

13.3

Влияние адсорбции атомов Ва на состав, эмиссионные и оптические свойства монокристаллов CdS

© Б.Е. Умирзаков¹, Ж.Ш. Содикжанов², Д.А. Ташмухамедова¹, А.А. Абдувайитов¹, Э.А. Раббимов³¹Ташкентский государственный технический университет им. Ислама Каримова, Ташкент, Узбекистан²Институт ионно-плазменных и лазерных технологий им. У.А. Арифова АН Узбекистана, Ташкент, Узбекистан³Джизакский политехнический институт, Джизак, Узбекистан

E-mail: ftmet@mail.ru

Поступило в Редакцию 25 ноября 2020 г.

В окончательной редакции 26 февраля 2021 г.

Принято к публикации 2 марта 2021 г.

Изучены состав, эмиссионные и оптические свойства монокристаллов CdS с поверхностной пленкой Ва толщиной Θ от 0.5 до 5 монослоев. Установлено, что с ростом Θ до 1 монослоя глубина зоны выхода истинно-вторичных электронов (и фотоэлектронов) λ существенно увеличивается, что объясняется уменьшением работы выхода. При дальнейшем росте Θ значения λ и интенсивность фототока уменьшаются. Показано, что при комнатной температуре не происходит заметной взаимодиффузии атомов на границе Ва–CdS. После прогрева при $T = 700$ К происходит интенсивная диффузия S в пленку Ва и образуется соединение типа Ва₂S.

Ключевые слова: зона выхода электронов, адсорбция, профили распределения атомов, эмиссионная эффективность, работа выхода.

DOI: 10.21883/PJTF.2021.12.51057.18632

Монокристаллические образцы и пленки A^2B^6 , в особенности CdS, и многослойные гетероструктуры на их основе широко используются при создании различных приборов микро-, нано- и оптоэлектроники, в том числе в области солнечной энергетики [1–4]. В настоящее время хорошо изучено влияние термообработки, лазерного отжига, СВЧ-обработок, ионной и электронной бомбардировки на структуру, состав и оптические свойства образцов A^2B^6 , а также на процессы взаимодиффузии атомов на границе раздела многослойных систем, созданных на основе этих полупроводников [5–13]. В частности, в работах [11,12] при имплантации ионов Ва⁺ в CdTe и CdS на их поверхности и вблизи нее получены нанокристаллы и слои типа Cd_{1-x}Va_xTe и Cd_{1-x}Va_xS. Ранее двух- и трехкомпонентные наноструктуры были получены методом ионной имплантации на поверхности Si, GaAs и SiO₂ [13–15]. Результаты этих работ показали, что электронно-зонные параметры, эмиссионные и оптические свойства данных структур зависят от значения x и размеров наноструктур. В [16] изучены процессы взаимодиффузии атомов на границе гетеросистем CdS/CdTe и обнаружено образование устойчивого переходного слоя типа CdS_xTe_{1-x}. Влияние адсорбции атомов активных элементов на структуру и физические свойства полупроводниковых материалов остается малоизученным. В работе [17] показано, что наличие монослойного покрытия атомов Ва увеличивает зону выхода истинно-вторичных электронов из CdTe. Эти исследования проводились для пленок Ва с толщиной $\Theta \leq 1$ монослоя (ML). До сих пор отсутствуют достоверные сведения об изменении состава, структуры

и свойств A^2B^6 с поверхностной пленкой активных металлов разной толщины.

В настоящей работе впервые изучено влияние адсорбции атомов Ва с толщиной от 0.5 до 5 ML на эмиссионные и оптические свойства монокристалла CdS(111).

Объектами исследования являлись монокристаллические образцы CdS(111) n -типа с толщиной ~ 1 mm. Напыление атомов Ва осуществлялось перпендикулярно поверхности мишени при вакууме не хуже 10^{-6} Pa. За один монослой (~ 3 Å) принимали толщину Ва, при которой работа выхода $e\phi$ уменьшалась до минимума. Исследования проводились с использованием методов оже-электронной спектроскопии, фотоэлектронной спектроскопии и метода измерения изменения интенсивности проходящего света через образец. Профили распределения атомов по глубине d определялись методом оже-электронной спектроскопии в сочетании с послойным травлением поверхности ионами Ar⁺ с $E_0 = 2$ keV под углом $5-10^\circ$ относительно поверхности образца.

