

UDC 621.315.592

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНО-ЗАВИСИМОСТИ ОСЦИЛЛЯЦИИ ПОПЕРЕЧНОГО МАГНИТОСОПРОТИВЛЕНИЯ И ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ В ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ С КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ

Р.Г. Рахимов

*Наманганский инженерно-технологический институт,
160115, Наманган, Узбекистан
e-mail: rgrakhimov@gmail.com*

Аннотация. В данной статье исследовано влияние двумерной плотности состояний на осцилляции поперечной электропроводности в гетероструктурах с прямоугольными квантовыми ямами. Выведено новое аналитическое выражение для расчета температурной зависимости осцилляции поперечной электропроводности и магнитосопротивления квантовой ямы. Исследованы осцилляции электропроводности и магнитосопротивления узкозонной квантовой ямы с непараболическим законом дисперсии. Предложенной теорией исследованы результаты экспериментов узкозонной квантовой ямы ($\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{Sb}$).

Ключевые слова: Полупроводник, квантующее магнитное поле, осцилляция, двумерные полупроводниковые структуры, квантовая яма.

MODELING THE TEMPERATURE DEPENDENCE OF OSCILLATIONS OF TRANSVERSE MAGNETORESISTANCE AND ELECTRICAL CONDUCTIVITY IN HETEROSTRUCTURES BASED ON QUANTUM WELLS

R.G. Rakhimov

Namangan Institute of Engineering and Technology, 160115, Namangan,
Uzbekistan

e-mail: rgrakhimov@gmail.com

Abstract. In this article, the influence of two-dimensional density of states on the oscillations of transverse electrical conductivity in heterostructures with rectangular quantum wells is investigated. A new analytical expression is derived for calculating the temperature dependence of the transverse electrical conductivity oscillation and the magnetoresistance of a quantum well. The oscillations of electrical conductivity and magnetoresistance of a narrow-band quantum well with a nonparabolic dispersion law are investigated. The proposed theory investigates the results of experiments of a narrow-band quantum well ($\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{Sb}$).

Keywords: Semiconductor, quantizing magnetic field, oscillation, two-dimensional semiconductor structures, quantum well.

1. Введение

При присутствии квантующего магнитного поля в наноразмерных полупроводни-ковых структурах существенным образом изменяется не только оптические или магнитные, но и кинетические свойства свободных электронов или дырок. Исследование осцилляции продольного и поперечного магнетосопротивления в гетероструктурах на основе квантовых ям наряду с Холловскими измерениями может дать важную информацию о его характеристиках, таких как эффективные массы свободных электронов и дырок [1,2], число занятых зон, спин вырождение, квантовое время релаксация и другие кинетические параметры [3]. В серии экспериментов, проведенных в последней десятилетии, было обнаружено, что кинетические свойства квантовой ямы, подвергнутый деформации, температуре, сверхвысоко частотной электромагнитному полю, деформации и свету в приложенном магнитном поле, дают еще более богатую информацию для теории квантовой физики. В частности, в работах [4,5], в квантовой яме GaAs, проанализировано полуклассическая теория осцилляции магнетосопротивления при облучении микроволнами. В квантующем магнитном поле удельное магнетосопротивление системы демонстрирует осцилляции Шубникова-де Гааза при низких температурах. А также, были установлены экспериментальные значения для квантовой ямы GaAs, под подсветкой микроволнового излучения. В работах [6-23] разработаны различные экспериментальные методики для определения температурной зависимости осцилляции Шубникова – де Гааза в гетероструктурах с квантовыми ямами с параболическими и непараболическими законами дисперсии. Например, в работе [6], наблюдаются квантовые осцилляционные явления в гетероструктурах с квантовыми ямами $Ga_{1-x}In_xN_yAs_{1-y}$ с использованием магнитотранспортных измерений. Осцилляции Шубникова-де Гааза получены при магнитных полях до 3 Тл и температур до 20 К, которые использованы для определения эффективной массы, двумерной плотности носителей заряда и энергии Ферми. В работе [7], представлены измерения магнитопроводимости при сжатии квантовых ям $In_xGa_{1-x}Sb$ и GaSb. Были изготовлены структуры Холла и Ван-де-Пау и измерены осцилляции Шубникова-де Гааза в диапазоне температур $T=2-300$ К при магнитных полях $B=0-9$ Тл. В этих образцах, высокая подвижность носителей зарядов делает возможным наблюдение осцилляции Шубникова-де Гааза.

А также, в работе [8], в гетероструктурах GaInNAs/GaAs с квантовыми ямами легированных модуляцией n- и p- типа, проведены измерения

магнитосопротивления, как в слабом ($B < 0,08$ Тл), так и в сильном магнитном поле (до 18 Тл) при температурах 75 мК и 6 К. Показано, что квантовые осцилляции в ρ_{xx} и квантового эффекта Холла в ρ_{xy} влияет присутствие азота в решетке $A_{III}B_V$. Для таких материалов, в слабых магнитных полях осцилляции Шубникова-де-Гааза развиваются с более высокой подвижностью при температуре 6 К, а с увеличением состава азота, амплитуда осцилляции Шубникова – де Гааза уменьшается.

Из приведенной выше литературы видно, что не построена полноценная теория в гетероструктурах квантовых ям

Как видно из проанализированной выше литературы, не существует четкой и полной теории зависимости квантовых осцилляций от температуры и магнитного поля, обнаруженных в экспериментах в гетероструктурах с квантовой ямой. Не разработана новая математическая модель для определения температурной зависимости осцилляций Шубникова-де Гааза в гетероструктурных полупроводниках с квантовой ямой через плотность энергетических состояний двумерных материалов.

Целью настоящей работы является моделирование температурной зависимости осцилляции магнитосопротивления в гетероструктурах на основе квантовых ям с учетом термического уширения двумерной плотности состояний.

