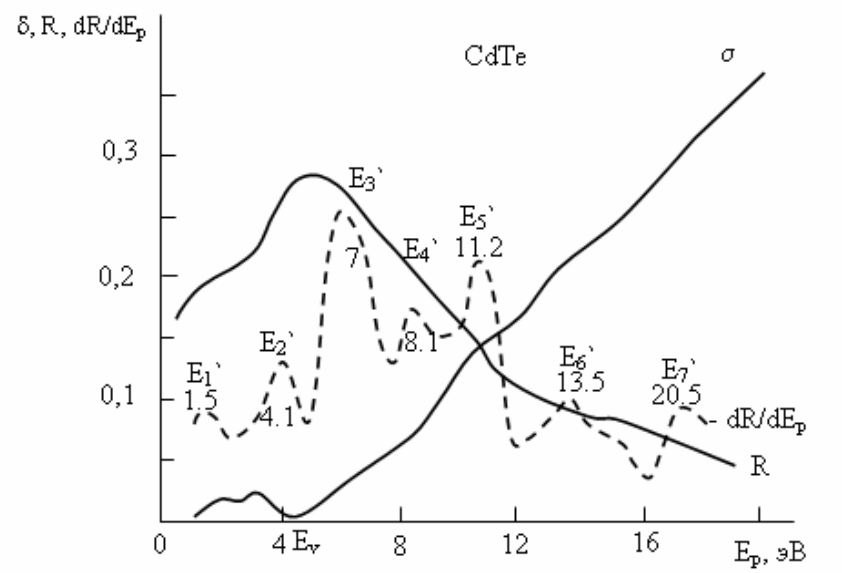


Рис. 3. Зависимости δ, R и dR/dE_p от энергии первичных электронов для CdTe(111).

На рис. 3 приведены зависимости коэффициентов истинно-вторичных δ, упруго отраженных электронов R и $-dR/dE_p$ – первой производной зависимости R от энергии первичных электронов E_p для CdTe(111), измеренных в области E_p=1–20 эВ. Особенности на кривой $R(E_p)$, т.е. максимумы на кривой $-dR/dE_p$ от E_p соответствует переходам электронов из максимумов валентной зоны в максимумы зоны проводимости [11]. Анализ кривой $-dR/dE_p(E_p)$ (спектров УОЭ) совместно со спектрами фотоэлектронов (рис. 1) и истинно-вторичных электронов (рис. 2) показал, что максимум E_1' соответствует переходу электронов из потолка валентной зоны E_v на дно зоны проводимости E_c (приблизительно равно E_g); E_2' – переходу из E_1 в E_{c1}, E_3' – переходу E_v в E_2, а E_4' – переходу из E_2 в E_{c2}. Максимумы E_6' и E_7', вероятно, связаны переходом электронов из максимумов плотности состояний валентных электронов в максимумы свободных состояний, находящихся в вакууме. Положение E_3' соответствует начальному резкому росту δ, что обусловлено переходом электронов из потолка валентной зоны в вакуум.

При E_p=8 эВ также наблюдается резкое уменьшение R (максимум E_4). Однако при этой энергии E_p не происходит резкого роста δ. Исходя из этого, можно полагать, что валентные электроны переходят не в вакуум, а в максимумы зоны

проводимости. Для более точного определения ширины запрещенной зоны CdTe снималась энергетическая зависимость интенсивности I проходящего через монокристаллический образец CdTe света в области $h\nu$=0.6–2 эВ [10]. Из рис. 4 видно, что E_g для CdTe составляет ~1.45 эВ.

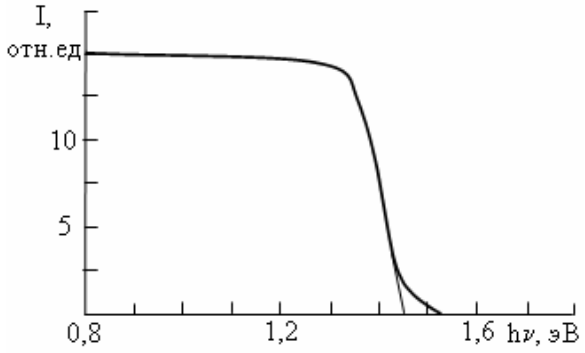


Рис. 4. Энергетическая зависимость интенсивности проходящего через CdTe света I.

Такие же исследования проводили для пленки $Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te$. На основе анализа спектров фото-, истинно-вторичных и упруго отраженных электронов оценены параметры энергетических зон и плотности электронных состояний валентной зоны и зоны проводимости (табл. 2). При расчетах за нуль принимался потолок валентной зоны E_v.

