

Технология Получения Тонкослойных Гетероструктур N-CdS/p-CeF₃ И Исследование Их Электрических Свойств

Саидов Сафо Олимович¹, Камолов Журабек Жалол угли²

Аннотация: В статье приведены технология получения тонкослойных гетероструктур n-CdS/p-CeF₃ и результаты исследования их электрических свойств. Показано, что доминирующим механизмом передачи тока в низших звеньях ($3kT/e < V < 1$ В) является многоступенчатая туннельная рекомбинация и процессы, связанные с состояниями поверхности CeF₃/CdS. Основными механизмами переноса носителей заряда в обратном направлении являются ($0,12 < |V| < 0,6$ Ом) эмиссия Френкеля-Пулла и ($0,5 < |V| < 1,5$ Ом) туннелирование через потенциальный барьер.

Ключевые слова: Технология получения тонкослойных гетероструктур, n-CdS/p-CeF₃, электрические свойства, механизм передачи тока, многоступенчатая туннельная рекомбинация, процессы связанные с состояниями поверхности, механизм переноса носителей заряда, эмиссия Френкеля-Пулла, туннелирование, потенциальный барьер и др.

Данная статья является продолжением серии работ [1-4] по исследованию электрофизических свойств гетероструктурных соединений состава n-CdS/p-CeF₃.

Для получения качественных тонких пленок важную роль играет очистка поверхности основания. В основном для очистки стеклянных оснований используется ультразвуковая ванна. В нашей работе стеклянные основания размером 1,5x1,5 см очищали в следующем порядке:

1. Мытье стеклянного основания водой с мылом или шампунем;
2. Очистка в ультразвуковом устройстве в растворе уксусной кислоты; (CH₃COOH) при температуре 50⁰ С, время очистки 7 минут;
3. Очистка в ультразвуковой установке в дистиллированной воде при температуре 500 С, время очистки 4 минуты;
4. Очистка в ультразвуковом приборе в этиловом спирте (C₂H₅OH) при температуре 500 С, время очистки 7 мин;
5. Очистка в ультразвуковой установке в дистиллированной воде при температуре 500 С, время очистки 4 минуты;
6. Сушка в потоке газообразного азота.

Технология изготовления тонкопленочной гетероструктуры /Mo/CeF₃/CdS. На первом этапе изготовления тонкопленочной гетероструктуры n-CdS/p-CeF₃ тонкие слои Мо толщиной 0,3-0,5 мкм укладывались на стеклянную основу путем распыления магнетроном при T = 500⁰ С. После напыления выбирали качественную пленку с высокой адгезией. Толщина пленки измерялась с помощью электронного микроскопа.

На втором этапе наносился слой CeF₃. Тонкие пленки CeF₃ на стеклянных основаниях, покрытых молибденом, помещали в рабочую камеру установки, состоящая из вакуумного устройства ВА-0,5-4 (рис.1), она имеет специальную конструкцию цилиндрической головкой из кварца и состоит из: 1) основания, фиксаторов и защитного цилиндра; 2) специального амортизатора для управления потоком вещества из распылителя, демпфер приводится в движение магнитами, магниты расположены внутри и снаружи рабочей камеры; 3) для контроля температуры основания и источника материала использовалась термопара (chromel-alumel). Для испарения парящего вещества изготавливали специальные тигли. Для улучшения качества вакуума в рабочей камере использовалась азотная ручка, а для дегазации в рабочей камере установлен внутренний нагреватель из молибденовой проволоки диаметром 1,5 мм.

¹ Кандидат химических наук, доцент кафедры «Физика» Бухарского государственного университета, Бухара, Узбекистан

² Ассистент кафедры «Биофизика и информационно-инновационные технологии в медицине» Бухарского государственного медицинского института им. Абу Али ибн Сино, Бухара



Рисунок 1. Установка вакуумного устройства для получения тонкослойных гетероструктур.

