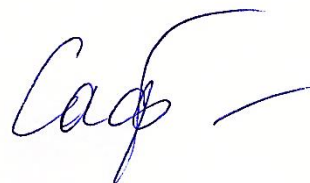


На правах рукописи



Сафошкин Алексей Сергеевич

**КИНЕТИКА ВЫРОЖДЕННОГО КВАЗИДВУМЕРНОГО
ЭЛЕКТРОННОГО ГАЗА В ЛЕГИРОВАННЫХ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КВАНТОВЫХ
ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ**

Специальность 01.04.10 — Физика полупроводников

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Рязань 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина».

Научный руководитель:

Дюбуа Александр Борисович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры высшей математики ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина», г. Рязань

Официальные оппоненты:

Глазов Сергей Юрьевич, доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой высшей математики и физики, профессор ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный социально-педагогический университет», г. Волгоград

Трегулов Вадим Викторович, кандидат технических наук, доцент кафедры общей и теоретической физики и методики преподавания физики ФГБОУ ВО «Рязанский государственный университет имени С.А. Есенина», г. Рязань

Ведущая организация:


ФГАОУ ВО «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», г. Москва

Защита состоится **«29» июня 2021 года в 11 часов 30 минут** на заседании диссертационного совета Д 212.211.03 в ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина», <http://www.rsreu.ru>

Автореферат разослан «__» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.211.03, д.ф.-м.н., доцент



Литвинов Владимир Георгиевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Изучение кинетических процессов в низкоразмерных квантовых структурах представляет собой одну из главных задач современной наноэлектроники. В ряде работ (например, [1,2]) по исследованию многочастичных взаимодействий была показана подавляющая роль электрон-электронных взаимодействий в гетероструктурах, которые уже при низких температурах (2-30 К) играют определяющую роль по сравнению с остальными процессами. Особенный интерес вызывают температурные (T) и концентрационные (n_s) зависимости времени электрон-электронных взаимодействий $\tau_{ee}(T, n_s)$.

В случае как одной заполненной подзоны, так и для нескольких подзон в интеграл столкновений в уравнении Больцмана входит тензор Фурье-образа полного потенциала экранирования $V_{tot}^{ijkl}(\mathbf{q}, \omega)$ как функция реакции электронной системы на внешнее возмущение. Непосредственное интегрирование уравнения Больцмана в случае двух заполненных подзон размерного квантования представляет собой достаточно громоздкую математическую задачу. В настоящей работе показано, что для корректной интерпретации особенностей экспериментально наблюдаемых температурных и концентрационных зависимостей времени электрон-электронной релаксации необходимы не только учет реального профиля гетероперехода (что уже представляет определенные математические трудности), но и возможные переходы между подзонами с учетом их тонкой структуры.

Для расчета времени электрон-электронного взаимодействия удобнее всего применять метод, который получил название приближения хаотических фаз, и особенностью которого является очевидная математическая привлекательность при исследовании процессов возбуждения квазичастиц – плазмонов в низкоразмерных гетероструктурах (главы 1 и 2) и поверхностных поляритонов в многослойных средах (глава 3). При этом интегродифференциальные уравнения Больцмана и Максвелла могут быть при определенных условиях сведены к алгебраическим.

Наблюдаемые аномалии в температурных и концентрационных зависимостях времени электрон-электронных взаимодействий $\tau_{ee}(T, n_s)$ непосредственно связаны с появлением второй подзоны размерного квантования и возбуждением плазменных колебаний (плазмонов) в 2D квантовой структуре. Появление возбужденной подзоны приводит к необходимости учета как внутривозонного τ_{ee}^{intra} , так и межвозонного τ_{ee}^{inter} электрон-электронного взаимодействия с учетом возможных

внутриподзонных и межподзонных переходов. Таким образом, в некотором диапазоне температур может появиться область, в которой наблюдаются аномалии как для низкотемпературного электронного транспорта, так и для процессов возбуждения и затухания плазменных колебаний, которые находятся из дисперсионного уравнения $\varepsilon(\mathbf{q}, \omega_p) = 0$. К этим аномалиям относятся рост $\tau_{ee}(T)$ с увеличением температуры и уменьшение плазменной частоты с увеличением концентрации.

Цель работы – теоретическое описание процессов электрон-электронного взаимодействия в умеренно и сильнолегированных гетеропереходах с возбуждением плазменных колебаний (плазмонов) и процессов возбуждения поверхностных волн (поляритонов) на границах раздела низкоразмерных структур, в том числе и на графене.

Достижение поставленной цели требует решения следующих **основных задач**:

1. Выбор аппроксимации для расчета зонной структуры гетероперехода $Al_xGa_{1-x}As(Si)/GaAs$ путем совместного решения дифференциальных уравнений Шредингера и Пуассона. При этом для дальнейших расчетов необходимо выбрать аппроксимацию, которая, с одной стороны, должна адекватно описывать реальный профиль гетероструктуры, а с другой – должна быть удобной для решения интегродифференциального уравнения Больцмана.

