

## Глубина выхода вторичных и фотоэлектронов из пленок CdTe с пленкой Ва

© Б.Е. Умирзаков, Д.А. Ташмухамедова, М.А. Турсунов, Ё.С. Эргашов, Г.Х. Аллаярова

Ташкентский государственный технический университет,  
100095 Ташкент, Узбекистан  
e-mail: ftmet@mail.ru

Поступило в Редакцию 10 января 2019 г.  
В окончательной редакции 10 января 2019 г.  
Принято к публикации 20 февраля 2019 г.

Впервые оценены зоны выхода  $\lambda'$  истинно-вторичных электронов и фотоэлектронов чистого CdTe и CdTe с пленкой Ва толщиной  $\theta \leq 1$  монослоя. Показано, что с уменьшением работы выхода поверхности на 2 eV значение  $\lambda'$  увеличивается в 1.2–1.3 раза.

DOI: 10.21883/JTF.2019.07.47809.4-19

В настоящее время хорошо изучены влияния ионной имплантации на состав, электронную и кристаллическую структуры, эмиссионные и электрофизические свойства кристаллов Si, CdTe, GaAs, SiO<sub>2</sub> и CaF<sub>2</sub> [1–3]. Однако изменения глубины выхода истинно-вторичных электронов (ИВЭ) и фотоэлектронов этих образцов при ионной бомбардировке являются мало изученными. Что касается глубины выхода ИВЭ образцов с субмонослойным покрытием различных элементов, то они практически не исследованы.

Под действием первичных электронов или фотонов в различных глубинах твердого тела возбуждаются электроны и часть из них эмиттируется в вакуум. При вторичной электронной эмиссии ИВЭ могут образоваться прямым потоком первичных электронов и неупругоотраженными электронами (НОЭ), а в случае фотоэмиссии фотоэлектроны образуются как прямым взаимодействием фотонов с электронами, так и взаимодействием этих же электронов с другими фотоэлектронами, с электронами твердого тела. Плотность возбужденных электронов и их глубина образования для различных материалов зависит от энергии первичных электронов (фотонов) и эффективности центров возбуждения приповерхностного слоя. Глубина выхода  $\lambda$  этих электронов в вакуум в области энергии первичных электронов  $E_p = 100–500$  eV с ростом энергии увеличивается, а затем, начиная с  $E = 600–700$  eV, не меняется. Последний называется зоной выхода  $\lambda'$  ИВЭ (фотоэлектронов) [4]. Для экспериментальной оценки глубины выхода электронов используются в основном методы эквивалентной подложки или диаграммы  $\delta-\eta$  [4]. Наши исследования показали, что когда  $\eta$ -подложки и пленки резко отличаются, то исследование зависимости  $\delta(d)$  дает ценную информацию о глубине выхода истинно-вторичных и неупругоотраженных электронов в вакуум, где  $\delta$  — коэффициент ИВЭ,  $\eta$  — коэффициент НОЭ,  $d$  — толщина пленки. Тонкие пленки CdTe имеют особый интерес при создании оптических, электронных, фоточувствительных приборов, в частности солнечных

элементов. Поэтому эмиссионные и оптические свойства, кристаллическая и электронная структуры CdTe и трехкомпонентные соединения на их основе в настоящее время хорошо изучены [4–7].

В настоящей работе впервые изучена глубина  $\lambda$  и зона выхода  $\lambda'$  истинно-вторичных и фотоэлектронов CdTe и их изменения при адсорбции атомов Ва до одного монослоя. При одинаковых энергиях  $E_p$  и  $h\nu$  глубина выхода ИВЭ и фотоэлектронов существенно не отличается друг от друга. Поэтому здесь основные результаты приводились для вторичной электронной эмиссии.

