

4. Rasulov, V. R., Rasulov, R. Y., Mamatova, M. A., & Gofurov, S. Z. U. (2022). GENERALIZED MODEL FOR THE ENERGY SPECTRUM OF ELECTRONS IN TUNNEL-COUPLED SEMICONDUCTOR QUANTUM WELLS. EPRA International Journal of Multidisciplinary Research (IJMR), 8(12), 1-5.
5. Rasulov, V. R., Rasulov, R. Y., Mamatova, M. A., & Qosimov, F. (2022, December). Semiclassical theory of electronic states in multilayer semiconductors. Part 2. In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 2388, No. 1, p. 012158). IOP Publishing.
6. Расулов, В. Р., Расулов, Р. Я., Маматова, М. А., & Исомаддинова, У. М. (2022). К ТЕОРИИ ЭЛЕКТРОННЫХ СОСТОЯНИЙ В МНОГОСЛОЙНОЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ СТРУКТУРЕ. КВАЗИКЛАССИЧЕСКОЕ ПРИБЛИЖЕНИЕ. Universum: технические науки, (10-5 (103)), 24-31.
7. Расулов, Р. Я., Муминов, И. А., кизи Нисолмухамметова, Н. И., Кучкаров, М., & Кодиров, Н. (2021). КЛАССИФИКАЦИЯ МЕЖДУЗОННЫХ ТРЕХ ФОТОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДОВ В InSb. EDITORIAL BOARD, 608.
8. Rustamovich, R. V., Yavkachovich, R. R., Adhamovna, M. M., Qizi, K. M. N., & Dovlatboyevich, M. D. (2022). VOLT-AMPERE CHARACTERISTICS OF A THREE-LAYER SEMICONDUCTOR DIODE OF DOUBLE INJECTION. European science review, (5-6), 37-41.
9. Расулов, В. Р., Расулов, Р. Я., Муминов, И. А., & Нетьматов, Х. М. О. (2021). К ТЕОРИИ МЕЖДУЗОННОГО ДВУХФОТОННОГО ПОГЛОЩЕНИЯ ПОЛЯРИЗОВАННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В УЗКОЗОННОМ КРИСТАЛЛЕ. EDITOR COORDINATOR, 962.
10. Rasulov, R. Y., Akhmedov, B. B., Muminov, I. A., & Umarov, B. B. (2021). Crystals with tetrahedral and hexagonal lattices. Fergana. Classic.-2021, 10.
11. Rustamovich, R. V., Yavkachovich, R. R., Mamirzhonovich, E. I., Xurshidboyevich, Q. C. M., & Adxamovna, M. M. (2021). MATRIX ELEMENTS OF THREE PHOTONIC OPTICAL TRANSITIONS IN CRYSTALS OF CUBIC SYMMETRY. OPTICAL TRANSITIONS FROM THE SPIN-ORBITAL SPLITTING BAND TO THE CONDUCTION BAND. European Science Review.
12. Расулов, Р. Я., Эшболтаев, И. М., Кучкаров, М. Х., & Махситалиев, Б. (2021, November). ДЫРОЧНЫЕ СОСТОЯНИЯ В КВАНТОВОЙ ЯМЕ ГИРОТРОПНОГО КРИСТАЛЛА. In The 6th International scientific and practical conference “Modern directions of scientific research development”(November 24-26, 2021) BoScience Publisher, Chicago, USA. 2021. 1153 p. (p. 304).

**ТРАНСПОРТНОЕ СВОЙСТВО ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР,
СОСТОЯЩЕЙ ИЗ ЧЕРЕДУЮЩИХСЯ АСИММЕТРИЧНЫХ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ
ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ЯМ И БАРЬЕРОВ**

**Расулов Вохоб Рустамович¹, Маматова Махлиё Адхамовна¹, Насиров Мардон
Халдарбекович², Уринова Камала Комилжановна³.**

**¹ Ферганский государственный университет,
Ферганский политехнический институт,**

³ Кокандский государственный педагогический институт

Аннотация: В этом исследовании изучаются передовые возможности современных технологий по созданию полупроводниковых слоев с настраиваемыми профилями состава, включая квантовые структуры, для повышения производительности электронных устройств. Такие инженерные слои часто сводят сложность электрических компонентов к поведению в прямоугольных потенциальных ямах между соседними слоями с потенциальными барьерами. Эти инженерные структуры находят применение в туннельных диодах, гетеролазерах и т. д.

