

5-7-2021

## INFLUENCE OF MECHANICAL DEFORMATION ON THE PHOTO-VOLTAIC PROPERTIES OF THIN POLYCRYSTALLINE CdTe, CdSe, CdS FILMS MANUFACTURED BY PORTIONAL EVAPORATION IN VACUUM

T I. Rakhmonov

*Fergana Polytechnic Institute, Uzbekistan, radiofizik2012@mail.ru*

R U. Siddikov

*Kokand branch of the Tashkent State Technical University named after Islam Karimov*

A Mirzaaxmedov

*Fergana State University*

Follow this and additional works at: <https://uzjournals.edu.uz/ferpi>



Part of the [Condensed Matter Physics Commons](#), and the [Optics Commons](#)

---

### Recommended Citation

Rakhmonov, T I.; Siddikov, R U.; and Mirzaaxmedov, A (2021) "INFLUENCE OF MECHANICAL DEFORMATION ON THE PHOTO-VOLTAIC PROPERTIES OF THIN POLYCRYSTALLINE CdTe, CdSe, CdS FILMS MANUFACTURED BY PORTIONAL EVAPORATION IN VACUUM," *Scientific-technical journal*. Vol. 4 : Iss. 3 , Article 2.

Available at: <https://uzjournals.edu.uz/ferpi/vol4/iss3/2>

This Article is brought to you for free and open access by 2030 Uzbekistan Research Online. It has been accepted for inclusion in Scientific-technical journal by an authorized editor of 2030 Uzbekistan Research Online. For more information, please contact [sh.erkinov@edu.uz](mailto:sh.erkinov@edu.uz).

## FUNDAMENTAL SCIENCES

**INFLUENCE OF MECHANICAL DEFORMATION ON THE PHOTO-VOLTAIC  
PROPERTIES OF THIN POLYCRYSTALLINE CdTe, CdSe, CdS FILMS  
MANUFACTURED BY PORTIONAL EVAPORATION  
IN VACUUM**

**T.I. Rakhmonov, R.U. Siddikov, A. Mirzaaxmedov**

Fergana Polytechnic Institute, Uzbekistan. [uzferfizika@mail.ru](mailto:uzferfizika@mail.ru)

**ВЛИЯНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА ФОТО-ВОЛЬТАИЧЕСКИЕ  
СВОЙСТВА ТОНКИХ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК CdTe, CdSe, CdS,  
ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ ПОРЦИОННОГО ИСПАРЕНИЯ  
В ВАКУУМЕ**

**Рахмонов Т.И., Сиддиков Р.У., Мирзаахмедов А.**

Ферганский политехнический институт, Узбекистан. [uzferfizika@mail.ru](mailto:uzferfizika@mail.ru)

**ВАКУУМДА ДИСКРЕТ БУҒЛАТИШ УСУЛИ БИЛАН ТАЙЁРЛАНГАН CdTe, CdSe,  
CdS ЮПҚА ПОЛИКРИСТАЛЛ ПЛЕНКАЛАРНИНГ ФОТОВОЛЬТАИК  
ХОССАЛАРИГА МЕХАНИК ДЕФОРМАЦИЯНИНГ ТАЪСИРИ**

**Рахмонов Т.И., Сиддиков Р.У., Мирзаахмедов А.**

Фаргона политехника институти, Ўзбекистон. [uzferfizika@mail.ru](mailto:uzferfizika@mail.ru)

**Abstract.** Some issues of improving the technology of obtaining thin-film ( $d \approx 1.0 \mu\text{m}$ ) elements with anomalous photovoltaic properties from cadmium chalcogenides by thermal evaporation in vacuum in separate portions on transparent dielectric substrates are considered. The experimental results of studying the current-voltage, lux-ampere, lux-voltage and deformation characteristics of CdTe, CdSe, CdS polycrystalline films are analyzed. It is shown that the obtained samples have linear  $I - V$ ,  $L - A$ , temperature ( $T \approx 120 - 320 \text{ K}$ ) and deformation characteristics ( $\epsilon \approx 3 \cdot 10^{-5} - 3 \cdot 10^{-3}$  arb. units). Therefore, they can serve as promising photocells for the producing of film photodetectors sensitive to mechanical deformation in the visible and near-IR regions of the radiation spectrum.

**Keywords:** thin polycrystalline films, photovoltaic properties, method of discrete evaporation in vacuum, substrate temperature, relative deformation, strain-sensitivity coefficient, current-voltage, lux-amp, lux-volt and spectral characteristics.

**Аннотация.** Рассмотрены некоторые вопросы усовершенствования технологии получения тонкопленочных ( $d \approx 1.0 \text{ мкм}$ ) элементов с аномальным фотовольтаическим свойством из халькогенидов кадмия методом термического испарения в вакууме отдельными порциями на прозрачных диэлектрических подложках. Анализированы экспериментальные результаты исследования вольт-амперных, люкс-амперных, люкс-вольтовых и деформационных характеристик поликристаллических пленок CdTe, CdSe, CdS. Показано, что полученные образцы обладают линейными ВАХ, ЛАХ, температурными ( $T \approx 120 - 320 \text{ K}$ ) и деформационными характеристиками ( $\epsilon \approx 3 \cdot 10^{-5} - 3 \cdot 10^{-3}$  отн. ед.). Поэтому они могут служить как перспективными фотоэлементами для изготовления пленочных фотоприем

---

**FUNDAMENTAL SCIENCES**


---

ников, чувствительных к механической деформации в видимой и ближней ИК области спектра излучения.

**Ключевые слова:** тонкие поликристаллические пленки, фотовольтаические свойства, метод дискретного испарения в вакууме, температура подложки, относительная деформация, коэффициент тензочувствительности, вольт-амперные, люкс-амперные, люксвольтовые и спектральные характеристики.

**Аннотация.** Кадмий халькогенидларидан вакуумда алоҳида порциялар (дискрет) шаклида термик буғлатиши усули билан шаффоф диэлектрик тағликда аномал фотовольтаик хусусиятга эга бўлган юққа ( $d \approx 1.0$  мкм) поенкали элементлар олиши технологиясини такомиллаштиришининг айрим масалалари қараб чиқилган. Поликристалл CdTe, CdSe, CdS пленкаларнинг вольт-ампер, люкс-ампер, люкс-вольт ва деформацион характеристикаларини тадқиқ қилишининг экспериментал натижалари таҳлил қилинган. Олинган намуналар  $T \approx 120-320$  K температура ва  $\varepsilon \approx -3 \cdot 10^{-5} - 3 \cdot 10^{-3}$  (нисб.бирлик) нисбий деформация оралиғида чизиқли характеристикаларга эга эканлиги кўрсатилган. Шу сабабли улар кўзга кўринадиган ва яқин инфрақизил нурланиш спектрал соҳаларида механик деформацияга сезгир юққа пленкали фотоприёмниклар тайёрлаш учун келажаги порлоқ фотоэлементлар сифатида хизмат қилиши мумкин.

