

УДК 53.043;53.023;539.234

## ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ИНЖЕКЦИОННОЕ УСИЛЕНИЕ ИНЖЕКЦИОННОГО ФОТОДИОДА НА ОСНОВЕ КРУПНОБЛОЧНЫХ ПЛЕНОК CdTe ПРИ ОСВЕЩЕНИИ “СОБСТВЕННЫМ” СВЕТОМ

Утениязов Абатбай Курбаниязович, к.ф.-м.н., доцент, E-mail: [abat-62@mail.ru](mailto:abat-62@mail.ru)

Каракалпакский государственный университет

Лейдерман Ада Юльевна, д.ф.-м.н., профессор,

Аюханов Рашид Ахметович, д.ф.-м.н., с.н.с

Физико-технический институт НПО «Физика–Солнце» АН РУз

Нсанбаев Максет Турдыбаевич, ассистент

Нукусский государственный педагогический институт

Есенбаева Эльмира Сейтжановна, ассистент

Нукусский филиал Ташкентского университета информационных технологий

**Аннотация:** Приведены результаты исследований фотоэлектрического инжекционного усиления структуры Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p-CdTe-Mo при подаче больших напряжений смещения в прямом направлении тока. Показано, что спектральная чувствительность достигает наибольшего значения  $S_{\lambda}=8.4 \cdot 10^4$  А/Вт при освещении “собственным” светом с  $\lambda=450$  нм и при  $V=7$  В. Установлено, что при освещении структуру “собственным” светом реализуется механизм усиления положительной обратной связи (ПОС).

**Ключевые слова:** структура, пленка, инжекционный фотоприемник, фототок, спектральная чувствительность.

## CdTe ИРИ БЛОКТУУ ПЛЕНКАЛАРЫНЫН НЕГИЗИНДЕГИ ИНЖЕКЦИЯЛЫК ФОТОДИОДДУН “ӨЗҮНҮН” ЖАРЫГЫ МЕНЕН ЖАРЫКТАНДЫРУУДА ФОТОЭЛЕКТРИК ИНЖЕКЦИЯЛЫК КҮЧӨТҮЛҮШҮ

**Аннотация:** Агымды түз багытта жылдырууда жогорку чыңалуу берген учурда Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p-CdTe-Mo структурасынын фотоэлектрик инжекциялык күчөтүлүүсүн изилдөөнүн жыйынтыктары келтирилген. “Өзүнүн”  $\lambda=450$  нм жана  $V=7$  В жарыгы менен жарыктандырууда спектрдик сезгичтиги  $S_{\lambda}=8.4 \cdot 10^4$  А/Вт барабар эң чоң мааниге жеткендиги көрсөтүлгөн. “Өзүнүн” жарыгы менен структураны жарыктандырууда оң кайтарым байланышын (ОКБ) күчөтүүнүн механизминин ишке ашуусу аныкталган.

**Ачкыч сөздөр:** структура, пленка, инжекциялык фотокабыл алгыч, фотоагым, спектрдик сезгичтик.

## PHOTOELECTRIC INJECTION AMPLIFICATION OF AN INJECTION PHOTODIODE BASED ON THE LARGE-GRAIN CdTe FILMS WHEN ILLUMINATED WITH “OWN” LIGHT

**Abstract:** The results of studies of the photoelectric injection amplification of the Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p-CdTe-Mo structure with high bias voltages in the forward direction of the current are presented. It has been shown that the spectral sensitivity reaches its maximum value  $S_{\lambda} = 8.4 \cdot 10^4$  A/W when illuminated with “own” light with  $\lambda = 450$  nm and at  $V = 7$  V. It is established that when illuminating the structure with “own” light, a positive feedback amplification (PFA) mechanism is realized.

