

O'ZBEKISTON RESPUBLIKASI

OLIY TA'LIM, FAN VA INNOVATSIYALAR VAZIRLIGI

FARG'ONA DAVLAT UNIVERSITETI

**FarDU.  
ILMIY  
XABARLAR**

1995-yildan nashr etiladi  
Yilda 6 marta chiqadi

6-2025  
ANIQ FANLAR

**НАУЧНЫЙ  
ВЕСТНИК.  
ФерГУ**

Издаётся с 1995 года  
Выходит 6 раз в год

## MATEMATIKA

**Sh.T.Nishonova, M.S.Sodiqova**

Elliptiko-giperbolik tipdagi tenglama uchun bir chegaraviy masalaning  
bir qiymatli yechimi..... 4

**N.S.Ikramova, M.T.Yunusaliyeva**

Solvability of a mixed problem for a degenerate sub-diffusion  
equation in a rectangular domain ..... 12

## INFORMATIKA

**B.A.Umarov**

IoT qurilmalarini tarmoqqa ulashdagi protokollar tahlili ..... 25

**B.A.Umarov, Sh.M.Kimsanboyeva**

Tarmoq energiya samaradorligini oshirish strategiyalari..... 29

## FIZIKA-TEXNIKA

**G.Q.Muxamadaliyeva, M.R.Akbaraliyeva**

Tabiiy va sun'iy tolalarni o'quvchilarga o'rgatishda steam va  
smart metodlari orqali o'qitish samaradorligini oshirish..... 32

**M.F.Solijonova**

Texnologik ta'lim yo'nalishi talabalariga zamonaviy innovatsion pedagogik  
texnologiyalardan foydalanib 'metallarning xossalarini o'qitish ..... 36

**J.R.Bobojonova**

Umumta'lim maktablarida ta'lim samaradorligini oshirishda interfaol  
usullarining roli ..... 40

**Sh.Sh.Shuxratov, S.A.Ismoilova**

Alohida ta'lim ehtiyojlariga ega o'quvchilar uchun interfaol  
pedagogik yondashuvlar ..... 44

**C.M.Отажонов, P.H.Эргашев, K.A.Ботиров, Д.Х.Нажмиддинова**

Оптические свойства и рентгеноструктурный анализ тонких  
пленок с глубокими примесными уровнями ..... 49

**M.X.Paxmonkulov**

Цели и методы изучения радиационных дефектов в полупроводниках ..... 57

**I.V.Xoldarova, Sh.A.Ibragimova**

Mehnatsevarlik tushunchasining asosiy sotsiomadaniy  
va tarbiyaviy kontsepsiyalari ..... 61

## ILMIY AXBOROT

**G.X.Ismoilova**

Xalq hunarmandchiligi va milliy qadriyatlarni umumiy o'rta ta'lim  
maktablarida smart usulidan foydalanib o'qitish samaradorligi ..... 67

**F.R.Muxitdinova**

Magnit maydondagi p-n o'tish kuchlanishining turli temperaturalarda o'zgarishi ..... 671



UO'K: 621.315.593.

**ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВО И РЕНТГЕНОСТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ ТОНКИХ ПЛЕНОК CdTe С ГЛУБОКИМИ ПРИМЕСНЫМИ УРОВНЯМИ****CHUQUR ARALASHMA SATXGA EGA CdTe YUPQA PLYONKALARINING OPTIK XUSUSIYATLARI VA RENTGEN STRUKTURAVIY TAHLILI****OPTICAL PROPERTIES AND X-RAY STRUCTURAL ANALYSIS OF CdTe THIN FILMS WITH DEEP IMPURITY LEVELS****Отажонов Салим Мадрахимович<sup>1\*</sup>** <sup>1</sup>Ферганский государственный университет, д.ф.-м.н., профессор**Эргашев Равшанбек Назирович<sup>2</sup>** <sup>2</sup>Ферганский государственный университет, д. ф. ф.-м.н. (PhD)**Ботиров Кадир Абдуллаевич<sup>3</sup>**<sup>3</sup>Ферганский государственный университет, доцент кафедры**Нажмиддинова Дилдорахон Халиловна<sup>4</sup>** <sup>4</sup>Ферганский государственный университет, докторант  
ORCID(0009-0001-4991-3834)**Аннотация**