2. Нахождение кинетических коэффициентов для времени электрон-электронного взаимодействия и связанное с этим решение уравнения Больцмана с учетом всех возможных сценариев затухания квантования Ландау в низкоразмерных структурах. Это достигается составлением соответствующих компонентов тензора полной экранировки $V_{tot}^{ijkl}(\mathbf{q}, \omega)$ с применением аппарата гриновских функций и диаграммной техники с учетом ослабления кулоновского взаимодействия между электронами за счет поляризуемости кристаллической решетки полупроводника.

3. Исследование процесса возбуждения плазменных колебаний (плазмонов) в гетеропереходе. Наблюдаемые аномалии (немонотонности) в температурных зависимостях связаны с возбуждением плазменных колебаний (плазмонов), в связи с чем необходимо провести спектральный анализ диэлектрической функции, т. е. решить дисперсионное уравнение $\varepsilon(\mathbf{q}, \omega_p) = 0$.

4. Определение условий возбуждения поверхностного поляритона на гетероструктуре. Одним из интересных явлений дифракции электромагнитной волны на наноструктуре является возбуждение квазичастиц (поляритонов),

для описания которого необходимо произвести решение интегродифференциальных уравнений Максвелла с заданным распределением (гауссовым) интенсивности.

Объектом и предметом исследования в настоящей работе являются полупроводниковые планарные гетероструктуры $Al_xGa_{1-x}As(Si)/GaAs$ и схожие с ними, в которых при определенных условиях могут возникать плазменные и поляритонные возбуждения.

Научная новизна

1. Для анализа полупроводниковой гетероструктуры применена кусочно-линейная аппроксимация профиля потенциальной ямы гетероперехода $Al_xGa_{1-x}As(Si)/GaAs$, рассчитанного в удобном для подстановки в интеграл столкновений Больцмана виде.

2. Для определения условий применимости метода приближения хаотических фаз для расчета времени электрон-электронных взаимодействий в низкоразмерных полупроводниковых гетероструктурах учтено ослабление тензора Фурье-образа потенциала за счет поляризуемости кристаллической решетки полупроводника.

3. Расчет времени электрон-электронных взаимодействий произведен в рамках приближения хаотических фаз с использованием диаграмм Фейнмана для расчета внутриволновых и межволновых электрон-электронных взаимодействий в сильно легированном гетеропереходе $Al_xGa_{1-x}As(Si)/GaAs$.

4. Использование спектрального анализа диэлектрической функции для определения условий гидродинамического режима в гетеропереходе $Al_xGa_{1-x}As(Si)/GaAs$ позволило установить связь между возникновением плазменных колебаний и появлением немонотонностей в температурных зависимостях времени электрон-электронных взаимодействий.

5. Для расчета планарного волновода на наноструктуре «металл – нелинейная пленка – полупроводник» решена задача о дифракции электромагнитной волны с использованием модового метода и учетом дисперсии диэлектрической функции. Найдены условия максимального возбуждения поверхностного поляритона, и как следствие, повышения эффективности волноводов и твердотельных терагерцевых лазеров.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Использование кусочно-линейной аппроксимации потенциальной ямы с изломами на уровнях размерного квантования позволяет получить аналитические температурные зависимости времени электрон-электронного взаимодействия для гетероперехода $Al_xGa_{1-x}As(Si)/GaAs$ и определить параметры гетероструктуры (подвижность, концентрацию, проводимость и т.д.).

2. Спектральный анализ диэлектрической функции позволяет оценить границы применимости гидродинамического режима для двумерного электронного газа в полупроводниковой гетероструктуре.

3. На основании решения дифракционной задачи показана возможность создания планарного волновода на наноструктуре «металл – нелинейная пленка – полупроводник».

Достоверность результатов

Достоверность полученных результатов определяется корректностью использования математического аппарата физики полупроводников и квантовой физики, контролируемостью применяемых аппроксимаций, а также качественным согласованием построенных теоретических зависимостей с имеющимися экспериментальными результатами.

Научные положения, выносимые на защиту

1. Метод аналитического расчета времени электрон-электронных взаимодействий для различных степеней легирования гетероперехода в рамках приближения хаотических фаз, позволяющий предсказать немонотонности в температурных зависимостях времени электрон-электронного взаимодействия.

2. Возникновение немонотонностей в температурных зависимостях времени электрон-электронного взаимодействия вызвано возбуждением плазменных колебаний (плазмонов) и сменой режима экранировки двумерного электронного газа в сильно легированном гетеропереходе.

