

СПЕКТР КОЭФФИЦИЕНТА ПОГЛОЩЕНИЯ МЕЖДУ РАЗРЕШЕННЫМИ ЗОНАМИ В АМОРФНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Икрамов Р.Ф., Нуриддинова М.А., Султанов Б.К., Холмирзаев О.Т

Наманганский инженерно-технологический институт,

г.Наманган ул.Касансай д.7

rgikramov@mail.ru

Аннотация: Методом приближения Дэвиса-Мотта по формуле Кубо-Гринвуда получен аналитический вид спектра коэффициента поглощения между разрешенными зонами в аморфных полупроводниках. Определены коэффициент пропорциональности и энергетическая ширина щели подвижности. Сравнивая расчетные и экспериментальные результаты спектра поглощения между разрешенными зонами, получена новая формула, определяющая распределения плотности состояний электронов в валентной зоне.

Ключевые слова: аморфные полупроводники, параболические разрешенные зоны, формула Кубо-Гринвуда, метод приближения Дэвиса-Мотта, оптические переходы электронов между разрешенными зонами, спектр коэффициента поглощения между разрешенными зонами, энергетическая ширина щели подвижности, распределение плотности состояний электронов.

Спектра коэффициента оптического поглощения аморфных полупроводников можно рассчитать по методу приближения Дэвиса-Мотта из формулы Кубо-Гринвуда [1].

$$\alpha(\hbar\omega) = B \int_{\varepsilon_0 - \hbar\omega}^{\varepsilon_0} g(\varepsilon)g(\varepsilon + \hbar\omega) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega}, \quad (1)$$

здесь коэффициент пропорциональности равно на $B = \frac{8\pi^4 e^2 \hbar^2 a}{nc(m^*)^2}$, где a - среднее расстояние между атомами полупроводника, n - показатель преломления полупроводника, c - скорость света в вакууме, m^* - эффективная масса электрона в валентной зоне и в зоне проводимости полупроводника, \hbar - постоянная Планка, ω - частота поглощенных фотонов, ε_0 - энергетическое положение точки пересечения экспоненциальных хвостов разрешенных зон, $g(\varepsilon)$ - и $g(\varepsilon + \hbar\omega)$ -

распределения плотностей начального и конечного состояний электронов, участвующих в оптическом переходе.

Известно, поглощения между разрешенными зонами происходит тогда, когда энергия фотонов, больше чем от энергетической ширины щели (E_g) подвижности (то есть $\varepsilon_C - \varepsilon_V = E_g \leq \hbar\omega$). В этом случае одновременно происходит следующие оптические переходы электронов: из «хвоста» валентной зоны в зону проводимости, между разрешенными зонами и из валентной зоны в «хвост» зоны проводимости [2] (рис. 1). Поскольку коэффициент поглощения является аддитивной величиной [3], суммарный коэффициент поглощения состоит из суммы парциальных коэффициентов поглощения, обусловленных вышеприведенными оптическими переходами электронов. Если формулу Кубо-Гринвуда разделить соответственно для этих переходов, тогда получим следующее выражение:

$$\alpha(\hbar\omega) = B \int_{\varepsilon_0 - \hbar\omega}^{\varepsilon_0} g(\varepsilon)g(\varepsilon + \hbar\omega) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} = B \int_{\varepsilon_V}^{\varepsilon_0} g(\varepsilon)g(\varepsilon + \hbar\omega) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} + B \int_{\varepsilon_C - \hbar\omega}^{\varepsilon_V} g(\varepsilon)g(\varepsilon + \hbar\omega) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} + B \int_{\varepsilon_0 - \hbar\omega}^{\varepsilon_C - \hbar\omega} g(\varepsilon)g(\varepsilon + \hbar\omega) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} = \alpha_1(\hbar\omega) + \alpha_2(\hbar\omega) + \alpha_3(\hbar\omega) \quad (2)$$

В этом выражении $\alpha_i(\hbar\omega)$ - парциальные коэффициенты поглощения, определенные следующими оптическими переходами электронов: $\alpha_1(\hbar\omega)$ - из «хвоста» валентной зоны в зону проводимости, $\alpha_2(\hbar\omega)$ - между разрешенными зонами, $\alpha_3(\hbar\omega)$ -из валентной зоны в «хвост» зоны проводимости.

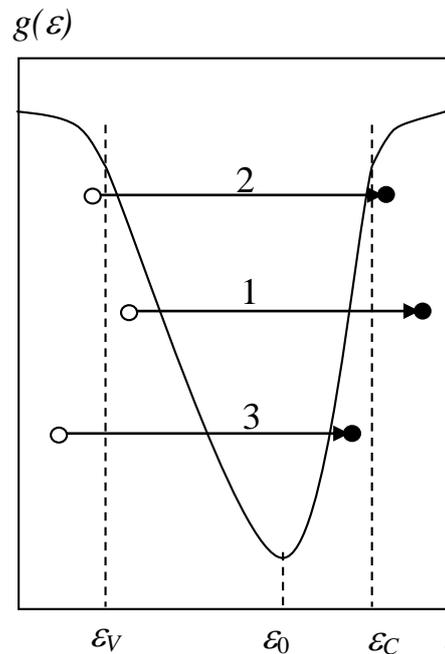


Рис. 1. Виды оптических переходов электрона, когда энергия поглощенных фотонов больше чем ширины щели подвижности ($\varepsilon_C - \varepsilon_V = E_g \leq \hbar\omega$) в аморфных полупроводниках: 1- из хвоста валентной зоны в зону проводимости, 2- между разрешенными зонами, 3- из валентной зоны в хвост зоны проводимости.