**Key words:** structure, film, injection photo-detector, photocurrent, spectral sensitivity.

### 1. Введение

На сегодняшний день в мире широко используют фотодиоды в регистрирующих и измерительных приборах фотометрии, в киноаппаратуре, фототелеграфии и т.д. Существенным недостатком фотодиодов является низкая токовая фоточувствительность, так как в них квантовый выход не может быть выше единицы. Их использование в режиме лавинного умножения возможно только при очень жестких требованиях к стабильности

температуры и напряжения питания. Этим недостаткам лишены инжекционные фотодиоды (ИФД) – новый класс фотоприемников с внутренним усилением. Они были получены в основном на Ge, Si, GaAs, которые эффективно работают при низких температурах. Другим недостатком всех этих приборов является их спектральная чувствительность ограничена спектральной чувствительностью материалов, на котором они изготовлены. С этой точки зрения создание ИФП на основе  $A^2B^6$  представляется актуальной и перспективной задачей, поскольку эти материалы имеют ширину запрещенной зоны, соответствующую полному спектру видимого и частично ультрафиолетового света, для них характерны прямые оптические переходы, что позволяет получать высокую эффективность генерации электронно-дырочных пар. Отсюда вытекает цель данной работы.

Для решения поставленных задач были получены пленочные структуры  $p$ -CdTe со столбчатой структуры зерен на Mo подложке методом сублимации в потоке водорода. На поверхности полученных пленок  $p$ -CdTe была создана МОП структура путем напыления алюминия в вакууме ( $\sim 10^{-5}$  Торр) (Mirsagatov и др., 2012). Пленки  $p$ -CdTe имели удельное сопротивление  $\rho \approx 10^9 - 10^{11}$   $\Omega \cdot \text{см}$  и время жизни неосновных носителей – электронов  $\tau \sim 10^{-8} - 10^{-7}$  s. Проведенный рентгеноструктурный анализ показал (Mirsagatov и др., 2010, Ачилов и др., 2014), что в проведенном технологическом процессе образуется тонкий окисный слой  $Al_2O_3$  с толщиной  $\sim 30$  nm, но этот слой играет очень важную роль в работе полученной структуры. Именно благодаря ему здесь получается не структура металл – полупроводник, а МОП-структура, а именно Al- $Al_2O_3$ - $p$ -CdTe (металл Al, окисел  $Al_2O_3$ , полупроводник CdTe).

Данная работа посвящена исследованию механизмов инжекционного усиления структуры Al- $Al_2O_3$ - $p$ -CdTe-Mo при освещении “собственным” светом.

## 2. Образцы и методики измерения

С целью определения эффективности регистрации фотонов исследуемой структурой в работе (Утениязов и Исмаилов, 2018) нами были исследованы спектральная чувствительность ( $S_\lambda$ ) структуры в отсутствие смещения, а также вычислена  $S_\lambda$  для идеального фотоприемника (ИФ) в спектральном диапазоне длин волн 400–1000 нм. Спектральная фоточувствительность структуры измерялась на монохроматоре ЗМР-3 при комнатной температуре (300K), мощность излучения была отградуирована в абсолютных единицах при помощи термоэлемента, имеющего кварцевое окно типа РНТ-10. Под идеальным фотоприемником подразумевается фотоприемник, в котором все падающие фотоны поглощаются и генерируют электронно-дырочные пары, которые без потерь разделяются потенциальным барьером и вносят свой вклад в фототок. Параметр  $S_{\lambda, \text{ид}}$  для идеального фотоприемника вычислялся по формуле  $(e/h\nu)\lambda\eta_\lambda(1-R)$ ,  $\eta_\lambda$  – внутренний квантовый выход,  $R$  – коэффициент отражения. При расчете были взяты следующие величины:  $\eta_\lambda=1$ ,  $R=0$ . Было показано, что исследуемая структура работает как инжекционный фотоприемник и усиливает первичный фототок даже в отсутствие внешнего напряжения смещения. Установлено, что при  $\lambda=450$  нм спектральная чувствительность  $S_\lambda \approx 0.93$  А/Вт, которая в 2.3 раза больше, чем  $S_{\lambda, \text{ид}}$  идеального фотоприемника при данной длине волны, а при  $\lambda=750$  нм  $S_\lambda \approx 1.1$  А/Вт; соответственно, соотношение  $S_\lambda/S_{\lambda, \text{ид}} \approx 1.85$ .