2. Теоретическая часть

В наноразмерных полупроводниковых структурах, анализ электропроводности электронов или дырок производится с помощью Больцмановской функции распределения $f_n(k)$ и в однородном электрическом поле F эта функция распределения удовлетворяет решениям кинетического уравнения при отсутствии магнитного поля [24, 25.]:

$$\frac{q}{\hbar} F \nabla_k f_n(k) = \sum_{n'k'} w_{nn'}(k, k') (f_{n'}(k') - f_n(k)) \quad (1)$$

Здесь, q – заряд носителей заряда, $w_{nn'}(k, k')$ – вероятность рассеяния за единицу времени из состояния $|nk\rangle$ в $|n'k'\rangle$, n и n' – номера подзон или минизон.

В случае классических электрических полей, когда отклонение функции распределения $\varphi(k)$ от равновесной функции Ферми – Дирака $f_0(E)$ можно считать малым, в одноминизонном приближении кинетическое уравнение (1) описывается в следующем виде:

$$qFv(k) \frac{\partial f_0(E)}{\partial E} = \sum_k w(k, k') (\varphi(k') - \varphi(k)) \quad (2)$$

Здесь, $\varphi(k) = f_1(k) - f_0(E)$; $E = E_1(k)$ – энергии свободного электрона или дырки в основной подзоне или минизоне; $v(k)$ – скорость свободного электрона или дырки.

Для решения уравнения (2) можно использовать приближение тензора времени релаксации с учетом анизотропного характера наноразмерных полупроводников и получаем следующее выражение, в этом приближении для решения уравнения (2):

$$\varphi(k) = q \left(-\frac{\partial f_0(E)}{\partial E} \right) \sum_i \tau_i(E) F_i v_i(k) \quad (3)$$

Здесь

$$\frac{1}{\tau_i} = \sum_{k'} w(k, k') \left(1 - \frac{v_i(k')}{v_i(k)} \right) \quad (4)$$

Компонента тензора времени релаксации в главных осях тензора обратна эффективной массе.

Теперь вычислим температурную зависимость осцилляции продольной электропроводности в квантовой яме при воздействии квантующего магнитного поля. В гетероструктурах с квантовыми ямами для двумерного свободного электрона или дырки добавка к функции распределения (3), с учетом симметрии пишется в виде:

$$\varphi(k) = q \left(-\frac{\partial f_0(E)}{\partial E} \right) \tau_{\perp}(E) F v(k) \quad (5)$$

Здесь, $\tau_{\perp} = \tau_x = \tau_y$.

В поставленной задаче индукция магнитного поля направлена по толщине квантовой пластины и рассчитывается перпендикулярно плоскости квантовой пластины (плоскость XY). Отсюда при проведении теоретических расчетов введем поперечную электрическую проводимость ($\sigma_{\perp}(E, B)$) перпендикулярно толщине квантовой ямы (по плоскости XY), одна из кинетических величин, вычисляемых по толщине квантовой ямы, определяется как продольная электропроводность ($\sigma_{\parallel}(E, B)$).

Используя к выражению (5) квантующее магнитное поле, можно получить выражение поперечной электропроводности $\sigma_{\perp}(E, B)$:

$$\sigma_{\perp}(E, B) = \sigma_{xx}(E, B) = \sigma_{yy}(E, B) = q n_s \mu_{\perp}(E, B) = \frac{e^2 n_s \langle \tau_{\perp}(E, B) \rangle}{m^*} \quad (6)$$

Здесь, n_s -концентрация носителей зарядов для двумерного электронного газа; μ_{\perp} - подвижность; m^* -эффективная масса свободного электрона или дырки в квантовой яме. $\langle \tau_{\perp}(E, B) \rangle$ - усредненное по энергии время релаксации свободного электрона при воздействии квантующего магнитного поля, и вычисляется следующим выражением [24, 25.]:

$$\langle \tau_{\perp}(E, B) \rangle = \frac{\int_0^{\infty} N_s^{2d}(E, B) \left(\frac{\partial f_0}{\partial E} \right) \tau_{\perp}(E) E dE}{n_s} \quad (7)$$

Где, $N_s^{2d}(E, B)$ - двумерная плотность энергетических состояний в квантующем магнитном поле.

В квантующем магнитном поле двумерная плотность энергетических состояний в зоне проводимости квантовой ямы взята в виде суммы гауссовых пиков [26]:

$$N_s^{2d}(E, B, n_L, d, n_Z) = \frac{eH}{2\pi c} \sum_{n_L} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{1}{\Gamma} \exp \left[-2 \left(\frac{E - \left[\hbar \omega_c \left(n_L + \frac{1}{2} \right) + \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m^* d^2} n_Z^2 \right]}{\Gamma} \right)^2 \right] \quad (8)$$

Где, n_L – число уровней Ландау. $\omega_c = \frac{eH}{mc}$ - циклотронная частота. Γ - параметр уширения, принимаемый постоянным.

В сильном магнитном поле рассматриваются двумерные электронные системы невзаимодействующих электронов по параболическому закону дисперсии при низкой температуре T . Дополнение к гауссовскому пику плотности состояний, на каждом уровне Ландау есть общий множитель магнитного поля B перед общей плотностью энергетических состояний. Это означает, что с увеличением магнитного поля B каждый уровень Ландау может содержать все большее и большее количество электронов. Согласно (8), между уровнями Ландау нет плотности состояний, если их расстояние $\hbar \omega_c$ заметно больше, чем Γ .