3. Методика определения условий максимального преобразования энергии объемного излучения в энергию поверхностного поляритона в планарной гетероструктуре на основе решения дифракционной задачи с использованием модового метода.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

- 55-57-я, 59-62-я научные конференции МФТИ (Долгопрудный, 2012, 2013, 2014, 2016, 2017, 2018, 2019);

- VI, VIII, XI Всероссийская молодежная научно-инновационная школа «Математика и математическое моделирование» (Саров, 2012, 2014, 2017);

- VI, VII, VIII, X Всероссийская школа-семинар студентов, аспирантов и молодых ученых по направлению «Диагностика наноматериалов и наноструктур» (Рязань, 2013, 2014, 2015, 2017);

- 18-я Международная конференция Объединения молодых ученых и специалистов (Дубна, 2014);

- International Workshop «Low-dimensional materials: theory, modeling, experiment» (Дубна, 2018);

- Научная сессия НИЯУ МИФИ-2015 (Москва, 2015);
- Международный молодежный научный форум «ЛОМОНОСОВ-2015» (Москва, 2015);
- Международная молодёжная конференция «Физика.СПб/2015», «Физика.СПб/2016» и «Физика.СПб/2017» (Санкт-Петербург, 2015, 2016, 2017);
- конференция «Плазменные, лазерные исследования и технологии» (Москва, НИЯУ МИФИ, 2016);
- III Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛАПЛАЗ-2017» (Москва, 2017);
- XX Международный симпозиум «Наноп физика и наноэлектроника» (Нижний Новгород, 2016);
- Международная научно-техническая и научно-методическая конференция «Современные технологии в науке и образовании – СТНО – 2016» и «СТНО – 2017» (Рязань, 2016, 2017);
- Международная научно-практическая конференция «Математика: фундаментальные и прикладные исследования и вопросы образования» (Рязань, 2016);
- XIII Международная научная конференция «Дифференциальные уравнения и их приложения в математическом моделировании» (Мордовия, Рузаевка, 2017);
- Третья российская конференция «Графен: молекула и 2D кристалл» (Новосибирск, 2019).

Публикации по теме диссертационного исследования

Результаты исследований опубликованы в 68 научных работах, из них 6 статей в журналах из списка ВАК (в том числе 3 статьи, включенные в базу Scopus), 4 статьи в других изданиях, 58 тезисов докладов на российских и международных конференциях.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы, изложена на 118 страницах, включает 34 рисунка, 3 таблицы. Список цитируемой литературы содержит 93 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы основные задачи исследований и научные положения, выносимые на защиту, обоснованы научная новизна и практическая значимость полученных результатов. Также во введении представлен обзор научных публикаций, посвященных исследованию электрон-электронных и электрон-фононных взаимодействий в полупроводниковых и графеновых структурах.

$Al_xGa_{1-x}As (Si (n \sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}))$	
$n - GaAs$	$\sim 100 \text{ \AA}$
$AlGaAs$	$\sim 300 \text{ \AA}$
$GaAs$	$\sim 50 \text{ \AA}$
$AlAs$	$\sim 20 \text{ \AA}$
$GaAs$	$\sim 50 \text{ \AA}$
$AlGaAs$	$\sim 300 \text{ \AA}$
$i - GaAs (2DEG, n_s \sim 10^{12} \text{ cm}^{-2})$	$\sim 200 \text{ \AA}$
Подложка $GaAs$	

Рис. 1. Геометрия исследуемой гетероструктуры

В первой главе произведены расчеты зонной структуры гетероперехода и температурных зависимостей времени электрон-электронного взаимодействия для случая умеренно легированного гетероперехода с одной заполненной подзоной размерного квантования.

На рис. 1 показана геометрия исследуемой гетероструктуры.

Для анализа кинетики электронов необходим анализ влияния экранирования потенциала как внешнего возмущения на всю двумерную электронную систему. Влияние вышеуказанного фактора удобно описывать матричной диэлектрической функцией. Фурье-образ внешнего возмущения подставляется в интеграл столкновений в уравнении Больцмана, результатом решения которого является время электрон-электронной релаксации. Решение данного интегродифференциального уравнения является сложным с математической точки зрения, так как необходим точный учет потенциального профиля квантовой ямы. В большинстве работ потенциальная яма при подстановке в интеграл столкновений аппроксимируется прямоугольным профилем, однако попытка применения аналитических результатов оказалась неудачной.

Зонные диаграммы исследованной наноструктуры были рассчитаны методом самосогласованного решения уравнений Шредингера и Пуассона. Для дальнейшего анализа удобнее использовать треугольную аппроксимацию профиля гетероперехода с изломом (рис. 2).