## 3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Как известно, инжекционные фотоприемники имеют два механизма усиления: положительная обратная связь (ПОС) (Vikulin и др., 2008, Стафеев, 2007) и параметрическое усиление (ПУ) (Vikulin и др., 2008, Стафеев, 2008).

Однако, результаты исследования по спектральной зависимости фототока- $I_{ph}$  и спектральной чувствительности- $S_\lambda$  не позволяют однозначно сказать, какой из механизмов усиления первичного фототока имеет место в исследуемых образцах. На этот вопрос дает ответ исследование зависимостей  $I_{ph}(\lambda)$  и  $S_\lambda(\lambda)$  при наложении напряжения смещения на структуру. Поэтому в работе (Утениязов, 2019) были исследованы зависимости  $I_{ph}(\lambda)$ ,  $S_\lambda(\lambda)$  при подаче малых напряжения смещения на структуру. Результаты исследований показали, что для установления возможности увеличения величины биполярной дрейфовой скорости (подвижности) с модуляцией заполнения глубоких уровней прилипания для электронов в

исследуемой структуре  $Al-n^+-Al_2O_3-p-CdTe-n-MoO_3-Mo$ , а также для определения взаимосвязи усиления первичного тока от величины тока в темноте надо исследовать интегральную и спектральную фоточувствительность при более высоких плотностях тока.

На рис.1. приведено спектральное распределение фоточувствительности структуры при различных уровнях инжекции. Из данных рисунка следует, что с

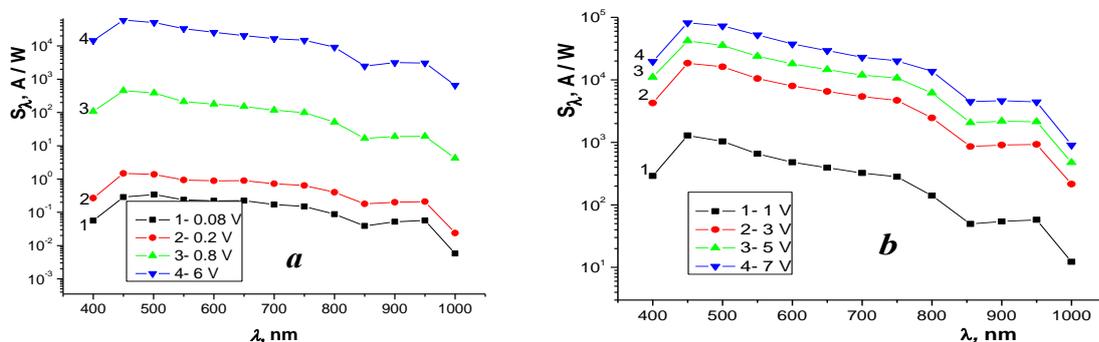


Рис. 1. Спектральная чувствительность структуры  $Al-n^+-Al_2O_3-p-CdTe-n-MoO_3-Mo$  в прямом направлении тока. Напряжение смещения  $V$ , В: а) 1 – 0.08, 2 – 0.2, 3 – 0.8, 4 – 6; б) 1 – 1, 2 – 3, 3 – 5, 4 – 7.  $T=300$  К.

ростом напряжения смещения в прямом направлении тока растёт спектральная чувствительность во всём диапазоне спектральной чувствительности (400–1000 нм). При этом нужно отметить, что зависимость  $S_\lambda$  от  $V$  изменяется весьма сложным образом. Например, до напряжения смещения  $V \approx 0.01-0.4$  В спектральная чувствительность имеет низкое значение во всем спектральном диапазоне спектральной чувствительности, которое по величине намного меньше, чем величина  $S_\lambda$  идеального фотоприемника во всем диапазоне длин волн.