**Таянч сўзлар:** юққа поликристалл пленкалар, фотовольтаик хоссалар, вакуумда дискрет буғлатиши, тағлик температураси, нисбий деформация, тензосезгирлик коэффициенти, вольт-ампер, люкс-ампер, люкс-вольт ва спектрал характеристикалар.

**1. Введение.** В настоящее время имеются достаточно много работ, посвященных всестороннему изучению эффекта генерации аномально большого фото напряжения (АФН, аномальный фотовольтаический (АФВ) эффект,  $U_{\text{АФН}} \approx 10^2 - 10^4$  В/см) в различных полупроводниковых пленках при собственном и примесном поглощении света (см., например, [1-3]). Как показывают многочисленные эксперименты [4-7], АФВ-эффект наблюдается исключительно в косонапыленных поликристаллических тонких ( $d \approx 1$  мкм) пленках, выращенных на диэлектрических подложках по специальной технологии в вакууме (с давлением остаточных паров  $P \approx 10^{-1} - 10^{-2}$  Па) при умеренных температурах ( $T \approx 250-350$  К). Этот эффект практически не обнаруживается в относительно толстых полупроводниковых проводящих и аморфных пленках ( $d \geq l_D$ , где  $l_D$  – Дебаевская длина экранирования) или монокристаллах. До сегодняшнего дня отсутствует единого мнения относительно физической природы образования и механизма данного эффекта [8-13]. Несомненно, что АФВ-эффект связан с наличием большого количества микро фоточувствительных элементов, соответствующих зернистой кристаллической структуре тонких пленок. Тем не менее, пока ещё окончательно не ясны точные механизмы возникновения фото-ЭДС в каждом из микро фотоэлементов, а также способы или методы их суммирования. Во всяком случае, как утверждают некоторые авторы (напр. [8,9]), физические механизмы, приводящие к возникновению АФВ эффекта в полупроводниковых пленках, якобы с периодической р-п-р... структурой (что вызывает справедливые возражения многих специалистов), по-видимому, связаны с неполной компенсацией фотонапряжений в р-п - и п-р-переходах, что обусловлена специальной технологией косоного напыления пленок на диэлектрическую подложку. Неполная компенсация фотонапряжения в р-п-р ячейке может возникать, например, вследствие асимметричного освещения, либо различия в темновых токах насыщения р-п- и п-р- переходов. Анализ литературных данных показывает, что фотовольтаические пленки имеют сложное внутреннее структурное строение, заведомо, они состоят из различных асимметричных микропотенциальных барьеров

**FUNDAMENTAL SCIENCES**

разной природы [10-13]. Следовательно, природу и механизма АФВ-эффекта целесообразно связать с технологической природой образования и фотовольтаическим свойством микропотенциальных барьеров на границах кристаллических зерен, ответственных за генерацию АФН.

Целью настоящей работы является получение новых информации о механизме генерации АФН путем комплексного исследования влияния технологических условий получения поликристаллических фотовольтаических пленок на их электрофизические, фотоэлектрические, спектральные и тензоэлектрические свойства. Ниже будет рассмотрено принципиальные вопросы усовершенствования технологии получения тонких пленок с АФВ свойством из *CdTe*, *CdSe*, *CdS*. Приводятся результаты экспериментального исследования вольт-амперных, люкс-амперных, люкс-вольтовых и деформационных характеристик изготовленных пленок. Для выявления типа барьеров ответственных за АФВ эффект, здесь предлагается новый метод, в котором фоточувствительные пленки подвергаются к упругим механическим деформациям при освещении. При этом анализ экспериментальных результатов показал, что внутренние микро-гетеропереходы на границах зерен с разными фазовыми составами обуславливают относительно высокой тензочувствительности изготовленных фотовольтаических пленок.

**2. Технология. 2.1. Методика получения пленочных фотовольтаических структур.** Анализ известных технологических методов получения пленочных фотовольтаических элементов показал [1-7,13,14], что авторами получены поликристаллические пленки толщиной  $d \approx 1$  мкм, в основном, методом открытого вакуумного ( $P \approx 10^{-2}$  Па) напыления при наклонном падении молекулярного пучка на предварительно подогретые ( $T_n \approx 350$  К) диэлектрические подложки со скоростью конденсации  $W \approx 8$  А/с. При этом некоторые особенности испарения и конденсации материалов недостаточно учитываются. В результате “оптимальные” условия получения пленочных элементов, установленные различными авторами, значительно отличаются друг от друга. На основе анализа литературных данных по способу получения фотовольтаических пленок и с учетом особенностей процессов испарения и конденсации мы усовершенствовали известные методов [1,13,14] и разработали способа вакуумного косонапыления испаряемого исходного материала определенными порциями, т.е. метод дискретного испарения в вакууме.

Для получения пленок использованы мелкодисперсные порошки *CdTe*, *CdSe*, *CdS* с грифом “Особо чистый”, а также механические смеси отдельных компонентов указанных выше двойных соединений. Естественно, что на структуру и свойства пленочных фотовольтаических элементов значительное влияние оказывает состав паровой фазы, который в свою очередь зависит от состава исходной навески, особенностей и условий ее испарения. Поэтому, учитывая эти технологические факторы, нами получены пленочные элементы из следующих компонент материалов: 1. Навесок *CdTe*, *CdSe* и *CdS* механических смесей стехиометрического состава. 2. Определенных порций испаряемого материала. 3. Механических смесей порошков *CdTe* и *CdS* с избытком *Cd* до 20 масс. %. 4. Механических смесей порошков *CdSe* с избытком *Cd* до 15 масс. %.