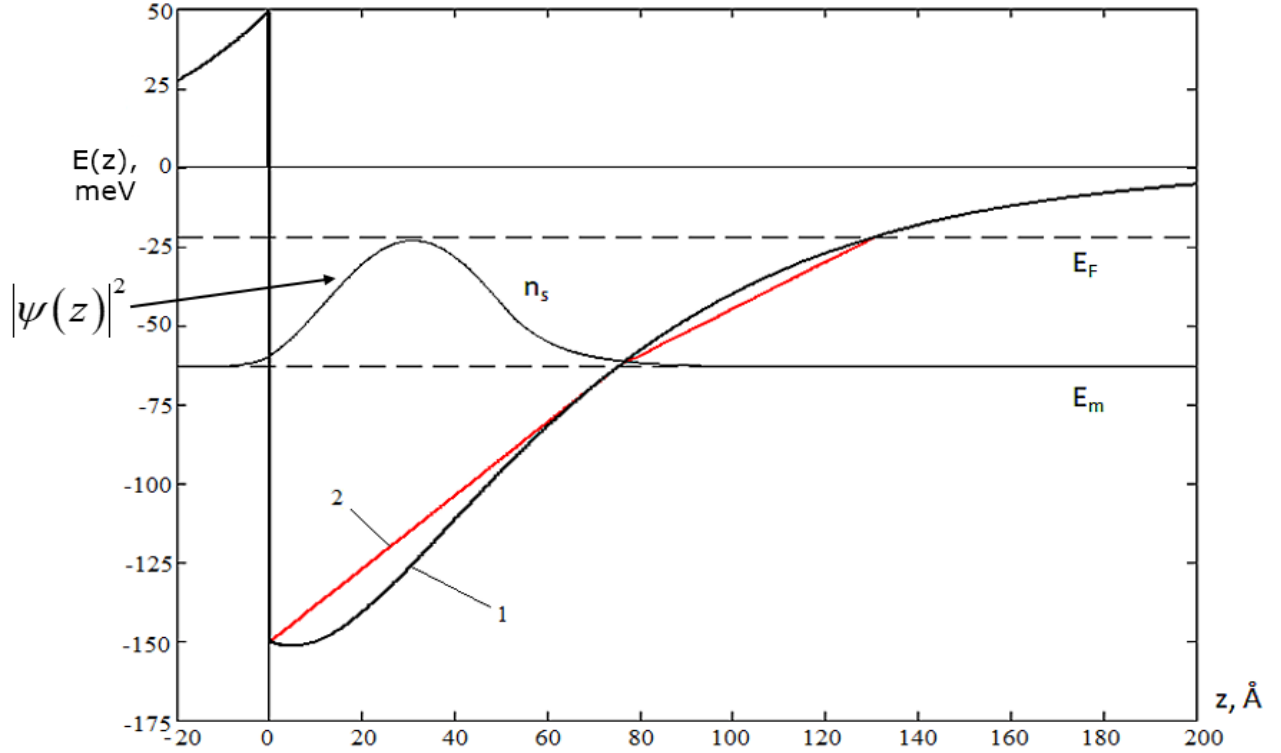


Рис. 2. Аппроксимация потенциальной ямы гетероперехода для $n_s = 6.3 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$. 1 – реальный профиль, 2 – аппроксимация

В рамках приближения хаотических фаз [3] интеграл столкновений в уравнении Больцмана для времени электрон-электронного взаимодействия имеет вид

$$\frac{1}{\tau_i^{ee}} = \int_{-\infty}^{\infty} d\omega \sum_{jkl} \sum_{\mathbf{k}, \mathbf{p}, \mathbf{q}} \left| V_{tot}^{ijkl}(\mathbf{q}, \omega) \right|^2 \delta(E_k(\mathbf{k}+\mathbf{q}) + E_l(\mathbf{p}-\mathbf{q}) - E_i(\mathbf{k}) - E_i(\mathbf{p})) f_{\mathbf{k}} f_{\mathbf{p}} (1-f_{\mathbf{k}+\mathbf{q}})(1-f_{\mathbf{p}-\mathbf{q}}), \quad (1)$$

где $V_{tot}^{ijkl}(\mathbf{q}, \omega)$ – Фурье-образ матричного элемента полного потенциала экранирования, f – функция Ферми – Дирака, $\delta(x)$ – дельта-функция. Для случая одной заполненной подзоны суммирование по индексам i, j, k, l не производится, тогда после преобразований получим, что время электрон-электронных взаимодействий имеет вид

$$\tau_{ee}^{intra} = \sigma(E_0, E_1, d, T) + p(T),$$

где $E_{ext}(0) = -E_0$, $E_{ext}(d) = -E_1$ – параметры гетероперехода, то есть выделяется зависящая только от температуры функция.

При использовании аппроксимации реального профиля гетероперехода треугольной ямой, когда под уровнем Ферми имеется ровно одна заполненная подзона размерного квантования, результаты расчета времени внутриподзонной релаксации хорошо согласуются с экспериментальной зависимостью (рис. 3).