Для основных механизмов, в массивных полупроводниках в приближении упругого рассеяния зависимость времени релаксации $\tau_3(E, T)$ от энергии и температуры носит степенной характер [27]:

$$\tau_3(E, T) = \gamma_3 (k_0 T)^\beta E^\alpha \quad (9)$$

Для свободных электронов в квантовой яме изменение плотности состояний и энергетического спектра с учетом размерного квантования приводит к следующей формуле [28]:

$$\tau_\perp / \tau_3 = \gamma d k_\perp = \gamma d \sqrt{\frac{2m^* E}{\hbar^2}} \sim E^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

Из (10), получим:

$$\tau_\perp = \gamma_\perp (k_0 T)^\beta E^{\alpha + \frac{1}{2}} \quad (11)$$

Здесь, d – толщина квантовой ямы. С учетом (7), (8) и (11) зависимость поперечной электропроводности от квантующего магнитного поля и температуры в гетероструктурах с квантовыми ямами принимает следующий вид:

$$\sigma_{\perp}^{2d}(E, B, T, d) = \frac{e^3 B}{2\pi m^* c} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{1}{\Gamma} \int_0^{\infty} \sum_{n_L} \exp \left[-2 \left(\frac{E - \left[\hbar \omega_c \left(n_L + \frac{1}{2} \right) + \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m^* d^2} n_Z^2 \right]}{\Gamma} \right)^2 \right] \gamma_{\perp} (k_0 T)^{\beta} E^{\alpha + \frac{3}{2}} \left(\frac{\partial f_0(E, T)}{\partial E} \right) dE \quad (12)$$

Таким образом, мы можем определить температурную зависимость осцилляции электропроводности в квантовой яме при воздействии квантующего магнитного поля. И так, выведено новое аналитическое выражение для вычисления осцилляции электропроводности в гетероструктурах с квантовыми ямами при присутствии температуры и магнитного поля, на основе формулы (12). Используя формулу (12), можно анализировать некоторые экспериментальные результаты при различных температурах и магнитных полях. Кроме того, с помощью формулы (12), можно вычислить температурную зависимость осцилляции поперечного магнитосопротивления в зоне проводимости квантовой ямы при присутствии квантующего магнитного поля. Тогда, для гетероструктуры на основе квантовой ямы, изменение осцилляции поперечного магнитосопротивления $\rho_{\perp}^{2d}(E, B, T, d)$ по температуре и по квантующему магнитному полю определяется в следующем новом аналитическом выражении:

$$\rho_{\perp}^{2d}(E, B, T, d) = 1 / \sigma_{\perp}^{2d}(E, B, T, d)$$

$$\rho_{\perp}^{2d}(E, B, T, d) = \frac{1}{\left[\frac{e^3 B}{2\pi m^* c} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{1}{\Gamma} \int_0^{\infty} \sum_{n_L} \exp \left[-2 \left(\frac{E - \left[\hbar \omega_c \left(n_L + \frac{1}{2} \right) + \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m^* d^2} n_Z^2 \right]}{\Gamma} \right)^2 \right] \gamma_{\perp} (k_0 T)^{\beta} E^{\alpha + \frac{3}{2}} \left(\frac{\partial f_0(E, T)}{\partial E} \right) dE \right]}$$

(13)

Теперь, на основании формул (12) и (13) рассмотрим зависимости $\sigma_{\perp}^{2d}(E, B, T, d)$ и $\rho_{\perp}^{2d}(E, B, T, d)$ на графике. Как видно из полученных новых аналитических выражений, член под интегралом является очень сложной функцией по отношению к энергии E. То есть получить точный результат путем его интегрирования невозможно, и для получения $\sigma_{\perp}^{2d}(E, B, T, d)$ и $\rho_{\perp}^{2d}(E, B, T, d)$ воспользуемся компьютерной программой.

На рис.1 показана зависимость осцилляции поперечной электропроводности от магнитного поля (рис.1а) и обратного индукции магнитного поля (рис.1б) в гетероструктурах на основе квантовой ямы

$\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ при постоянных низких температурах. Здесь, параметры квантовой ямы $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ равняется следующей величине: толщина квантовой ямы $d=16.8$ нм, эффективная массы электронов в зоне проводимости квантовой ямы $m_n=0,059m_0$, параметр уширения $\Gamma=0,6$ мэВ и температура $T=4,2\text{K}$ [9].

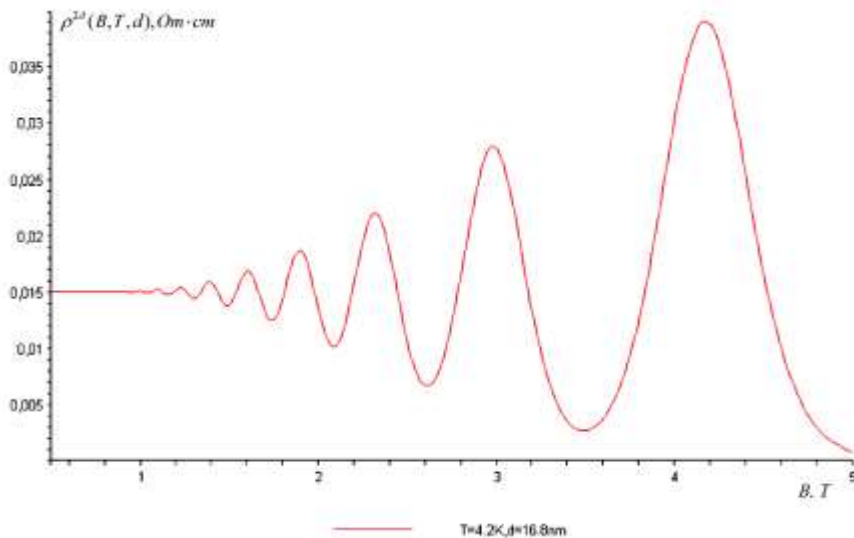


Рис.1а. Зависимость осцилляции поперечной электропроводности от магнитного поля в гетероструктурах на основе квантовой ямы $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ при температурах $T=4,2$ К.