Ионопроводящие материалы испарялись с помощью кварцевых испарителей (тиглей) CeF_3 . Кварцевые тигли изготавливаются отжигом (3-4 раза) в цилиндрических спиральях из молибдена в высоком вакууме (10^{-6} мм.рт.ст.). Расстояние между основанием и тиглями составляет 25 см. Тигли дегазируют испаренным материалом перед осаждением тонких пленок CeF_3 . Укладку тонких пленок осуществляли при давлении остаточных газов в вакуумной камере 10^{-5} - 10^{-6} тор. Для этого использовался сверхчистый порошок CeF_3 . В процессе осаждения CeF_3 температура оснований составляла 60°C , а температура испарителя оставалась постоянной $\approx 1500^\circ\text{C}$ на протяжении всего процесса осаждения пленки. Скорость осаждения тонких пленок составляла $\approx 2,5$ Нм/мин. После укладки пленки медленное охлаждение осуществлялось под высоким вакуумом. Толщина отлитых пленок CeF_3 измерялась методом микробаланса и составляла 360 и 1200 Нм. После получения тонких пленок CeF_3 на стеклянных основаниях с молибденовым покрытием через вакуумный осадок на его поверхность укладывают пленки CdS толщиной 300 Нм при температуре основания 200°C . Таким образом, на основе тонких пленок CeF_3 и CdS были получены тонкопленочные гетероструктуры (рис.2).

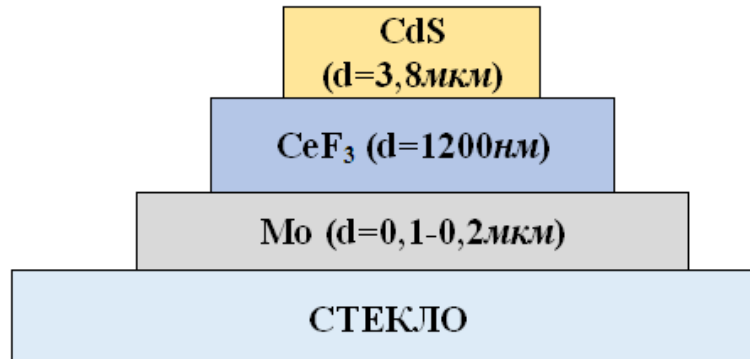


Рисунок 2. Схематическое изображение гетероструктуры /Mo/CeF₃/CdS

Для проведения электрических измерений в стеклянной гетероструктуре /Mo/CeF₃/CdS индиевые контакты укладываются спереди методом вакуумного осаждения. Вольт-амперные характеристики (ВАХ) гетероструктур измерялись стандартным методом при комнатной температуре с использованием источника постоянного тока BVP Electronics DC, точного мультиметра Fluke 5545A и вольтметра Picotest M3500A в качестве амперметра.

Электрические свойства тонкослойных гетероструктур /Mo/CeF₃/CdS. В классической работе [5] изучались оптические свойства ИТО, полученные пиролизом. На рисунке 3 показаны зависимости переноса и отражения двух образцов, носителей заряда одинаковой толщины и разной концентрации N. Видно, что граница спектральной