В статье представлены результаты исследования тонких фотоэлектрофизических пленок теллурида кадмия (CdTe), полученных методом термического осаждения на стеклянные и молибденовые подложки с использованием легиранта серебра. Исследованы влияние температуры подложки и последующей термообработки на структурные, морфологические и оптические свойства пленок. Рентгеновская дифракция показала, что осажденные пленки являются нанокристаллическими с кубической структурой, а термообработка приводит к росту зерен и формированию поликристаллической структуры. С помощью атомно-силовой микроскопии (АСМ) определены размеры зерен и морфология пленок. Оптические измерения позволили установить ширину запрещенной зоны, которая варьировалась от 1,45 до 1,48 эВ в зависимости от температуры обработки. Были изготовлены фотоэлектрофизические элементы CdTe-CdS, для которых проведены вольтамперные характеристики и определен коэффициент полезного действия (КПД) равный 22 %. Полученные результаты показывают перспективность применения тонких пленок CdTe в фотоэлектрических и рентген-радиационных детекторах, а также возможность оптимизации их свойств посредством термообработки.

**Anotatsiya**

Ushbu maqolada kumush qo'shimchasi yordamida shisha va molibden substratlariga termik cho'ktirish orqali olingan kadmiy telluridining (CdTe) yupqa fotoelektrofizik plyonkalarini o'rganish natijalari keltirilgan. Substrat harorati va keyingi issiqlik bilan ishlov berishning plyonkalarining strukturaviy, morfologik va optik xususiyatlariga ta'siri o'rganilgan. Rentgen difraksiyasi shuni ko'rsatdiki, cho'ktirilgan plyonkalar kubik tuzilishga ega nanokristalli bo'lib, issiqlik bilan ishlov berish don o'sishiga va polikristalli tuzilish hosil bo'lishiga olib keladi. Atom kuch mikroskopiyesi (AKM) yordamida plyonkalarining don hajmi va morfologiyasi aniqlandi. Optik o'lchovlar qayta ishlash haroratiga qarab 1,45 dan 1,48 eV gacha o'zgarib turadigan tasma oralig'ini aniqlash imkonini berdi. CdTe-CdS fotoelektrofizik elementlari ishlab chiqarildi, ular uchun tok-kuchlanish xususiyatlari olindi va samaradorlik (FIK) 22% ga teng deb aniqlandi. Olingan natijalar CdTe yupqa plyonkalarini fotoelektrik va rentgen nurlanish detektorlarida qo'llash imkoniyatlarini, shuningdek, ularning xususiyatlarini issiqlik bilan ishlov berish orqali optimallashtirish imkoniyatini namoyish etadi.

**Abstract**

This article presents the results of a study of thin photoelectrophysical films of cadmium telluride (CdTe), obtained by thermal deposition on glass and molybdenum substrates using a silver dopant. The influence of substrate temperature and subsequent heat treatment on the structural, morphological, and optical properties of the films is studied. X-ray diffraction showed that the deposited films are nanocrystalline with a cubic structure, and heat treatment leads to grain growth and the formation of a polycrystalline structure. Using atomic force microscopy (AFM), the grain

size and morphology of the films were determined. Optical measurements made it possible to determine the band gap, which varied from 1.45 to 1.48 eV depending on the processing temperature. CdTe-CdS photoelectrophysical elements were fabricated, for which current-voltage characteristics were obtained and the efficiency (COP) was determined to be 22%. The obtained results demonstrate the potential of using CdTe thin films in photoelectric and X-ray radiation detectors, as well as the possibility of optimizing their properties through heat treatment.

**Ключевые слова:** CdTe, тонкие пленки, термическое осаждение, фотоэлектрофизические элементы, рентгеновская дифракция, атомно-силовая микроскопия, ширина запрещенной зоны, поликристаллическая структура, термообработка, коэффициент полезного действия.

**Kalit so'zlar:** CdTe, yupqa plyonkalar, termal cho'kma, fotoelektrofizik elementlar, rentgen difraksiyasi, atom kuch mikroskopiya, tasma oralig'i, polikristallik tuzilish, issiqlik bilan ishlov berish, samaradorlik.

**Key words:** CdTe, thin films, thermal deposition, photoelectrophysical elements, X-ray diffraction, atomic force microscopy, band gap, polycrystalline structure, heat treatment, efficiency.