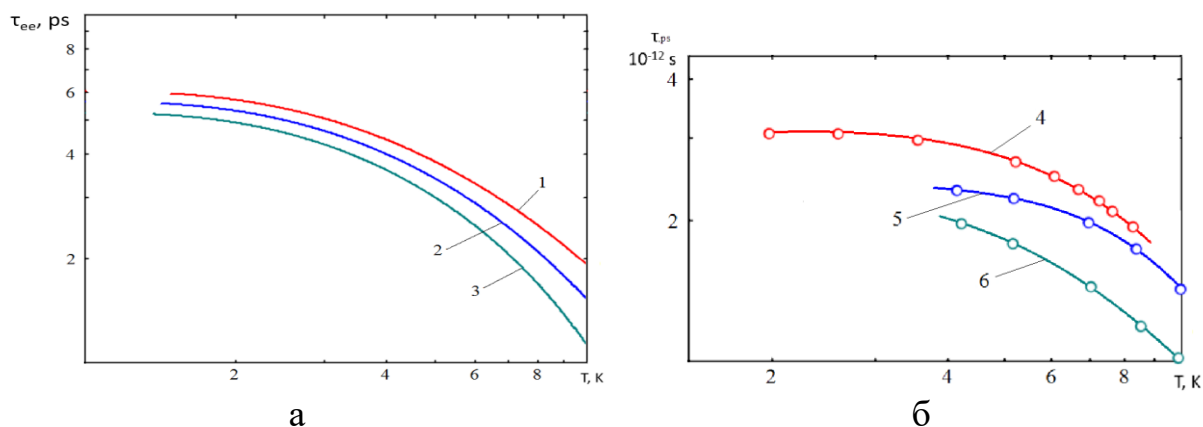


Рис. 3. Сопоставление теоретических (а) и экспериментальных (б, [4]) зависимостей для $n_s = 8 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ — кривые 1 и 4, $n_s = 6.9 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ — 2 и 5, $n_s = 6.3 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ — 3 и 6

Использование предложенной методики не ограничивает выбор профиля потенциальной ямы. При подстановке в исходные выражения требуемых значений возможно получение температурной зависимости времени релаксации для иных структур с аналогичной геометрией.

Вторая глава посвящена исследованию электрон-электронных взаимодействий в гетеропереходах с сильным легированием, где наблюдаются две заполненные подзоны размерного квантования. Исследованы каналы электрон-электронного взаимодействия, произведен анализ матричных элементов полного потенциала экранирования, выполнен спектральный анализ диэлектрической функции.

Для исследования электрон-электронных взаимодействий в сильно легированном гетеропереходе необходимо применить треугольную аппроксимацию с двумя изломами (рис. 4).

Для анализа времени электрон-электронных взаимодействий необходимо рассмотреть все возможные сценарии прохождения возмущения от источника. Каждому сценарию электрон-электронных взаимодействий соответствуют собственные матричные элементы полного потенциала экранирования, учитывающие переходы внутри и между подзонами. Расчет предполагает использовать в качестве модели слабонеоднородный взаимодействующий двумерный электронный газ со свойствами заряженной Ферми-жидкости, что делает справедливым применение приближения хаотических фаз и гидродинамического приближения.