На рис. 1 приведены зависимости работы выхода $e\phi$, интенсивности фототока I_{ph} и глубины зоны выхода истинно-вторичных электронов и фотоэлектронов λ от толщины Θ слоя барьера для CdS с поверхностной пленкой Ва. Видно, что зависимость $e\phi(\Theta)$ проходит через минимум, а зависимости $I_{ph}(\Theta)$ и $\lambda(\Theta)$ — через максимум при $\Theta \approx 1$ ML. Известно, что уменьшение $e\phi$ способствует выходу электронов, термализованных вблизи уровня вакуума, а следовательно, увеличивает глубину выхода истинно-вторичных и фотоэлектронов [17]. С ростом Θ значение $e\phi$ увеличивается и при $\Theta \approx 2$ ML составляет ~ 2.3 eV. Дальнейший рост Θ не приводит к заметному изменению $e\phi$. Значение

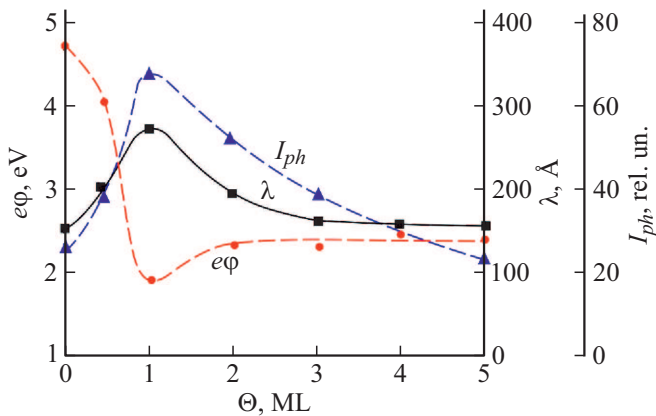


Рис. 1. Зависимости работы выхода $e\phi$, интенсивности фототока I_{ph} и глубины зоны выхода истинно-вторичных электронов λ от толщины слоев Ва для CdS с пленкой Ва.

I_{ph} начиная с $\Theta \approx 1$ ML уменьшается монотонно и при $\Theta \approx 5$ ML становится меньше, чем I_{ph} чистого CdS. Можно полагать, что эмиссионная эффективность слоев Ва значительно меньше, чем эффективность слоев CdS. Что касается λ , то ее значение при $\Theta \approx 3$ ML уменьшается до величины λ для чистого CdS и с дальнейшим ростом Θ заметно не меняется.

На рис. 2, *a* приведены зависимости интенсивности оже-пиков Ва и S от глубины d для CdS с пленкой Ва толщиной $\Theta = 5$ ML. Видно, что при комнатной температуре на границе Ва–CdS не происходит заметной взаимодиффузии атомов. Толщина переходного слоя составляет ~ 3 – 5 Å и начиная с $d \approx 20$ Å значение I_{Auger} для S практически не меняется и не отличается от такового в случае чистых пленок CdS. После прогрева этой системы при $T \approx 700$ К в течение часа интенсивность оже-пика Ва на поверхности уменьшается

приблизительно в 1.5 раза и появляется интенсивный пик S. Интенсивности оже-пиков Ва и S практически не меняются до глубины 18–20 Å. Анализ полного спектра оже-электронов показал, что при этом образуется соединение типа Ва₂S с толщиной $\Theta \approx 18$ –20 Å. Образование соединений между атомами Ва и S нами определено по изменению положения и формы низкоэнергетического пика барьера N_5O_2V ($E_2 = 75$ eV), связанному с переходом электронов из валентной зоны. Из рис. 2, *b* видно, что пик Ва с $E_2 = 75$ eV после прогрева практически исчезает и появляется новый пик при $E_2 = 71$ eV. Концентрации Ва и S определялись по относительному изменению интенсивности высокоэнергетических пиков, обусловленных только переходами остовных уровней барьера ($E_{MNN} = 584$ eV) и S ($E_{LMM} = 152$ eV). Расчеты показали, что после прогрева концентрация Ва составляла ~ 65 – 70 at.%, а S — 30–35 at.%. Исходя из этих данных мы установили, что после прогрева образуются соединения типа Ва₂S. В интервале $d \approx 18$ – 30 Å I_{Auger} для Ва уменьшается до нуля (в пределах чувствительности оже-спектрометра), а I_{Auger} для S увеличивается до значения в чистой пленке CdS. Таким образом, на границе системы ВаS₂/CdS формируется переходный слой толщиной ~ 10 – 12 Å. Основываясь на этих результатах, мы предполагаем, что при прогреве в основном происходит диффузия атомов S в пленку Ва. В переходном слое в интервале $d \approx 20$ – 25 Å, по-видимому, содержится соединение типа Ва–Cd–S, Cd_{1-x}S_x ($x \leq 0.5$).