## ВВЕДЕНИЕ

В последнее годы все большую внимание приобретают фотоэлектрофизические пленки, обладающие определенными преимуществами по сравнению с пленками с p-n-переходом. Фотоэлектрофизические пленки могут быть нанесены на большие площади, дефекты в кристаллической структуре отдельных слоев незначительны, а их эффективность приближается к диодным солнечным батареям [1]. В последнее время исследуются материалы, экологически не наносящие вреда окружающей среде, однако солнечные элементы на основе CdTe эффективны и стабильны [2, 3]. CdTe является полупроводниковым соединением, используемым в процессе производства фотоэлемента, благодаря высокому значению коэффициента поглощения и оптимальной ширине запрещенной зоны 1,5 эВ. CdTe в виде тонкой пленки может быть поликристаллическим или нанокристаллическим, что может способствовать изменению его характеристик. Для получения тонких пленок CdTe используются различные методы, в том числе электроосаждение, магнетронное распыление, термическое испарение, сублимация в замкнутом пространстве [4].

Полупроводниковые солнечные элементы рентгеновского и радиоактивного излучения применены для медицины и ядерной медицины [5]. Важно разработать цифровые эмиссионные детекторы, которые будут иметь большую чувствительность и разрешение по сравнению с газовыми и сцинтилляционными детекторами. Для этого исследуются полупроводниковые материалы CdTe/CdS и CdTe/CdSe, которые должны регистрировать рентгеновское и гамма-излучение.

Предыдущие исследования были направлены на получение солнечных элементов с поглощающим слоем CdTe, созданным на основе существования гетероструктуры перехода и электродов для сбора генерируемых носителей.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЕ

Парильным методом строения конструкции гетероструктуры выбор определенном количестве материалов для нанесения каждого слоя. Перед нанесением тонкой пленки CdTe на подложку из молибдена и стеклянные подложки наносится тонкая пленка CdS с сопротивлением 20 Ом/кв. Тонкие пленки CdS были получены термическим осаждением. Пленки CdS, нанесенные через 5 минут, подвергают термообработке на воздухе при температуре 400°C для лучшей кристаллизации [6].

Тонкие пленки теллурида кадмия наносили методом термическим осаждения на подложки молибдена и стеклянные подложки.

Для этого водный раствор состоял из 0,2 М CdSO<sub>4</sub> и 0,8 мМ Na<sub>2</sub>TeO<sub>3</sub>, при этом температура раствора составляла 90 °C, а кислотность раствора довели винной кислотой до значения pH=2. В качестве рабочего электрода использовали прозрачную проводящую пленку SnO<sub>2</sub>, нанесенную на стекло и подложки со слоями SnO<sub>2</sub>-CdS, а в качестве противозэлектрода использовали графитовый стержень.

Кристаллическую структуру пленок исследовали с помощью рентгеновской дифракции (РДФ) на порошковом рентгеновском дифрактометре Rigaku Ultima IV при 20 в диапазоне 20–70°. В качестве источника излучения использовалось Cu-K<sub>α</sub>-излучение с  $\lambda = 0,15418$  нм, полученное от генераторной установки при напряжении 40 кВ и токе 40 мА, со скоростью сканирования 2°/мин. Спектры оптического пропускания осажденных тонких

## FIZIKA-TEXNIKA

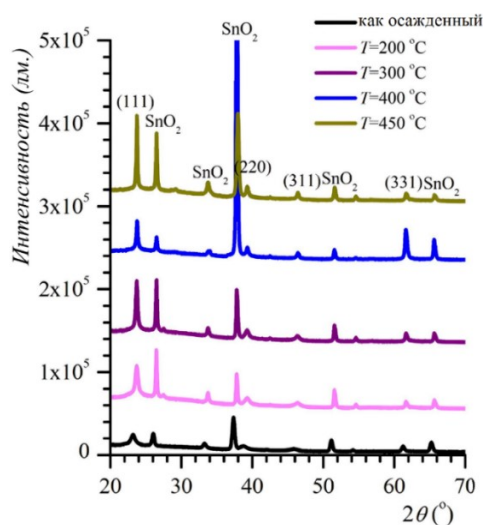
пленок CdTe определяли на спектрофотометре Varian Cary 50 для определения ширины запрещенной зоны в диапазоне 400–900 нм [7].

АСМ-изображения поверхности пленок были получены на сканирующем зондовом микроскопе SPM-9700, работающем в динамическом режиме.