Однако, с  $V \approx 0.4$  В  $S_\lambda$  начинает стремительно возрастать и при напряжении смещения 6 В величина  $S_\lambda$  превосходит фоточувствительность идеального фотоприемника в тысячи и даже в сто тысяч раз в зависимости от области спектральной чувствительности. При этом  $S_\lambda$  обычно увеличивается примерно в сто тысяч раз в области “собственного” поглощения, а в области “примесного” поглощения она возрастает в десять тысяч раз и более. Отсюда следует, что усиление первичного фототока происходит как в области “собственного”, так и в области “примесного” поглощения. Однако, при этом остаются не ясными закономерности изменения спектральной чувствительности в зависимости от величины тока.

Чтобы внести ясность в этот вопрос, проведено совместное исследование вольтамперной характеристики в темноте и на свету, а также зависимости токовой чувствительности от напряжения смещения. Сначала рассмотрим влияние облучения монохроматическим светом из области “собственного” поглощения. Для этого были измерены вольтамперная характеристика в темноте и на свету при облучении монохроматическим светом ( $\lambda=650$  нм) из области “собственного” поглощения (рис. 2а), а также зависимость  $S_\lambda$  от  $V$  (рис. 2б). Из рисунков 2а и б видно, что световая и темновая вольтамперные характеристики описываются одинаковыми закономерностями, а закономерность изменения  $S_\lambda$  от  $V$  соответствует закономерности световой вольтамперной характеристики. Вольтамперная характеристика в темноте имеет четыре участка, которые описываются степенными зависимостью тока от напряжения смещения типа  $J \sim V^\alpha$  с

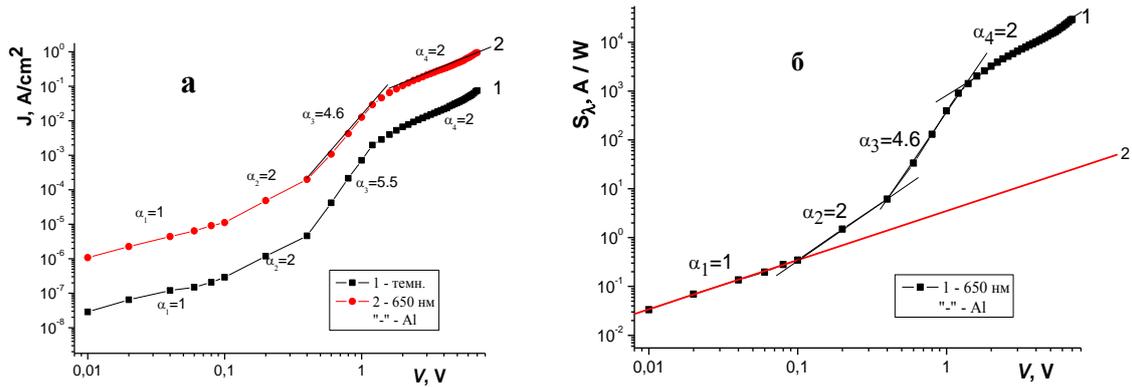


Рис. 2. Зависимости плотности тока  $J$  (а) и токовой фоточувствительности  $S_\lambda$  (б) от напряжения смещения в прямом направлении тока структуры  $\text{Al}-n^+-\text{Al}_2\text{O}_3-p-\text{CdTe}-n-\text{MoO}_3-\text{Mo}$  в темноте (1) и на свете (2) монохроматическим светом при  $\lambda=650 \text{ nm}$ ,  $T=300 \text{ K}$ . различными значениями показателя степени « $\alpha$ ». В (Мирсагатов и Утениязов, 2017) такая последовательность ВАХ была объяснена с изменением условий рекомбинационных процессов. Рекомбинационные процессы происходят сначала через простые локальные центры, затем, при больших плотностях тока – через сложные комплексы, внутри которых происходит обмен неравновесными носителями. В частности, линейный участок  $J \sim V$  и следующая за ним зависимость  $J \sim V^2$  хорошо объясняются в рамках представлений о рекомбинации, идущей через простые локальные примесные центры. Но далее идёт участок резкого роста тока  $J \sim V^\alpha$ , где  $\alpha=4.6$ , и за ним второй квадратичный участок  $J \sim V^2$ , которые в эту модель не укладываются. Видимо, рекомбинационные процессы идут через сложные комплексы.