**2.2. Влияние условия испарения.** Для изучения влияния особенностей и условий испарения навесок *CdTe*, *CdSe*, *CdS* и избытка кадмия на фотовольтаические свойства пленочных элементов были получены слои из различных порций испаряемого материала. Из навесок теллурида кадмия и избытка кадмия испарялось контролируемое количество материала навески. В полученных пленках измерялось значение фотонапряжения. Исследования показывали, что с увеличением первой порции от 5 % до 30 % фотонапряжение, генерируемое при нормальных условиях пленочными элементами при освещении растут до 2500 В на 1 см длины пленки, полученной из теллурида кадмия и 1200 В-из сульфида кадмия, а затем (выше 30 %) медленно падают. При увеличении количество не испаренной части (при увеличении

## FUNDAMENTAL SCIENCES

третьей порции) от 0 до 10 % максимальное значение АФН растет, а затем (выше 10 %) начинает падать. Наибольшее значение АФН получены при следующих условиях: I порция ~30%, II порция ~60%, III порция ~10%. Наименьшее фотонапряжение генерировали пленочные элементы, полученные из всего исходного материала. Самое наибольшее фотонапряжение ~ 5 кВ генерировали пленки из CdSe, полученные из порций I (25% исходного материала). Определены наименьшие оптимальные массы исходного материала. Они составляли: CdTe-40 мг, CdSe и CdS-50 мг. Такое влияние порции исходного материала на величину генерируемых фотонапряжений, связано с тем, что в процессе испарения молекулярный состав навески изменяется, а это вызывает изменение фазового состава и структуры получаемых слоев.

**2.3. Влияние состава исходного материала.** Для исследования влияния состава исходного материала на электрофизические и фотоэлектрические свойства пленочных элементов получены фотовольтаические слои из смесей с различными содержаниями отдельных компонентов. Результаты показали, что значение АФН почти линейно зависит от относительной массы избытка компонентов над стехиометрией до ~ 10 % для теллурида кадмия и ~ 5 % для селенида кадмия. При дальнейшем увеличении избытка компонентов, значение генерируемого фотонапряжения уменьшается. Изменение состава испаряемого материала и температуры его испарения существенно влияет на условия конденсации паровой фазы и вызывает изменение состава и структуры пленочных элементов.

Из полученных результатов можно сделать вывод, что при отклонении от стехиометрии на 10 масс.% для теллурида и 5 масс % для селенида кадмия, по-видимому, создаются благоприятные условия для формирования в пленках фотовольтаически активных элементов в виде микро-гетеропереходов типа *Te-CdTe*, *Se-CdSe*, *S-CdS*, *CdTe-CdO* и т.п. Эти структуры могут образоваться на границах кристаллических зерен или различных гетерофаз.

**2.4. Влияние температуры и материала подложки.** Известно [13-15], что свойства пленочных элементов, полученных на предварительно нагретых подложках, зависят от температуры подложки. Для исследования влияния температуры подложки на свойства пленочных элементов получены пленки из CdTe, CdSe и CdS, а также из смесей их компонентов на стеклянных подложках, охлаждаемых предварительно, не нагретых и нагретых до 303-373 К. Результаты измерений фотонапряжения при комнатной температуре показали, что АФН, генерируемое пленочными элементами, полученные на предварительно не нагретых или охлаждаемых подложках, по величине были одного порядка, а с увеличением температуры подложки значения фотонапряжения уменьшается. По полярности фотонапряжения все пленочные элементы были одного типа. По-видимому, при конденсации парового потока на охлаждаемые и предварительно не нагретые подложки создаются более благоприятные условия для формирования мелкодисперсной пленки с большим числом микро-гетеропереходов. Очевидно, что при повышении температуры подложки изменяется состав и структура (часть материала реиспаряется) конденсата, увеличиваются размеры кристаллитов, а число микро-гетеропереходов уменьшается. Установлено, что наибольшее фотонапряжение генерируется пленочными элементами CdTe, CdSe, полученными на предварительно не нагретых или охлаждаемых подложках. Пленки, выращенные на кварцевых, слюдяных диэлектрических подложках, генерировали АФН не больше  $10^3$  В/см при комнатной температуре.

**3. Методика исследования деформации пленок.** С целью выявления физической природы аномальных фотоэлектрических эффектов в поликристаллических слоях CdTe, CdSe и CdS мы изучали влияния внешних механических напряжений на их электрические и фотоэлектрические свойства. Исследуемые пленочные элементы получали на подложке из органического стекла по методу открытого вакуумного напыления определенных порций испаряемого материала. При этом учитывалось влияние условий получения и геометрических размеров пленок на возможность образования различных структурных дефектов.

---

**FUNDAMENTAL SCIENCES**


---

Для изучения влияния механических напряжений на свойства фотовольтаических элементов было собрано обычное деформационное устройство из стальной консольной балки, с помощью которого наклеенные на него пленочные образцы ступенчато или плавно подвергались деформации одностороннего растяжения или сжатия путем изгиба подложки. Величина относительной деформации  $\varepsilon$  вычислялась по известному выражению:

$$\varepsilon = 3ab\Delta x / \ell^3 ,$$

где  $a$  - расстояние от нейтральной оси консольной балки до пленки,  $b$  - расстояние от точки приложения силы до середины пленочного образца,  $\Delta x$  - прогиб свободного конца пластинки в точке приложения силы,  $\ell$  - длина пластинки между опорной точкой и точкой приложения силы. Значения деформации варьировались в интервале от  $\varepsilon = +2 \cdot 10^{-3}$  до  $\varepsilon = -2 \cdot 10^{-3}$  отн. ед., что позволило многократно деформировать одну и ту же пленку без её разрушения. Ниже рассмотрим влияния механической деформации на электрофизические, фотоэлектрические и спектральные свойства изготовленных пленок  $CdTe$ ,  $CdSe$  и  $CdS$ .

**4. Результаты и обсуждения экспериментов. 4.1. Вольт-амперные характеристики при деформации.** Известно [1-3, 13, 14], что вольт-амперные характеристики фотовольтаических пленок из халькогенидов кадмия линейны в темноте и при значениях освещенности в пределах  $L=0 \div 3,5 \cdot 10^5$  лк до напряженности электрического поля  $\sim 10^3$  В/см и в интервале температур  $T=150 \div 300^0$  К. Это можно объяснить тем, что количество микро-гетеропереходов достигает  $N \approx 10^5$  на 1 см и при электрических полях  $\sim 10^3$  В/см на каждой из них падает очень малое напряжение  $U_i \approx 0,01$  В, при котором они обладают, естественно, линейной ВАХ.

Изучались электрические свойства пленочных элементов  $CdTe$ ,  $CdSe$  с толщиной  $d \approx 1$  мкм и площадью  $5 \times 20$  мм<sup>2</sup>, полученных по оптимальным технологическим условиям, снимались их ВАХ в темноте и при освещенности  $5 \cdot 10^4$  лк в интервале значений напряженности электрического поля от -3 кВ/см до +3 кВ/см. Оказалось, что ВАХ этих пленок, также линейны в темноте и при освещении, однако их темновое сопротивление на один порядок превышает сопротивления аналогичных пленок, полученные по известным методам [1, 2, 13, 14], и составляет  $R \approx 10^{12} \div 10^{13}$  Ом. Это, по-видимому, связано с тем, что в фотовольтаических пленках, изготовленных методом порционного испарения формируется большее число активных микро-фотоэлементов (микро-гетеропереходов) и уменьшается число неактивных (шунтирующих слоев), и заведомо осуществляется сильная компенсация донорных и акцепторных примесей в кристаллических зернах.