Исследование посвящено решению уравнения Шрёдингера с конкретными потенциалами и вычислению эффективной массы электронов в различных областях с учетом условия Бастарда для униполярных матриц в симметричных структурах с однородными высокими потенциальными барьерами.

Ключевые слова: квантовые структуры, полупроводниковые приборы, профили состава, уравнение Шрёдингера, эффективная масса, потенциальные барьеры, туннельные диоды, гетеролазеры, коэффициент передачи, электронное поведение, квантум Уэллс, явление помех, спектральная зависимость, электронные волновые векторы, симметричные структуры.

Современная технология дает возможность получения полупроводниковых слоев с произвольным профилем изменения состава (структуры с квантовой ямой) для улучшения характеристик приборов, полученных на их основе. В этом случае задача об электронных состояниях сводится к задаче о поведении частицы в прямоугольных потенциальных ямах, между двумя соседними которых имеется потенциальная яма, описываемая соотношением

$$U(x) = \begin{cases} U_j & \text{при } x \in (x_j, x_{j+1}), \\ U_{j+1} & \text{при } x \in (x_{j+1}, x_{j+2}), \\ U_{j+2} & \text{при } x \in (x_{j+2}, x_{j+3}), \\ U_{j+3} & \text{при } x \in (x_{j+3}, x_{j+4}), \\ U_{j+4} & \text{при } x \in (x_{j+4}, \dots) \end{cases} \quad (1)$$

Далее отметим, что для создания нового поколения резонансно-туннельных диодов, гетеролазеров с разделенными электронным и оптическим ограничением применяются структуры с прямоугольными размерно-квантованными ямами, в центре которых имеется дополнительный энергетический провал. Такая структура описывается потенциалом (1), где надо считать, что $U_j, U_{j+4} > 0$, $U_{j+1}, U_{j+3} = 0$, $U_{j+2} < 0$.

Решение стационарного уравнения Шрёдингера с потенциалом (1) выберем как

$$\psi_j(x) = A_j e^{(ik_j x)} + B_j e^{(-ik_j x)} \quad (2)$$

где $k_j(x) = k_j = \sqrt{\frac{2m_j}{\hbar^2}(E - U_j)}$, $j = 1, 2, 3, \dots$.

При дальнейших расчетах считаем, что эффективные массы электронов различны в различных областях. Поэтому, при решении уравнения Шрёдингера с потенциалом (1) учтем условия Бастарда, т.е.

$$\psi_j(x = x_j) = \psi_{j+1}(x = x_j), \quad \frac{1}{m_j} \frac{\partial \psi_j(x)}{\partial x} \Big|_{x=x_j} = \frac{1}{m_{j+1}} \frac{\partial \psi_{j+1}(x)}{\partial x} \Big|_{x=x_j} \quad (3)$$

Подставляя (2) в (3) нетрудно получить следующая линейная комбинация амплитуд электронных де-бройловских волн

$$\begin{aligned} 2A_j &= \left(1 + \frac{\tilde{k}_{j+1}}{\tilde{k}_j}\right) A_{j+1} e^{i(k_{j+1}-k_j)x_j} + \left(1 - \frac{\tilde{k}_{j+1}}{\tilde{k}_j}\right) B_{j+1} e^{-(i(k_{j+1}+k_j)x_j)}, \\ 2B_j &= \left(1 - \frac{\tilde{k}_{j+1}}{\tilde{k}_j}\right) A_{j+1} e^{i(k_{j+1}+k_j)x_j} + \left(1 + \frac{\tilde{k}_{j+1}}{\tilde{k}_j}\right) B_{j+1} e^{-(i(k_{j+1}-k_j)x_j)}. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь $\tilde{k}_j = k_j / m_j$.