Фотоэлектрохимическая ячейка типа  $\text{SnO}_2$ -CdS-CdTe-электролит-графит изготавливалась с использованием полупроводникового электрода  $\text{SnO}_2$ -CdS-CdTe и графитового противозэлектрода, а в качестве электролита использовался водный раствор 0,1 М NaOH и 0,1 М  $\text{Na}_2\text{S}_x$ . Для освещения фотоэлектрохимического элемента использовался ГРАФОСКОП-S8650, интенсивность которого измерялась люксметром LUX-UV-IR Meter 666 230 [8].

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЯ**

Кристаллическая структура и состав тонких пленок CdTe были определены по спектрам рентгеновской дифракции (рис. 1), которые показали, что пленки, полученные при 90°C, являются нанокристаллическими с кубической структурой, тогда как отожженные пленки являются поликристаллическими с кубической структурой. Поскольку пленки были нанесены на пленку CdS, спектр дифракции рентгеновского излучения (ДРИ), показанный на рисунке 2, сравнивают со спектром дифракции CdTe, приведенным на карточке JCPDS 75-2086 (JCPDS - Международный центр дифракционных данных и национальное бюро стандартов). Пики, не показанные на карте, относятся к спектру дифракции пленки CdS и для того, чтобы их можно было различить, отмечены на рис. 1. Из рентгенограммы можно сделать вывод, что при  $2\theta = 23,76^\circ$  самый высокий получается, при этом он является отражением кристаллографической плоскости (111), а остальные пики  $2\theta = 39,29^\circ$ ,  $46,44^\circ$ ,  $62,42^\circ$  соответствуют плоскостям (220), (311), (331) соответственно. Термическая обработка пленки CdTe при температурах  $T = 200^\circ\text{C}$  и  $T = 300^\circ\text{C}$  увеличивает высоту пика  $2\theta = 23,76^\circ$ , а пик при  $T = 400^\circ\text{C}$  уменьшается и при  $T = 450^\circ\text{C}$  имеем самый высокий пик по сравнению с другими температурами.



**Рис. 1. Рентгенограмма, полученная для тонких пленок CdTe после осаждения и после отжига при различных температурах**

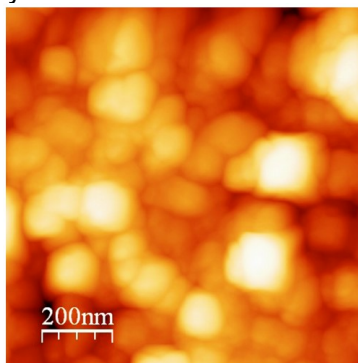
Тонкие пленки CdTe были получены термическим осаждением на стеклянных и молибденовых подложках, покрытых легированным серебром, при постоянном напряжении 1,40 В. Для определения параметров осаждения CdTe была проведена циклическая вольтамперометрия. Пленки отжигали при  $T = 200^\circ\text{C}$ ,  $T = 300^\circ\text{C}$ ,  $T = 400^\circ\text{C}$  и  $T = 450^\circ\text{C}$ , в атмосфере воздуха. Рентгеновские дифрактограммы показывают, что пленки, полученные при 90°C, представляют собой нанокристаллы кубической структуры с размером зерна 14 нм. Термическая обработка пленок CdTe способствует росту зерен и получению поликристаллических пленок. Атомно-силовой микроскоп показывает, что пленки гладкие и однородные со столбчатыми зернами. Оптические свойства пленок CdTe были исследованы путем измерения пропускания в зависимости от длины волны. Оптическая ширина

запрещенной зоны свежесоздаваемых пленок составляет 1,48 эВ и уменьшается до 1,45 эВ для пленок, отожженных при температуре 300 °С, и вновь увеличивается при температуре 450 °С. Наконец, были изготовлены фотоэлектрофизические солнечные элементы типа CdTe-CdS с использованием легиранта Ag. Из измеренных вольт - амперных характеристик были определены напряжение холостого хода  $V_{xx} = 500$  мВ и ток короткого замыкания  $I_{кз} = 1,2$  мА/см<sup>2</sup>.