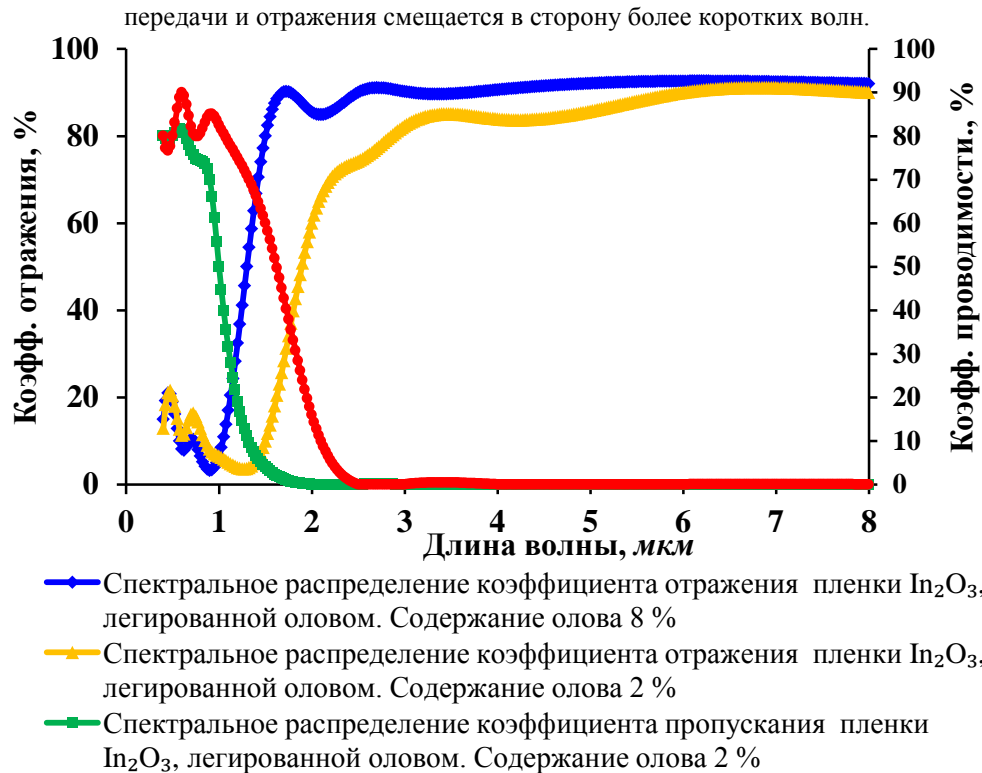


Рисунок 3. Спектральное распределение коэффициентов проводимости и отражательной способности пленок In_2O_3 , добавленных оловом. Толщина пленки 300 Нм.

Путем экстраполяции линейных сечений на пересечение с осью напряжения была определена высота ϕ_0 потенциального барьера гетеросоединения при различных температурах (рис.3). Было обнаружено, что зависимость высоты потенциального барьера гетероструктуры от температуры хорошо описывается следующим уравнением:

$$\phi_0(T) = \phi_0(0) - \beta_0 T \quad (1)$$

Используя это уравнение и зависимость высоты потенциального барьера от температуры, полученной в эксперименте, определяется температурный коэффициент высоты потенциального барьера $\beta_\phi = 1 \cdot 10^{-2} \text{эВ} \cdot \text{K}^{-1}$, а значение высоты потенциального барьера при абсолютном нуле температуры $\phi_0(0) = 4,4 \text{эВ}$.

