

ЗАХИРИДДИН
МУҲАММАД БОБУР
НОМИДАГИ АНДИЖОН
ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ

ANDIJAN STATE
UNIVERSITY NAMED
AFTER ZAKHIRIDDIN
MUKHAMMAD BABUR

ИЛМИЙ ХАБАРНОМА

Физика-математика
Тадқиқотлари
(Махсус сон)

SCIENTIFIC BULLETIN

Physical and
Mathematical Research
(Special Issue)

Андижон
2023 йил

Муассис

Захириддин Мухаммад Бобур номидаги Андижон давлат университети

**ИЛМИЙ ХАБАРНОМА.
ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА
ТАДҚИҚОТЛАРИ**

Журнал бир йилда 2 марта чоп этилади.

Андижон вилояти ахборот ва оммавий коммуникациялар бошқармаси
томонидан 2019-йил 26 декабрда
0452 рақам билан рўйхатга олинган.

Нашр индекси: 344

Нашр учун масъул:
А.Й.Бобоев

Босишга рухсат этилди:
27.12.2019.

Қоғоз бичими: 60x81 1/8

Босма табоғи: 13,5

Офсет босма. Офсет қоғози.

Адади: 110 дона.

Баҳоси келишилган нархда.

Буюртъа №: 165.

“Мухаррир” нашриёти манбаа бўлимида чоп этилди.
Тошкент шаҳри, Сўгалли ота кўчаси 7-уй

Таҳририят манзили:

170100, Андижон шаҳри, Университет кўчаси, 129. Телефон: +998911602043.

Факс: (374) 223-88-30

E-mail: adu_xabarnoma@mail.ru Расмий сайт: uzjournals.edu.uz/adu

**Сборник статей международной научно-практической конференции по
«Полупроводниковая опто- и наноэлектроника, альтернативные
источники энергии и их перспективы» Андижан, 12-13 октября 2023 года**

ОГЛАВЛЕНИЕ

С.З. ЗАЙНАБИДИНОВ, А.Й. БОБОЕВ, Б.М. ЭРГАСHEB Механизмы формирования квантово-размерных нанообъектов в многокомпонентных структурах GaAs/Ge/ZnSe и GaAs/Si/ZnSe.....	7
М.Х. АШУРОВ, Б.Л. ОКСЕНГЕНДЛЕР, С.Х. СУЛЕЙМАНОВ, С.Е. МАКСИМОВ, З.И. КАРИМОВ, Н.Н. НИКИФОРОВА, Ф.А. ИСКАНДАРОВА Современные аспекты радиационной деградации твердых тел и биообъектов.....	10
М.Т. НОРМУРАДОВ, Е.Н. ВЛАСОВА, К.Т. ДОВРАНОВ, Д.А. НОРМУРОДОВ, Х.Т. ДАВРАНОВ Измерение оптических параметров, диэлектрических материалов, созданных низкоэнергетическим ионно-плазменным методом.....	15
Е.С. РЕМБЕЗА, Т.В. СВИСТОВА, Н.Н. КОШЕЛЕВА, М.Б. РАСУЛОВА Гетероструктуры металлооксид-кремний, как перспективные структуры для создания солнечных элементов.....	24
О.О. МАМАТКАРИМОВ, В.Х. QUCHQAROV, М.А. ERGASHEV, А.А. XOLMIRZAYEV Yarimo'tkazgich moddalariga asoslangan konvertorlarni ishlab chiqishda va uning asl parametrlarini saqlanishini o'rganish xossalari.....	28
S.Z. ZAINABIDINOV, H.J. MANSUROV, N.YU. YUNUSALIEV Photoelectric Properties of n-ZnO/p-Si Heterostructures.....	34
Х.Б. АШУРОВ, А.А. ЗАРИПОВ, А.А. РАХИМОВ, У.Ф. БЕРИДЕВ, И.Ж. АБДИСАИДОВ, М.М. АДИЛОВ Методы синтеза никелевого нанокатализатора для получения углеродных нанотрубок.....	39
Н.Ф. ЗИКРИЛЛАЕВ, М.М. ШОАБДУРАХИМОВА Особенности автоколебаний тока в компенсированном кремнии и их применение в электронике.....	46
Ш.Б. УТАМУРАДОВА, Ж.Ж. ХАМДАМОВ, В.Ф. ГРЕМЕНOK, К.А. ИСМАЙЛОВ, Х.Ж. МАТЧОНОВ, Х.Ю. УТЕМУРАТОВА Комбинационное рассеяние света в монокристаллическом Si, легированного атомами Gd.....	54
N.N. ABDURAZAKOV, R. ALIEV Power load forecasting using linear regression method of machine learning: Andijan regional case.....	58
И. Н. КАРИМОВ, М. ФОЗИЛЖОНОВ, А.Э. АБДИКАРИМОВ Вольт-фарадные характеристики SOI FINFET структуры.....	63
О.А. АБДУЛХАЕВ, А.З. РАХМАТОВ Низковольтные ограничители напряжения на основе структур с эффектом смыкания.....	67
SH.X. YO'LCHIYEV, B.D. G'ULOMOV, J.A. O'RINBOYEV ZnO va ZnO:Al yuqqa plyonkalarini sintez qilish va ularni fizik xossalari o'rganish.....	75
Ш.Т. ХОЖИЕВ, С.Ф. КОВАЛЕНКО, С.Е. МАКСИМОВ, В.М. РОТШТЕЙН, О.Ф. ТУКФАТУЛЛИН, Б.Л. ОКСЕНГЕНДЛЕР, Ш.К. КУЧКАНОВ Кластеры Y_n^+ и $Y_nO_m^+$, распыленные ионной бомбардировкой: эксперимент и теоретические аспекты.....	79