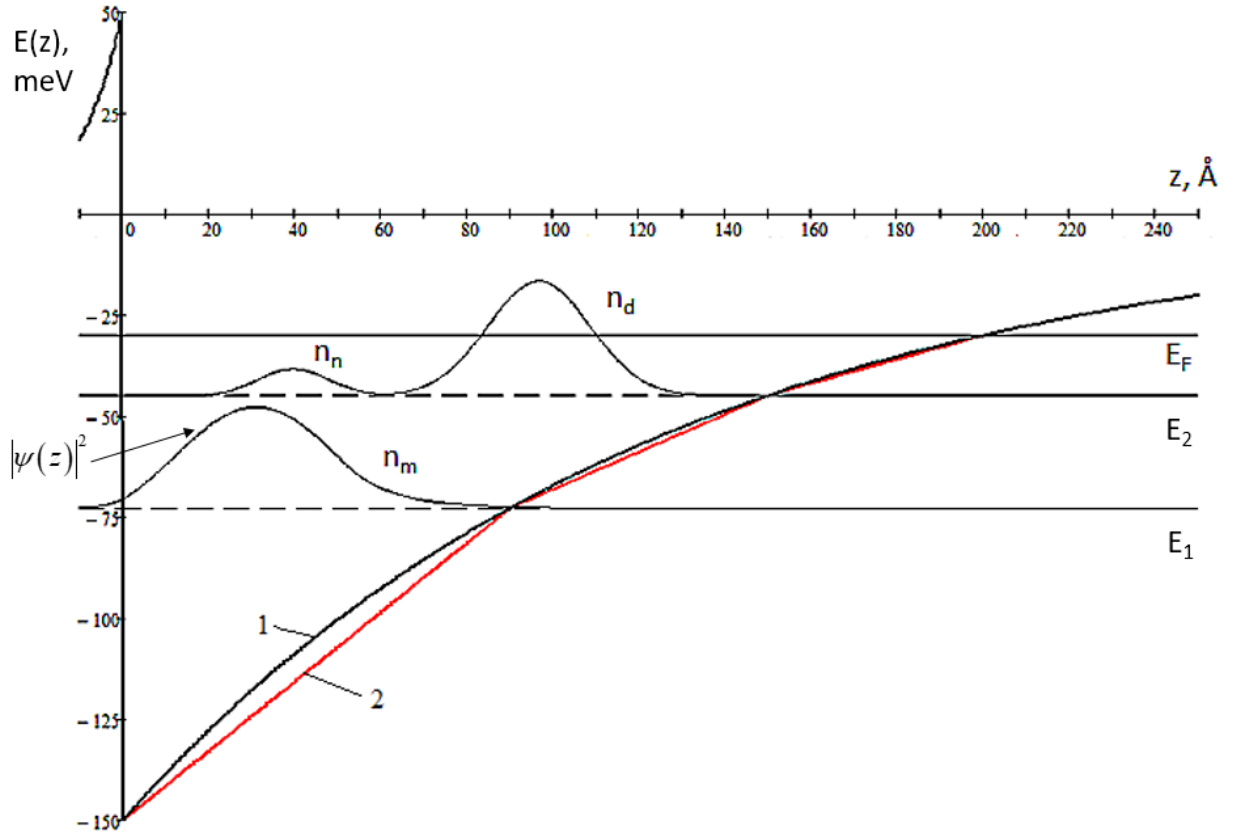


Рис. 4. Энергетическая диаграмма зоны проводимости $E_c(z)$ гетероперехода с двумя заполненными подзонами размерного квантования E_1 и E_2 ; n_m и $n_{n,d}$ — поверхностные концентрации 2D электронов, E_F — энергия Ферми. 1 — реальный профиль, 2 — аппроксимация

Для расчета каждого типа взаимодействия удобно использовать фейнмановские диаграммы. Например, для внутриподзонного m-m взаимодействия фейнмановские диаграммы представлены на рис. 5, матричный элемент тензора полной экранировки имеет вид

$$V_{tot}^{mmmm}(\mathbf{q}, \omega) = \frac{V_{ext}^{mm}(\mathbf{q})}{\epsilon_{mm}(\mathbf{q}, \omega)} = \frac{E_m}{2\epsilon_{GaAs} d_m S(q^3 + 2\pi e^2 q^4 \Pi_{mm}(\mathbf{q}, \omega))},$$

где ϵ_{GaAs} — диэлектрическая проницаемость GaAs, а поляризационная функция

$$\Pi_{mm}(\mathbf{q}, \omega) = \frac{2\gamma\sqrt{n_m}}{q} \left\{ \frac{q}{\sqrt{n_m}} - \left[\sqrt{2\pi} - \left(\frac{q}{2\sqrt{n_m}} - \frac{m^*\omega}{\hbar\sqrt{n_m}q} \right)^2 \right]^{1/2} - \left[\sqrt{2\pi} - \left(\frac{q}{2\sqrt{n_m}} + \frac{m^*\omega}{\hbar\sqrt{n_m}q} \right)^2 \right]^{1/2} \right\},$$

тогда соответствующее время электрон-электронного взаимодействия получается из (1):

$$\left(\frac{1}{\tau_{mn}^{\text{inter}}}\right) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{d\omega}{\pi^2 \cosh^2(\hbar\omega/2k_B T)} \sum_{\mathbf{q}} |V_{\text{tot}}^{mnmn}(\mathbf{q}, \omega)|^2 \Pi_{mn}(\mathbf{q}, \omega) \times \\ \times \left[\Pi_{mn}(\mathbf{q}, \omega) (\Pi_{mn}(\mathbf{q}, \omega))^* \right]^{1/2}.$$

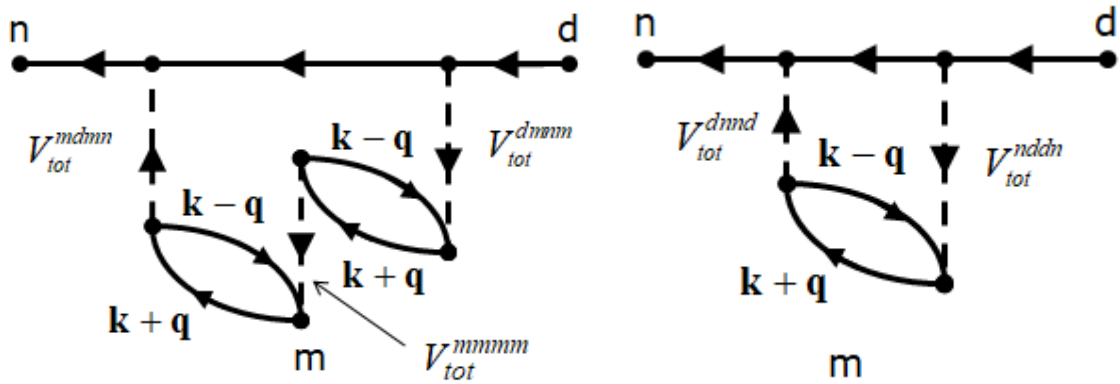


Рис. 5. Фейнмановские диаграммы, иллюстрирующие различные виды электрон-электронных взаимодействий. Слева – межподзонаное взаимодействие с внутриподзональными переходами, справа – межподзональное взаимодействие с межподзональными переходами

Расчеты температурной зависимости времени электрон-электронного взаимодействия τ_{ee}^{th} (рис. 6) выполнены в соответствии со схемой-моделью разрушения квантования Ландау [4]. При этом с учетом каналов, включающих в себя меж- и внутриподзональные переходы, расчеты τ_{ee}^{th} выполнены в соответствии со следствием правила Матиссена $\tau_{ee}^{-1} = \sum_i (\tau_{ee}^{-1})_i$, где суммирование производится по всем типам взаимодействия.