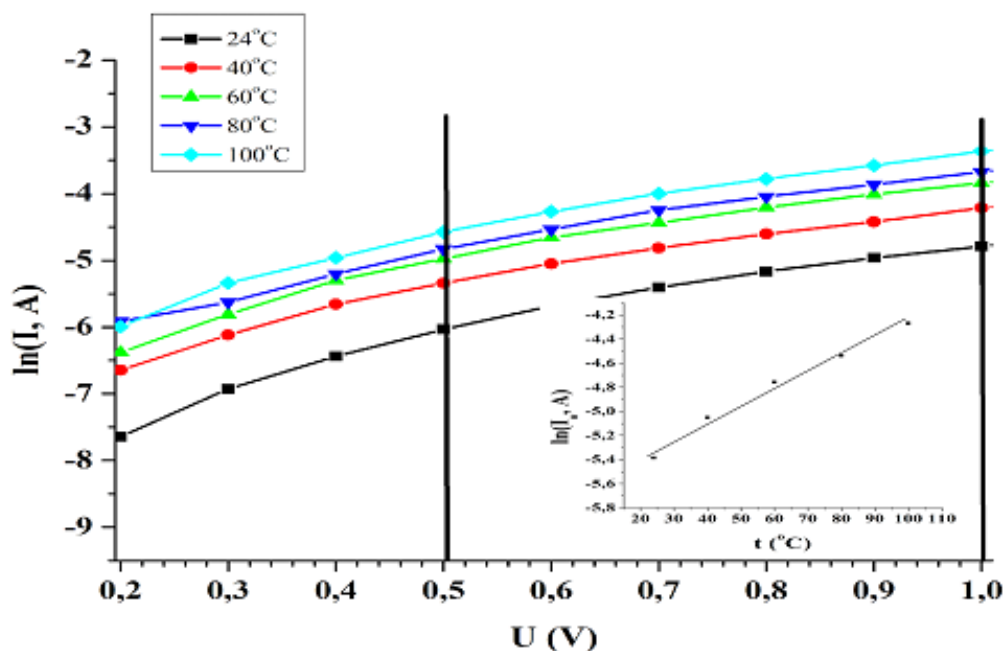


Рисунок 4. Прямые ветви VAX гетеросоединения $\text{CeF}_3/\text{n-CdS}$ $3kT/2 < V < 1 \text{ V}$ по полулогарифмической шкале в области прямых изгибов.

На вставке показана зависимость тока сдвига от температуры.

- а) температурная зависимость высоты потенциального барьера;
- б) зависимость $R_s = f(10^3/T)$ по семилогарифмической шкале.

Значение последовательного сопротивления гетероструктуры R_s определяется по наклону прямой ток-напряжение характеристики в области напряжения выше высоты потенциального барьера, где кривые $I=f(V)$ изменяются от экспоненциальной к линейной зависимости. Известно, что температурная зависимость последовательного сопротивления в основном определяется коэффициентом $R_s \sim \exp(-E_A/kT)$. Таким образом, наклон прямой $R_s=f(10^3/T)$ по семилогарифмической шкале определяет глубину уровня рабочего акцептора $E_A = 0,35$ эВ, что определяет свойства основного материала [6], [7].

Механизм переноса тока тонкослойной стеклянной гетероструктуры /Mo/CeF₃/CdS/. Прямые ветви гетероструктуры /Mo/CeF₃/CdS/In в семилогарифмических координатах при различных температурах показаны на рис.4. Как видно из рисунка, прямолинейные отрезки наблюдаются в области сдвигов $V > 3kT/2$ вперед. Анализ прямых ответвлений характеристики I-V, проведенный в гетероструктуре в полулогарифмической шкале, показал, что зависимость $\ln I = f(V)$ состоит из двух прямых секций, что указывает на экспоненциальную зависимость и наличия потока напряжения, двух доминирующих механизмов передачи заряда в исследуемом диапазоне напряжений. Определенные значения коэффициента неидеальности ($\ln(I)/1V = e/nkT$, где n - коэффициент неидеальности) для обоих графиков напряжения $n \approx 12$ ($3kT/e < V < 1V$) и $n \approx 21$ ($1 < V < 1,8 V$) показаны в таблице.

Таблица. Приближенные значения коэффициента неидеальности переходов гетеросоединения CsF₃ / CdS.

Гетероструктура	U, V	N
CeF ₃ /CdS	$3kT/e < V < 1B$	12
CeF ₃ /CdS	$1 < V < 1,8 B$	21

Анализ прохождения носителей заряда через энергетический барьер в прямом направлении на прямых изгибах показывает, что большие значения индекса неидеальности и наклон прямых участков $\Delta \ln(I)/\Delta V$ практически не зависят от температуры. При этом доминирующим механизмом переноса тока в области прямых смещений ($3kT/e < V < 1 V$) можно считать многоступенчатые туннельно-рекомбинационные процессы с участием поверхностных состояний на границе CeF₃/CdS и прямого смещения, ток определяется следующим выражением [8]:

$$I = B(\exp^{-\alpha\phi_0(T)})\exp(\alpha eV) = I_0 \exp(\alpha eV) \quad (2)$$

где α -характеристика материала, B - значение, слабо зависящее от температуры и напряжения, ϕ_0 - высота потенциального барьера,