M. RASULOVA	
Application of Solution of the Quantum Kinetic Equations for Renewable Energy problem.....	85
A.A.МИРЗААЛИМОВ, Р.АЛИЕВ, Н.А.МИРЗААЛИМОВ	
разработка высокоэффективных и ресурсосберегающих конструкций кремниевых высоковольтных фотоэлектрических устройств.....	89
D.G' KHAJIBAEV, B.Ya. YAVIDOV	
On correlation of T_c and Cu-O _{apex} distance in single layered cuprates.....	97
A. АБДУЛВАХИДОВ, С.ОТАЖОНОВ, Р.ЭРГАШЕВ	
Фоточувствительность солнечных элементов гетероструктуры p CdTe – n CdS и p CdTe – n CdSe с глубокими примесными уровнями.....	102
М.К. КУРБАНОВ, К.У. ОТАБАЕВА, Д.У. ХУДОЙНАЗАРОВА	
Распыление пленок льда при бомбардировке ионами Ag+.....	107
H.O. QO'CHQAROV S.B. FAZLIDDINOV B.B.BURXONJANOV	
Simmetrik bo'lgan silikon diodning statik parametrlarini hisoblash p-n-uch nuqtali zaryadlangan nuqsonlarning δ -qatlami o'tish.....	113
N.Yu. SHARIBAYEV, B.M. BAXROMOV R.M. JALALOV A.A. YUSUFJONOV	
Study of electrophysical properties of semiconductor materials based on lead-selenium.....	120
Ш.К.КУЧКАНОВ, Х.Б.АШУРОВ, Б.М.АБДУРАХМАНОВ, С.Е.МАКСИМОВ, О. Э. КИМИЗБАЕВА, Ш.А.МАХМУДОВ	
О роли структурных дефектов в процессах генерации при нагреве эдс и носителей заряда в эпитаксиальных плёночных кремниевых p-n-структурах.....	125
S.Z. ZAYNABIDINOV, I.M. SOLIYEV, SH.K. AKBAROV	
Kremniy monokristallarida elektro noaktiv nikel va kislorod atomlarining o'zaro tasirlashuvi.	128
M.A.MUYDINOVA, G.J. MAMATOVA	
Yarimo'tkazgich plastinalar sirti va p-n strukturalarning optik xususiyatlari va ularni takomillashtirish usullari.....	132
L.O.OLIMOV, I.I. ANARBOYEV	
Kremniy granulari asosida termoelektrik material samaradorligini oshirish mexanizimi.....	136

Фоточувствительность солнечных элементов гетероструктуры p cdte – n cds и p cdte – n cdse с глубокими примесными уровнями

А. Абдулвахидов¹, С.Отажонов², Р.Эргашев²

¹Ростов-Донский Южный Федеральный университет, Россия

²Ферганский государственный университет, Узбекистан Получена 2 мая 2023 г. Принята к печати 23 мая 2023г.