На рис.1,а представлена ВАХ пленочных элементов  $CdTe$ ,  $CdS$  в темноте при отсутствии и наложении внешней упругой механической деформации. Из характеристик видно, что при деформации линейный характер ВАХ не меняется. При одностороннем сжатии проводимость пленки заметно растет, а при растяжении уменьшается. Это обусловлено изменением параметров потенциальных барьеров на границах гетерофаз под действием деформации. Очевидно, что при сжатии высота и ширина барьера уменьшается, а при растяжении - растёт. Коэффициент тензочувствительности  $K$  пленочных образцов при постоянном напряжении  $U = \text{const}$  вычисляли по формуле

$$K = \Delta I / I_0 \varepsilon ,$$

## FUNDAMENTAL SCIENCES

где  $\Delta I = I - I_0$  - абсолютное изменение силы тока,  $I$  и  $I_0$  - ток через образец при наличии и отсутствии деформации,  $\varepsilon$  - относительная деформация. Оценки показали, что величина  $K$  достигает от 60 до 100 отн. единиц для исследованных пленок.

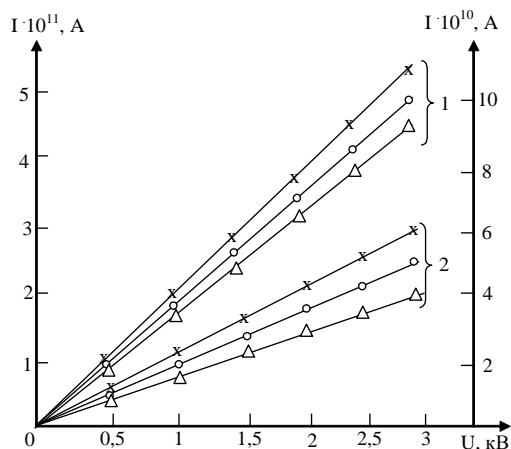


Рис.1а. ВАХ CdTe (1) и CdS (2, левая шкала) при деформациях сжатия:  $\varepsilon=0$  (о),  $2,0 \cdot 10^{-3}$  ( $\Delta$ -растяжение),  $-2,0 \cdot 10^{-3}$  (х-сжатие) отн.ед.

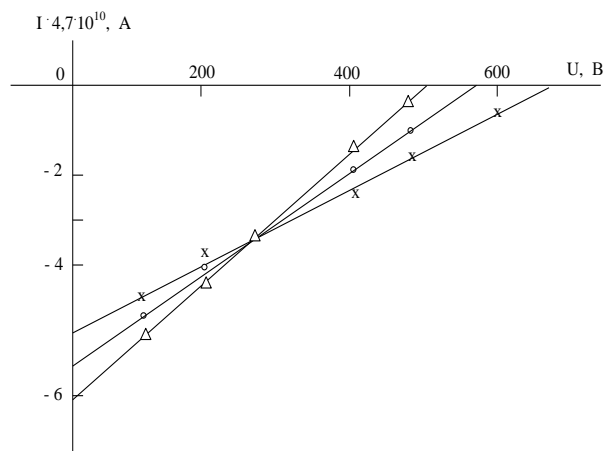


Рис.1б. ВАХ CdTe при освещении  $L=2 \cdot 10^4$  лк: о – при отсутствии деформации,  $\Delta$ -при  $\varepsilon = -2,0 \cdot 10^{-3}$  отн.ед. (сжатие), х – при  $\varepsilon = 2,0 \cdot 10^{-3}$  отн. ед. (растяжение).

Снимались световые ВАХ под действием механической деформации. При освещении светом в спектральной области собственного поглощения пленочных элементов меняется наклон ВАХ, т.е. пленки обладают заметной фотопроводимостью. На рис.1 б приведена ВАХ деформированных пленочных элементов из теллурида кадмия при освещении. Из полученных характеристик видно, что при сжатии величина фототока растет, а при растяжении - уменьшается. При этом интересно заметить, что при некотором критическом значении  $U_{кр}$  сопротивление фотовольтаической пленки не зависит от деформации, что трудно объяснить. Из рис. 1 б определяем значение  $U_{кр}=280$  В для пленок CdTe.

Типичная деформационная характеристика  $f(\varepsilon) = \Delta U_{АФН} / U_{АФН}$  фотонапряжения пленок CdTe, CdS и CdSe приведена на рис. 2, из которого видно, что при сжатии величина  $U_{АФН}$  уменьшается, а при растяжении - растет линейно и симметрично по  $\varepsilon$ . Из рисунка также видно, что тензочувствительность по  $U_{АФН}$  наибольшая у пленок CdS:  $K \approx 10^2$ . Изменения фототока и фотонапряжения при деформации, очевидно, связаны с изменением параметров микропотенциальных барьеров внутрикристаллических структур пленок, созданных прежде всего, асимметричными микрогетеропереходами на интерфейсах границ раздела кристаллических зерен [2,10].

Известно, что при испарении CdTe, CdS и CdSe молекулы этих материалов частично разлагаются за счет термической диссоциации. В результате этого состав полученных пленок может значительно отличаться от степени стехиометрии исходного материала. Нарушение стехиометрии влияет на фазовый состав, структурно-чувствительные свойства,

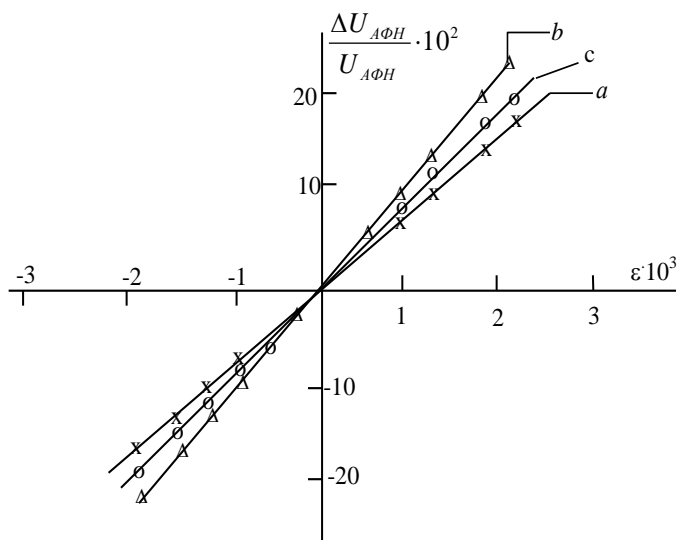


Рис.2. Деформационная характеристика CdTe (a), CdS (b) и CdSe (c) по  $U_{АФН}$  при комнатной температуре при значении освещенности света лампы накаливания  $L=2 \cdot 10^4$  лк.