$I_0 = B(\exp \alpha\phi_0(T))$ - ток сдвига, который не зависит от приложенного напряжения. Как видно из выражения (2) наклон $\Delta \ln(I)/\Delta V$ начальных участков прямых ветвей VAX , показанных на рисунке 4, определяет коэффициент α , который принимает значение 3,36 эВ-1. Наклон прямых сечений $\Delta \ln(I)/\Delta V$ с дальнейшим увеличением наклона вперед $U > 1V$ также не зависит от температуры. Небольшой постоянный наклон экспериментальных зависимостей $\ln(I) = f(V)$ при различных температурах (большой индекс неидеальности $n \approx 21$) можно рассматривать как свидетельство туннельного характера механизма переноса тока. Учитывая влияние последовательного сопротивления, формула Ньюмана [9] описывается областью космического заряда для очень больших изгибов, достаточно тонких, чтобы туннелировать напрямую; для механизма туннелирования тока:

$$I = I_t^0 \exp(\beta T) \cdot \exp[\alpha(V - IR_s)] \quad (3)$$

где I_t^0 , α , β - константы. Экспериментальное значение $\alpha = 3,36$ было определено из зависимости $\ln(I) = f(V - IR_s)$

$$\ln \ln(I) + \alpha IR_s = \ln \ln(I_t) + \alpha V \quad (4)$$

- где $I_t = I_t^0 \exp(\beta T)$ сдвиг тока.

Как видно из последнего выражения, зависимости $\ln(I) + \alpha IR_s = f(V)$ должны быть прямыми, что и наблюдается в реальности (рис.5). Экстраполируя прямые пересечения с осью y , мы определяем значение $\ln(I_t)$. Температурная зависимость туннельного тока при $V = 0$ в линейна, что позволило определить коэффициенты $I_t^0 = 7,22 \cdot 10^{-6} A$, $\beta = 19,6 \cdot 10^{-3} K^{-1}$.

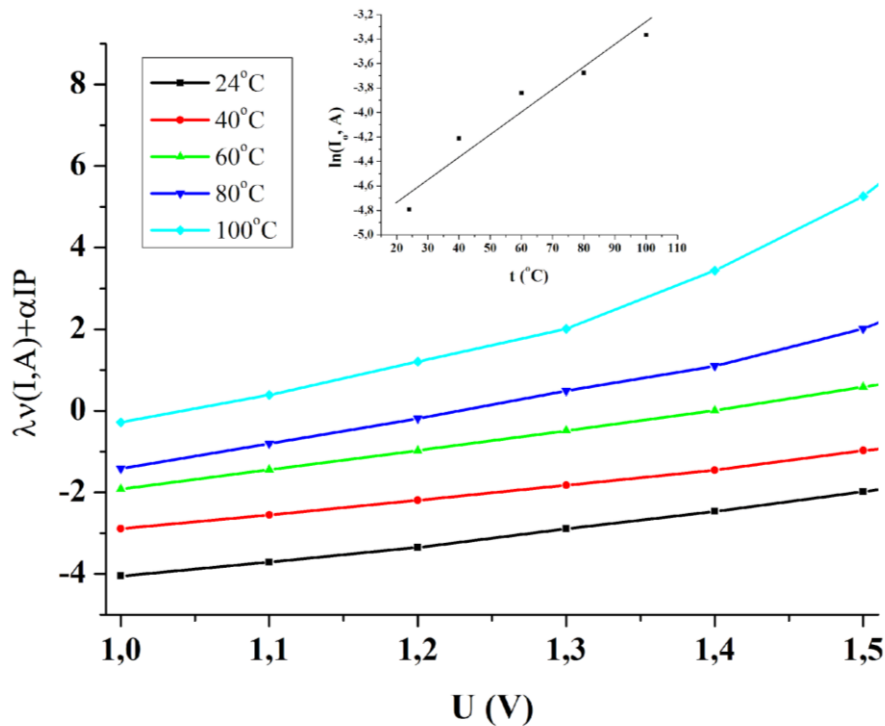


Рисунок 5. Прямые ветви гетеросоединения с изгибом $U > 1$ В с учетом эффекта последовательного сопротивления. На вставке показан ток сдвига как функция температуры.