Аннотация: В работе рассмотрено фотоэлектрические характеристики солнечных элементов созданной на основе пленочных гетеропереходов p CdTe – n CdS и p CdTe – n CdSe. Установлено, что спектральная область чувствительности солнечных элементов со структурой CdTe – CdS имеет значение длины волны 0,52 и 0,85 мкм. Показано, что разделение носителей происходит не на границе раздела CdS и CdTe, а в глубине слоя CdTe, которые равно несколько микрометров от поверхности, что связано с образованием слоя в результате диффузия свободного атома кадмия в p – CdTe.

Ключевые слова: гетеропереходы, солнечные элементы, p CdTe – n CdS, фоточувствительность, поликристаллическая пленка, рекомбинационные центры, спектральная чувствительность.

1. Введение. В настоящее время на основе CdTe получены гетеропереходы, эффективно работающие в качестве солнечных элементов [1] и фотоприемников в видимой и ИК области спектра [2].

Предельный теоретический коэффициент полезного действия(КПД)солнечного элемента с гетеропереходом p CdTe – n CdS и p CdTe – n CdSe составляет соответственно 17 и 21% [3]. Вследствие этого интерес к исследованиям теллурида кадмия в последнее время уделяет большое внимание.

В такие гетеропереход существенно снижается влияние поверхностной рекомбинации и последовательного сопротивления. Рассогласование постоянных кристаллических решеток CdTe и CdS составляет ~ 10%, в случае пары CdTe – CdSe ~ 13%. При таком рассогласовании постоянных решеток возникает большая концентрация рекомбинационных центров на границе раздела двух полупроводников. Однако результаты исследование [4,5] показали, что для фоточувствительных приборов наличие высокой плотности рекомбинационных центров N_s на границе не является губительным. Это видно из того факта, что скорости поверхностной рекомбинации S на гетерогранице при $N_s \rightarrow \infty$ стремятся не к бесконечности, а к конечной дрейфовой скорости в приграничном электрическом поле.

Авторами работы [6] по методике переходные процессы контактной фотопроводимости в пленках CdTe было определено скорости поверхностной рекомбинации которые равна $\tau_R \approx 19$ нс. В этих работах также определено доминирующий глубокий уровень с энергий фотоионизации 1,23 эВ, которые приводят к уменьшению воздействия поверхностной рекомбинации.

Полученные на основе гетероперехода p CdTe – n CdSe солнечный элемент пока обладают низким КПД, что связано с трудностью легирование слоев CdSe и возникновением тройного соединения в области перехода вследствие взаимной растворимости CdTe и CdSe [2]. Для избежание взаимной растворимости CdTe и CdSe температура осаждения CdSe на поверхности CdTe не должно превышать ~ 300°C.

В работе приводятся фотоэлектрическая характеристика и результаты изучения механизма переноса тока солнечных элементов на основе пленочных гетеропереходов p CdTe – n CdS и p CdTe – n CdSe.

2. Методика эксперимента. Рассмотрим методики получения CdTe и гетеропереходов p CdTe – n CdS и p CdTe – n CdS. Поликристаллические пленки CdTe

осаждались газотранспортным методом в квазизамкнутом объеме в патоке водорода предварительно химически обработанную подложку из молибдена. Пленки CdTe осаждались также на графитовые подложки. В качестве источника CdTe использовались порошки CdTe полупроводниковой частоты. Температура источника во время процесса варьировались в диапазоне 850 – 950°C. Размер зерен пленке зависел от температуры подложки, при 500°C, получалась пленка размером зерен 20-30 мкм, а при 600°C – 50 мкм и более.

Структурные исследование подтвердили, что в интервале температуры подложки 450...550°C зерна пленки CdTe получаются ориентированными т.е. столбчатыми и с поверхностным рельефом. Темновое удельное сопротивление полученных пленок превышает 10^3 Ом·см и обладает дырочной проводимостью. При использовании в качестве легирующих примесей Sb или As удельной сопротивление снижается в 2-3 раза [6].