## FUNDAMENTAL SCIENCES

природы и концентрацию различных дефектов и, следовательно, и на тип проводимости пленок, максимальные значения  $V_{AFH}$  и его полярности  $M_y$  изучали влияние состава навески на тензoeлектрические свойства фотовольтаических пленок  $CdTe$ ,  $CdS$  и  $CdSe$ . Результаты исследования показали, что при нарушении стехиометрии смеси в сторону избытка кадмия до  $\Delta Cd = 10$  масс.% значение коэффициента тензочувствительности  $K$  пленок из  $CdTe$  и  $CdS$  возрастает, а с увеличением избытка кадмия выше 10 масс. % - медленно уменьшается. Оказалось, что такой характер зависимости  $K$  у пленок  $CdSe$  наступает при значении  $\Delta Cd = 5$  вес %. По-видимому, у  $CdTe$ ,  $CdS$  при избытке  $Cd$  до 10 масс. % и у  $CdSe$  при избытке  $Cd$  до 5 масс. % создаются благоприятные условия для образования в пленке фото-тензо активных дефектов, а при увеличении  $\Delta Cd$  больше указанных значений могут образоваться в фотовольтаических пленках слои из шунтирующих проводящих фаз.

**4.2. Люкс-вольтовые и люкс-амперные характеристики.** Важнейшей характеристикой АФВ эффекта является зависимость фотонапряжения  $U_{AFH}$  от интенсивности возбуждающего света. Изучение ЛВХ при деформации позволяет получить необходимую информацию о природе и механизма протекания этого эффекта. С этой целью были исследованы влияния деформации на ЛВХ фотовольтаических пленок из  $CdTe$  и  $CdS$ . Полученные характеристики приведены на рис.3а. Из рисунка видно, что ЛВХ теллурида и сульфида кадмия качественно совпадают и состоят из двух характерных участков в пределах изменения освещенности возбуждающего света от 0 до  $5 \cdot 10^4$  лк. Сначала в интервале  $L=(0 \div 10^4)$  лк наблюдается быстрый рост фотонапряжения  $U_{AFH}$ , а дальнейшее увеличение интенсивности света до значения  $5 \cdot 10^4$  лк приводит к увеличению фотонапряжения всего лишь на 20 % и в дальнейшем процесс генерации  $U_{AFH}$  пленок выходит к насыщению. Из рисунка также видно, что ЛВХ  $CdTe$  и  $CdS$  при деформации качественно не меняется, а только смещается по ординате: при сжатии вниз, а при растяжении – вверх, что, безусловно связаны соответствующими изменениями высоты микро-потенциальных барьеров.

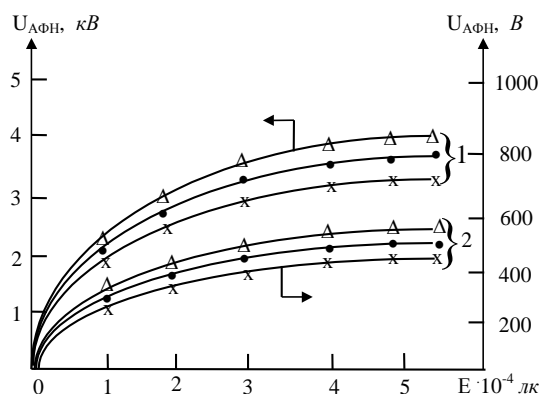


Рис.3,а. Зависимость фотонапряжения от интенсивности света для  $CdTe$  (1) и  $CdS$  (2) при значении относительной деформации:  $\varepsilon=0$  (●),  $2 \cdot 10^{-3}$  отн.ед. ( $\Delta$ -растяжение),  $-2 \cdot 10^{-3}$  отн.ед. (x-сжатие).

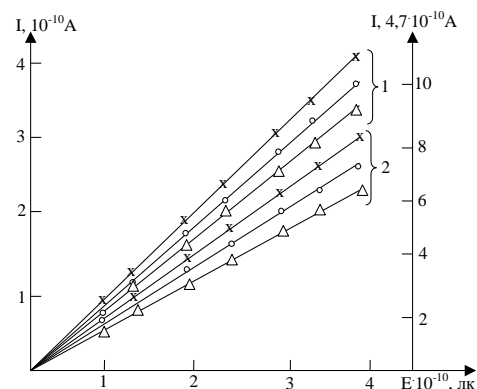


Рис.3,б. Люкс-амперная характеристика  $CdTe$  (1) и  $CdS$  (2) при:  $\varepsilon=0$  (○),  $\varepsilon=-2 \cdot 10^{-3}$  (x-сжатие) и  $\varepsilon=2 \cdot 10^{-3}$  отн.ед. ( $\Delta$ -растяжение).

Были изучены также и люкс-амперные характеристики пленок  $CdTe$  и  $CdS$  при комнатной температуре в интервале значения освещенности от 0 до  $5 \cdot 10^4$  лк при деформации и без деформации. Соответствующие ЛАХ приведены на рис.3б. Видно, что в интервале значения освещенности от 0 до  $5 \cdot 10^4$  лк характеристика линейно как при наличии, так и при отсутствии деформации. Под действием деформации качественный вид ЛАХ не меняется, а только смещается по ординате вниз при растяжении, и вверх - при сжатии, т.е. фототок при сжатии растет, а при растяжении - уменьшается. Эти изменения мы также связываем с изменением параметров асимметричных микро-потенциальных барьеров [2,3,7,10,13] при де-



## FUNDAMENTAL SCIENCES

формации фотовольтаических пленок халькогенидов кадмия, приводящее к существенной фото- и тензочувствительности этих пленок.

**4.3. Спектральные характеристики.** Известно [1-4, 13,14], что фотонапряжение  $U_{АФН}$  и соответствующий ток короткого замыкания в обычных фотовольтаических пленках CdTe стехиометрического состава или с легированием, существенно зависит от длины волны падающего света. Исследования спектров  $U_{АФН}(\lambda)$  пленок CdTe:Ag в области 563-1240 нм показали, что наблюдается плавный спектр с максимумом вблизи края собственного поглощения и в зависимости от длины волны возбуждающего света может меняться не только значение, но и полярность фотонапряжения [4, 13]. Влияние механических напряжений на спектральные характеристики фотовольтаических пленок из халькогенидов кадмия мало изучены.