Анализ механизмов токопереноса в тонкослойных гетероструктурах, исследованных в обратном направлении (рис. 6), показывает, что зависимость $I_{rev}(V)$ в области низких напряжений ($0,12 < |V| < 0,5V$) $I_{rev}(V)$ хорошо описывается каркасная модель Френкеля-Пула. Суть происходящих при этом процессов заключается в термическом разделении, облегчаемом электрическим полем носителей заряда, захваченных поверхностными ловушками [10]. Наличие достаточно сильного электрического поля в переходной области подтверждается высокой величиной контактной разности потенциалов ($V_{bi} = 2,16$ В $T=295$ К).

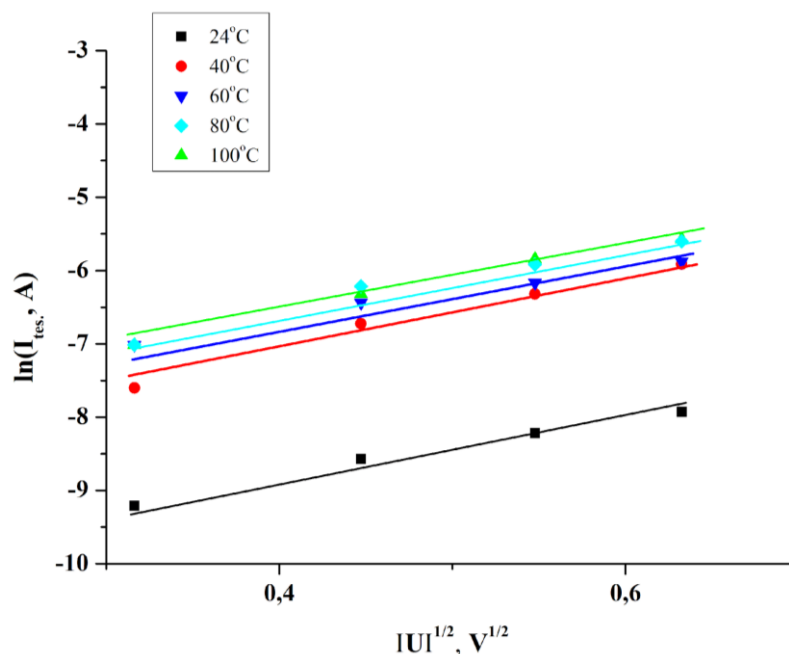


Рисунок 6. Зависимость $I_{rev} = f(|V|^{1/2})$, которая характеризуется эмиссией Френкеля-Пула через гетеросоединение $CeF_3/n-CdS$.

В этом случае выражение, связывающее величину обратного тока с приложенным напряжением, имеет следующий вид [10], [11], [12]:

$$I_{rev} \propto |V| \exp \left[2\beta \left(\frac{|V|}{T} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (5)$$

где β — константа, зависимость обратного тока от напряжения ($0,12 < |V| < 0,6V$), построенная в координатах $\ln(I_{rev})$ от $|V|^{1/2}$, показана на рис. 6 и хорошо аппроксимируется, прямые линии подтверждают правильность механизма передачи тока. Правда, в случае резкого перехода с обратным смещением обратные ветви ВАХ на рис. 7 представляют собой прямые линии в координатах $\ln(I_{rev}^t) = f(\phi_0 - eV)^{1/2}$ согласно [13], [14], [15], обратные направления подтверждают доминирующий туннельный механизм проводимости тока в области $0,5 < V < 2V$.