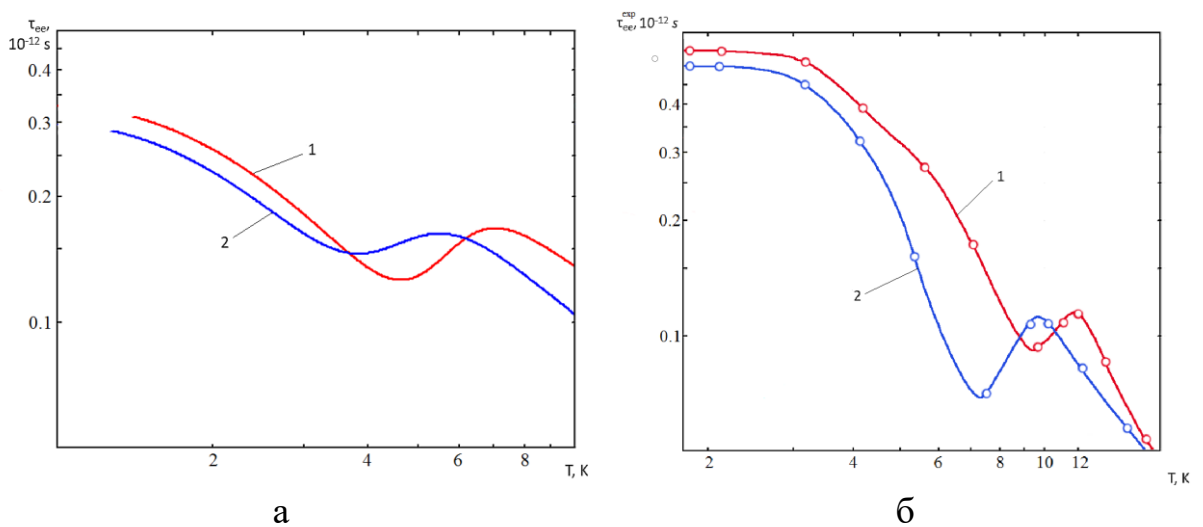


Рис. 6. Сравнение расчетных кривых $\tau_{ee}^{\text{th}}(T)$ (а) и экспериментальных кривых $\tau_{ee}^{\text{exp}}(T)$ (б, [2]) для различных концентраций плотности электронов m -подзоны: кривые 1 – $9.1 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$, 2 – 10^{12} cm^{-2}

Для определения природы наблюдаемых аномалий был произведен спектральный анализ дисперсионных выражений $\varepsilon(\mathbf{q}, \omega)$ для различных каналов электрон-электронных взаимодействий и различных концентраций n_m , n_d и n_n для случая, когда заполнены две подзоны размерного квантования ($n_m > 8 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$). Условие существования частоты плазменных осцилляций ω_p является дисперсионным выражением $\varepsilon(\mathbf{q}, \omega_p) = 0$. Спектры показаны на рис. 7.

