

УДК 621.315.592

## Электрические свойства пленок теллурида кадмия и барьера Шоттки на его основе (Al/CdTe)

*Н. Султонов, А.Т. Акобиров, Р.Б. Хамрокулов, О.В. Гафуров,  
Б.А. Рахматов, У.Р. Наимов*

Таджикский национальный университет (Душанбе, Таджикистан)

## Electrical Properties of Cadmium Telluride Films and the Al/CdTe Based Schottky Barrier

*N. Sultonov, A.T. Akobirova, R.B. Khamrokulov, O.V. Gafurov,  
B.A. Rakhmatov, U.R. Naimov*

Tajik National University (Dushanbe, Tajikistan)

Показано, что с ростом толщины пленок теллурида кадмия от 0,4 до 1 мкм удельное сопротивление уменьшается от  $8 \cdot 10^8$  до  $8,1 \cdot 10^7$  Ом·см, что равносильно возрастанию проводимости от  $1,25 \cdot 10^{-9}$  до  $1,23 \cdot 10^{-8}$  Ом<sup>-1</sup>·см<sup>-1</sup>. При толщинах выше 1 мкм удельное сопротивление и проводимость меняются слабо.

При толщинах пленок  $D=0,4$  мкм на рентгенограмме наблюдается один широкий максимум, что свидетельствует о несовершенстве кристаллитов. С ростом толщины до 1 мкм на рентгенограмме появляется ряд четких рефлексов с нарастающей интенсивностью, который связан с усовершенствованием кристаллической структуры пленок.

Получена вольт-амперная характеристика диода Шоттки. Показано, что с ростом прямого смещения наблюдается значительное увеличение прямого тока, а также заметное увеличение обратного тока при обратном смещении. Начальный участок прямой характеристики при напряжениях до 10 В является линейным и присущ барьерам Шоттки, однако при высоких напряжениях характеристика становится нелинейной.

Нелинейность вольт-амперной характеристики барьера Шоттки в достаточно широком диапазоне приложенного напряжения связана с эффектом границы зерен в поликристаллических пленках. А именно, при увеличении приложенного напряжения до определенного значения плотность ловушечных состояний в области границы кристаллита уменьшается, т.е. дырки начинают заполняться, что обычно наблюдается в полупроводниках, содержащих проводящие частицы в непроводящей матрице. Этот эффект мы использовали при изучении возможности изготовления детекторов ядерного излучения со структурой металл — полупроводник — металл.

**Ключевые слова:** барьер Шоттки, рентгенограмма, теллурид кадмия, кристаллиты, проводимость, пленка, энергия активации, межзеренные границы, вакуумная установка.

It is shown that with an increase in the thickness of cadmium telluride films from 0.4 to 1  $\mu\text{m}$ , the resistivity decreases from  $8 \cdot 10^8$  to  $8,1 \cdot 10^7$  Ohm·cm. It is equivalent to an increase in conductivity from  $1,25 \cdot 10^{-9}$  to  $1,23 \cdot 10^{-8}$  Ohm<sup>-1</sup>·cm<sup>-1</sup>. The resistivity and conductivity change only slightly at thicknesses above 1  $\mu\text{m}$ .

One broad maximum is observed on the X-ray diffraction pattern at film thicknesses  $D=0.4$   $\mu\text{m}$ . This indicates the imperfection of the crystallites. As the thickness increases to 1  $\mu\text{m}$ , a number of clear reflections with increasing intensity appear on the X-ray diffraction pattern, which is associated with the improvement of the crystal structure of the films.

The current-voltage characteristic of the Schottky diode is obtained. It is shown that with an increase in the forward displacement, a significant increase in the forward current is observed, as well as a noticeable increase in the reverse current with a reverse displacement. The initial section of the forward characteristic at voltages up to 10 V is linear, which is inherent in Schottky barriers. However, the characteristic becomes non-linear at high voltages.