Такие сложные комплексы могут быть различной природы. Это могут быть донорно-акцепторные пары, комплексы типа примесь+вакансия, примесь+ междоузельный дефект или дефекты типа пар Френкеля, возникающие в результате рекомбинационно-стимулированных или фото-стимулированных процессов. В (Лейдерман и Минбаева, 1996) собраны различные модели таких сложных комплексов. При этом схема рекомбинации через подобные двухуровневые комплексы будет для всех них примерно одинаковой. Она показана на рисунке 3.

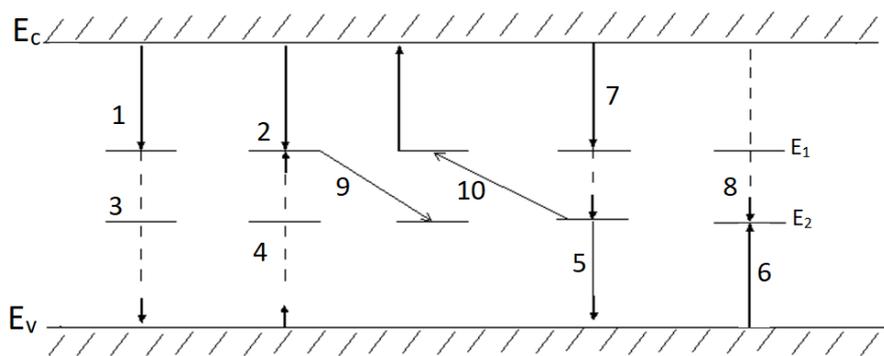


Рис.3. Схема рекомбинации через двухуровневый рекомбинационный комплекс.  $E_1$  и  $E_2$  – энергетические состояния этого комплекса.

- 1 –  $c_{n1}N(1-f_{R_1})n$ , 2 –  $c_{n1}Nf_{R_1}n_{11}$  – обмен уровня  $E_1$  с зоной проводимости.
- 3 –  $c_{p1}Nf_{R_1}p$ , 4 –  $c_{p1}N(1-f_{R_1})p_{11}$  – обмен уровня  $E_2$  с валентной зоной.
- 5 –  $c_{p2}Nf_{R_2}p$ , 6 –  $c_{p2}N(1-f_{R_2})p_{12}$  – обмен уровня  $E_2$  с валентной зоной.
- 7 –  $c_{n2}N(1-f_{R_2})n$ , 8 –  $c_{n2}Nf_{R_2}n_{12}$  – обмен уровня  $E_2$  с зоной проводимости.

$9 - c_{12} N f_{R_1} (1 - f_{R_2}), 10 - c_{12} N f_{R_2} (1 - f_{R_1}) e^{\frac{E_2 - E_1}{kT}}$  – обмен уровня  $E_1$  с уровнем  $E_2$ , т.е. внутри-комплексный обмен.  $f_{R_1}$  и  $f_{R_2}$  – вероятности заполнения уровней  $E_1$  и  $E_2$  электронами.