### Методика эксперимента

Поликристаллические пленки CdTe с толщиной 5.0–50.0 nm получены на поверхности Mo (111) методом газовой фазной эпитаксии. После технологических обработок (полировка ионами Ar<sup>+</sup> в сочетании с прогревом до  $T \leq 900$  K) в сверхвысоком вакууме поверхность CdTe становится существенно гладкой, стехиометрический состав приближается к таковому для совершенных пленок CdTe [6]. После многократного распыления и прогрева поверхности подложки получены сплошные поликристаллические пленки CdTe, начиная с толщины 5.0–6.0 nm.

Исследования проводились при вакууме не хуже  $10^{-6}$  Pa с использованием методов оже-электронной спектроскопии (ОЭС), ультрафиолетовой фотоэлектронной спектроскопии (УФЭС), спектроскопии характеристических потерь энергии электронов (СХПЭЭ) и измерением энергетических зависимостей коэффициентов вторичной электронной эмиссии (ВЭЭ). Для оценки величин  $\lambda$  и  $\lambda'$  в основном применялся метод снятия зависимости  $\delta(d)$ . Морфологию и степень шероховатости поверхности изучали с помощью методов растровой электронной микроскопии (РЭМ) и атомно-силовой микроскопии (АСМ). Напыление Ва осуществлялось

при вакууме не хуже, чем  $10^{-5}$  Па. За один монослой принималась толщина пленки Ва, при которой значение работы выхода уменьшается до минимума ( $\delta$  увеличивается до максимума).

### Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение

Для исследования подготовлены в одинаковых условиях пленки CdTe/Мо с разной толщиной  $d = 5.0-10.0, 15.0, 20.0$  и  $50.0$  nm. Перед каждым исследованием поверхности пленок очищались прогревом при  $T = 900$  К в течение 30–40 min в вакууме  $P = 10^{-6}$  Па. На рис. 1 приведены зависимости  $\sigma(E_p)$  и  $\eta(E_p)$  в области  $E_p = 100-1200$  eV чистого Мо (111) и Мо с пленкой CdTe толщиной 50.0 nm (где  $\sigma$  — полный коэффициент ВЭЭ:  $\sigma = \delta + \eta + r$ ,  $r$  — коэффициент упру-

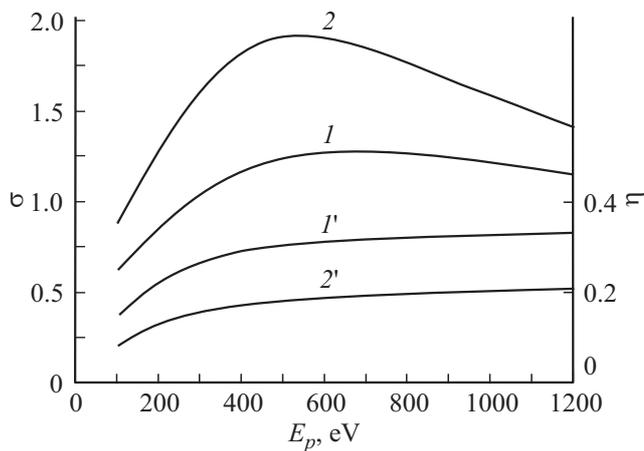


Рис. 1. Зависимости  $\sigma$  (кривые 1, 2) и  $\eta$  ( $1'$ ,  $2'$ ) от  $E_p$  для Мо (1, 2) и для пленки CdTe/Мо с  $d = 50.0$  nm ( $1'$ ,  $2'$ ).

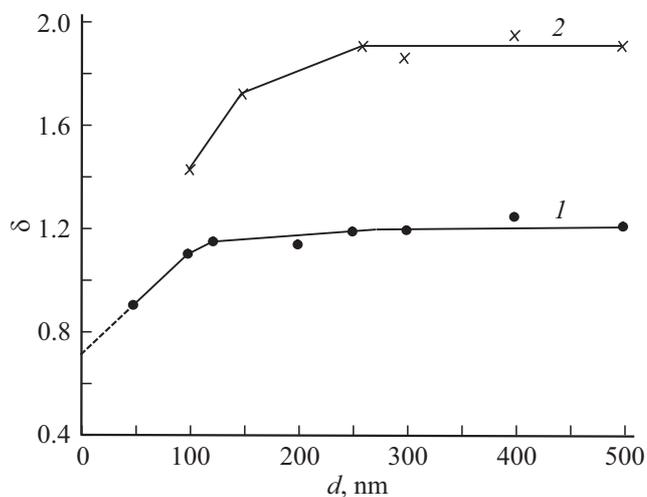


Рис. 2. Зависимости  $\delta(d)$  для пленки CdTe до (1) и после (2) напыления атомов Ва с толщиной  $\sim 1$  монослой.