На рис. 2 можно определить размер зерен D на тонких пленках CdTe после осаждения и термической обработки при различных температурах. В зависимости от высоты и ширины наивысшего пика определяют средний размер зерен и рассчитывают его по соотношению [9]:

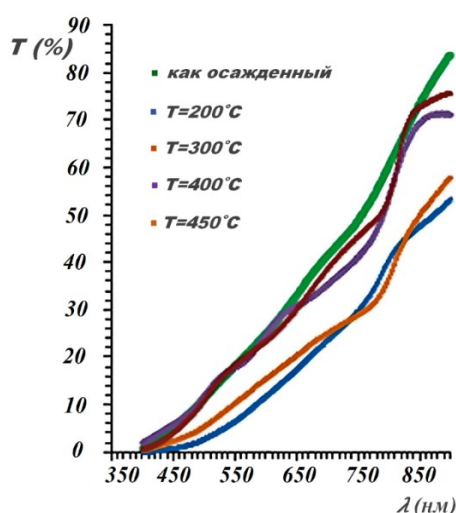
$$D = \frac{0,9\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (1)$$

где  $\lambda$  — длина волны,  $\beta$  — уширение дифракционной линии, измеренное на половине максимальной интенсивности, а  $\theta$  — угол.



**Рис. 2. АСМ-изображение поверхности пленки CdTe, отожженной при температуре 450 °С**

Морфологию пленок определяли методом АСМ (атомно-силовой микроскопии), при этом исследуемая поверхность пленок составляла 1 мкм х 1 мкм. Размер зерен, определенный по изображениям АСМ, соответствует результатам, полученным из измерений ДРИ (рис. 1).



**Рис. 3. Спектры пропускания тонких пленок CdTe в зависимости от температуры подложки.**

Рисунок 3 показывает, что пропускание резко возрастает на длинах волн от 770 до 850 нм. Это означает, что значение ширины запрещенной зоны CdTe должно быть установлено в этом диапазоне длин волн.

## FIZIKA-TEKNIKA

Однако для определения ширины запрещенной зоны и характера переходов электронов между валентной зоной и зоной проводимости необходимо определить коэффициент поглощения (рис. 4), определяемый соотношением [10]:

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln \left( \frac{I_0}{I} \right) \quad (2)$$

Оптическая ширина запрещенной зоны рассчитывается по соотношению:

$$\alpha h\nu = A(h\nu - E_g)^{\frac{1}{2}n} \quad (3)$$

где  $A$  — параметр, зависящий от вероятности перехода,  $\alpha$  — коэффициент поглощения,  $h$  — постоянная Планка,  $E_g$  — энергия оптической запрещенной зоны,  $\nu$  — частота фотонов,  $n$  — индекс, который может принимать значения  $\frac{1}{2}$  для прямые разрешенные переходы. Оптическую ширину запрещенной зоны  $E_g$  пленок можно определить, используя графическое представление  $(\alpha h\nu)^2 = f(h\nu)$  и пересечение прямой части кривых с осью  $x$  (рис. 5).

Полученные результаты показывают, что ширина запрещенной зоны  $E_g$  свежесажженной и термически обработанной пленки CdTe изменяется от 1,45 эВ до 1,48 эВ и уменьшается с повышением температуры до 300 °С, тогда как выше этой температуры наблюдается тенденция роста (Таблица 1).

Таблица 1. Расчетные значения размера зерна и ширины запрещенной зоны в зависимости от температуры подложки

CdTe	D(нм)	$E_{g(33)}$ (эВ)
депонированный	6	1.48
200°C	18	1.46
300°C	40	1.45
400°C	38	1.47
450°C	74	1.47

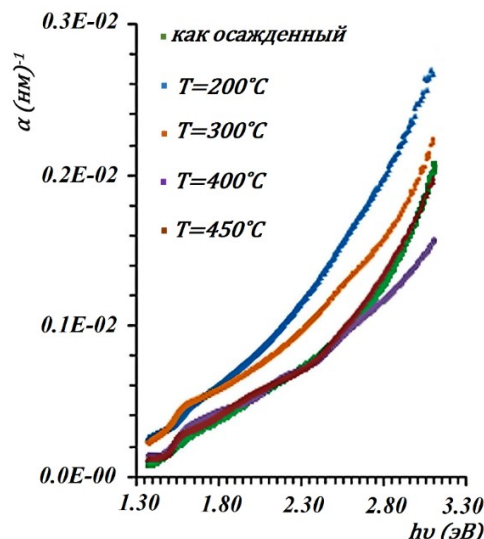
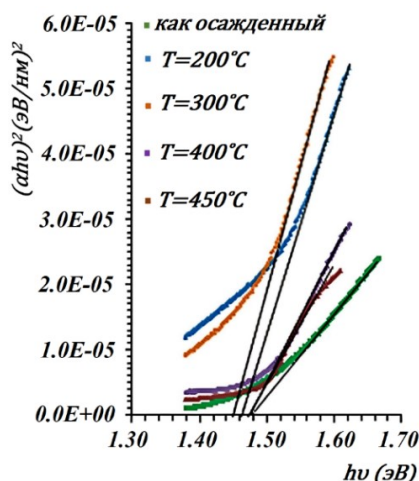