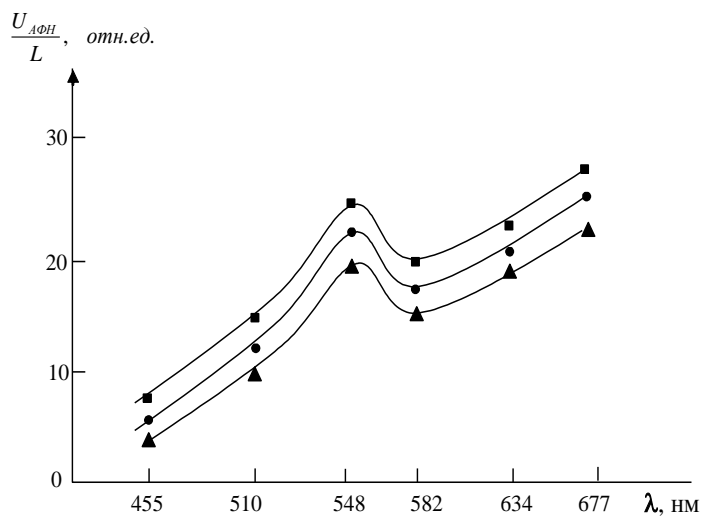


Рис.4. Влияние механической деформации на спектральную характеристику CdTe.  $\epsilon=0$ ;  $\epsilon= 2,0 \cdot 10^{-3}$  отн.ед. (растяжение) и  $\epsilon= -2,0 \cdot 10^{-3}$  отн.ед. (сжатие) для линий с точками ●, ■ и ▲, соответственно.

Снимались спектральные характеристики  $U_{АФН}(\lambda)$  для пленок CdTe, CdSe, полученных методом порционного испарения при наличии и без механической деформации. Типичные кривые  $U_{АФН}(\lambda)$  для этих пленок имеют качественно одинаковый вид, поэтому на рис.4 показаны фрагменты спектров в коротковолновой области  $\hbar\omega > E_g$  только для пленки CdTe. Из рисунка видно, что наблюдается характерная спектральная линия M фотонапряжения, расположенная примерно в интервале (510-580) нм с максимумом на длине волны  $\lambda_M = 548$  нм ( $\hbar\omega_M = 2.26$  эВ), что ранее не было обнаружено в пленках CdTe и CdTe:Ag, полученных другими авторами с помощью известных технологий. По-видимому, появление линии M на коротковолновой крыльях спектра  $U_{АФН}(\lambda)$  связано образованием фотовольтаических пленок с сильно развитыми асимметричными микро-потенциальными барьерами несколько иной структурой по методу порционного испарения в вакууме. Считаем, что M-линия заведомо обусловлено генерацией фотонапряжения микро-гетеропереходной структурой типа CdTe-CdO-CdTe. Заметим, что ширина запрещенных зон CdTe и CdO при комнатной температуре равны 1.46 эВ и 2.37 эВ, а последнее сравнимо со значением  $\hbar\omega_M = 2.26$  эВ.

Под действием механического напряжения качественная форма, частота максимума  $\lambda_M$  и полуширина кривой спектрального распределения фотонапряжения для фотовольтаических пленок CdTe, CdSe существенно не меняется, только смещается вниз при сжатии и вверх при растяжении (рис.4). Полярность фотонапряжения в исследуемой коротковолновой области спектра не меняется ни на одном образце, как при наличии, так и без деформации. При этом установлено, что спектральный максимум  $\lambda_M$  фотонапряжения образцов, полученных напылением теллурида кадмия с избытком кадмия, с ростом  $\Delta_{Cd} \leq 10\%$  смещается в более коротковолновую сторону спектра, а при  $\Delta_{Cd} > 10\%$  с ростом концентрации Cd уширяется и исчезает так же, как и АФВ эффект.

**4.4. Температурные зависимости фотонапряжения и фототока при деформации.** При изучении фотовольтаического эффекта немаловажными характеристиками являются зависимости фототока и фотонапряжения от температуры. В деформированном и недеформированном пленках CdTe, CdSe снимались зависимости фотонапряжения и фототока

## FUNDAMENTAL SCIENCES

короткого замыкания от температуры. На рис.5,а приведена температурная зависимость фотонапряжения  $U_{\Delta FH}$  при наличии и отсутствии деформации. Из рисунка видно, что с уменьшением температуры генерируемое фотонапряжение для пленок  $CdTe$  без

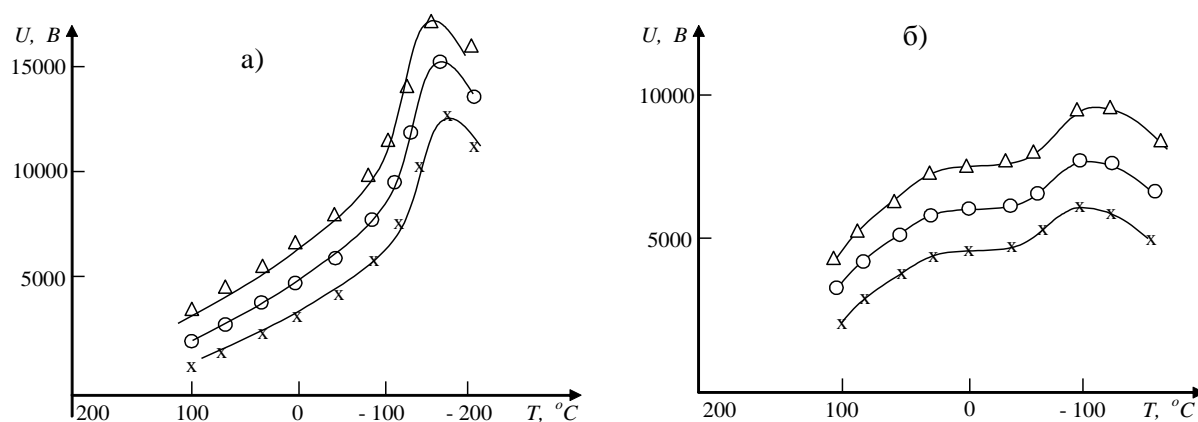


Рис.5. Температурные зависимости фотонапряжения пленок  $CdTe$  (а) и  $CdSe$  (б) при механической деформации:  $\varepsilon=0$  (о),  $2,0 \cdot 10^{-3}$  отн.ед. ( $\Delta$ -растяжение), и  $-2,0 \cdot 10^{-3}$  отн.ед. (х-сжатие).  $L=2 \cdot 10^4$  лк.