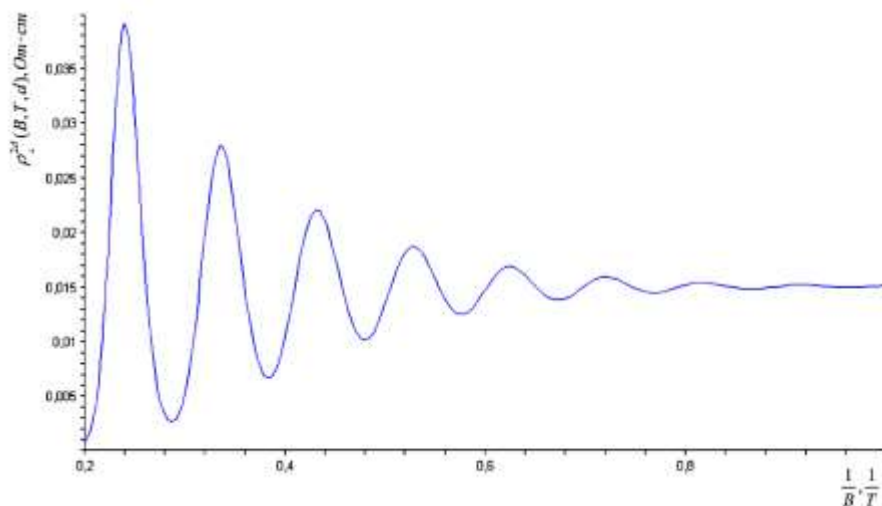


Рис.1б. Зависимость осцилляции поперечной электропроводности от обратного индукции магнитного поля в гетероструктурах на основе квантовой ямы $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ при температурах $T=4,2$ К.

При этом при построении графика $\sigma_{\perp}^{2d}(E, B, T, d)$ количество уровней Ландау принималось за $n_L=8$, а количество размерных квантов (число размерных квантований) за $n_Z=1$. На рисунках наблюдается резкое увеличение значения амплитуды колебаний электропроводности в зоне проводимости квантовой ямы

$\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ при значениях индукции магнитного поля 1,5 Тл и выше. На рис.2 показано влияние температуры на зависимость осцилляции поперечной электропроводности от индукции магнитного поля (рис.2а) и обратной индукции магнитного поля (рис.2б) в гетероструктурах на основе квантовой ямы $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ с параболическим законом дисперсии. Как видно из этих рисунков, с ростом температуры, амплитуда осцилляции электропроводности в зоне проводимости квантовой ямы $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ уменьшается. При достаточно высоких температурах, например, при $T=40$ К, осцилляции магнитосопротивления не чувствует квантующего магнитного поля и не наблюдаются осцилляции кинетических параметров. Потому что в наноразмерных полупроводниковых материалах для наблюдения эффектов квантовых колебаний тепловая энергия свободных носителей заряда должна быть намного меньше, чем разница между двумя соседними дискретными уровнями энергии.

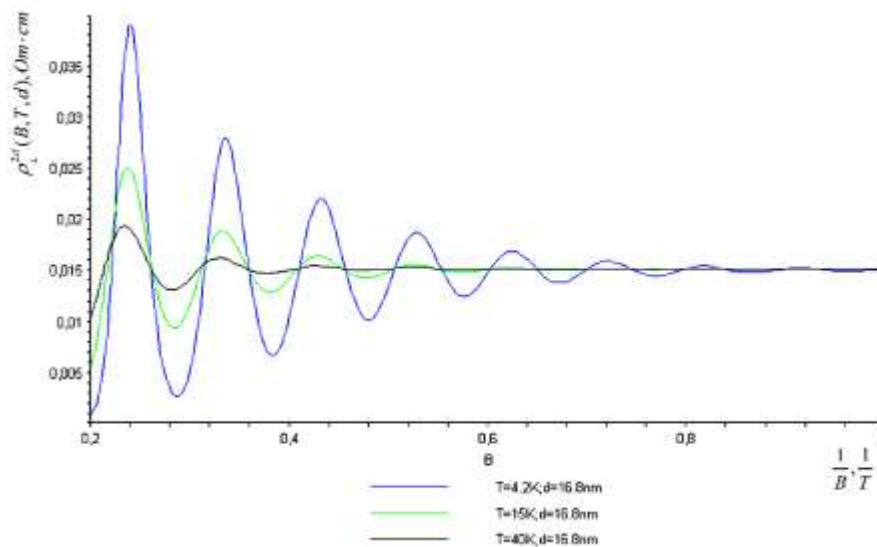


Рис.2а. Влияние температуры на зависимость осцилляции поперечной электропроводности от индукции магнитного поля в гетероструктурах на основе квантовой ямы $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$

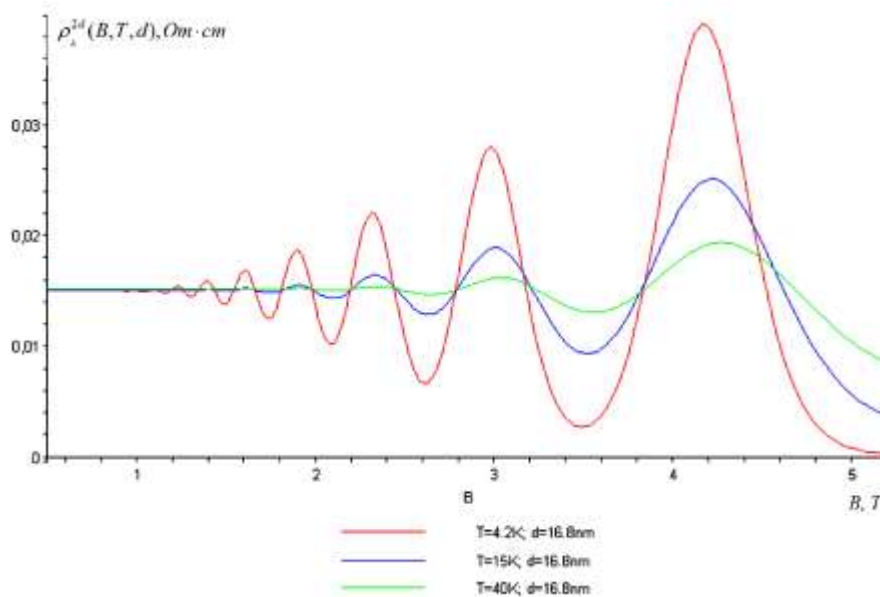


Рис.2б. Влияние температуры на зависимость осцилляции поперечной электропроводности от обратной индукции магнитного поля в гетероструктурах на основе квантовой ямы $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$