Таблица 2. Зонно-энергетические параметры и энергетические положения максимумов в спектрах фото-, истинно-вторичных и упруго-отраженных электронов для CdTe и $Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te$ относительно потолка валентной зоны E_v.

Исследуемый объект	Φ, эВ	E_g, эВ	χ, эВ	УФЭС		Спектры ИВЭ		$dR/dE_p(E_p)$	
				$E_{св}$, эВ	Интерпретация	E_c, эВ	Интерпретация	E, эВ	Интерпретация
CdTe(111)	5.4	1.48	3.95	1	$E_{пр}$	3.5	E_{c1}	1.5	$E_v \rightarrow E_c$
				–0,5	$E_{пс}$	4.4	E_{c2}	4.3	$E_1 \rightarrow E_{c1}$
				–1	E_1				
				–1.8	–			5.5	$E_v \rightarrow E_в$
				–2.4	E_2			8.1	$E_3 \rightarrow E_{c1}$
				–4.5	E_3			11.2	$E_3 \rightarrow E_в$
$Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te$	5.6	1.71	3.9	1.1	$E_{пр}$	3	E_{c1}	1.8	$E_v \rightarrow E_c$
				–0.4	$E_{пс}$	4.2	E_{c2}	4.4	$E_1 \rightarrow E_{c1}$
				–1.2	E_1			5.5	$E_1 \rightarrow E_{c2}$
									$E_2 \rightarrow E_{c1}$
				–2.3	E_2			6.9	$E_2 \rightarrow E_{c2}$
									$E_3 \rightarrow E_{c1}$
				–3.7	E_3			7.9	$E_3 \rightarrow E_{c2}$
									$E_4 \rightarrow E_{c1}$
				–5	E_4				

$E_в$ – уровень вакуума.

Из таблицы видно, что, используя комплекс методов фото- и вторичной электронной спектроскопии, можно получить более полную информацию об электронной структуре нанопленок сложного состава. Данные табл. 2 позволяют построить примерные зонно-энергетические диаграммы CdTe и пленки CdZnTe.

Таким образом, в данной работе методом низкоэнергетической ионной имплантации на поверхности монокристаллов CdTe(111) получены нанокристаллические фазы и нанопленки CdBaTe и CdZnTe и изучены их зонно-энергетические параметры и плотности занятых и свободных электронных состояний.

ЛИТЕРАТУРА

1. C.H. Lee, S.W. Park, Jaesun Lee, Y.M. Moon et al., J. Electron. Mater. **27**, No 6, 668 (1998).
2. А.В. Бродовой, С.Г. Бунчук, З.Ф. Цибрий, ФТТ **53**, № 3, 524-526 (2011).
3. П.Н. Ткачук, ФТТ **42**, № 11, 1961-1963 (2000).
4. К.Д. Глинчук, А.П. Медвид, А.М. Мычко и др., ФТП **47**, № 4, 435-441 (2013).
5. Н.И. Клюй, В.Б. Лозинский, А.Н. Лукьянов, В.А. Мороженко, Р.К. Савкина и др., ЖТФ **82**, № 8, 83-86 (2012).
6. M.K. Herndon, A. Gupta, V.I. Kaydanov, R.T. Collins, Appl. Phys. Lett. **75**, 3503 (1999).
7. С.А. Музафарова, Ш.А. Мирсагатов, Ж. Жанабергенов, ФТТ **49**, № 6, 1111-1116 (2007).
8. B.E. Umirzakov, D.A. Tashmukhamedova, M.K. Ruzibaeva, A.K. Tashatov, S.B. Donaev, B.B. Mavlyanov, Technical Physics **58**, No 9, 1383-1386 (2013).
9. Y.S. Ergashov, D.A.Tashmukhamedova, F.G. Djurabekova, B.E. Umirzakov, Bulletin of the Russian Academy of Sciences, Physics **80**, No 2, 138-140 (2016).
10. D.M. Muradkabilov, D.A.Tashmukhamedova, B.E. Umirzakov, Journal of Surface Investigation **7**, No 5, 967-971 (2013).
11. Z.E. Mukhtarov, Z.A. Isakhanov, B.E. Umirzakov, T. Kodirov, E.S. Ergashev, Technical Physics **60**, No 12, 1880-1884 (2015).
12. Н.П. Бажанова, В.В. Кораблев, Ю.А. Кудинов. Актуальные вопросы вторично-эмиссионной спектроскопии. Учебное пособие (Ленинград, ЛПИ, 1985).