деформации возрастает сначала почти линейно от значения  $2 \cdot 10^3$  В при  $T=100$  °С до  $7 \cdot 10^3$  В при  $T=-50$  °С, далее резко увеличивается до максимума ( $\sim 15$  кВ) при  $T=-160$  °С, а затем уменьшается (а). Для  $CdSe$  (рис.5, б) наблюдается сначала плавный сублинейный рост от значения  $3 \cdot 10^3$  В при  $T=100$  °С до  $6 \cdot 10^3$  В при  $T=40$  °С, происходит насыщение до  $T=-40$  °С, далее повторный суперлинейный рост до значения  $7.5 \cdot 10^3$  В при  $T=-100$  °С, а затем плавное падение. Такие особенности температурной зависимости  $U_{\Delta FH}(T)$  говорит о том, что на генерации фотонапряжения существенно влияют различные механизмы и области рассеяния. Так, для пленки  $CdTe$  при  $T \geq -50$  °С превалирует рассеяния носителей в квазинейтральной области кристаллических зерен, а при  $T < -50$  °С доминируют влияния приповерхностных областей объемных зарядов и перезарядки поверхностных состояний [2, 13]. Заметим, что у пленок  $CdSe$  различаются три характерные температурные области:  $T \geq 40$  °С,  $T=(40 \div -40)$  °С,  $T < -40$  °С.

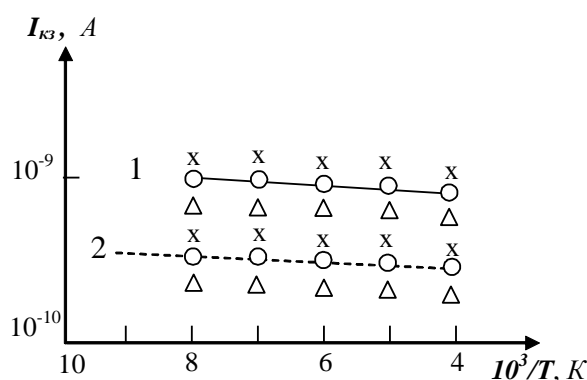


Рис.6. Температурные зависимости фототока короткого замыкания в полулогарифмическом масштабе: для теллурида кадмия (1) и сульфида кадмия (2) при  $\varepsilon=0$  (о), растяжении ( $\Delta$ ), сжатии (х).  $L=2 \cdot 10^4$  лк.

При деформации вид температурной характеристики  $U_{\Delta FH}(T)$  обеих пленок качественно почти не меняется, а лишь только смещается по ординате вверх при растяжении, а при сжатии – вниз, причем симметрично относительно  $\varepsilon$ . Заметим, фотовольтаические пленки становятся более чувствительным к механической деформации с уменьшением температуры. Это объясняется увеличением сопротивления пленок при низких температурах за счет уменьшения эффективных концентраций и подвижностей носителей заряда, обусловленных изменением

высоты и ширины микро-потенциальных барьеров, а также зарядовых состояний дефектов.

На рис.6 приведена зависимость фототока короткого замыкания  $I_{кз}$  от температуры при наличии и отсутствии деформации для фотовольтаических пленок  $CdTe$ ,  $CdS$ . Из полученных характеристик  $I_{кз}(T)$  видно, что сила фототока, генерируемой аномальной фото-ЭДС

**FUNDAMENTAL SCIENCES**

этих пленок при коротком замыкании очень слабо зависит от температуры в интервале ~120-300 К, что означает, механизм токопрохождения в исследуемых образцах практически носит туннельный характер [1, 13,14]. Под действием механической деформации характер зависимости фототока от температуры не меняется. При сжатии пленки фототок растет, а при растяжении - уменьшается. По-видимому, это также связано с изменением параметров микро-потенциальных барьеров на границах кристаллических зерен при деформации.

**5. Заключение.** На основе представленных выше результатов исследования фото-тензoeлектрических свойств фотовольтаических пленок *CdTe*, *CdSe* и *CdS*, изготовленных методом порционного испарения в вакууме можно сделать следующие выводы:

1. Фотовольтаические свойства тонких ( $d \leq 1$  мкм) поликристаллических пленок *CdTe*, *CdS* и *CdSe*, выращенных на органической стеклянной подложке с температурой  $T_n = 250-350$  К в вакууме с давлением остаточных газов  $P \approx 10^{-1}-10^{-2}$  Па путем порционного испарения из исходного материала в 40-50 мг обнаруживают ряд особенностей, отличающихся от аналогичных пленок, исследованных другими авторами.

2. Полученные предложенным в данной работе способом фотовольтаические пленки *CdTe*, *CdS* и *CdSe* обладают линейными вольт-амперными, люкс-амперными, деформационными характеристиками, что позволяет изготовить на их основе новых пленочных фото-тензочувствительных приборов.

3. Анализ спектральных характеристик и температурных зависимостей фотонапряжения и фототока короткого замыкания при деформации показали, что ответственным за высоковольтный эффект в исследованных пленках *CdTe*, *CdSe* и *CdS* могут служить встроенные цепочки микро-фотоэлементов, потенциальные барьеры в которых заведомо имеют природы микро-гетеропереходной структуры типа *CdTe-CdO-CdTe*.

4. Среди тонких поликристаллических пленок *CdTe*, *CdSe* и *CdS*, с АФВ свойством наиболее перспективными являются пленки *CdTe* для изготовления фотоприемников, чувствительной к деформации в ближней инфракрасной области спектра излучения.

**References:**

1. Adirovich E.I., Mastov E.M., Mirzamakhmudov T. et al. In the Coll.: Photoelectric phenomena in semiconductors and optoelectronics. – Fan, Tashkent, 1972, pp. 143-229 (in Russian).
2. Vaitkus Yu.Yu., Yuldashev N.Kh., Otazhonov S.M. On the mechanism of the formation of high-voltage photo EMF in thin co-deposited CdTe: Ag films with intrinsic and impurity absorption // FIP, 2005. - Vol.3. No.3. - pp. 219-227 (in Russian).
3. Юлдашев Н. Х., Ахмадалиев Б. Ж. 02 ФКС Сильная интерференционная люминесценция смешанных мод в окрестности критического значения затухания экситона // Оптика и спектроскопия. – 2021. – Т. 129. – №. 9. (in Russian).
4. Vaitkus Yu.Yu., Senulis FD, Otajonov SM, Ergashev Zh. Anomalous photoelectric effect in CdTe films upon photoexcitation from the impurity absorption region // Lithuanian physical collection. 1986. - No. 5 (26). - P.602-606 (in Russian).
5. Юлдашев, Н., & Маматов, О. (2021). Исследование фотовольтаических свойств поликристаллических пленок CdTe, CdTe:In с глубокими уровнями. InterConf, (41). вилучено із <https://ojs.ukrlogos.in.ua/index.php/interconf/article/view/8814>
6. Karimov M.A., Yuldashev N.Kh. The role of thermal field migration of In<sup>+</sup> ions and cadmium vacancies in the photovoltaic properties of polycrystalline CdTe: In: Cl films // Uzbek Physical Journal - Tashkent. 2006. - No. 4 (6). - P. 63-86 (in Russian).