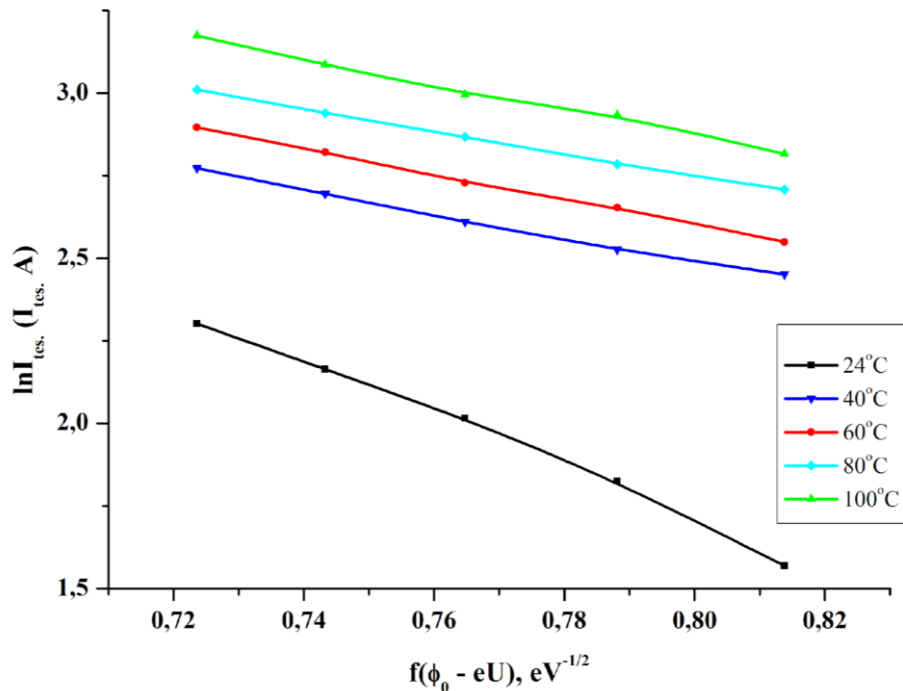


Рисунок 7. Обратные I-V характеристики гетеросоединений в полулогарифмической шкале.

Таким образом, из анализа температурных зависимостей прямых сеток ВАХ характеристики гетероструктур можно сделать вывод, что доминирующим механизмом передачи тока в низших звеньях ($3kT/e < V < 1 B$) является многоступенчатая туннельная рекомбинация и процессы, связанные с состояниями поверхности CeF_3/CdS . При больших изгибах ($1 < V < 1,5 B$) доминирующим механизмом проведения тока является туннелирование, описываемое формулой Ньюмана. Основными механизмами переноса носителей заряда в обратном направлении являются ($0,12 < |V| < 0,6 Om$) эмиссия Френкеля-Пулла и ($0,5 < |V| < 1,5 Om$) туннелирование через потенциальный барьер.

Список использованной литературы.

1. С.О. Саидов, М. Жўраев, Ж. Камолов.//PEDAGOGS international research journal.-Volume-6.-Issue-1.-March-2022.-P.-409-414.-www.pedagoglar.uz.
2. S.O. Saidov, J.J.O'. Kamolov.// International Journal for Innovative Engineering and Management Research. V.-10. – Issue-4. –April. -2021. – P. 266-268.
3. Файзиёв Ш. Ш. и др. Композицион копламаларнинг акс эттириш спектрларини ўлчаш, селективлик коэффициентини аниқлаш //Science and Education. – 2022. – Т. 3. – №. 4. – С. 401-404.
4. Саидов С. О. и др. Анализ влияния толщины прозрачного проводящего покрытия и температуры отжига на оптические и электрофизические свойства покрытия на примере ZN (AL) O (AZO) //Results of National Scientific Research. – 2022. – Т. 1. – №. 2. – С. 111-120.
5. Atoyevich T. A. et al. Diod rejimida ulangan maydon tranzistoriga yorug'lik ta'sirini o'rganish //Results of National Scientific Research. – 2022. – Т. 1. – №. 2. – С. 106-110.
6. Sadikovich N. E. et al. Energy-saving and environmentally friendly technologies for vulcanization of elastomeric compositions //Results of National Scientific Research. – 2022. – Т. 1. – №. 2. – С. 101-105.
7. Саидов С. О. и др. Вакуумланган куёш иссиқлик қабул қилғичлар учун селективлик коэффициентини аниқлаш билан композицион копламаларни ишлаб чиқиш //international scientific research CONFERENCE. – 2022. – Т. 1. – №. 3. – С. 18-22.