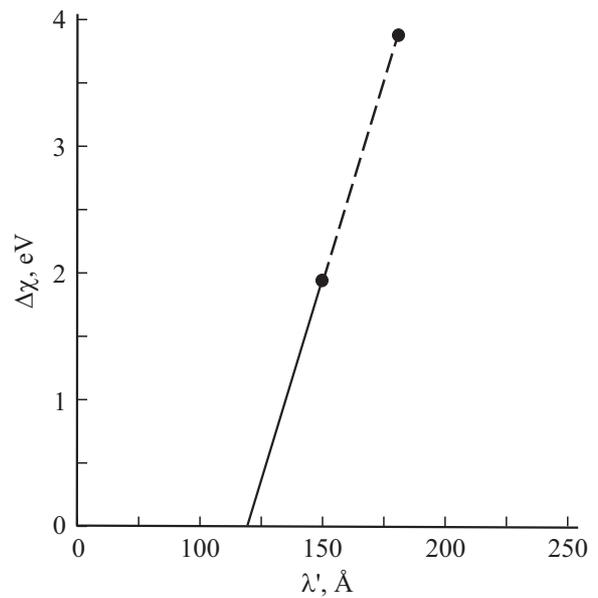


Рис. 3. Зависимость глубины зоны выхода ИВЭ от уменьшения работы выхода CdTe/Мо (111).

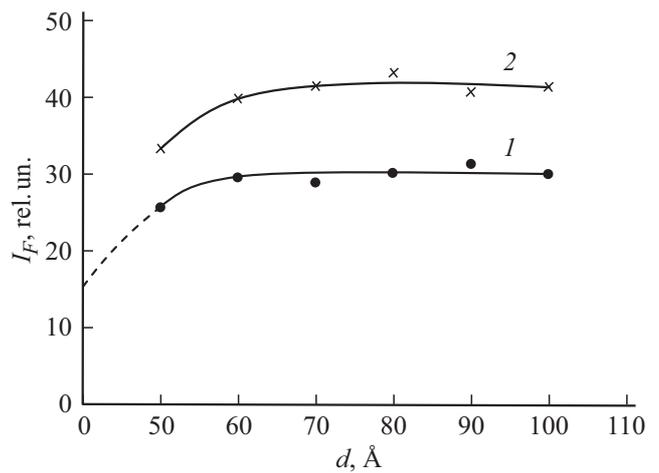


Рис. 4. Зависимость интенсивности фототока  $I_F$  от толщины пленок CdTe/Мо (111) до (1) и после (2) напыления атомов Ва с толщиной  $\sim 1$  монослой.

го отраженных электронов). Видно, что значение  $\sigma$  пленки проходит через максимум при  $E_p = 600-700$  eV ( $\sigma_m = 1.8$ ), т.е. начиная с этой энергии глубина выхода ИВЭ  $\lambda$  не меняется и равняется зоне выхода  $\lambda'$  [6]. Значения  $\eta$  для Мо и CdTe существенно отличаются друг от друга и практически остаются постоянными при  $E_p \geq 700-800$  eV. Поэтому для определения значения зоны выхода ИВЭ зависимость  $\delta(d)$  снималась при  $E_p = 1000$  eV (рис. 2). Из рис. 2 (кривая 1) видно, что до  $d = 10.0-12.0$  nm значение  $\delta$  увеличивается линейно, затем скорость роста резко уменьшается и, начиная с  $d = 25.0$  nm, практически не меняется. Исходя из этого, можно полагать, что глубина зоны выхода ИВЭ  $\lambda'$  в случае CdTe составляет  $\sim 10.0-12.0$  nm. Исследова-