В (Лейдерман и Минбаева, 1996) показано также, что скорость рекомбинации, идущей через все такие комплексы, может быть приближённо представлена в виде:

$$U = N \frac{c_{n1} c_{p2} (pn - n_i^2)}{c_{n1}(n + n_{11}) + c_{p2}(p + p_{12}) + c_{12} pn} \quad (1)$$

Здесь  $N$ - концентрация комплексов,  $c_{n1}$ - коэффициент захвата электрона на уровень  $E_1$ ,  $c_{p2}$ - коэффициент захвата дырки на уровень  $E_2$ ,  $n_{11}$  и  $p_{12}$ - аналоги статистических факторов Шокли-Рида для уровней  $E_1$  и  $E_2$ :

$$n_{11} = N_c e^{\frac{E_c - E_1}{kT}}, \quad p_{12} = N_v e^{\frac{E_2 - E_v}{kT}}$$

В выражении (1) последний член в знаменателе описывает внутрикомплексный обмен электронами. Когда этот член мал, то есть

$$c_{12} pn \ll c_{n1}(n + n_{11}) + (p + p_{12}), \quad (2)$$

то выражение (1) практически ничем не отличается от обычного выражения статистики Шокли-Рида. В этом случае ВАХ для достаточно длинного диода ( $d/L \gg 1$ ) описывается известным законом Ламперта  $J \sim V^2$ . Но когда этот член становится существенным, закон Ламперта, как показано в (Лейдерман и Минбаева, 1996), сменяется более сильной зависимостью  $J \sim V^\alpha$  с  $\alpha > 2$ . Когда же внутрикомплексный обмен неравновесными носителями становится преобладающим, знак неравенства (2) меняется на обратный и скорость рекомбинации  $U$ , как видно из (1), выходит на насыщение. В этом случае на ВАХ должен снова появиться участок с зависимостью  $J \sim V^2$  (Лейдерман и Минбаева, 1996). Эти теоретические прогнозы хорошо согласуются с экспериментом, подробно описанным в (Мирсагатов и Утениязов, 2017).

Теперь более подробно проанализируем участки световой вольтамперной характеристики, чтобы определить динамику роста фоточувствительности в зависимости от напряжения смещения. Линейный участок ВАХ практически определяется сопротивлением базы, так как перенос тока определяется равновесными носителями в базе. Известно, что сопротивление линейного участка практически совпадает с сопротивлением фоторезистора, изготовленного из того же материала базы инжекционного фотодиода и имеющего те же геометрические размеры.

Отсюда следует, что спектральная интегральная фоточувствительность инжекционного фотодиода и фоторезистора на этом участке ВАХ практически совпадают. Как видно из рис. 2b, максимальная величина токовой чувствительности  $S = 0.34$  А/Вт на линейном участке, которая намного меньше, чем у идеального фотоприемника ( $S_\lambda = 0.51$  А/Вт) при данной длине волны электромагнитного излучения. После выполнения условия  $n > n_0$  (где  $n$ -концентрация инжектированных электронов,  $n_0$ -концентрация равновесных электронов) ток в структуре в основном определяется неравновесными носителями, образованными падающим светом и инжекцией из контакта. Квадратичный участок зависимости тока от напряжения на ВАХ обусловлен модуляцией полупроводника инжектированными носителями заряда при их биполярном дрейфе в электрическом поле (Лейдерман и Минбаева, 1996). На этом участке максимальное значение спектральной чувствительности  $S_\lambda = 6.1$  А/Вт, которое в  $\sim 12$  раз больше чувствительности идеального фотоприемника ( $\lambda = 650$  нм). Такая величина фоточувствительности достигается при  $V = 0.4$  В.

При таком значении напряжения смещения аналогичный фоторезистор имеет чувствительность  $\sim 1.3$  А/Вт, которая примерно в пять раз меньше, чем у инжекционного фотодиода. Величина токовой чувствительности фоторезистора при больших напряжениях смещения получена путем экстраполяции линейной части зависимости  $S_\lambda(V)$ . После  $V = 0.4$  В с дальнейшим возрастанием напряжения смещения величина фоточувствительности фотодиода резко возрастает.