8. Olimovich S. S. et al. Higher education and teaching modern physics in it //international journal of social science & interdisciplinary research issn: 2277-3630 Impact factor: 7.429. – 2022. – Т. 11. – №. 04. – С. 73-76.
9. Kamolov J., Saidov S. Разработка математической модели нестационарного процесса нагрева и охлаждения тонкой пластинки с керметным ПОКРЫТИЕМ //Science and innovation. – 2022. – Т. 1. – №. А6. – С. 626-635.
10. Kamolov J., Saidov S. Селективно-поглощающие покрытия на основе металлокерамических МАТЕРИАЛОВ //Science and innovation. – 2022. – Т. 1. – №. А6. – С. 655-663.
11. Olimovich S. S., Ugli K. Z. J. To Secure Your Paper As Per UGC Guidelines We Are Providing A Electronic Bar Code.
12. H. Kostein, R. Jost, W. Lems. “Optical and electrical properties of doped In₂O₃ films” // Physica Status Solidi (a). – 1975. –Vol. 29. –Issue 1. –P. 87 – 93.
13. S. Niyogi, E. Bekyarova, M.E. Itkis, J.L. Mc Williams, M.A. Hamon, R.C. Haddon. “Solution Properties of Graphite and Graphene”// J. Am. Chem. Soc. –2006. –Vol. 128. Issue 24. –P. 7720 – 7721.
14. В.В. Брус, М.И. Илащук, З.Д. Ковалюк, П.Д. Марьянчук, К.С. Ульяницкий, Б.Н. Грицюк. “Механизмытокопереносаванизотипныхгетеропереходах n-TiO₂/p-CdTe” // Физикаитехникаполупроводников. –2011. –Т. 45. –Вып. 8. –С. 1109 – 1114.
15. Б.Л. Шарма, Р.К. Пурохит. Полупроводниковые гетеропереходы. –М., Сов. радио, 1979. [Пер. сангл.: V.L. Sharma, R.K. Purohit. Semiconductor heterojunctions. Pergamon Press, 1974].
16. А. Фаренбрух, Р. Бьюб. Солнечные элементы: Теория и эксперимент. –М., Энергоатомиздат, 1987. [Пер. сангл.: A.L. Fahrenbruch, R.H. Bube. Fundamentals of solar cells. Photovoltaic solar energy conversion. –N.Y., 1983].
17. S.M. Sze, K.Ng. Kwok. Physics of Semiconductor devices. –New Jersey: Wiley, 2007.
18. A.G. Milnes, D.L. Feucht. Metal-semiconductor Junctions. –N.Y.: Academic Press, 1972.
19. M.N. Solovan, V.V. Brus, P.D. Maryanchuk, M.I. Iashchuk, Z.D. Kovalyuk. “Temperature dependent electrical properties and barrier parameters of photosensitive heterojunctions n-TiN/p-Cd_{1-x}Zn_xTe” // Semicond. Sci. Techn. – 2015. –Vol. 30. –№ 7. –Art. 075006.
20. A.R. Riben, D.L. Feucht. “nGeGaAs Heterojunctions” // Sol. St. Electron. –1966. –Vol. 9. –Issues 11 – 12. –P. 1055 – 1065.
21. A.R. Riben, D. L. Feucht. “Electrical Transport in nGe-pGaAs Heterojunctions” // Int. J. Electron. –1966. –Vol. 20. – Issue 6. –P 583 – 599.
22. М.Н. Солован, В.В. Брус, П.Д. Марьянчук. “Изотипная поверхностно-барьерная гетероструктура n-TiN/n-Si” // Физика и техника полупроводников. –2014. –Т. 48. –Вып. 2. –С. 232 – 236.