На рис. 3 приведены кривые зависимости интенсивности I проходящего света от энергии фотонов $h\nu$ для чистого монокристалла CdS(111) и системы Ва₂S/CdS(111) в интервале $h\nu \approx 0.6$ – 4 eV. Видно, что в случае CdS(111) резкое уменьшение I наблюдается начиная с $h\nu \approx 2.3$ – 2.4 eV, а для Ва₂S/CdS — с $h\nu \approx 0.9$ – 1 eV. Экстраполяция этой части кривой к оси

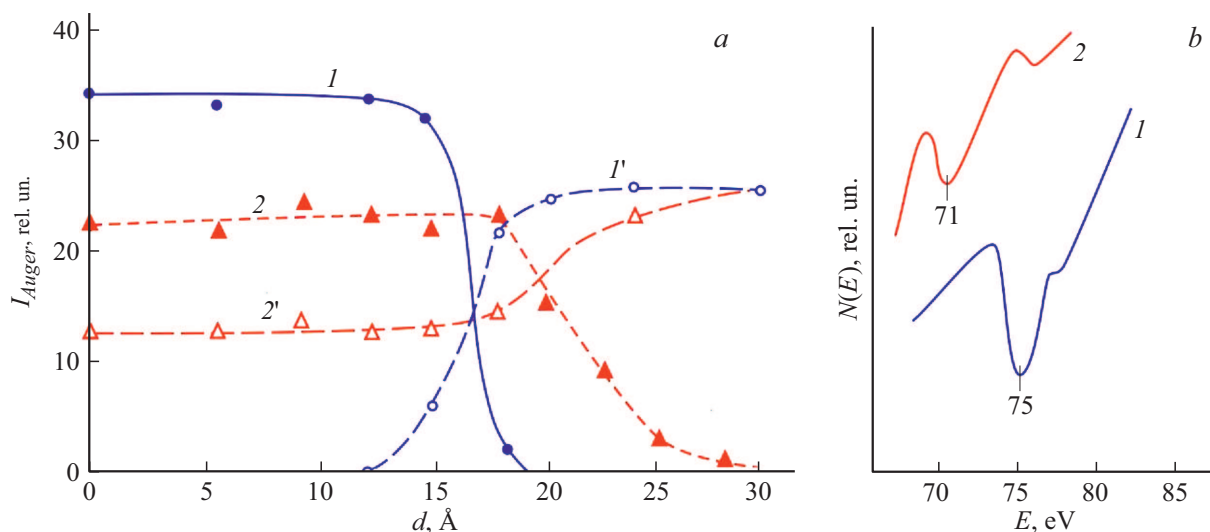


Рис. 2. *a* — зависимость интенсивности оже-пика Ва (I , 2) и S (I' , $2'$) от d для CdS с пленкой Ва толщиной $\Theta = 5$ ML: I , I' — до прогрева, 2 , $2'$ — после прогрева при $T = 700$ К в течение часа; *b* — оже-спектр Ва в области $E = 70$ – 85 eV для CdS с пленкой Ва толщиной $\Theta = 5$ ML: I — до прогрева, 2 — после прогрева при $T = 700$ К.

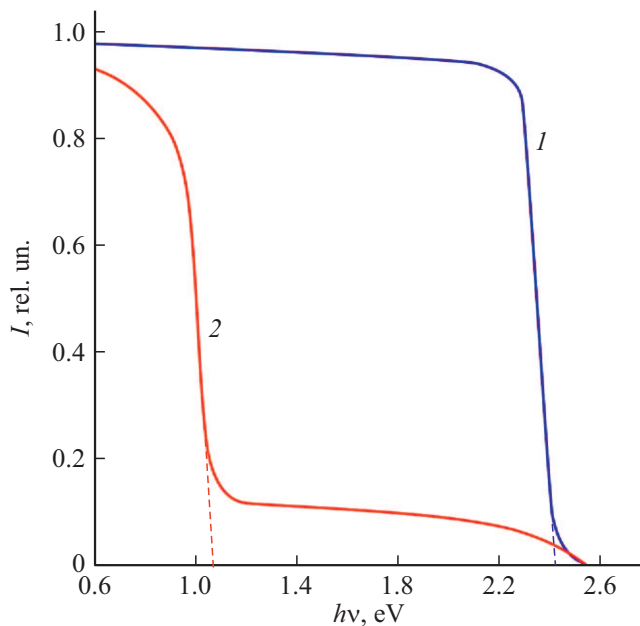


Рис. 3. Зависимости интенсивностей I проходящего света от энергии фотонов $h\nu$ для CdS (1) и CdS с пленкой Ba₂S толщиной ~ 20 Å (2).

$h\nu$ дает оценочное значение ширины запрещенной зоны E_g : для CdS $E_g \approx 2.42$ eV, а для Ba₂S — $E_g \approx 1.1$ eV. Вследствие того что пленка Ba₂S очень тонкая, через нее проходят малоинтенсивные излучения вплоть до 2.4 eV.