The nonlinearity of the current-voltage characteristic of the Schottky barrier in a fairly wide range of applied voltage is related to the grain boundary effect in polycrystalline films. Namely, as the applied voltage increases to a certain value, the density of trap states in the region of the crystallite boundary decreases; holes begin to fill, which is usually observed in semiconductors containing conductive particles in a non-conductive matrix. We used this effect when studying the possibility of manufacturing nuclear radiation detectors with a metal — semiconductor — metal structure.

**Key words:** Schottky barrier, X-ray pattern, cadmium telluride, crystallites, conductivity, film, activation energy, grain boundaries, structure, reflex, vacuum setup.

**Введение**

Тонкие пленки теллурида кадмия, а также халькогениды кадмия являются подходящим материалом для создания фотоэлектрических преобразователей, поскольку их ширина запрещенной зоны близка к диапазону теоретически возможного максимального значения коэффициента полезного действия (КПД) [1]. Их можно использовать в гетеропереходах, ИК-детекторах, коммутационных устройствах и оптоэлектронике. Высококачественные поликристаллические пленки теллурида кадмия уже используются для создания высокоэффективных солнечных элементов [2–4].

Повышенный интерес к солнечным преобразователям породил спрос на тонкие пленки с высокими коэффициентами поглощения в видимой области спектра. Важнейшим параметром полупроводников с точки зрения использования в фотоэлектрических преобразователях является ширина запрещенной зоны  $E_g$ . С помощью халькогенидов Cd можно регулировать ширину запрещенной зоны в пределах  $1,4 \leq E_g \leq 2,4$  эВ, что обеспечивает разумное перекрытие энергии солнечного спектра. CdTe является наиболее перспективным материалом для создания фотогальванических устройств из-за его большой ширины запрещенной зоны и высокого коэффициента поглощения.

Тонкие пленки теллурида кадмия могут быть получены различными технологиями [5–8].

**Методы исследования**

Исследование структуры тонких пленок теллурида кадмия проводилось методом рентгеноструктурного анализа на дифрактометре ДРОН-1. Использовали  $CuK_2$  излучения фильтрация никелем. Для регистрации рассеянного излучения использовали гониометр ГУР-5, где предусмотрено раздельное и собственное вращение счетчика и образца. Использован режим соотношения скоростей 2:1, т.е. скорость вращения счетчика составляла 1 град/мин, а скорость вращения образца — 0,5 град/мин.

Регистрацию интенсивности рассеяния  $I$  осуществляли сцинтилляционным счетчиком. Углы дифракционных максимумов (по шкале гониометра и по диаграмме на ленте самописца) измеряли с точностью 0,03 мин.

Электрические измерения проводили при помощи нановольтамперметра Р341, который позволяет измерять напряжения и ток в следующих поддиапазонах: напряжения: 0–500 нВ; 0–500 мВ; 0–500 мкВ; 0–10 мВ; ток: 0–500 нА; 0–50 мкА.

Кроме того, прибор позволяет при помощи встроенных (внешних) делителей расширять пределы измерения напряжения от 0–50 мВ до 0–5 В, тока от 0–125 мкА до 0–250 мкА.

Пленки толщиной 50–150 мкм получены на вакуумной установке ВУП-5.

**Полученные результаты**

В этой работе рассмотрены проводимость пленок, а также характеристики и параметры диода Шоттки на основе пленок теллурида кадмия толщиной 2 мкм, полученных вакуумным напылением в квазизамкнутом объеме. Пленки имеют поликристаллическую структуру с размером кристаллитов 140 Å.

Как известно, зависимость темнового тока от температуры выражается формулой,  $\sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{\Delta E}{2kT}\right)$ ,

где — предэкспоненциальный коэффициент,  $\Delta E$  — энергия активации технологического процесса,  $k$  — постоянная Больцмана.