На рис.3а приведены осцилляции поперечного магнитосопротивления $\rho_{\perp}^{2d}(E, B, T, d)$ в зоне проводимости квантовой ямы $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ при низких постоянных температурах $T=4,2\text{K}$. Этот график $\rho_{\perp}^{2d}(E, B, T, d)$ получен с помощью формулы (11). Если мы наблюдаем за колебаниями индукции квантующего магнитного поля в диапазоне от 0,5 Тл до 3,5 Тл, то максимальное значение амплитуды магнитного сопротивления квантовой катушки составляет около 1000 Ом. С ростом температуры наблюдается уменьшение амплитуды колебаний поперечной проводимости (рис. 3б). При достижении температуры 40 К, когда величина квантующего магнитного поля достигает почти 3 Тл, осцилляции $\rho_{\perp}^{2d}(E, B, T, d)$ начинают исчезать, то есть влияние квантующего магнитного поля становится не заметным. Однако с понижением температуры квантующее магнитное поле начинает усиливать свое действие. Упрощенно это можно объяснить следующим образом: к этим квантовым эффектам применяется статистическая физика, т.е. температурная зависимость осцилляций $\rho_{\perp}^{2d}(E, B, T, d)$ изучается путем термического размывания (или термического уширения).

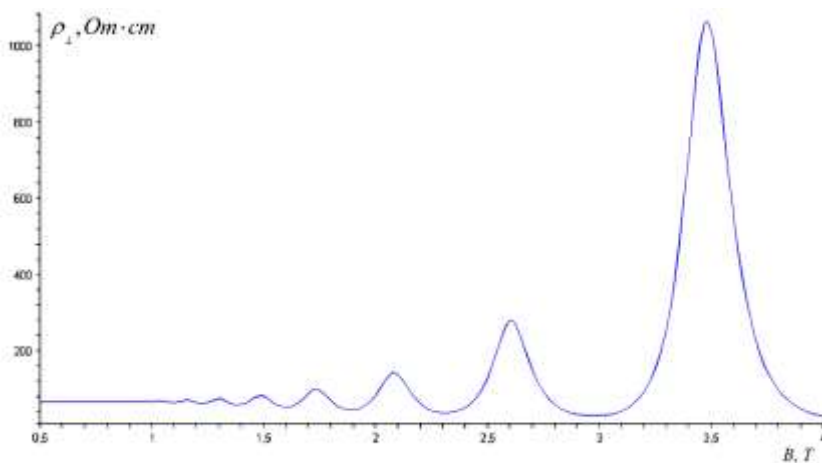


Рис.3а. Осцилляции поперечного магнитосопротивления $\rho_{\perp}^{2d}(E, B, T, d)$ в зоне проводимости квантовой ямы $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ при температурах $T=4,2\text{K}$.

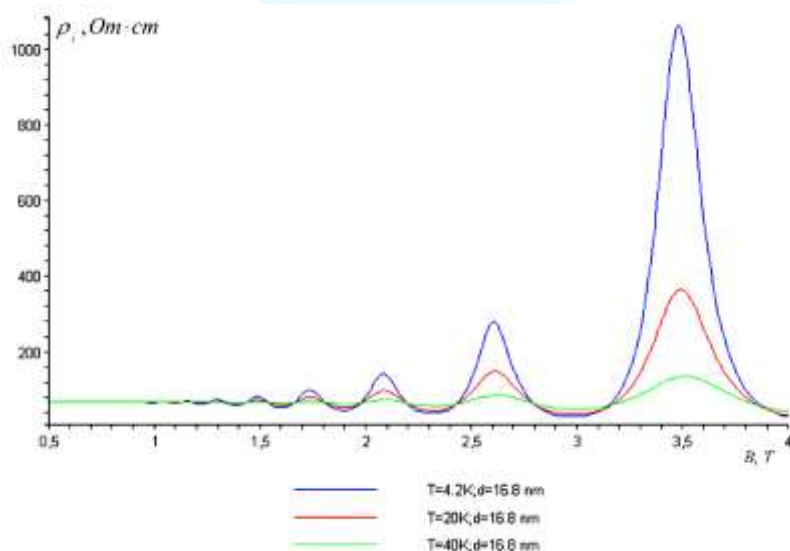


Рис.3б. Влияние температуры на осцилляции поперечного магнитосопротивления $\rho_{\perp}^{2d}(E, B, T, d)$ в зоне проводимости квантовой ямы $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$

Известно, что температурная зависимость осцилляций плотности энергетических состояний в двумерных и трехмерных полупроводниковых материалах подробно исследована с теоретической точки зрения в работах [27,28]. При этом была разработана новая математическая модель. В формуле (8) для постоянно низких температур представлена зависимость осцилляций плотности энергии состояний $N_s^{2d}(E, B, n_L, d, n_z)$ в двумерных полупроводниковых материалах от энергии и магнитного поля. Производная функции распределения Ферми-Дирака по энергии дает дельта-функцию $\left(\frac{\partial f_0(E, T)}{\partial E}\right)$ при очень низких температурах, при этом высота $\left(\frac{\partial f_0(E, T)}{\partial E}\right)$ уменьшается, а ширина увеличивается

с повышением температуры. Отсюда, термическое уширение уровней Ландау определяется с помощью $\left(\frac{\partial f_0(E,T)}{\partial E}\right)$ функции. Однако, как видно из работ [27,28], осцилляции квантового эффекта осуществляется путем наблюдения $N_s^{2d}(E, B, n_L, d, n_Z)$. Поэтому путем разложения $N_s^{2d}(E, B, n_L, d, n_Z)$ в ряд $\left(\frac{\partial f_0(E,T)}{\partial E}\right)$ определяются осцилляции поперечного магнитосопротивления $\rho_{\perp}^{2d}(E, B, T, d)$ гетероструктурных полупроводников с квантовой ямой в зависимости от температуры.