---

**FUNDAMENTAL SCIENCES**


---

7. Mamatov Olmosbek Maxammatdovich, Yuldashev Nosirjon Khaydarovich Feature of technology for obtaining by thermovacuum evaporation method of film n-CdS / p-CdTe heterostructures with photovoltaic and photoresistive properties // European science review. 2021. №1-2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/feature-of-technology-for-obtaining-by-thermovacuum-evaporation-method-of-film-n-cds-p-cdte-heterostructures-with-photovoltaic-and> (дата обращения: 01.11.2021).
8. Akhmadaliev B.Zh., Mamatov O.M., Karimov M.A., Polvonov B.Z., Yuldashev N.Kh. RUz patent No. IAP 05384 dated 03/10/2017 // Method of obtaining abnormally photovoltaic films.
9. Akhmadaliev B. J., Mamatov O. M., Polvonov B. Z., Yuldashev N. Kh. Correlation between the Low-Temperature Photoluminescence Spectra and Photovoltaic Properties of Thin Polycrystalline CdTe Films // Journal of Applied Mathematics and Physics, -USA, 2016, - Vol.4, No.2. -P.391-397.
10. Aronov D.A., Yuabov Yu.M. On the theory of the APN effect in semiconductor films with a periodic p-n-p-... structure // FTP - 1984, -Vol.18, No.7. - P. 1318-1321 (in Russian).
11. Agarev V.N., Stepanova N.A. On the theory of the effect of anomalous photovoltage in multilayer structures with p-n-junctions //FTP, 2000.-№4 (34). -P. 452-459 (in Russian).
12. Guly E.G., Zhadko I.P., Romanov V.A. Photovoltaic properties of an asymmetric periodic p-p-p-structure // FTP, 1982, - Vol.16, No.2, - P. 331-336 (in Russian).
13. Doshanov K.M. The mechanism of the APN effect in polycrystalline semiconductors // FTP, 1990.- №1 (24) - P. 251- 259 (in Russian).
14. Gulyamov G., Boydedoev S.R., Dadamirzaev M.G., Gulyamov A.G. Abnormally high photovoltage in semiconductor films due to reactive photovoltage // Alternative energy and ecology. 2006, No.2. -P. 94-98 (in Russian).
15. Ergashev Zh., Yuldashev N.Kh. Photoelectret Effect in Semiconductor Film Structures. Monograph.- "Technics", Fergana-2017, 180 p. (in Russian).
16. Atakulov B.A., Abdullaev E.A., Afuzov A.Ya., Bilyalov E.I., Rakhimov A.U. Deformation effects in semiconductors. - Fan, Tashkent, 1978. 371 s. (in Russian).
17. Nurmatov, O.; Rahmonov, T.; Sulaymonov, Kh.; and Yuldashev, N. (2020) "Phototenzoelectric properties of polycrystalline films of chalcogenides of cadmium and zinc, produced by portional evaporation in vacuum," Euroasian Journal of Semiconductors Science and Engineering: Vol. 2 : Iss. 5 , Article 10. <https://uzjournals.edu.uz/semiconductors/vol2/iss5/10>
18. Sulaymonov Kh.M., Yuldashev N.Kh.. Effect of Internal Stresses on the Static Strain Characteristics of p-(Bi0.3Sb0.7)2Te3 Composite Films // Journal of surface investigation: X-ray, synchrotron and neutron techniques, - 2016. -Vol.10, No. 4, -p.52-56.
19. Mamadieva, D T.; Nurmatov, O R.; Raxmonov, T I.; Sulaymonov, Kh M.; and Yuldashev, N Kh (2019) "The effect of mechanical deformation on the photovoltaic properties of semiconductor polycrystalline film structures CdTe: Sn," Scientific-technical journal: Vol. 2 : Iss. 3 , Article 1
20. Axmadjonov, M F.; Mamatov, O M.; Nurmatov, O R.; Rahmonov, T I.; and Yuldashev, N Kh (2019) "The spectral characteristics of CdTe:Ag photoelectrical films in the areas own and impurite absorption," Scientific-technical journal: Vol. 2 : Iss. 2 , Article 4. Available at: <https://uzjournals.edu.uz/ferpi/vol2/iss2/4>
21. Фото- и тензoeлектрические свойства тонких поликристаллических пленок CdTe, CdSe, ZnTe на прозрачных диэлектрических подложках, полученных методом дискретного испарения в вакууме / Т. И. Рахмонов, Х. Э. Мухаммадякубов, Х. М. Сулаймонов, Н. Х.

**FUNDAMENTAL SCIENCES**

- Юлдашев // General question of world science : Collection of scientific papers on materials VII International Scientific Conference, Brussel, 30 марта 2019 года. – Brussel: "Наука России", 2019. – С. 42-47. – DOI 10.18411/gq-30-03-2019-36.
22. Сулаймонов, Х. М., Юлдашев, Х. Т., Нурматов, О. Р., Рахмонов, Т. И., & Мухаммадюкубов, Х. Э. (2019). Фотоэлектрические свойства полупроводниковых поликристаллических пленочных структур CdTe: Sn при статических механических деформациях. Известия Ошского технологического университета, (3), 180-186.
23. Abdukadirov A. G., Rasulov A. M., Yuldashev N. K. Exciton-polariton luminescence in conditions of ion channeling //Scientific-technical journal. – 2021. – Т. 3. – №. 3. – С. 6-13. (in Russian).
24. Ahmadaliyev B. J., Yuldashev N. K., Yulchiyev I. I. Specific features of the dispersion of mixed exciton-polariton modes in uniaxial crystals of the cds type //Scientific-technical journal. – 2020. – Т. 24. – №. 5. – С. 61-65. (in Russian).
25. Yuldashev N. K. Study of photovoltaic and photoresistive properties of a thin cdte layer in a film heterostructure n-CdS/p-CdTe //Scientific-technical journal. – 2019. – Т. 23. – №. 4. – С. 9-16. (in Russian).