Распределение плотности состояний электронов в аморфных полупроводниках можно разделить на три типа в зависимости от их энергетического положения: нелокализованные в валентной зоне и в зоне проводимости, локализованные в «хвостах» зон, расположенные в щели подвижности, и локализованные в дефектах структурной сетки (оборванные связи, дефекты). Энергетическое распределение плотности состояний электронов на краях разрешенных зон имеет степенную, а на «хвостах» этих зон экспоненциальную зависимость и на дефектах подчиняется распределению Гаусса [4]. Имея в виду этого, в работе [5] выражении зависимости плотностей состояний электронов от энергии в аморфных полупроводниках выбрали следующих видах: для разрешенных зон соответственно:

$$g(\varepsilon) = N(\varepsilon_V) \left(\frac{\varepsilon_C - \varepsilon}{E_g} \right)^{n_1}, \quad \text{здесь } \varepsilon \leq \varepsilon_V, \quad (3)$$

$$g(\varepsilon) = N(\varepsilon_C) \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_V}{E_g} \right)^{n_2}, \quad \text{здесь } \varepsilon_C \leq \varepsilon, \quad (4)$$

где $N(\varepsilon_V) = N(\varepsilon_C) = 10^{22} \text{ эВ}^{-1} \text{ см}^{-3}$ [6] эффективные значение плотности электронных состояний в валентной зоне и в зоне проводимости, соответственно, ε_V - верхняя граница валентной зоны, ε_C - нижняя граница зоны проводимости.

Обычно, при проведении теоретических расчетов энергетическая зависимость плотности электронных состояний на границах разрешенных зон является параболическим [7], поэтому степени равны на $n_1 = 1/2$ и $n_2 = 1/2$.

В работе [8] распределения электронных состояний в экспоненциальных «хвостах» разрешенных зон написано следующими выражениями: для «хвоста» валентной зоны

$$g(\varepsilon) = N(\varepsilon_V) \exp(-\beta_1(\varepsilon - \varepsilon_V)), \quad \text{здесь } \varepsilon_V < \varepsilon < \varepsilon_0, \quad (5)$$

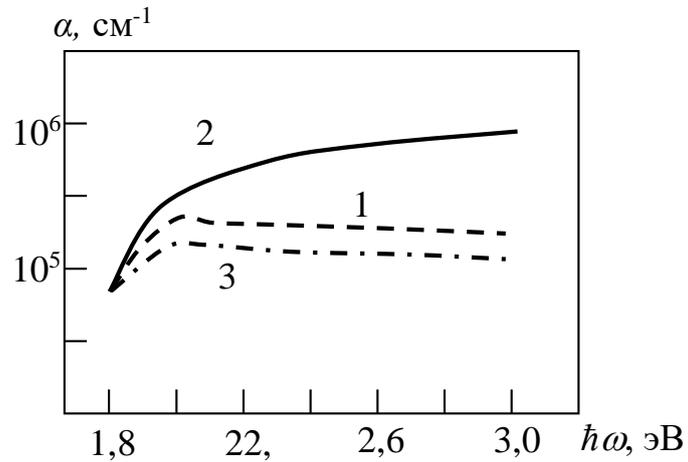


Рис. 2. Спектры парциальных коэффициентов поглощения когда, энергия поглощенных фотонов больше чем ширины щели подвижности аморфных полупроводников, соответствующие следующим оптическим переходам электронов: 1- $\alpha_1(\hbar\omega)$ – из хвоста валентной зоны в зону проводимости, 2- $\alpha_2(\hbar\omega)$ – между разрешенными зонами и 3- $\alpha_3(\hbar\omega)$ – из валентной зоны в хвост зоны проводимости.

а для «хвоста» зоны проводимости

$$g(\varepsilon) = N(\varepsilon_C) \exp(\beta_2(\varepsilon - \varepsilon_C)), \quad \text{здесь } \varepsilon_0 < \varepsilon < \varepsilon_C \quad (6)$$

В этих формулах β_1 - и β_2 - являются параметрами, которые определяют экспоненциальную кривизну «хвостов» разрешенных зон, соответственно.