На рисунке 1 показана зависимость логарифма удельной проводимости от обратной температуры. Электропроводность образцов измеряли в темноте в интервале температур 300–400 К. Как видно, зависимость  $\lg\sigma$  от  $1/T$  представляет собой прямую с наклоном  $(\Delta E/2k)$ . С повышением температуры проводимость увеличивается. Зависимость  $\lg\sigma$  —  $10^3/T$  для пленок представляет собой прямую линию, что свидетельствует об активирующем характере проводимости тонких пленок. Очевидно, такой характер зависимости  $\lg\sigma$  от  $1/T$  свидетельствует о том, что доминирующим механизмом протекания тока является ограничение тока границами зерен (из-за наличия межкристаллитного барьера).

Следует отметить, что межзеренные границы являются местом, где велика концентрация разного рода несовершенств, связанных с поликристаллической природой пленок. Механизм роста проводимости тонких пленок с температурой связан с тем, что полученные вакуумным методом пленки теллурида кадмия являются полупроводниками [7, 8].

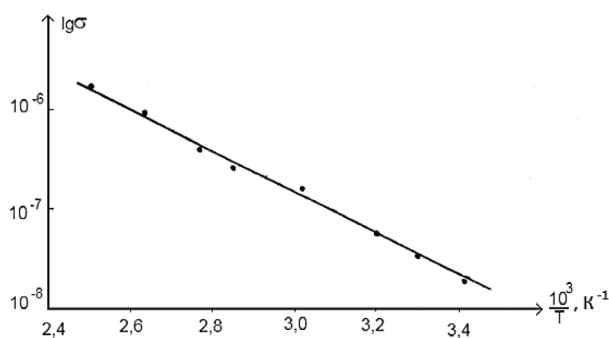


Рис. 1. Температурная зависимость проводимости пленок CdTe

Из графика, приведенного на рисунке 1, рассчитана энергия активации носителей пленок толщиной 2 мкм, которая оказалась равной 0,4 эВ. Эти данные не противоречат данным, полученным в работах авторов [8, 9].

В таблице приведены значения удельного сопротивления пленок разной толщины. Видно, что с увеличением толщины пленки от 0,4 до 1 мкм удель-

ное сопротивление уменьшается с  $8 \cdot 10^8$  до  $8,1 \cdot 10^7$  Ом·см, что эквивалентно увеличению проводимости с  $1,25 \cdot 10^{-9}$  до  $1,23 \cdot 10^{-8}$  Ом $^{-1}$ ·см $^{-1}$ . 1 см $^{-1}$ . При толщинах более 1 мкм  $\rho$  изменяется незначительно.

Изменение размеров кристаллитов и удельного сопротивления с ростом толщины пленок

Толщины пленок $D$ , мкм	Размеры кристаллитов $h_k$ , Å	Интенсивность реф. (002) $I_m$ , усл. ед.	Удельное сопротивление $\rho$ , Ом·см
0,4	70	52	$8 \cdot 10^8$
0,6	100	70	$4,8 \cdot 10^8$
0,8	130	115	$8,2 \cdot 10^7$
1,0	135	120	$8,1 \cdot 10^7$

На рисунке 2 приведена рентгенограмма пленок различной толщины. При толщине пленки  $D=0,4$  мкм на рентгенограмме наблюдается один широкий максимум, что свидетельствует о дефектности кристаллитов. При увеличении толщины до 1 мкм на рентгенограмме появляется ряд четких рефлексов с возрастающей интенсивностью.

Как видно из таблицы, с увеличением толщины пленок размеры кристаллитов и интенсивность рефлекса (002) заметно увеличиваются вплоть до 0,8 мкм (рис. 2). Из анализа данных рентгеновских измерений

и удельной проводимости следует, что проводимость пленок теллурида кадмия зависит от совершенства кристаллической структуры: улучшение кристаллической структуры способствует увеличению проводимости пленок (табл., рис. 2).

Низкая удельная проводимость ( $\sigma \sim 10^{-8}$  Ом $^{-1}$ ·см $^{-1}$ ) и значительная энергия активации проводимости (0,4 эВ) свидетельствуют о том, что проводимость тонких пленок теллурида кадмия определяется межкристаллитными барьерами [7, 8].