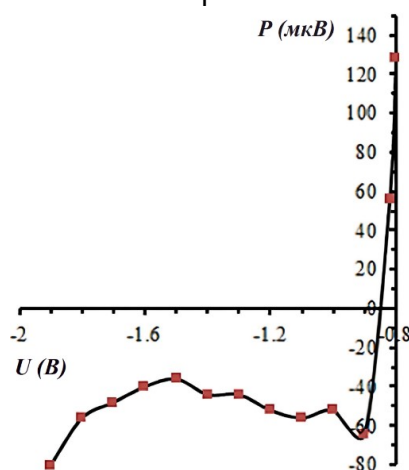
Рис. 4. Зависимость коэффициента поглощения от энергии фотонов и в зависимости от температуры подложки





**Рис. 5. Зависимость  $(\alpha hv)^2$  от энергии фотонов ( $hv$ ) тонких пленок CdTe при различных температурах подложки для прямых разрешенных переходов**

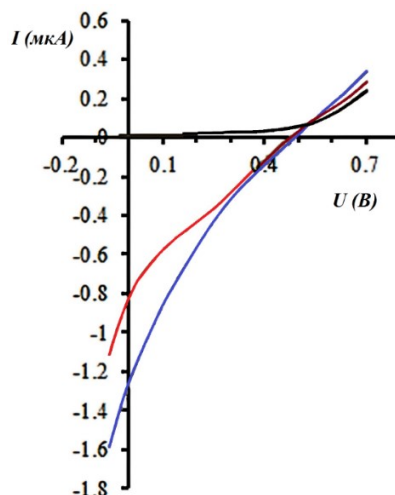
Определение типа электропроводности электроосажденной тонкой пленки CdTe проводят путем измерения напряжения между стеклом/FTO/CdTe-электролитом (0,1 М  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ) и графитом. В зависимости от разницы напряжения ячейки ФЭП в темноте и освещенности 100 мВт/см<sup>2</sup> определяется тип тонкой пленки CdTe. На рис. 1.2.6 видно, что тонкая пленка CdTe является n-типом при напряжении выше -0,85 В, а при напряжении 1,5 В тонкая пленка CdTe близка к стехиометрическому полупроводнику. При напряжении более 1,5 В тонкая пленка CdTe становится сильнолегированной n-типа [11].



**Рис. 6. Сигнал ФЭП тонкой пленки CdTe после осаждения**

Были изготовлены фотоэлектрофизические элементы типа молибден и стеклянные подложки-CdS-CdTe.





**Рис. 7. ВАХ солнечного элемента полученных на подложки молибден и стекло-  
CdS-CdTe**

Для характеристики фотоэлектрофизической ячейки измеряют ее ВАХ в темноте и на свету при интенсивности света 50 мВт/см<sup>2</sup> и 100 мВт/см<sup>2</sup> (рис. 7). При освещении напряжение фотоанода молибден и стеклянные подложки -CdS-CdTe выше, чем напряжение графитового противоиэлектрода.

Используя измеренные ВАХ, КПД ячейки определяют по следующему уравнению:

$$\eta = \frac{V_m I_m}{P \cdot A} = \frac{FF I_{sc} V_{oc}}{P \cdot A} \quad (4)$$

где  $P$  — интенсивность света,  $FF$  — коэффициент заполнения,  $A$  — поверхность солнечного элемента,  $I_{sc}$  — ток короткого замыкания и  $V_{oc}$  — напряжение холостого хода. Кроме того, коэффициент заполнения определяется уравнением:

$$FF = \frac{V_{max} I_{max}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (5)$$