Гетеропереходы p CdTe – n CdS и p CdTe – n CdSe изготавливались напылением в вакууме ($\sim 10^{-5}$ мм рт.ст.) слоя CdS и CdSe толщиной 1...5 мкм на поверхность базовых слоев p-CdTe. Пленки CdS и CdSe формировались при температуре подложки 250°C и 300°C соответственно. Слои CdS и CdSe легировались индием (In) непосредственно во время их напыления. Токосъемочные контакты были получены напылением In в вакууме ($\sim 10^{-5}$ мм рт.ст.) в виде полосок.

3. Экспериментальные результаты и их обсуждение. Изучение вольт - амперных характеристик (ВАХ) гетероперехода p CdTe – n CdS и p CdTe – n CdSe показало, что прямые токи превышают обратные в $10^3 \dots 10^4$ раз, напряжение отсечки, найденное из ВАХ при 290°K, составляло 0,6...0,7В для гетероперехода p CdTe – n CdS и 0,9...1,1В для гетероперехода p CdTe – n CdSe.

Прямые ветви ВАХ гетероперехода p CdTe – n CdS при различных температурах в полулогарифмическом масштабе представлена на рис.1. Полученных ВАХ невозможно объяснить на основе одной из моделей p-n-гетероперехода. Это связано с тем, что при получении CdS происходит диффузия свободного атома кадмия Cd вдоль прослоек приповерхностном слое зерен. Таким образом, в зернах CdTe проявляется мелкие p-n-гомопереходы и структура состоит из последовательно включенных изотипных n CdTe – n CdS гетеропереходов и p CdTe – n CdTe гомопереходов. При формировании n-слоя CdTe нельзя исключить и роль индия, который диффундируется из CdS, так как CdS легирован с индием.

В диапазоне напряжений $0 < V < 0,6$ В и при температуре $T > 298$ К преобладающим является процесс рекомбинации инжектированных дырок или в области объемного заряда n – CdTe или на поверхностных состояниях. Соответствующий участок ВАХ подчиняется закономерности [8,9].

$$I = I_0 \left[\exp \left(\frac{qV}{\beta RT} \right) - 1 \right], \quad (1)$$

где:

$$I_0 = \left(\frac{kT}{2E_{\max}} n_i + q n_i S n_o \right)$$

V-напряжение на структуре, E_{\max} - максимальное поле в слое объемного заряда, n_i – собственная концентрация электронов CdTe, $S n_o$ – скорость поверхностной рекомбинации. Диодный коэффициент в показателе степени приблизительно равняется двум и слабо изменяется с температурой. Вычислено значение I_0 намного меньше, значение найденных из ВАХ. При напряжении $V > 0,6$ В начинается второй участок, где β принимает возрастающее значение.

Надо отметить, что второй участок ВАХ в двойной логарифмической координате дает прямую линию и аппроксимируется зависимостью $I \sim V^n$, где $n \simeq \frac{3}{2}$.

Обратная ветвь ВАХ гетероперехода р CdTe – n CdS состоит из двух участков. Начальный участок при комнатной температуре в интервале напряжений $0 < V < 0,2\text{В}$ обладает экспоненциальной закономерностью с диодным коэффициентом $\beta \simeq 2$. При напряжении $V > 0,2\text{В}$ зависимость тока от напряжения носит степенной характер: $I \sim V^n$, где $n \simeq 0,5$. С увеличением температуры начальный экспоненциальный участок расширится и при 378°К доходит до напряжения $0,5\text{В}$. При обратных напряжениях нарушение диффузионно-дрейфового равновесия обуславливает расширение области объемного заряда (003) р-п-перехода и ее объединение как электронами, так и дырками. В этом случае генерация дырок в 003 переобладает над рекомбинацией. Плотность тока, обусловленного генерацией в обедненной области, выражается формулой [4].

$$I = \frac{qn_i d}{\tau_p}, \quad (2)$$

где d – ширина объединенного слоя.