Согласно результатам расчетов, выполненных путем подстановки (3), (4), (5) и (6) в выражение (2), показано, что значению коэффициента поглощения фундаментальной области в основном определяют $\alpha_2(\hbar\omega)$, т.е. коэффициент поглощения между разрешенными зонами (рис 2). Поэтому коэффициент поглощения между разрешенными зонами можно написать следующим образом:

$$\alpha(\hbar\omega) = B \int_{\varepsilon_C - \hbar\omega}^{\varepsilon_V} g_1(\varepsilon) g_2(\varepsilon + \hbar\omega) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} \quad (7)$$

где $g_1(\varepsilon)$ - плотность электронных состояний в валентной зоне, а $g_2(\varepsilon + \hbar\omega)$ - плотность электронных состояний в зоне проводимости. В работе [2] подставляя (3) и (4) в (7), получено следующее выражение для коэффициента межзонного поглощения при параболическом распределении электронных состояний на краях разрешенных зонах:

$$\alpha(\hbar\omega) = \frac{A}{4E_g \hbar\omega} \left(2(\hbar\omega - E_g) \sqrt{E_g \hbar\omega - (E_g + \hbar\omega)^2} \arctg \left(\frac{E_g - \hbar\omega}{\sqrt{4E_g \hbar\omega}} \right) \right). \quad (8)$$

где $A = N(\varepsilon_V)N(\varepsilon_C)B$.

В работе [9] представлены экспериментальные спектры коэффициента межзонного поглощения аморфного углерода (a-C), полученного методом «магнетронного напыления» (рис. 3). Применяя уравнение Тауца к экспериментальным результатам [10]:

$$\sqrt{\alpha \hbar\omega} = \sqrt{A}(\hbar\omega - E_g) \quad (9)$$

проведенные расчеты показали, что энергетическая ширина щели подвижности этого материала составляет $E_g \approx 1$ эВ, а согласно методике определения начальной точки спектра межзонного поглощения, $E_g \approx 1,2$ эВ. По нашему мнению, чтобы определить этого параметра, необходимо скорректировать результаты расчета, полученные по формуле (8) и экспериментальные данные, рассматривая коэффициент пропорциональности (A) и энергетическую ширину щели подвижности (E_g) в качестве подгоночного параметра.

Результаты расчетов, выполненные этим методом, также показаны на рисунке 3 (непрерывная кривая). Экспериментальные результаты получение для $a-C$ и результаты расчетов, полученные по формуле (8), показали, что они соответствуют при $A=6,19 \cdot 10^5 \text{ см}^{-1}$ и $E_g = 1,235 \text{ эВ}$.

Из уравнения (7) видно, что коэффициент межзонного поглощения сильно зависит от плотности электронных состояний в разрешенных зонах. Поэтому мы предполагаем, что по этой

формуле можно рассчитать Распределение плотности состояний электронов в разрешенных зонах. В работе [11] приведено следующее выражение для дифференцирования интеграла функции двух переменных от одной переменной:

$$\frac{d}{dy} \int_{\alpha(y)}^{\beta(y)} f(x, y) dx = \int_{\alpha(y)}^{\beta(y)} \frac{\partial f(x, y)}{\partial y} dx + \frac{\partial \beta(y)}{\partial y} f(\beta(y), y) - \frac{\partial \alpha(y)}{\partial y} f(\alpha(y), y) \quad (10)$$

Используя эту формулу, дифференцируем формулу (7) по энергии поглощенных фотонов ($\hbar\omega$) и получаем следующее выражение:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \alpha(\hbar\omega)}{\partial \hbar\omega} &= \frac{\partial}{\partial \hbar\omega} B \left(\int_{\varepsilon_c - \hbar\omega}^{\varepsilon_v} \frac{g_1(\varepsilon)g_2(\varepsilon + \hbar\omega)}{\hbar\omega} d\varepsilon \right) = B \left(\int_{\varepsilon_c - \hbar\omega}^{\varepsilon_v} \frac{\partial}{\partial \hbar\omega} \left(\frac{g_1(\varepsilon)g_2(\varepsilon + \hbar\omega)}{\hbar\omega} \right) d\varepsilon + \right. \\ &+ \left. \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial \hbar\omega} \frac{g_1(\varepsilon_v)g_2(\varepsilon_v + \hbar\omega)}{\hbar\omega} - \frac{\partial(\varepsilon_c - \hbar\omega)}{\partial \hbar\omega} \frac{g_1(\varepsilon_c - \hbar\omega)g_2(\varepsilon_c - \hbar\omega + \hbar\omega)}{\hbar\omega} \right) = \\ &= \frac{B}{\hbar\omega} \int_{\varepsilon_c - \hbar\omega}^{\varepsilon_v} g_1(\varepsilon) \frac{\partial}{\partial \hbar\omega} g_2(\varepsilon + \hbar\omega) d\varepsilon - \frac{\alpha(\hbar\omega)}{\hbar\omega} + \frac{B}{\hbar\omega} g_1(\varepsilon_c - \hbar\omega)g_2(\varepsilon_c). \end{aligned} \quad (11)$$