Для упрощения дальнейших вычислений вводим матрицу переноса, удовлетворяющую следующее равенство

$$\begin{bmatrix} A_j \\ B_j \end{bmatrix} = T^{(j,j')} \begin{bmatrix} A_{j'} \\ B_{j'} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{11}^{(j,j')} & T_{12}^{(j,j')} \\ T_{21}^{(j,j')} & T_{22}^{(j,j')} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{j'} \\ B_{j'} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где матричные элементы в случае $j' = j + 1$

$$T_{11}^{(j,j+1)} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\tilde{k}_{j+1}}{\tilde{k}_j} \right) e^{i(k_{j+1}-k_j)x_j}, T_{12}^{(j,j+1)} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\tilde{k}_{j+1}}{\tilde{k}_j} \right) e^{-i(k_{j+1}+k_j)x_j}, \quad (6)$$

$$T_{21}^{(j,j+1)} = T_{12}^{(j,j+1)*}, T_{22}^{(j,j+1)} = T_{11}^{(j,j+1)*}.$$

Заметим, что матрица $T^{(j,j+1)}$ удовлетворяет следующего соотношения

$$T_{11}^{(j,j+1)} = T_{22}^{(j,j+1)*}, T_{12}^{(j,j+1)} = T_{21}^{(j,j+1)*}, T_{11}^{(j,j+1)} T_{22}^{(j,j+1)} - T_{21}^{(j,j+1)} T_{12}^{(j,j+1)} = \frac{\tilde{k}_{j+1}}{\tilde{k}_j} \quad (7)$$

матрица $T^{(j,j+1)}$ становится униполярной матрицей в случае $\tilde{k}_{j+1} = \tilde{k}_j$, т.е. для симметричных структур, когда одинаковы высота потенциальных барьеров и эффективные массы электронов.

Теперь рассмотрим конкретные случаи: пусть трехслойная структура имеет в середине одного потенциального барьера. Тогда коэффициент прохождения ($t_{j,j+2}$) через потенциальный барьер³, введенный как отношения плотности потоков вероятности в отраженной и прошедшей де-бройловских волнах электронов в падающей волне, в формализме матрицы переноса, имеют вид

$$t_{j,j+2} = \frac{4 \frac{k_{j+2}}{k_j} \frac{m_j}{m_{j+2}}}{\left(1 + \frac{k_{j+2}}{k_j} \frac{m_j}{m_{j+2}} \right)^2 - \left[1 - \left(\frac{k_{j+1}}{k_j} \frac{m_j}{m_{j+1}} \right)^2 \right] \left[1 - \left(\frac{k_{j+2}}{k_{j+1}} \frac{m_{j+1}}{m_{j+2}} \right)^2 \right] \sin^2 \left[k_{j+1} (x_{j+1} - x_j) \right]}. \quad (8)$$

Отметим здесь следующие:

1. Коэффициент $t_{j \rightarrow j+2}$ инвариантен к преобразованию $j \leftrightarrow (j + 2)$, что означает коэффициент прохождения не зависит от того с какой стороны налетают электроны на потенциальный барьер. Коэффициенты $t_{j \rightarrow j+2}$ и $r_{j \rightarrow j+2}$ верны как для надбарьерного ($E \rangle U_j$), так и для подбарьерного ($E \langle U_j$) прохождения электронов. В последнем случае удобно использовать преобразования типа $\tilde{k}_{m+n} = i\tilde{\kappa}_{m+n}$, $\tilde{k}_m \pm \tilde{k}_{m+n} = \sqrt{(\tilde{k}_m)^2 \pm (\tilde{\kappa}_{m+n})^2} e^{\pm i\varphi_{m,m+n}}$ тогда, когда \tilde{k}_m - вещественная, а $\tilde{\kappa}_{m+n}$ - мнимая величина, где $\arctg(\varphi_{m,m+n}) = \frac{\tilde{\kappa}_{m+n}}{\tilde{k}_m}$. Тогда, надо отметить, что при переходе из одной области в другую в электронных волнах должно происходит смещение по фазе, связанное с несовпадением фаз волн, распространяющихся в различных, но в соседних, областях.

³ Т.е. переход электронов из области j в область $j + 2$ через потенциальный барьер $j + 1$.