Как видно из формулы (2), при заданной температуре ток генераций пропорционален ширине обедненного слоя, которая, в свою очередь, зависит от приложенного обратного напряжения. Таким образом, соответствующий участок обратной ветви ВАХ описывается сублинейной зависимостью [5]

$$I = \frac{qn_i}{\tau_p} \sqrt{\frac{2\varepsilon_n V}{q N_a}}. \quad (3)$$

Прямые ветви ВАХ гетероперехода р CdTe – n CdSe при различных температурах представлены на рис.2. В этих структурах зависимость прямого тока от напряжения также имеет экспоненциальный характер, определяемый формулой (1). Однако диодный коэффициент β зависит от температуры, то есть он увеличивается с ее ростом.

Прохождение прямого тока через гетеропереход р CdTe – n CdSe удовлетворительно описывается рекомбинационным механизмом Долеги [6], характерным для поликристаллических гетероструктур с большим числом дислокаций на границе материалов, образующих гетеропереход.

Обратные ветви ВАХ (рис. 3) гетероперехода р CdTe – n CdSe имеют три участка, характерные для токов, ограниченных пространственными зарядами. Первый участок – ловушечные квадратичные, второй участок – участок резкого роста тока, начинается при напряжении, необходимом для полного заполнения ловушек, затем следует квадратичный участок.

Как видно на рис.3, с увеличением температуры, протяжённость ловушечное квадратичного участка расширяется, а участок резкого роста тока укорачивается. Кроме того, значение тока при высоких температурах в квадратичном участке меньше, чем его значение при комнатной температуре, то есть при постоянном напряжении с увеличением температуры ток уменьшается. Такое поведение ВАХ явно свидетельствует о режиме токов, ограниченных пространственными зарядами.

Из первого квадратичного участка определялся фактор прилипания θ (θ – отношение свободного заряда к заряду, захваченному на ловушках). Оценка, проведенная по формуле [3]

$$V_{\text{пл}} = \frac{eN_t d^2}{2\varepsilon},$$

дает для θ значение $\simeq 10^{-9}$. Такое малое значение фактора прилипания свидетельствует о наличии большой концентрации ловушек в слое CdSe и границе раздела.

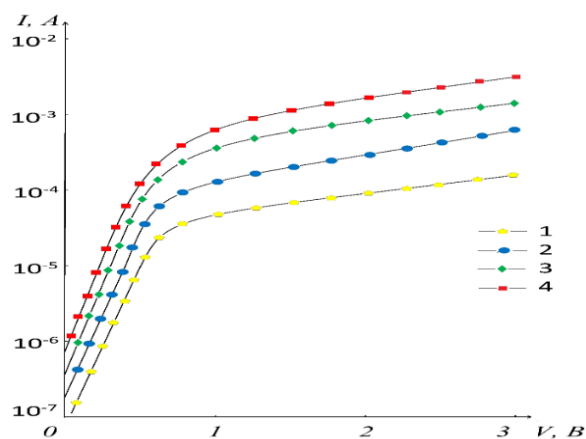


Рис.1. Прямые ветви ВАХ гетероперехода p CdTe – n CdS при различных температурах, К: 1-302, 2-338, 3-358, 4-376

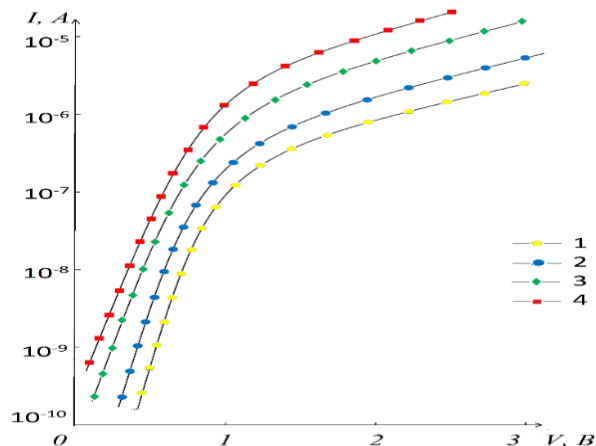


Рис.2. Прямые ветви ВАХ гетероперехода p CdTe – n CdSe при различных температурах, К: 1-298, 2-325, 3-355, 4-376