Подставляя (3) и (4) в эту формулу получаем следующую выражению:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \alpha(\hbar\omega)}{\partial \hbar\omega} &= \frac{B}{\hbar\omega} \int_{\varepsilon_c - \hbar\omega}^{\varepsilon_v} N(\varepsilon_v) \left(\frac{\varepsilon_c - \varepsilon}{E_g} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{\partial}{\partial \hbar\omega} N(\varepsilon_c) \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_v + \hbar\omega}{E_g} \right)^{\frac{1}{2}} d\varepsilon - \frac{\alpha(\hbar\omega)}{\hbar\omega} + \\ &+ \frac{B}{\hbar\omega} N(\varepsilon_v) \left(\frac{\varepsilon_c - \varepsilon_c + \hbar\omega}{E_g} \right)^{\frac{1}{2}} N(\varepsilon_c) \left(\frac{\varepsilon - \hbar\omega - \varepsilon_v + \hbar\omega}{E_g} \right)^{\frac{1}{2}} = \\ &= \frac{A(\hbar\omega - E_g)}{2E_g \hbar\omega} \operatorname{arctg} \left(\frac{\hbar\omega - E_g}{2\sqrt{E_g \hbar\omega}} \right) - \frac{\alpha(\hbar\omega)}{\hbar\omega} + \frac{A}{\hbar\omega N(\varepsilon_v)} N(\varepsilon_v) \left(\frac{\hbar\omega}{E_g} \right)^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (12)$$

в выражении (12) обозначаем:

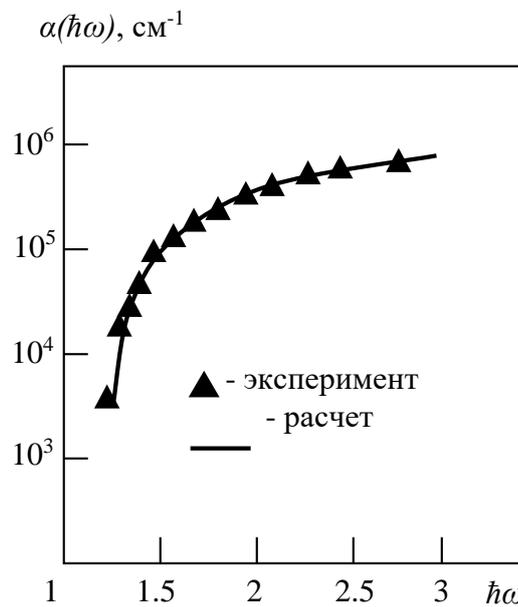


Рис. 3. Спектры межзонного поглощения определение из эксперимента [8] и расчетные данные получение по формуле (8).

$$g_1(\varepsilon) = N(\varepsilon_V) \left(\frac{\hbar\omega}{E_g} \right)^{\frac{1}{2}} = N(\varepsilon_V) \left(\frac{\varepsilon_C - \varepsilon}{E_g} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

применяя (13), вычислим, какое энергетическое состояние соответствуют на энергию $\hbar\omega$:

$$\hbar\omega = \varepsilon_C - \varepsilon; \quad \varepsilon = \varepsilon_C - \hbar\omega = \varepsilon_C - \varepsilon_V + \varepsilon_V - \hbar\omega = \varepsilon_V + (E_g - \hbar\omega).$$

Поскольку в этом выражение $E_g - \hbar\omega < 0$ и $\varepsilon \leq \varepsilon_V$, то ε определяет расположение энергетического состояния в валентной зоне. Следовательно, из уравнения (12) для распределения плотности электронных состояний валентной зоне, получаем следующее выражение:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \alpha(\hbar\omega)}{\partial \hbar\omega} &= \frac{A(\hbar\omega - E_g)}{2E_g \hbar\omega} \operatorname{arctg} \left(\frac{\hbar\omega - E_g}{2\sqrt{E_g \hbar\omega}} \right) - \frac{\alpha(\hbar\omega)}{\hbar\omega} + \frac{A}{\hbar\omega N(\varepsilon_V)} g_1(\varepsilon) \\ g_1(\varepsilon) &= \frac{\hbar\omega N(\varepsilon_V) \left(\frac{\partial \alpha(\hbar\omega)}{\partial \hbar\omega} + \frac{\alpha(\hbar\omega)}{\hbar\omega} - \frac{A}{2} \frac{(\hbar\omega - E_g)}{\hbar\omega E_g} \operatorname{arctg} \frac{\hbar\omega - E_g}{2\sqrt{E_g \hbar\omega}} \right)}{A} \end{aligned} \quad (14)$$

Запишем это уравнение, используя средние значение коэффициента межзонного поглощения и энергии поглощенных фотонов в следующем виде:

$$\begin{aligned} g_i(\varepsilon) &= \frac{1}{A} \left(N(\varepsilon_V) \left(\frac{\hbar\omega_i + \hbar\omega_{u+1}}{2} \right) \left(\frac{\alpha_{i+1}(\hbar\omega) - \alpha_i(\hbar\omega)}{\hbar\omega_{i+1} - \hbar\omega_i} + \frac{\alpha_{i+1}(\hbar\omega) + \alpha_i(\hbar\omega)}{\hbar\omega_i + \hbar\omega_{u+1}} - \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \frac{A \left(E_g + \frac{\hbar\omega_i + \hbar\omega_{u+1}}{2} \right)}{E_g (\hbar\omega_i + \hbar\omega_{u+1})} \operatorname{arctg} \frac{E_g - \frac{\hbar\omega_i + \hbar\omega_{u+1}}{2}}{2\sqrt{E_g \frac{\hbar\omega_i + \hbar\omega_{u+1}}{2}}} \right) \right) \end{aligned} \quad (15)$$

где $\alpha_i(\hbar\omega)$ - и $\hbar\omega_i$ - экспериментальные значение коэффициента межзонного поглощения и энергии поглощенных фотонов, соответственно.