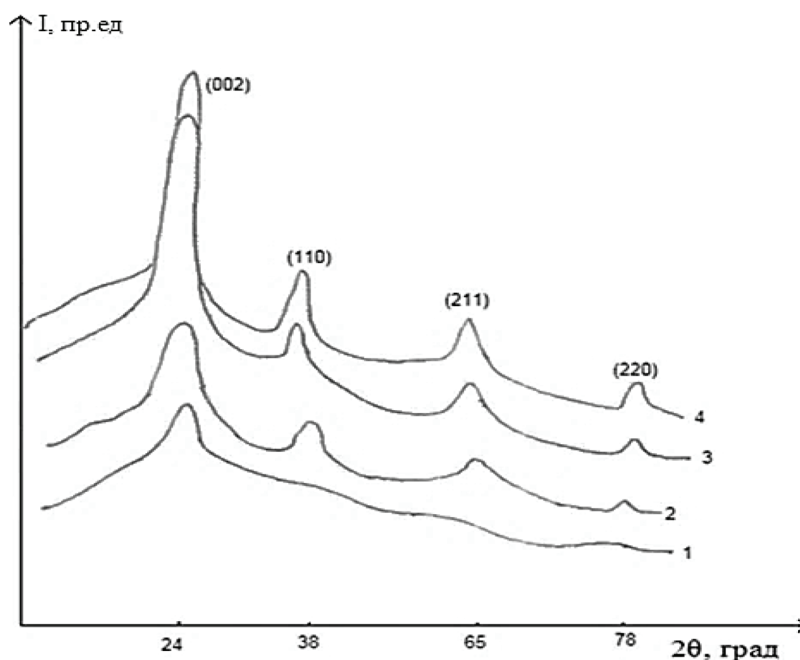


Рис. 2. Дифрактограммы пленок CdTe различной толщины: 1 — 0,4; 2 — 0,6; 3 — 0,8; 4 — 1 мкм

Важнейшими характеристиками тонких пленок с точки зрения использования в фотоэлектрических устройствах являются удельная проводимость и возможность создания барьерного слоя на границе металл — полупроводник.

Барьер Шоттки на границе алюминия и CdTe создавался следующим образом. В вакуумной установке на пленку теллурида кадмия толщиной 2 мкм на стеклянной подложке был напылен алюминиевый контакт [9, 10]. Площадь контакта с алюминием была выбрана меньшей, чем площадь пленки. Барьер, об-

разовавшийся на границе поликристаллического теллурида кадмия и алюминия (Al-CdTe), является барьером Шоттки. Известно, что барьер Шоттки имеет широкий спектр применения: на основе барьеров Шоттки уже созданы высокочастотные диоды, транзисторы, полевые транзисторы и т.д.

Вольтамперные характеристики тонких полупроводниковых пленок с металлическими контактами (ВАХ) отражают характеристики диода. Прямая и обратная ветви ВАХ описываются уравнениями:

$$j = j_s \left( e^{qV/nkT} - 1 \right) \quad (1)$$

$$j = AT^2 \exp(-q\varphi_b/kT) \quad (2)$$

$$A = \frac{4\pi q m^* k^2}{h^3},$$

где  $n$  — фактор идеальности,  $j$  — плотность тока,  $j_s$  — плотность тока насыщения,  $\varphi_b$  — величина барьера Шоттки,  $k$  — постоянная Больцмана ( $8,62 \cdot 10^{-5} \text{эВ/К}^0$ ),  $T$  — абсолютная температура.

$$A = \frac{4\pi q m^* k^2}{h^3},$$

где  $A$  — эффективная постоянная Ричардсона,  $q$  — заряд электрона,  $m^*$  — эффективная масса дырки,  $k$  — постоянная Больцмана,  $h$  — постоянная Планка.

Экстраполируя значение обратного тока при нулевом напряжении, получаем плотность тока насыщения  $j_s$ .