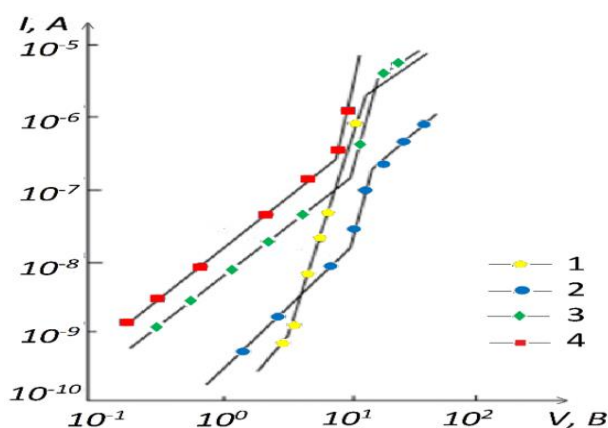


Рис.3. Обратные ветви ВАХ гетероперехода p CdTe – n CdS при различных температурах, К: 1-302, 2-338, 3-358, 4-376

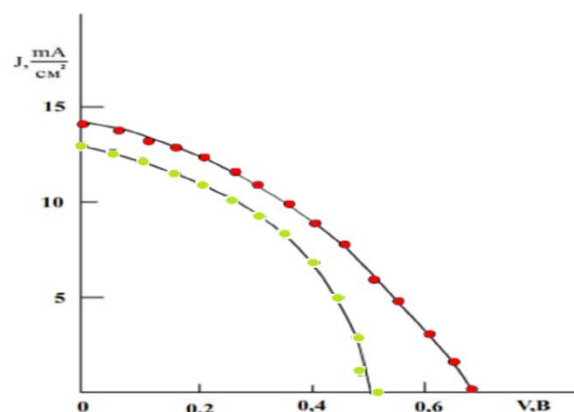


Рис.4. Нагрузочная ВАХ пленочных солнечных элементов на основе гетероперехода p CdTe – n CdS (1) и p CdTe – n CdSe (2) при мощности солнечного излучения $60 \frac{\text{мВт}}{\text{см}^2}$

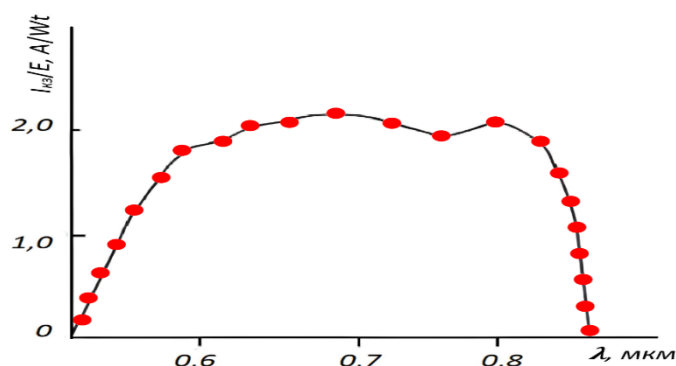


Рис. 5. Спектральное распределение фоточувствительности структуры p CdTe – n CdSe

Концентрация ловушек N_t , вычисленная по направлению $V_{\text{ПЗЛ}}$, оказалось равной $N_t \approx 3,4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Зная θ и N_t , вычислили глубину залегания ловушек E_t , которая оказалась равной $\approx 0,5 \text{ эВ}$ [4].

На рис.4 приведены нагрузочные ВАХ солнечного элемента на основе гетероперехода p CdTe – n CdS (кривая 1) и p CdTe – n CdSe (кривая 2). При интенсивности солнечного

излучения $\sim 60 \frac{\text{мВт}}{\text{см}^2}$ солнечного элемента на основе гетероперехода p CdTe – n CdS имели следующие характеристики: $V_{\text{xx}} \approx 0,65\text{В}$ $I_{\text{кз}} \approx 14 \frac{\text{мА}}{\text{см}^2}$, коэффициент заполнения нагрузочной характеристики 0,4, КПД 5...6%. При таких условиях солнечного элемента на основе гетероперехода p CdTe – n CdSe обладали меньшими показателями: $I_{\text{кз}} \approx 13 \frac{\text{мА}}{\text{см}^2}$, $V_{\text{xx}} \approx 0,5\text{В}$, коэффициент заполнения 0,45, КПД 3...4% [5, 6].