Кроме того, с помощью аналитического выражения (13) можно анализировать зависимость осцилляций $\rho_{\perp}^{2d}(E, B, T, d)$ поперечного магнитосопротивления гетероструктурных полупроводников с квантовыми ямами. На рис.4 показана зависимость осцилляции поперечного магнитосопротивления гетероструктуры $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ от толщины квантовой ямы $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ с параболическим законом дисперсии. Здесь, $\rho_{\perp}^{2d}(E, B, T, d)$ при квантующем магнитном поле $B=3,5$ Тл:

$$\rho_{\perp}^{2d}(T = 3K, d = 16,8nm) = 1000 \text{ Ом}; \quad \rho_{\perp}^{2d}(T = 3K, d = 14,8nm) = 1100 \text{ Ом};$$

$$\rho_{\perp}^{2d}(T = 3K, d = 12,8nm) = 1200 \text{ Ом}$$

Таким образом, с уменьшением толщины квантовой ямы, амплитуда осцилляции поперечного магнитосопротивления увеличивается. Отсюда можно сделать вывод, что в двумерных полупроводниковых материалах высота дискретных уровней Ландау зависит как от температуры, так и от толщины квантовой ямы. Чтобы наблюдать осцилляции квантового эффекта даже при более высоких температурах, предлагается, чтобы толщина квантовой ямы была как можно ближе к длине де Бройля.

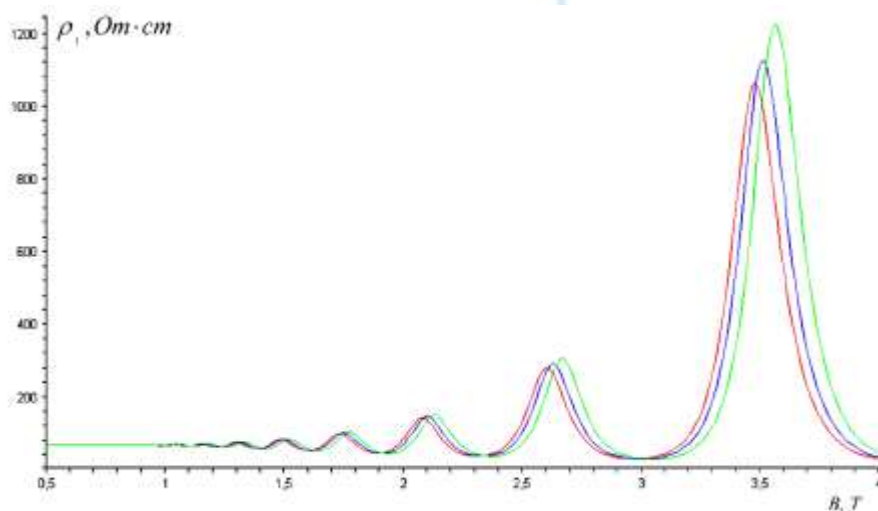


Рис.4. Зависимость осцилляции поперечного магнитосопротивления гетероструктуры $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ от толщины квантовой ямы $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ с параболическим законом дисперсии.

3. Результаты

На основе проведенного исследования можно сделать следующие заключения:

Выведено новое аналитическое выражение для расчета температурной зависимости осцилляции поперечной электропроводности и магнитосопротивления квантовой ямы. Разработан механизм осцилляции поперечной электропроводности и магнитосопротивления квантовой ямы от производной первого порядка магнитного поля (дифференциал) $\frac{\partial(\rho_{\perp}^{2d}(E, B, T, d))}{\partial B}$

при низких температурах и слабых магнитных полях. Исследованы осцилляции электропроводности и магнитосопротивления узкозонной квантовой ямы с непараболическим законом дисперсии.

4. Заключение

Предложенной теорией исследованы результаты экспериментов узкозонной квантовой ямы ($\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{Sb}$). Уровни Ландау квантовой ямы $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{Sb}$ при слабых магнитных полях, которые не наблюдались в эксперименте, осциллируют. Это было доказано через теорию магнитосопротивления $\frac{\partial(\rho_{\perp}^{2d}(E, B, T, d))}{\partial B}$. В эксперименте показано, что измеренные при температуре 2 К осцилляции поперечного магнитосопротивления квантовой нити $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{Sb}$ переходят в сплошной энергетический спектр за счет термической промывки под влиянием динамики роста температуры.

Литературы:

1. Yuzeeva N.A., Galiev G.B., Klimova E.A., Oveshnikov L.N., Lunin R.A., Kulbachinskii V.A. Experimental determination of the subband electron effective mass in InGaAs/InAlAs HEMT-structures by the Shubnikov - de Haas effect at two temperatures // *Physics Procedia*. 2015. Vol.72, pp.425-430. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2015.09.087>
2. Tarquini V., Knighton T., Wu Zh., Huang J., Pfeiffer L., West K. Degeneracy and effective mass in the valence band of two-dimensional (100)-GaAs quantum well systems // *Applied Physics Letters*. 2014. Vol.104, Iss.9, Article ID 092102. <https://doi.org/10.1063/1.4867086>
3. Berkutov I.B., Andrievskii V.V., Komnik Yu.F., Kolesnichenko Yu.A., Morris R.J.H., Leadley D.R. Magnetotransport studies of SiGe-based p-type heterostructures: Problems with the determination of effective mass // *Low*