Зависимости зоны выхода ИВЭ от значений  $\chi$  для CdTe

Образец	$\theta_{\text{Ва}}$ , монослой	$\chi$ , eV	$\Delta\chi^*$ , eV	$E_g$ , eV	$\lambda'$ , nm	$\lambda_{\text{NERE}}$ , nm
CdTe	0	4.2	0	1.45	12.0	25.0
	0.5	3	1.2	1.45	—	25.0
	1.0	2.2	2.0	1.45	15.0	25.0

Примечание: \* — изменение величины  $\chi$  относительно уровня вакуума.

ния зависимости  $\delta$ – $\eta$ , снятые при  $E_p = 1000$  eV также показали, что для CdTe  $\lambda' = 10.0$ – $12.0$  nm. Некоторое увеличение  $\delta$  в интервале  $d = 12.0$ – $25.0$  nm может быть связано с выходом НОЭ с энергией меньше, чем 50 eV. С учетом этого можно полагать, что глубина выхода НОЭ при  $E_p = 1000$  eV составляет 20.0–25.0 nm. Напыление на поверхность пленок CdTe ( $d = 10.0$ – $50.0$  nm), пленок Ва с толщиной  $\theta \leq 1$  монослоя приводило к увеличению коэффициента  $\delta$  во всей исследуемой области  $d$  (рис. 2, кривая 2). Наибольшее увеличение происходило при  $\theta = 1$  монослой. При этом значение  $e\phi$  уменьшается на 2 eV, из этой кривой видно, что резкий рост  $\delta$  наблюдается в интервале  $d = 0$ – $15.0$  nm, в интервале  $d = 15.0$ – $25.0$  nm  $\delta$  увеличивается всего лишь на 0.1–0.2, а при  $d \geq 25.0$  nm практически не меняется. Из этого следует, что уменьшение  $e\phi$  на  $\sim 2$  eV приводит к увеличению зоны выхода ИВЭ  $\lambda'$  на 4.0–5.0 nm, а глубина выхода НОЭ существенно не изменяется. Необходимо отметить, что при напылении изменение  $e\phi$  равно изменению сродства к электрону  $\chi$  (ширина зоны проводимости).

В таблице приведены зонно-энергетические параметры и глубина зоны выхода ИВЭ пленки CdTe/Мо (111) с субмонослойной пленкой Ва разной толщины. Толщина CdTe  $\sim 50.0$  nm. Из таблицы видно, что при  $\theta_{\text{Ва}} \sim 1$  монослой значение  $\chi$  уменьшается на  $\sim 2$  eV, а значения  $E_g$  и глубина выхода неупругоотраженных электронов практически не меняется. При этом не меняются также глубина и эффективность образования вторичных электронов. Поэтому можно полагать, что увеличение коэффициента ВЭЭ и фотоэлектронов при уменьшении  $\chi$  в основном обусловлено увеличением зоны выхода электронов. Из полученных результатов следует, что с уменьшением  $\chi$  зона выхода  $\lambda'$  монотонно увеличивается. Если эта зависимость линейная, то можно оценить значение  $\lambda'$  при  $\chi = 0$  ( $\Delta\chi = -4.2$  eV), которое составляет  $\sim 17.0$ – $18.0$  nm (рис. 3). При этом ИВЭ выходят на уровень дна зоны проводимости.