Из формулы (2) определяем высоту барьера

$$\varphi_b = \left( \frac{kT}{2,3q} \right) \cdot \lg \left( \frac{AT^2}{j_s} \right). \quad (3)$$

Фактор идеальности контакта дается уравнением

$$n = \left( \frac{2,3q}{kT} \right) \cdot \lg \left[ \frac{\Delta V}{\Delta \lg j} \right]. \quad (4)$$

На рисунке 3 приведена ВАХ структуры (Al-CdTe) на основе поликристаллической пленки CdTe. Как видно, при увеличении прямого смещения происходит значительное увеличение прямого тока, а также заметное увеличение обратного тока при обратном смещении. Начальный участок прямой характеристики при напряжениях до 10 В линейный, что присуще барьерам Шоттки. При больших напряжениях характеристика становится нелинейной.

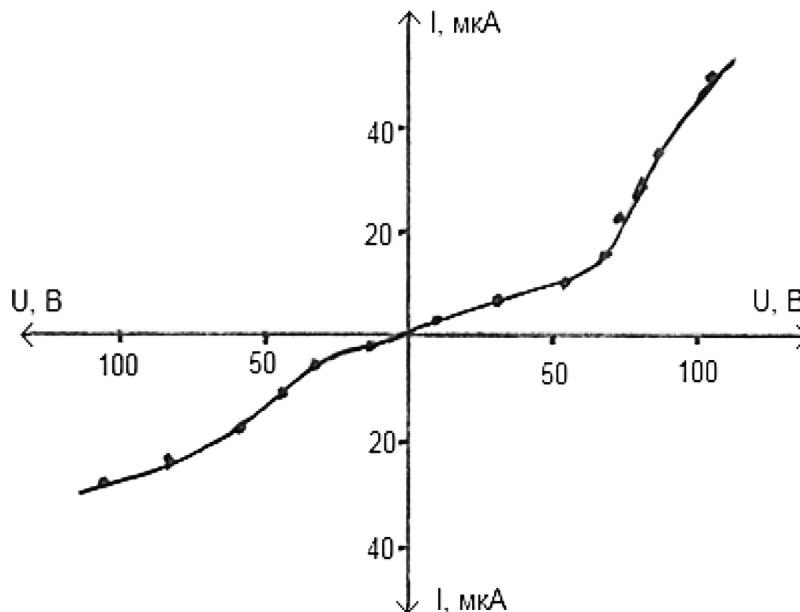


Рис. 3. Характеристики барьера Шоттки на границе Al-CdTe.

Нелинейность вольтамперной характеристики в достаточно широком диапазоне приложенного напряжения связана с эффектом границы зерен в поликристаллических пленках. При увеличении приложенного напряжения до определенного значения плотность ловушечных состояний в области границы кристаллита уменьшается, т.е. дырки начинают заполняться [11]. Это явление обычно наблюдается

в полупроводниках, содержащих проводящие частицы в непроводящей матрице. Высота барьера Шоттки рассчитывалась по формуле (3) по наклону зависимости  $\log j_s(V)$  (рис. 4). Коэффициент идеальности перехода также рассчитывался по рисунку 4 и уравнению (4). Высота барьера Шоттки на границе Al/CdTe и коэффициент идеальности составили 0,66 эВ и 1,16 соответственно.