- Temperature Physics. 2012. Vol.38, Iss.12, pp.1145-1452.
<https://doi.org/10.1063/1.4770520>
4. Abdullah Yar, Kashif Sabeeh. Radiation-assisted magnetotransport in two-dimensional electron gas systems: appearance of zero resistance states // [Journal of Physics: Condensed Matter](#). 2015. Vol.27, No.43, Article ID 435007.
<https://doi.org/10.1088/0953-8984/27/43/435007>
 5. Erkaboev U.I, Rakhimov R.G., Sayidov N.A. Influence of pressure on Landau levels of electrons in the conductivity zone with the parabolic dispersion law // Euroasian Journal of Semiconductors Science and Engineering. 2020. Vol.2., Iss.1.
 6. Rakhimov R.G. Determination magnetic quantum effects in semiconductors at different temperatures // VII Международной научнопрактической конференции «Science and Education: problems and innovations». 2021. pp.12-16.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=44685006>
 7. Gulyamov G, Erkaboev U.I., Rakhimov R.G., Sayidov N.A., Mirzaev J.I. Influence of a strong magnetic field on Fermi energy oscillations in two-dimensional semiconductor materials // Scientific Bulletin. Physical and Mathematical Research. 2021. Vol.3, Iss.1, pp.5-14
 8. Erkaboev U.I., Sayidov N.A., Rakhimov R.G., Negmatov U.M. [Simulation of the temperature dependence of the quantum oscillations' effects in 2D semiconductor materials](#) // Euroasian Journal of Semiconductors Science and Engineering. 2021. Vol.3., Iss.1.
 9. Gulyamov G., Erkaboev U.I., Rakhimov R.G., Mirzaev J.I. On temperature dependence of longitudinal electrical conductivity oscillations in narrow-gap electronic semiconductors // Journal of Nano- and Electronic Physic. 2020. Vol.12, Iss.3, Article ID 03012. <https://doi.org/10.1142/S0217979220500526>
 10. Erkaboev U.I., Gulyamov G., Mirzaev J.I., Rakhimov R.G. Modeling on the temperature dependence of the magnetic susceptibility and electrical conductivity oscillations in narrow-gap semiconductors // International Journal of Modern Physics B. 2020. Vol.34, Iss.7, Article ID 2050052. <https://doi.org/10.1142/S0217979220500526>
 11. Erkaboev U.I., R.G.Rakhimov. Modeling of Shubnikov-de Haas oscillations in narrow band gap semiconductors under the effect of temperature and microwave field // Scientific Bulletin of Namangan State University. 2020. Vol.2, Iss.11. pp.27-35
 12. [Gulyamov G.](#), [Erkaboev U.I.](#), [Sayidov N.A.](#), [Rakhimov R.G.](#) The influence of temperature on magnetic quantum effects in semiconductor structures // Journal of Applied Science and Engineering. 2020. Vol.23, Iss.3, pp. 453–460.
[https://doi.org/10.6180/jase.202009_23\(3\).0009](https://doi.org/10.6180/jase.202009_23(3).0009)

13. Erkaboev U.I., Gulyamov G., Mirzaev J.I., Rakhimov R.G., Sayidov N.A. Calculation of the Fermi–Dirac Function Distribution in Two-Dimensional Semiconductor Materials at High Temperatures and Weak Magnetic Fields // Nano. 2021. Vol.16, Iss.9. Article ID 2150102. <https://doi.org/10.1142/S1793292021501022>
14. Erkaboev U.I., R.G.Rakhimov. Modeling the influence of temperature on electron landau levels in semiconductors // Scientific Bulletin of Namangan State University. 2020. Vol.2, Iss.12. pp.36-42
15. Erkaboev U.I., Gulyamov G., Mirzaev J.I., Rakhimov R.G., Sayidov N.A. Calculation of the Fermi-Dirac Function Distribution in Two-Dimensional Semiconductor Materials at High Temperatures and Weak Magnetic Fields // Nano. 2021. Vol.16, Iss.9, Article ID 2150102. <https://doi.org/10.1142/S0217984921502936>
16. Erkaboev U.I., Rakhimov R.G., Sayidov N.A. Mathematical modeling determination coefficient of magneto-optical absorption in semiconductors in presence of external pressure and temperature // Modern Physics Letters B.2021. Vol.35, Iss.17, Article ID 2150293. <https://doi.org/10.1142/S0217984921502936>
17. Erkaboev U.I., Rakhimov R.G., Mirzaev J.I., Sayidov N.A. The influence of external factors on quantum magnetic effects in electronic semiconductor structures // [International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering](https://www.ijitee.org/portfolio-item/e2613039520/). 2020. Vol.9, Iss.5, pp. 1557-1563. <https://www.ijitee.org/portfolio-item/e2613039520/>
18. [Erkaboev U.I.](#), [Rakhimov R.G.](#), [Sayidov N.A.](#), [Mirzaev J.I.](#) Modeling the temperature dependence of the density oscillation of energy states in two-dimensional electronic gases under the impact of a longitudinal and transversal quantum magnetic fields // Indian Journal of Physics. 2022. Vol.96, Iss.10, Article ID 02435. <https://doi.org/10.1007/s12648-022-02435-8>
19. [Erkaboev U.I.](#), [Negmatov U.M.](#), [Rakhimov R.G.](#), [Mirzaev J.I.](#), [Sayidov N.A.](#) Influence of a quantizing magnetic field on the Fermi energy oscillations in two-dimensional semiconductors // International Journal of Applied Science and Engineering. 2022. Vol.19, Iss.2, Article ID 2021123. [https://doi.org/10.6703/IJASE.202206_19\(2\).004](https://doi.org/10.6703/IJASE.202206_19(2).004)
20. [Erkaboev U.I.](#), [Gulyamov G.](#), [Rakhimov R.G.](#) A new method for determining the bandgap in semiconductors in presence of external action taking into account lattice vibrations // Indian Journal of Physics. 2022. Vol.96, Iss.8, pp. 2359-2368. <https://doi.org/10.1007/s12648-021-02180-4>
21. U.I.Erkaboev, N.A.Sayidov, R.G.Rakhimov, U.M.Negmatov. Simulation of the temperature dependence of the quantum oscillations'effects in 2D semiconductor