Известно [8], что для твердых тел зависимость глубины выхода электронов от энергии электронов (фотонов) при  $\lambda = 5.0$ – $10.0$  nm проходит через минимум, т.е. при энергиях, меньших, чем 50–100 eV с уменьшением энергии  $E_p$  и  $h\nu$ , глубина выхода ИВЭ и фотоэлектронов вновь увеличивается. В качестве примера на рис. 4 приведена зависимость интенсивности фототока  $I_F$  от  $d$ , измеренная при  $h\nu = 10.8$  eV для чистого CdTe и

CdTe с пленкой Ва толщиной  $\sim 1$  монослой. Видно, что значение  $I_F$  для чистого CdTe начиная с  $d = 6.0$  nm практически не меняется, т.е. глубина выхода фотоэлектронов  $\lambda = 6.0$  nm. После уменьшения  $\chi$  на 2 eV значение  $\lambda$  увеличивается до 8.0–9.0 nm. Если учесть, что фотоэлектронная работа  $e\phi$  выхода CdTe  $\sim 5.65$  eV, то при данной  $h\nu$  из чистого CdTe в вакуум выходят только фотоэлектроны, а „вторичные“ электроны твердого тела, образующиеся под действием фотоэлектронов, не смогут выходить в вакуум. При уменьшении  $e\phi$  на 2 eV наиболее быстрые вторичные электроны могут выходить в вакуум, что приводит к увеличению  $\lambda$  и  $I_F$ .

## Заключение

На основе экспериментальных исследований оценены глубина выхода  $\lambda$  и зона выхода  $\lambda'$  ИВЭ и фотоэлектронов из пленок CdTe с субмонослойным покрытием Ва. Показано, что  $\lambda'$  для „чистого“ CdTe составляет  $\sim 12.0$  nm. Уменьшение  $\chi$  на  $\sim 2$  eV приводит к увеличению  $\lambda'$  на 4.0–5.0 nm. При этом значения  $E_g$ , глубина выхода НОЭ и глубины образования ИВЭ практически не изменяются. Поэтому можно полагать, что увеличение эмиссии истинно-вторичных и фотоэлектронов при уменьшении  $\chi$  в основном обуславливается увеличением  $\lambda'$ .

## Список литературы

- [1] Мурадкбилов Д.М., Ташмухамедова Д.А., Умирзаков Б.Е. // Поверхность рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2013. № 10. С. 58–62. [Muradkabilov D.M., Tashmukhamedova D.A., Umirzakov B.E. // Journ. Surf. Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2013. Vol. 7. N 5. P. 967–971.]
- [2] Умирзаков Б.Е., Ташмухамедова Д.А., Рузибаева М.К., Ташатов А.К., Донаев С.Б., Мавлянов Б.Б. // ЖТФ. 2013. Т. 83. Вып. 9. С. 146–149. [Umirzakov B.E., Tashmukhamedova D.A., Ruzibaeva M.K., Tashatov A.K., Donaev S.B., Mavlyanov B.B. // Techn. Phys. 2013. Vol. 58. N 9. P. 1383–1386. DOI: 10.1134/S1063784213090260]
- [3] Эргашов Ё.С., Ташмухамедова Д.А., Джурабекова Ф.Г., Умирзаков Б.Е. // Известия РАН. Сер. физическая. 2016. Т. 80. № 2. С. 157–159. DOI: 10.7868/S0367676516020071 [Ergashov Y.S., Tashmukhamedova D.A., Djurabekova F.G., Umirzakov B.E. // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics. 2016. Vol. 80. N 2. P. 138–140. DOI: 10.3103/S1062873816020064]
- [4] Бронштейн И.М., Фрайман Б.С. Вторичная электронная эмиссия. М.: Наука, 1969. 305 с.
- [5] Качук П.Н. // ФТТ. 2000. Т. 42. Вып. 11. С. 1961–1963.
- [6] Krylyuk S.G., Korbutyak D.V., Kryuchenko Yu.V., Kupchak I.M., Vakhnyak N.D. // J. Alloys. Comp. 2004. Vol. 371. P. 142–145.
- [7] Li Q., Jie W., Gu Z., Yang G., Wang T., Zhang J. // J. Cryst. Growth. 2004. Vol. 265. P. 159–164.
- [8] Somorjai G. Chemistry in two dimensions: surfaces. NY: Cornell University Press. Ithaca, 1981. 552 p.