где  $I_{max}$  — максимальный ток, а  $V_{max}$  — максимальное напряжение в той или иной точке ВАХ, в которой мы имеем максимальный КПД элемента. При освещении ячейки силой света 100 мВт/см<sup>2</sup> КПД фотоэлектрофизической ячейки составляет 22% и будет способствовать стабильности и долговечности структуры и ее использованию в качестве солнечного элемента.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Тонкая пленка CdTe была термически осаждена на стеклянные и молибденовый подложки при использовании легиранта серебра. Рентгенограммы пленок после осаждения и термической обработки показывают, что пленки имеют кубическую кристаллическую структуру. Средний размер зерен 74 нм наибольший для пленок, прошедших термообработку при температуре  $T = 450^\circ\text{C}$ . Оптическая ширина запрещенной зоны уменьшается до значения 1,45 эВ при термообработке при температуре  $T = 300^\circ\text{C}$ , а более высокие температуры увеличивают ее до 1,47 эВ.

КПД элементов составляет 22% и может быть увеличен за счет использования термической обработки слоев при температуре выше  $T = 100^\circ\text{C}$ .

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Deepak, S. Srivastava, C. S. Malvi. Light sources selection for solar simulators: A review. International Conference on Recent Advances in Mechanical Engineering 2020 At: Gwalior Madhya Pradesh Volume: 6, pp. 28-46. DOI:10.32438/WPE.060257
2. Luka T, Eiternick S, Turek M. Rapid testing of external quantum efficiency using LED solar simulators. Energy Procedia (2015) 77:113–118. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.018>
3. K.A.M.H. Siddiquee, M.A.K. Pathan, S. Alam, O. Islam, M.R. Qadir. Investigation of CdS and CdTe thin films and influence of CdCl<sub>2</sub> on CdTe/CdS structure. Optik - Int. J. Light Electron Opt. (2013), pp. 1-6. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijleo.2013.01.099>

4. В.И. Максимов, С.Ф. Дубинин, Т.П. Суркова. Тонкие особенности кристаллической структуры кубического полупроводникового монокристалла  $Zn_{0.9}V_{0.1}Se$ . Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия. Физика твердого тела, 2014, том 56, вып. 12, стр. 2311-2318. <http://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/41118>
5. I. M. Dharmadasa, P. A. Bingham, O. K. Echendu et al., "Fabrication of CdS/CdTe-Based Thin Film Solar Cells Using an Electrochemical Technique" *Coatings*, vol. 4, no. 3, pp. 380-415, Jun. 2014. DOI: 10.3390/coatings4030380
6. Luksa Kujovic, Xiaolei Liu, Ali Abbas and others. Achieving 21.4% Efficient CdSeTe/CdTe Solar Cells Using Highly Resistive Intrinsic ZnO Buffer Layers. *Advanced Functional Materials* published by Wiley-VCH GmbH, 2024, 34, 2312528, pp. 1-8. <https://doi.org/10.1002/adfm.202312528>
7. R. Mallick, X. Li, C. Reich, X. Shan, and others "Arsenic-doped CdSeTe solar cells achieve world record 22.3% efficiency," *IEEE J. Photovoltaics* 13(4), pp. 510–515 (2023). <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2023.3282581>
8. H. M. Wikoff , S. B. Reese , and M. O. Reese , " Embodied energy and carbon from the manufacture of cadmium telluride and silicon photovoltaics," *Joule* 6(7), pp. 1710–1725 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.joule.2022.06.006>
9. M. A. Scarpulla, B. McCandless, A. B. Phillips and others. "CdTe-based thin film photovoltaics: Recent advances, current challenges and future prospects" *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 255, 112289 pp. 1-12 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2023.112289>
10. D. A. Lamb, S. J. C. Irvine, M. A. Baker, C. I. Underwood, and S. Mardhani, "Thin film cadmium telluride solar cells on ultra-thin glass in low earth orbit—3 years of performance data on the AISat-1N CubeSat mission," *Prog. Photovoltaics* 29(9), pp. 1000–1007 (2021). <https://doi.org/10.1002/pip.3423>
11. M. K. Jamarkattel, A. B. Phillips, G. K. Liyanage, F. K. Alfadhili, E. Bastola, V. V. Plotnikov, A. D. Compaan, R. J. Ellingson, and M. J. Heben, "Ultra-thin and lightweight CdS/CdTe solar cell fabricated on ceramic substrate for space applications," in *IEEE 49th Photovoltaics Specialists Conference (PVSC)*, 05-10 June 2022. pp. 12-21. DOI: 10.1109/PVSC48317.2022.9938514