Из уравнения (15) следует, что если известна экспериментальная спектральная характеристика коэффициента межзонного поглощения, то с помощью этого выражения можно определить распределение плотности состояний электронов в валентной зоне.

На рис.4 показано распределение плотностей состояний электронов в валентной зоне, определенное с использованием экспериментальных спектральных характеристик коэффициента поглощения между разрешенными зонами, показанного на рис.3.

Таким образом, в данной работе, исследован аналитический вид спектра коэффициента поглощения между разрешенными зонами полученного для параболических разрешенных зон аморфных полупроводников. Используя спектра коэффициента поглощения между разрешенными зонами, определенная по этой работе и эксперимента, показана возможность определения плотность электронных состояний в валентной зоне. Определено распределение плотности состояний электронов расположенные, в валентной зоне сравнивая расчетные и экспериментальные результаты получение для спектра межзонного поглощения. Поскольку поглощение между разрешенными зонами характерно для всех полупроводников, результаты, полученные в этом исследовании, также могут быть использованы кристаллическим, поликристаллическим и микрокристаллическим полупроводникам.

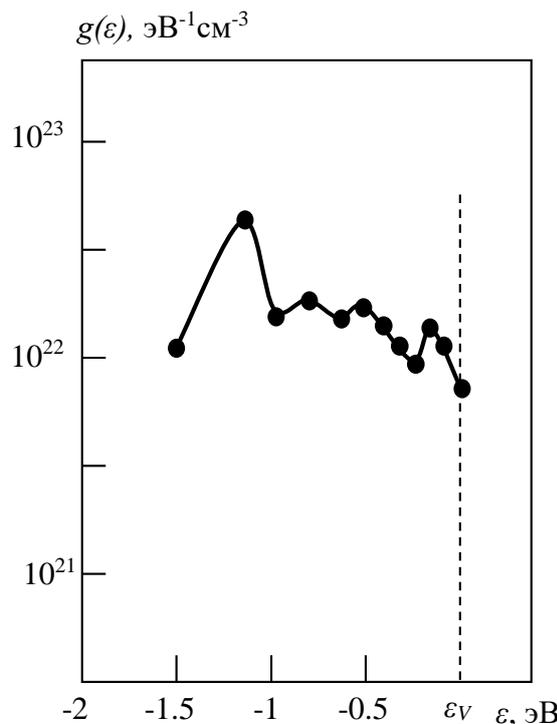


Рис. 4. Расчетные данные плотность электронных состояний в валентной зоне аморфного углерода (*a-C*) получение из формулы (15).

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Bozorov, Kh N., O. O. Mamatkarimov, and B. T. Abdulazizov. "Electric and ionic conductivity of potassium antimony tungstate with addition of alkali metals." *«Узбекский физический журнал»* 24.2 (2022): 129-132.
2. Uktamaliyev, B. I., et al. "Determination of transport properties for polymer electrolytes containing LiTf and MgTf2 salts." *Molecular Crystals and Liquid Crystals* 763.1 (2023): 17-27.
3. Mamatkarimov, O. O., R. Khamidov, and A. Abdukarimov. "The relative current change, concentration, and carrier mobility in silicon samples doped nickel and at pulse hydrostatic pressure." *Materials Today: Proceedings* 17 (2019): 442-445.
4. Uktamaliyev, B. I., et al. "Determination of transport properties for polymer electrolytes containing LiTf and MgTf2 salts." *Molecular Crystals and Liquid Crystals* 763.1 (2023): 17-27.
5. Mamatkarimov, O., B. Uktamaliyev, and A. Abdukarimov. "Temperature dependence of active and reactive impedances of PMMA-EC-LITF2 solid polymer electrolytes." *НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НОВОГО УРОВНЯ И СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ* (2022): 366.