2. Для симметричной структуры с $U_j = U_{j+2}$ имеем

$$t_{j \rightarrow j+2} = 4 \left\{ \left(1 + \frac{m_j}{m_{j+2}} \right)^2 + \left[1 - \left(\frac{k_j m_{j+1}}{k_{j+1} m_j} \right)^2 \right] \left[1 - \left(\frac{k_{j+1} m_j}{k_j m_{j+1}} \right)^2 \right] \sin^2 \left[k_{j+1} (x_{j+1} - x_j) \right] \right\}^{-1}. \quad (9)$$

3. В асимметричной (и в симметричной, но с различными эффективными массами электронов в различных областях (слоях)) структуре должна наблюдаться осцилляция в спектральной зависимости как коэффициента $t_{j \rightarrow j+2}$, т.е. в эффекте туннелирования, так и в коэффициенте прозрачности потенциального барьера. Эта осцилляция обусловлена интерференцией волн отраженных от потенциального барьера, и ее амплитуда определяется разностью между волновыми векторами электронов, находящихся в потенциальном барьере и в соседней ему потенциальных ямах, т.е. $(\tilde{k}_{j+1} - \tilde{k}_j)$ и $(\tilde{k}_{j+2} - \tilde{k}_{j+1})$.

Отметим лишь, что такое интерференционное явление в структуре не исчезает даже в симметричной структуре из-за разности эффективных масс электронов, находящихся в различных областях структуры.

Литература

1. Е.Л.Ивченко. // ФТТ. -1972.-Т.14. Вып.12. -С. 3489-3485.
2. Е. Л. Ивченко, Е. Ю. Перлин. // ФТТ. -1973. -Т. 15. -Вып. 9. -С. 2781-2783.
3. Р.Я.Расулов Угловые оптические фотогальванические эффекты в полупроводниках при линейном и нелинейном поглощении света: дис. докт. физ.-мат. наук. – СПб.: ФТИ РАН им. акад. А.Ф. Иоффе, 1993. -168 с.
- 4 Р.Я.Расулов// ФТТ. 1993. -Т.35. -Вып.6. -С. 1674-1678.
5. В.Р. Расулов, Р.Я. Расулов, Р.Р. Султонов, Б.Б. Ахмедов //ФТП. 2020. Т.54. В.11. С.1181-1187.
6. Расулов, В. Р., Расулов, Р. Я., Маматова, М. А., Исомаддинова, У. М., & Кодиров, Н. У. О. (2022, October). ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ДВУХФОТОННОГО ПОГЛОЩЕНИЯ СВЕТА И ЕГО ЛИНЕЙНО-ЦИРКУЛЯРНОГО ДИХРОИЗМА В КРИСТАЛЛАХ. УЧЕТ ВКЛАДА ЭФФЕКТА КОГЕРЕНТНОГО НАСЫЩЕНИЯ. In The 15 th International scientific and practical conference “Innovations and prospects of world science”(October 12-14, 2022) Perfect Publishing, Vancouver, Canada. 2022. 454 p. (p. 126).
7. Расулов, В. Р., Расулов, Р. Я., & Маматова, М. А. (2022, August). МЕЖДУЗОННОЕ ОДНОФОТОННОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ ПОЛЯРИЗОВАННОГО СВЕТА В КРИСТАЛЛАХ С УЧЕТОМ ЭФФЕКТА КОГЕРЕНТНОГО НАСЫЩЕНИЯ. In The 12 th International scientific and practical conference “Modern science: innovations and prospects”(August 21-23, 2022) SSPG Publish, Stockholm, Sweden. 2022. 308 p. (p. 112).
8. Rasulov, V. R., Rasulov, R. Y., Mamatova, M. A., & Qosimov, F. (2022, December). Semiclassical theory of electronic states in multilayer semiconductors. Part 2. In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 2388, No. 1, p. 012158). IOP Publishing.
9. Rasulov, V. R., Rasulov, R. Y., & Adhamovna, M. M. (2022). ELECTRONIC PROPERTIES OF A SEMICONDUCTOR TWO-BARRIER STRUCTURE. EPRA International Journal of Multidisciplinary Research (IJMR), 8(5), 58-62.
10. Rasulov, R. Y., Rasulov, V. R., Kuchkarov, M. K., & Eshboltaev, I. M. (2023). Interband Multiphoton Absorption of Polarized Radiation and Its Linear Circular Dichroism in Semiconductors in the Kane Approximation. Russian Physics Journal, 65(10), 1746-1754.