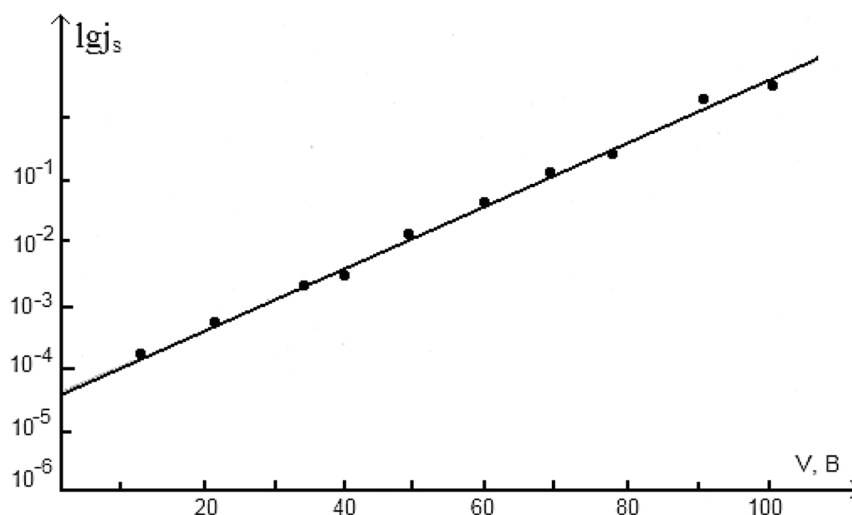


Рис. 4. Зависимость  $\lg j_s$  от приложенного напряжения для определения высоты барьера Шоттки

Точно такие же измерения и вычисления были проведены для контакта Ag-CdTe. Высота барьера Шоттки [12], вычисленная на основе вольтамперных характеристик и температурной зависимости удельной проводимости, составляла величину 0,75 эВ. Это связано с различием работ выхода металлов Al (4,2 эВ) и Ag (4,7 эВ).

#### Заключение

На основе анализа данных рентгеновского измерения и удельной проводимости установлено, что проводимость пленок теллурида кадмия сильно зависит от совершенства кристаллической струк-

туры: совершенствование кристаллической структуры способствует возрастанию проводимости пленок. Изготовлены барьеры Шоттки Al-CdTe на основе поликристаллических пленок теллурида кадмия.

Установлено, что нелинейность вольтамперной характеристики в достаточно широких пределах приложенного напряжения связана с эффектом границы зерен в пленках, которые часто сравнимы со средней длиной свободного пробега основных носителей. Показано, что высота барьера Шоттки на контакте Al/CdTe и фактор идеальности соответственно составляют величину 0,66 эВ и 1,16.

## Библиографический список

1. Чопра К., Дас С. Тонкопленочные солнечные элементы / пер. с англ. с сокр. М., 1986.
2. Bhattacharya R.N., Rajeshwar K. Heterojunction CdS/CdTe Solar Cells Based on Electrodeposited p-CdTe Thin Films: Fabrication and Characterization // J. Appl. Phys. 1985. № 58.
3. Marsillac S., Parikh V.Y., Compaan A.D. Ultra-thin Bifacial CdTe Solarcell // Sol. Energ. Sol. C. 2007. № 91.
4. Kumar L., Singh B.P., Misra A. Characterization of CdSe x Te 1-x sintered films for photovoltaic applications // Physica B-Condensed Matter 2005. № 1-4.
5. Kumar V., Khan, K.L., Singh G, Sharma, T.P, Husain M. ZnSe Sintered Films: Growth and Characterization // Appl. Surf. Sci. 2007. Vol. 253. № 7.
6. Campbell D.S. Handbook of Thin Film Technology / eds. L.I. Maissel, R. Glang; McGraw-Hill Book Company. New York. 1970.
7. Беляев А.П. Зибец В.А., Калинин И.П. Электрофизические характеристики эпитаксиальных пленок CdTe // Изв. вузов. Физика. 1990. № 3.
8. Беляев В.П., Рубец В.П., Нуждин М.Ю. Электрические свойства пленок теллурида кадмия, синтезированных в тепловом поле градиента температуры // ФТП. 2003. Т. 37. № 6.
9. Darwish S. DC electric and photoelectric measurements of CdTe thin films in Schottky-barrier cells // Phys. B. 2004. Vol. 349.
10. Soshnikov A., Bilevych Ye., Darchuk L., Apatskaya M., Tsybrii Z., Vyuchyk M., Boka A., Sizov F. Boelling and B. Sul'kio-Cleff. The influence of substrate materials to the properties of CdTe thin films grown by HWE // Journal of Crystal Growth. 2005.
11. Clark A.H., Kazmerski L.L. *Polycrystalline and Amorphous Thin Film Devices* // Academic. New York. 1980.
12. Султонов Н., Акобиров А.Т., Хамрокулов Р.Б., Наимов У.Р. Определение высоты барьера Шоттки на контакте металл — пленка CdTe // Наука и инновация. 2014. № 1. С. 65–69.