6. Manjuladevi, R., et al. "Preparation and characterization of blend polymer electrolyte film based on poly (vinyl alcohol)-poly (acrylonitrile)/MgCl₂ for energy storage devices." *Ionics* 24 (2018): 1083-1095.
7. Mamatkarimov, O., A. Abdugarimov, and B. Uktamaliyev. "ABOUT THE CHARACTERISTICS OF MULTILAYER THIN-FILM STRUCTURES WITH DYES BASED ON TITANIUM DIOXIDE." *Euroasian Journal of Semiconductors Science and Engineering* 3.40 (2021): 26-29.
8. Odiljon, Mamatkarimov, Uktamaliyev Bekzod, and Abdullaziz Abdugarimov. "Determination of ionic conductivity of polymer electrolytes in li-ion batteries using electrochemical impedance spectroscopy." *ACADEMICIA: An International Multidisciplinary Research Journal* 11.7 (2021): 141-146.
9. Ikramov, R. G., et al. "Calculation of the interband absorption spectra of amorphous semiconductors using the Kubo-Greenwood formula." *Journal of Applied Science and Engineering* 25.5 (2021): 919-924.
10. Ikramov, Rustamjon G., et al. "Calculation of the Density of the Distribution of Electronic States in the Conduction Band from the Fundamental Absorption Spectra of Amorphous Semiconductors." *East European Journal of Physics* 4 (2023): 153-158.
11. Ikramov, Rustamjon G., et al. "Dangerous Bonds Individual of Hydrogenated Amorphous Silicon and Defect Absorption Spectra." *East European Journal of Physics* 4 (2023): 244-250.
12. Абдулазизов, Б. Т., et al. "Дефекты, характерные для гидрогенизированных аморф-ных полупроводников, и спектры дефектного поглощения." «*Узбекский физический журнал*» 25.3 (2023).
13. Ikramov, R. G., et al. "Kubo-greenwood Formula For The Exponential Absorption Region Of Amorphous Semiconductors And Distribution Of The Density Of Electronic States In The Tail Of The Conduction Band." *Journal of Applied Science and Engineering* 26.8 (2022): 1167-1171.
14. Абдулазизов, Б. Т., et al. "Область экспоненциального поглощения аморфных полупроводников." «*Узбекский физический журнал*» 24.2 (2022): 96-99.
Икрамов, Рустамжон, et al. "СПЕКТРЫ КОЭФФИЦИЕНТА ДЕФЕКТНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ АМОРФНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ." *Scientific Collection «InterConf»* 107 (2022): 409-420.
15. Муминов, Х. А., Б. Султонов, and О. Т. Холмирзаев. "РАСЧЕТ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ЭЛЕКТРОННЫХ СОСТОЯНИЙ В ВАЛЕНТНОЙ ЗОНЕ ИЗ СПЕКТРА МЕЖЗОННОГО ПОГЛОЩЕНИЯ АМОРФНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ." *EDITOR COORDINATOR* (2021): 384.
16. Икрамов, Рустамжон, et al. "СПЕКТРЫ КОЭФФИЦИЕНТА ДЕФЕКТНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ АМОРФНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ." *Scientific Collection «InterConf»* 107 (2022): 409-420.
17. Mahmudovich, To'xliyev Mansur. "PAST POTENSIALLI QUYOSH QURITGICHLARNI SAMARADORLIGINI OSHIRISH." *Educational Research in Universal Sciences* 1.6 (2022): 79-86.

18. Yusupov, Elmurod Kuchkarboyevich. "STUDYING PROPERTIES OF ROTATIONAL STATES 156Gd."
19. Байматов, П. Ж., et al. "ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ХИМИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА НА ТЕПЛОЕМКОСТЬ КВАЗИДВУМЕРНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ГАЗА." *«Узбекский физический журнал»* 20.6 (2018).
20. Ravshanjon o'g, G'aybullayev Dostonbek. "QUYOSH ENERGIYASI VA UNDAN FOYDALANISH." *O'ZBEKISTONDA FANLARARO INNOVATSIYALAR VA ILMIY TADQIQOTLAR JURNALI* 2.19 (2023): 1574-1576.
21. Ikramov, Rustamjon G., et al. "Calculation of the Density of the Distribution of Electronic States in the Conduction Band from the Fundamental Absorption Spectra of Amorphous Semiconductors." *East European Journal of Physics* 4 (2023): 153-158.
22. Ikramov, Rustamjon G., et al. "Dangerous Bonds Individual of Hydrogenated Amorphous Silicon and Defect Absorption Spectra." *East European Journal of Physics* 4 (2023): 244-250.
23. Ikramov, R. G., et al. "Kubo-greenwood Formula For The Exponential Absorption Region Of Amorphous Semiconductors And Distribution Of The Density Of Electronic States In The Tail Of The Conduction Band." *Journal of Applied Science and Engineering* 26.8 (2022): 1167-1171.
24. Ikramov, Rustamzhon Gulomzhonovich, Mashkhura Anvarbekovna Nuriddinova, and Xurshid Adhamjon Muminov. "A new method for determining the density distribution of electronic states on the tail of the valence band of amorphous semiconductors $Se_x S_{1-x}$." *Optics and spectroscopy* 129.11 (2021): 1382-1386.
25. Икрамов, Р. Г., М. А. Нуриддинова, and Х. А. Муминов. "Вычисление плотности электронных состояний в валентной зоне из экспериментального спектра межзонного поглощения аморфных полупроводников." *Журнал прикладной спектроскопии* 88.3 (2021): 378-382.
26. Икрамов, Рустамжон Гуломжонович, Машхура Анварбековна Нуриддинова, and Хуршид Адхамжон уғли Муминов. "Новый метод определения распределения плотности электронных состояний в хвосте валентной зоны аморфных твердых растворов $Se_x S_{1-x}$." *Оптика и спектроскопия* 129.11 (2021): 1382-1386.
27. Ikramov, Rustam, et al. "Temperature Dependence of Urbach Energy in Non-Crystalline Semiconductors." *Optics and Photonics Journal* 10.9 (2020): 211-218.
28. Абдулазизов, Б. Т., et al. "Расчет распределения плотности электронных состояний в хвосте зоны проводимости аморфных полупроводников." *«Узбекский физический журнал»* 22.6 (2020): 344-349.
29. IKRAMOV, RUSTAM GULOMJONOVICH, MASHXURA ANVARBEKOVNA NURIDDINOVA, and KHURSHID ADHAMJON UGLI MUMINOV. "Parameters defining the interzonal absorption coefficient in amorphous semiconductors." *Journal of Applied Physical Science International* 12.1 (2021): 36-40.