11. Rasulov, R. Y., Karimova, G. A., & Rahmatov, I. (2023). LINEAR-CIRCULAR DICHROISM OF THE PHOTON DRAG EFFECT IN SEMICONDUCTOR SUPERSTRUCTURES. *Oriental renaissance: Innovative, educational, natural and social sciences*, 3(4), 458-463.
12. Расулов, В. Р., Расулов, Р. Я., Исомаддинова, У. М., & Кодиров, Н. У. О. (2022, December). УГЛОВАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ОДНОФОТОННЫХ МЕЖЗОННЫХ ЛИНЕЙНОЦИРКУЛЯРНЫХ ДИХРОИЗМОВ В КРИСТАЛЛАХ. In *The 12 Th International Scientific And Practical Conference "Eurasian Scientific Discussions"* (December 18-20, 2022) Barca Academy Publishing, Barcelona, Spain.
13. Расулов, В. Р., Расулов, Р. Я., Муминов, И. А., Эшболтаев, И. М., & Кучкаров, М. (2021). МЕЖДУЗОННОЕ ТРЕХФОТОННОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ В InSb.
14. Rasulov, V. R., Rasulov, R. Y., Axmedov, B. B., Muminov, I. A., & Polvonov, B. Z. (2020). Linear-circular dichroism of one-photon absorption of light in narrow-zone semiconductors. contribution of the effect of coherent saturation. *European Science Review*, (7-8), 49-53.
15. Rasulov, V. R., Rasulov, P. Y., Eshboltaev, I. M., & Sulonov, R. R. (2020). Size Quantization in n-GaP. *Semiconductors*, 54, 429-432.
16. Расулов, В. Р., Расулов, Р. Я., Султонов, Р. Р., & Ахмедов, Б. Б. (2020). Теоретическое исследование спин-зависимого размерного квантования в двухбарьерной полупроводниковой структуре. «Узбекский физический журнал», 22(1), 16-19.
17. Rustamovich, R. V., Yavkachovich, R. R., Rustamovich, S. R., Mamirjonovich, E. I., & Bahromovich, A. B. (2020). Phenomenology of two and three photon linear-circular dichroism of light absorption in p-GaAs. *European science review*, (1-2), 97-100.

THEORETICAL CALCULATIONS OF THE MAGNETIC FIELD OF HELMHOLTZ COIL

Taylanov Nizom Abdurazzakovich¹, Dehqonova Ohista Kosimjonovna²

¹Jizzakh State Pedagogical University,

²Fergana State University,

Abstract: In the present article we have studied the physical properties of a Helmholtz coil that can produce a second-order uniformity field for use in magnetic resonance imaging (MRI) applications. A Helmholtz coil is a device used to create a region of nearly uniform magnetic field. It consists of two identical magnetic coils arranged symmetrically along a common axis, one on each side of the experimental site, separated by a distance equal to the radius of the round coil and the half-length of the side of the square coil. Each coil carries an equal electric current flowing in the same direction. The main goal of this article is to calculate the magnetic field created by Helmholtz coils at any point in space. Mathematical equations are simulated using the MATLAB simulation tool to demonstrate the axial magnetic field generated by one and two loops. The importance of testing electronic devices under the influence of a constant magnetic field is substantiated. The magnetic field created by Helmholtz coils of finite rectangular cross-section is investigated. An analytical expression is derived for the magnetic field on the axis of a solenoid of finite thickness and the magnetic field on the axis of Helmholtz coils of rectangular cross-section. In the particular case of using Helmholtz coils with a square cross-section, the condition for the second derivative of the magnetic field to vanish along the symmetry axis of the system at its center is numerically analyzed. This makes it possible to determine the distance between square coils at which the field in the center of the system is most uniform. It is shown that taking into account the finiteness of the cross-section