- materials // Euroasian Journal of Semiconductors Science and Engineering. 2021. Vol.3, Iss.1, p.8
22. R.Rakhimov, U.Erkaboev. Modeling of Shubnikov-de Haas oscillations in narrow band gap semiconductors under the effect of temperature and microwave field // Scientific and Technical Journal of Namangan Institute of Engineering and Technology. 2020. Vol.2, Iss.11, pp.27-35
23. R.Rakhimov, U.Erkaboev. Modeling the influence of temperature on electron Landau levels in semiconductors // Scientific and Technical Journal of Namangan Institute of Engineering and Technology. 2020. Vol.2, Iss.12, pp.36-42
24. U.I.Erkaboev, R.G.Rakhimov, N.Y.Azimova. Determination of oscillations of the density of energy states in nanoscale semiconductor materials at different temperatures and quantizing magnetic fields // Global Scientific Review. 2023. Vol.12, pp.33-49
25. G.Gulyamov, U.I.Erkaboev, R.G.Rakhimov, J.I.Mirzaev, N.A.Sayidov. Determination of the dependence of the two-dimensional combined density of states on external factors in quantum-dimensional heterostructures // Modern Physics Letters B. 2023. Vol.37, Iss.10, Article ID 2350015
26. U.I.Erkaboev, R.G.Rakhimov. Determination of the dependence of the oscillation of transverse electrical conductivity and magnetoresistance on temperature in heterostructures based on quantum wells // East European Journal of Physics. 2023. Issue 3, pp.133-145
27. U.I.Erkaboev, R.G.Rakhimov. Simulation of temperature dependence of oscillations of longitudinal magnetoresistance in nanoelectronic semiconductor materials // e-Prime-Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy. 2023. Vol.5, pp.100236
28. U.I.Erkaboev, R.G.Rakhimov, J.I.Mirzaev, U.M.Negmatov, N.A.Sayidov. Influence of a magnetic field and temperature on the oscillations of the combined density of states in two-dimensional semiconductor materials // Indian Journal of Physics. 2023. Vol.2023, pp.1-9
29. U.Erkaboev, R.Rakhimov, J.Mirzaev, N.Sayidov, U.Negmatov, M.Abduxalimov. Calculation of oscillations in the density of energy states in heterostructural materials with quantum wells // AIP Conference Proceedings. 2023. Volume 2789, Issue 1
30. U.Erkaboev, R.Rakhimov, J.Mirzaev, N.Sayidov, U.Negmatov, A.Mashrapov. Determination of the band gap of heterostructural materials with quantum wells at strong magnetic field and high temperature // AIP Conference Proceedings. 2023. Volume 2789, Issue 1
31. U.Erkaboev, R.Rakhimov, J.Mirzaev, U.Negmatov, N.Sayidov. Influence of the two-dimensional density of states on the temperature dependence of the electrical

- conductivity oscillations in heterostructures with quantum wells // International Journal of Modern Physics B. 2023. Article ID 2450185
32. R.G.Rakhimov. Clean the cotton from small impurities and establish optimal parameters // The Peerian Journal. 2023. Volume 17, Pages 57-63
33. U.I.Erkaboev, N.A.Sayidov, U.M.Negmatov, J.I.Mirzaev, R.G.Rakhimov. Influence temperature and strong magnetic field on oscillations of density of energy states in heterostructures with quantum wells HgCdTe/CdHgTe // E3S Web of Conferences. 2023. Volume 401, Pages 01090
34. U.I.Erkaboev, N.A.Sayidov, U.M.Negmatov, R.G.Rakhimov, J.I.Mirzaev. Temperature dependence of width band gap in $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ quantum well in presence of transverse strong magnetic field // E3S Web of Conferences. 2023. Volume 401, Pages 04042
35. U.I.Erkaboev, R.G.Rakhimov, U.M.Negmatov, N.A.Sayidov, J.I.Mirzaev. Influence of a strong magnetic field on the temperature dependence of the two-dimensional combined density of states in InGaN/GaN quantum well heterostructures // E3S Web of Conferences. 2023. Volume 401, Pages 04042
36. Эркабоев У.И., Рахимов Р.Г., Мирзаев Ж.И., Сайидов Н.А., Негматов У.М. Вычисление осцилляции плотности энергетический состояний в гетеронаноструктурных материалах при наличии продольного и поперечного сильного магнитного поля // Международные конференция: «Научные основы использования информационных технологий нового уровня и современные проблемы автоматизации». 25-26 апреля 2022. С. 341-344. <https://rep.bntu.by/handle/data/125284>
37. Эркабоев У.И., Рахимов Р.Г., Мирзаев Ж.И., Сайидов Н.А., Негматов У.М. Расчеты температурная зависимость энергетического спектра электронов и дырок в разрешенной зоны квантовой ямы при воздействии поперечного квантующего магнитного поля // Международные конференция: «Научные основы использования информационных технологий нового уровня и современные проблемы автоматизации». 25-26 апреля 2022. С. 344-347. <https://rep.bntu.by/handle/data/125284>
38. Erkaboev U.I., Sayidov N.A., Mirzaev J.I., Rakhimov R.G. Determination of the temperature dependence of the Fermi energy oscillations in nanostructured semiconductor materials in the presence of a quantizing magnetic field // Euroasian Journal of Semiconductors Science and Engineering. 2021. Vol.3, Iss.2, pp.47-52