30. Ikramov, R. G., M. A. Nuriddinova, and R. M. Jalalov. "Density of defect states and spectra of defect absorption in a-Si: H." *Ukrainian journal of physics* 64.4 (2019): 315-315.
31. Ikramov, R. G., M. A. Nuriddinova, and A. Muminov Kh. "Spectra of the coefficient of defect absorption and the energy position of defects in amorphous hydrogenated silicon." *International Journal of Multidisciplinary Trends* 1.1 (2019): 12.
32. Zaynobidinov, S., et al. "Infra-red absorption spectra of amorphous semiconductors." *Uzbekiston Fizika Zhurnali* 21.2 (2019): 88-92.
33. Ikramov, R. G., M. A. Nuriddinova, and A. Muminov Kh. "Spectra of the coefficient of defect absorption and the energy position of defects in amorphous hydrogenated silicon." *International Journal of Multidisciplinary Trends* 1.1 (2019): 12.
34. ZAYNOBIDINOV, S., et al. "Spectra of interband absorption and optical gap of amorphous semiconductors; Spektry mezhzonnogo pogloshcheniya i opticheskaya shchel'amorfnykh poluprovodnikov." *Uzbekiston Fizika Zhurnali* 15 (2013).
35. Zainobidinov, S., et al. "Distribution of electron density of states in allowed bands and interband absorption in amorphous semiconductors." *Optics and spectroscopy* 110 (2011): 762-766.
36. Zajnobidinov, S., et al. "Dependence of the Urbach energy on the Fermi level in A-Si: H films; Zavisimost'ehnergii Urbakha ot urovnya Fermi v plenkakh a-Si: H." *Ukrayins' kij Fyizichnij Zhurnal (Kyiv)* 53 (2008).
37. Zajnovidinov, S., et al. "Temperature effect in absorption spectra of amorphous semiconductors; Temperaturnyj ehffekt v spektrakh pogloshcheniya amorfnykh poluprovodnikov." *Ukrayins' kij Fyizichnij Zhurnal (Kyiv)* 53 (2008).
38. Qo'chqarov, B. X., A. Nishonov, and X. O. Qochqarov. "Scientific bulletin of Namangan State University,“." *The effect of tunneling gurrent on the speedd surface generation of charge garries* 1.7 (2020): 3-6.
39. Qo'chqarov, Bekzod Xoshimjonovich, Azizbek Nishonov, and Xoshimjon Ortiqovich Qo'chqarov. "The effect of tunneling current on the speed surface generation of charge carriers." *Scientific Bulletin of Namangan State University 2019y* 1.7 (2009): 3-6.
40. Usmanov, P. N., A. I. Vdovin, and A. N. Nishonov. "Investigating the Energies and Electrical Characteristics of the Negative Parity States of the ^{156}Gd Nucleus." *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics* 86.8 (2022): 918-923.
41. Усманов, П. Н., et al. "Энергия и структура октупольных состояний ядра ^{238}U ." *«Узбекский физический журнал»* 24.2 (2022): 90-95.
42. Arof, A. K., et al. "Investigation on morphology of composite poly (ethylene oxide)-cellulose nanofibers." *Materials Today: Proceedings* 17 (2019): 388-393.
43. Abdukarimov, Abdullaziz, et al. "Characteristics of dye-sensitized solar cells (DSSCs) using liquid and gel polymer electrolytes with tetrapropylammonium salt." *Optical and Quantum Electronics* 52 (2020): 1-15.