Таким образом, впервые изучено влияние адсорбции атомов Ва с толщиной ~ 1 – 15 Å ($\Theta \approx 0.5$ – 5 ML) на состав, эмиссионные и оптические свойства монокристаллов CdS (111). Увеличение значения интенсивности фототока при уменьшении $e\phi$ объясняется увеличением глубины зоны выхода фотоэлектронов. Установлено, что эмиссионная эффективность слоев Ва значительно меньше, чем эмиссионная эффективность слоев CdS. Показано, что после прогрева системы Ва–CdS при $T = 700$ K происходит интенсивная диффузия S в пленку Ва и формируется пленка с примерным составом Ba₂S, E_g этой пленки составляет величину ~ 1.1 eV.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Г.С. Хрипунов, В.Р. Копач, А.В. Мериуц, Р.В. Зайцев, М.В. Кириченко, Н.В. Дейнеко, ФТП, **45** (11), 1564 (2011). <http://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/7572>
- [2] K.R. Murali, M. Matheline, R. John, Chalcogenide Lett., **6** (9), 483 (2009). http://www.chalcogen.ro/483_Murali-aug22.pdf
- [3] А.А. Ващенко, В.С. Лебедев, А.Г. Витухновский, Р.Б. Васильев, И.Г. Саматов, Письма в ЖЭТФ, **96** (2), 118 (2012). [Пер. версия: 10.1134/S0021364012140135].
- [4] C. Dang, J. Lee, C. Breen, J.S. Steckel, S. Coe-Sullivan, A. Nurmikko, Nature Nanotechnol., **7** (5), 335 (2012). <https://doi.org/10.1038/nnano.2012.61>
- [5] А.П. Беляев, В.П. Рубец, В.В. Антипов, ФТП, **39** (2), 204 (2005). <http://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/5728>
- [6] Ш.А. Мирсагатов, И.Б. Сапаев, ФТП, **48** (10), 1398 (2014). <http://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/40959>
- [7] К.А. Свит, Д.Ю. Протасов, Л.Л. Свешникова, А.К. Шестаков, С.А. Тийс, К.С. Журавлев, ФТП, **48** (9), 1237 (2014). <http://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/40814>
- [8] Р.А. Редько, С.И. Будзуляк, Д.В. Корбутяк, А.П. Лоцько, Н.Д. Вахняк, Л.А. Демчина, С.М. Калитчук, Р.В. Конасова, В.В. Миленин, Ю.В. Быков, С.В. Егоров, А.Г. Еремеева, ФТП, **49** (7), 916 (2015). <http://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/41963>
- [9] А.Г. Роках, М.И. Шишкин, В.С. Аткин, ФТП, **52** (8), 853 (2018). DOI: 10.21883/FTP.2018.08.46209.8687
- [10] Д.М. Седракан, П.Г. Петросян, Л.Н. Григорян, ЖТФ, **85** (5), 94 (2015). <http://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/41745>
- [11] Ё.С. Эргашов, Д.А. Ташмухамедова, Ф.Г. Джурабекова, Б.Е. Умирзаков, Изв. РАН. Сер. физ., **80** (2), 162 (2016). DOI: 10.7868/S0367676516020071
- [12] Б.Е. Умирзаков, Д.А. Ташмухамедова, Э.А. Раббимов, Ж. Содикжанов, А.Н. Уроков, Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, № 12, 76 (2019). DOI: 10.1134/S1028096019120343
- [13] Ё.С. Эргашов, Д.А. Ташмухамедова, Э. Раббимов, Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, № 4, 38 (2015). <https://doi.org/10.7868/S0207352815040083>
- [14] Д.А. Ташмухамедова, Б.Е. Умирзаков, М.А. Мирджалилова, Изв. РАН. Сер. физ., **68** (3), 424 (2004).
- [15] Д.А. Ташмухамедова, М.Б. Юсупжанова, Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, № 12, 89 (2016). DOI: 10.7868/S0207352816100231
- [16] A.S. Gilmore, V.I. Kaydanov, T.R. Ohno, D. Roze, S.D. Feldman, P. Erslev, in *Twenty-Ninth IEEE Photovoltaic Specialists Conf.* (New Orleans, USA, 2002), p. 604. DOI: 10.1109/PVSC.2002.1190637
- [17] Б.Е. Умирзаков, Д.А. Ташмухамедова, М.А. Турсунов, Ё.С. Эргашов, Г.Х. Аллаярова, ЖТФ, **89** (7), 1115 (2019). DOI: 10.21883/JTF.2019.07.47809.4-19