Например, при увеличении  $V$  всего в три раза от величины 0.4 В до 1.2 В величина  $S_\lambda$  возрастает в 150 раз, примерно в столько же раз увеличивается и фототок (см. рис. 2a). Как указывалось выше, в этих пределах  $V$  вольтамперная характеристика описывается степенной зависимостью типа  $J \sim V^\alpha$ , где  $\alpha=4.6$ , т.е. имеет участок резкого роста тока. Для стационарного внешнего сигнала коэффициентом инжекционного усиления- $K$  являются отношения, определяемые формулами (6)-(10) в (Vikulin и др., 2008). Отсюда следует, что в формировании фоточувствительности инжекционных фотодиодов, помимо модуляции сопротивления базы инжекционными эффектами, определяющую роль играет и крутизна ВАХ, которая определяется механизмами переноса тока, что находит свое подтверждение на эксперименте (см. рис. 2b). В конце третьего участка зависимости  $S_\lambda(V)$  коэффициент инжекционного усиления достигает  $\sim 250$  раз. А на четвертом участке световой ВАХ, когда скорость рекомбинации, происходящая через сложные комплексы, выходит на полное насыщение, коэффициент  $K$  достигает своего наивысшего значения, равного  $\sim 1350$ . Таким образом, в инжекционных фотодиодах, изготовленных на основе высокоомных сильно компенсированных пленок  $p$ -CdTe, при освещении “собственным” светом фотоэлектрическое инжекционное усиление реализуется при помощи механизма положительной обратной связи (ПОС).

Таким образом, исследование зависимости спектрального распределения фоточувствительности от уровня инжекции при больших напряжениях смещения показывает, что спектральная чувствительность достигает наибольшего значения  $S_\lambda=8.4 \cdot 10^4$  А/Вт при освещении “собственным” светом с  $\lambda=450$  нм и при  $V=7$  В. Установлено, что при освещении структуру “собственным” светом реализуется механизм усиления положительной обратной связи (ПОС).

#### Литература:

1. Vikulin I.M., Kurmashev Sh.D., Stafeev V.I. (2008). Injection-Based Photodetectors. *Physics of semiconductor devices*, 42(1), 113-127.
2. Ачилов А.С., Заверюхин Б.Н., Каланов М.У., Рустамова В.М. (2014). Рентгеновские исследования структуры нового типа  $A^2B^6$  приемника электромагнитного излучения. *Доклады Академии наук РУз.*, 2, 24-26.
3. Лейдерман А.Ю., Минбаева М.К. (1996). Механизм быстрого роста прямого тока в полупроводниковых диодных структурах. *Физика и техника полупроводников*, 30(11), 1729-1738.
4. Mirsagatov Sh.A., Uteniyazov A.K., Achilov A.S. (2012). Mechanism of Current Transport in Schottky Barrier Diodes Based on Coarse-Grained CdTe Films. *Physics of the Solid State*, (54)9, 1643-1654.
5. Мирсагатов Ш.А., Музафарова С.А., Баиев М.С., Ачилов А.С. (2010). Исследование реального строения диода с барьером Шоттки Al-p-CdTe”, *Узбекский физический журнал*.12, 154-160.
6. Мирсагатов Ш.А., Утениязов А.К. (2017). Влияние толщины базы на параметры рекомбинационных постоянных в структуре Al-p-CdTe-Mo. *Доклады Академии наук РУз.*, 2, 17-21.
7. Стафеев В.И. (2008). Фотоприемники ИК диапазона на основе  $Cd_xHg_{1-x}Te$ , на примесных полупроводниках (Ge и Si) и УФ диапазона на основе соединений  $A^2B^5$ , 35 лет работы в НИИ прикладной физики (1970-2005). Москва: Орион.
8. Стафеев В.И. (2007). Электронные приборы на основе полупроводников. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 5, 3-13.
9. Утениязов А.К., Исмаилов К.А. (2018). Спектральное распределение фоточувствительности структуры Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p-CdTe-Mo, *Доклады Академии наук РУз.*, 5, 27-31.
10. Утениязов А.К. (2019). Фотоэлектрическое инжекционное усиление структуры Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-p-CdTe-Mo при подаче малых напряжений смещения. Tashkent: International Scientific and Practical Conference “Solar Energy: Priority Sciences and Development Trends”.