Спектральная область чувствительности солнечного элемента со структурой CdTe – CdS ограничена значениям длины волны 0,52 и 0,85 мкм, причем в диапазоне 0,58...0,81 мкм кривая чувствительности имеет плоскую форму (рис.5) [7]. Спектральные положения коротковолновой и длинноволновой границ области чувствительности определяется значениями ширины – запрещенных зон, соответственно CdTe и CdS и не зависят от напряжения смещения, которое влияет на эффективность собирания носителей заряда. Еще одна особенность этих элементов состоит в том, что разделение носителей происходит не на границе раздела CdS и CdTe, а в глубине слоя CdTe, на расстоянии от его поверхности, равном нескольким микрометром, что связано с образованием слоя в результате диффузии свободного атома кадмия в p-CdTe [8, 9].

Спектральная область чувствительности солнечного элемента на основе структуры CdTe – CdSe лежит в диапазоне 0,45...0,80 мкм. Однако коэффициент собирания носителя заряда в коротковолновой части спектра меньше чем в длинноволновой, что свидетельствует о малой диффузионной длине носителей CdSe.

4. Выводы. Таким образом, по полученным экспериментальным результатам можно судить, созданные гетеропереходы существенно снижает влияние поверхностной рекомбинации на фоточувствительности и при этом спектральное распределение фоточувствительности расширяется от 0,5 мкм до 0,9 мкм

Список литературы

1. Kuddus, Abdul & Ismail, Abu Bakar Md & Hossain, Jaker. (2021). Design of a highly efficient CdTe-based dual-heterojunction solar cell with 44% predicted efficiency. Solar Energy. 221. 488-501. 10.1016/j.solener.2021.04.062. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X21003625>
2. Bing Ren, Jijun Zhang, Meiyong Liao, Jian Huang, Liwen Sang, Yasuo Koide, and Linjun Wang. High-performance visible to near-infrared photodetectors by using (Cd,Zn)Te single crystal. Vol. 27, No. 6 | 18 Mar 2019 | OPTICS EXPRESS 8935/ <https://opg.optica.org/oe/fulltext.cfm?uri=oe-27-6-8935&id=407310>
3. Дирин Д.Н. Синтез и оптические свойства коллоидных нанокристаллов CdTe/CdSe и CdTe/CdS на основе тетраподов CdTe. / «Фундаментальное материаловедение и наноматериалы»/ Московский Государственный Университет им.М.В.Ломоносова, Факультет наук о материалах, Москва, Россия 2009 г. <http://www.lssm.inorg.chem.msu.ru/pDirin.html>
4. S. Otajonov, T. Ahmedov, Ya. Usmonov, M. Khalilov, N. Yunusov. Optical properties of polycrystalline films of lead telluride with distributed stoichiometry // journal of physics: Conf. ser....
5. А.Г. Витухновский А.С. Шульга С.А. Амброзевич Е.М. Хохлов Р.Б. Васильев Д.Н. Дирин В.И. Юдсон. Влияние разветвления тетраподных нанокристаллических гетероструктур CdTe/CdSe на их люминесценцию. /Физика Буквы А/ Том 373, выпуск 26, 15 июня 2009 г., страницы 2287-2290. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0375960109005350?via%3Dihub>
6. E.Gaubas, T. Ceponis, D. Dobrovolskas, J. Mickevicius, N. Alimov, S. Otajonov. Study of polycrystalline CdTe films by contact and contactless pulsed photo-ionization spectroscopy // J. Thin Solid films 660 june 2018 pp. 231-235. Doi
7. Роман Б. Васильев, Дмитрий Н. Дирин, Александр Михайлович Гасков. Влияние температуры на рост коллоидных нанотетраподов CdTe. Менделеевские сообщения. Том 19, выпуск 3, май – июнь 2009 г., страницы 126–127. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959943609000649?via%3Dihub>
8. C.Li, J.Poplawsky, Y. Yans, S.J. Pennycook, Understanding individual defects in CdTe thin-film solar cells via STEM: from atomic structure to electrical activity, Mater.Sci. Semicond. Process. 65 (2017) 64-76.
9. T. Okamoto, A. Yamada, M. Konagai, Optical and electrical characterizations of highly efficient CdTe thin film solar cells, Thin Solid Films 387 (2001) 6-10