44. Abdukarimov, Abdullaziz, et al. "Influence of charge carrier density, mobility and diffusivity on conductivity–temperature dependence in polyethylene oxide–based gel polymer electrolytes." *High Performance Polymers* 34.2 (2022): 232-241.
45. Kuchkarov, B. H., et al. "Influence of all-round compression on formation of the mobile charge in lead-borosilicate glass structure." *American Institute of Physics Conference Series*. Vol. 2432. No. 1. 2022.
46. Uktamaliyev, B. I., et al. "Determination of transport properties for polymer electrolytes containing LiTf and MgTf₂ salts." *Molecular Crystals and Liquid Crystals* 763.1 (2023): 17-27.
47. Mamatkarimov, O. O., R. Khamidov, and A. Abdukarimov. "The relative current change, concentration, and carrier mobility in silicon samples doped nickel and at pulse hydrostatic pressure." *Materials Today: Proceedings* 17 (2019): 442-445.
48. Uktamaliyev, B. I., et al. "Determination of transport properties for polymer electrolytes containing LiTf and MgTf₂ salts." *Molecular Crystals and Liquid Crystals* 763.1 (2023): 17-27.
49. Abdukarimov, A. A., et al. "Dependence of the characteristics of dye-sensitized solar cells on amount tetrapropylammonium iodide." *«Узбекский физический журнал»* 22.4 (2020): 250-253.
50. Sultanov, A. M., A. A. Abdukarimov, and M. Z. Kufian. "Development of technology for creating high-voltage p₀–n₀ junctions based on GaAs." *Bulletin of the Karaganda University" Physics Series"* 112.4 (2023): 50-56
51. Abdukarimov, A. A., et al. "Characteristics of natural dye sensitized solar cells." *Molecular Crystals and Liquid Crystals* 767.1 (2023): 98-105.
52. Mamatkarimov, O., B. Uktamaliyev, and A. Abdukarimov. "Temperature dependence of active and reactive impedances of PMMA-EC-LITF₂ solid polymer electrolytes." *НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НОВОГО УРОВНЯ И СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ* (2022): 366.
53. Manjuladevi, R., et al. "Preparation and characterization of blend polymer electrolyte film based on poly (vinyl alcohol)-poly (acrylonitrile)/MgCl₂ for energy storage devices." *Ionics* 24 (2018): 1083-1095.
54. Mamatkarimov, O., A. Abdukarimov, and B. Uktamaliyev. "ABOUT THE CHARACTERISTICS OF MULTILAYER THIN-FILM STRUCTURES WITH DYES BASED ON TITANIUM DIOXIDE." *Euroasian Journal of Semiconductors Science and Engineering* 3.40 (2021): 26-29.
55. Yakubbaev, A. A., A. Abdukarimov, and S. H. Nazarov. "Application of pincent of spinal leaf (chlorophylle) as a natural die for paint sensitive sun element (DSSC)." *ACADEMICIA: An International Multidisciplinary Research Journal* 11.8 (2021): 185-188.
56. Odiljon, Mamatkarimov, Uktamaliyev Bekzod, and Abdullaziz Abdukarimov. "Determination of ionic conductivity of polymer electrolytes in li-ion batteries using electrochemical impedance spectroscopy." *ACADEMICIA: An International Multidisciplinary Research Journal* 11.7 (2021): 141-146.
57. Mamatkarimov, O., and A. Abdukarimov. "ABOUT THE CHARACTERISTICS OF MULTILAYER THIN-FILM STRUCTURES WITH DYES BASED ON

- TITANIUM DIOXIDE." *Euroasian Journal of Semiconductors Science and Engineering* 2.3 (2020): 28.
58. Abdugarimov, A. A. "UDK: 621.315. 592 MAIN ELECTROPHYSICAL CHARACTERISTICS OF DYE-SENSITIZED SOLAR CELLS (DSSCS)." *атты V Халықаралық ғылыми-тәжірибелік конференция.*
59. Корольков, В. И., and Александр Владимирович Рожков. "Исследование стабильности переключения высоковольтных субнаносекундных фотонно-инжекционных коммутаторов." *Письма в Журнал технической физики* 18.10 (1992): 26-31.
60. Sultanov, A. M., E. K. Yusupov, and R. G. Rakhimov. "Investigation of the Influence of Technological Factors on High-Voltage p₀-n₀ Junctions Based on GaAs." (2024).
61. Avrutin, E. A., Korol'Kov, V. I., ORLOV, B., Rozhkov, A. V., & Sultanov, A. M. (1992). Dynamic characteristics of high-power pulses generated in GaAs/AlGaAs superluminescent diodes. *Soviet physics. Semiconductors*, 26(4), 403-406.
62. Sultanov, A. M., & Mirzarayimov, J. Z. (2024). MAIN TECHNOLOGICAL FACTORS AFFECTING THE PROPERTIES OF LOW-DOPED LAYERS AND TRANSISTOR n⁺-p₀-n₀ STRUCTURES. *European Journal of Emerging Technology and Discoveries*, 2(3), 41-47.
63. Султанов, А. М., and Ж. З. Мирзарайимов. "ОСОБЕННОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ФОТОННОЕ-ИНЖЕКЦИОННЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ТИРИСТОРОВ ДЛЯ МОДУЛЯЦИИ УСИЛЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ГЕТЕРО ЛАЗЕРОВ." *Multidisciplinary Journal of Science and Technology* 4.3 (2024): 577-583.
64. Рожков, А. В., А. М. Султанов, and Х. Бозоров. "ГЕТЕРОПЕРЕХОДЫ МИКРОЭЛЕКТРОНИКЕ." *И ПРИКЛАДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ СОВРЕМЕННОЙ ФИЗИКИ FUNDAMENTAL AND APPLIED PROBLEMS OF MODERN PHYSICS* (2023): 115.