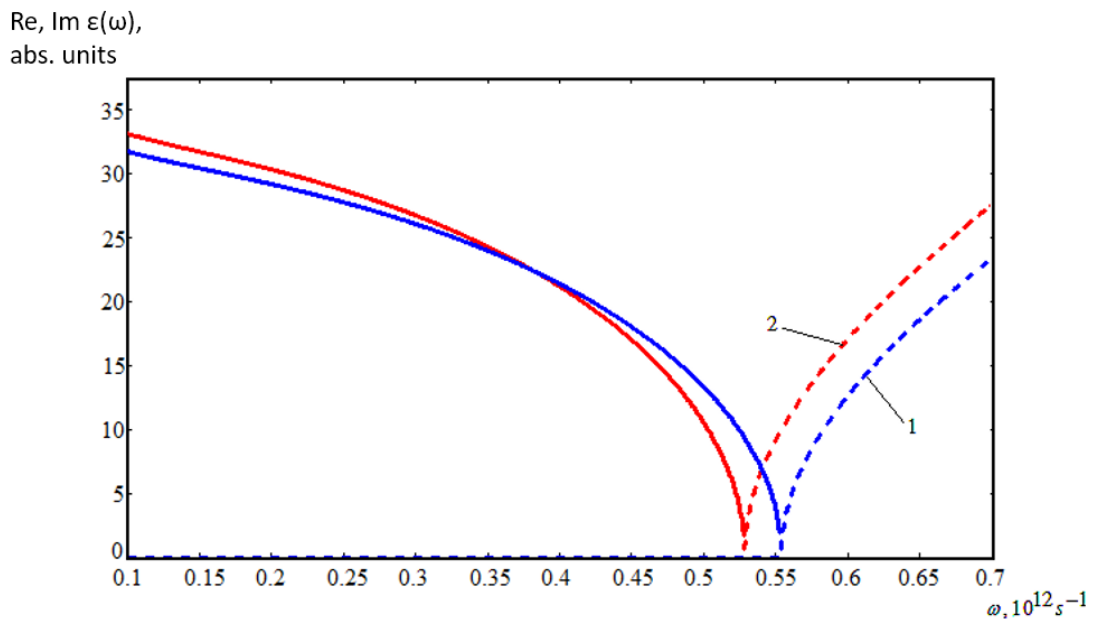


Рис. 7. Частотная зависимость диэлектрической функции для каналов электрон-электронного «*m-d*» взаимодействия для различных концентраций n_m , cm^{-2} : 1 – $9.1 \cdot 10^{11}$, 2 – $10.0 \cdot 10^{11}$, $d_p/d_m=3.5$

В **третьей главе** рассмотрен процесс дифракции гауссова пучка ТМ – поляризованной электромагнитной волны на наноструктуре «металл – нелинейная пленка – полупроводник» с учетом нелинейности диэлектрической проницаемости полупроводниковой пленки. В рамках теории развит модовый метод расчета процесса взаимодействия излучения со структурой, позволяющий рассчитывать для фиксированного потока энергии возмущения потоки энергий, возникающих в процессах дифракции. Процесс дифракции электромагнитного излучения в многослойных и диссипативных средах представляет собой одну из важнейших задач физики полупроводников [5].

В работе произведен расчет процесса отражения гауссова пучка с возбуждением поверхностных и объемных электромагнитных полей в структуре, где уже при относительно небольших напряженностях

электромагнитного поля нелинейность в диэлектрической проницаемости будет оказывать влияние на процесс отражения от нелинейной структуры. Последний представляет собой четыре области, характеризующиеся диэлектрическими проницаемостями $\varepsilon_1 = 1$ – вакуум, $\varepsilon_2(\omega)$ – металл, $\varepsilon_3(\omega)$ – тонкая нелинейная пленка, ε_4 – диэлектрик (рис. 8).

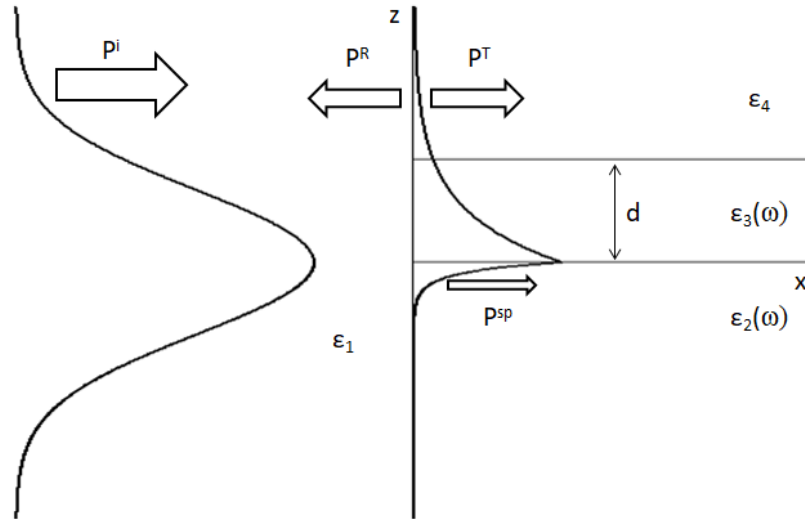


Рис. 8. Процесс дифракции при нормальном падении электромагнитной волны на диэлектрический барьер

Магнитное поле представлено в виде

$$\mathcal{H}(x, z) = G(z) \exp(-ik_x x), \text{ где } G(z) = C_0 / (1 + z^2/W_0^2),$$

где C_0 и W_0 – параметры пучка.

Уравнения Максвелла

$$i\omega \mathcal{H} = c \operatorname{rot} \mathcal{E} \text{ и } i\omega \varepsilon_i(\omega) \mathcal{E} = -c \operatorname{rot} \mathcal{H}$$

в декартовой системе в совокупности с гармоническим характером распространения каждой моды вдоль оси X $\{\mathcal{H}(x, z), \mathcal{E}(x, z)\} = \{\mathbf{H}(z), \mathbf{E}(z)\} \exp(ik_x x)$ связывают компоненты мод ТМ — поляризованного излучения (E_x, E_z, H_y) следующим образом:

$$\mathcal{E}_x(x, z) = \frac{ic}{\omega \varepsilon_i} \frac{\partial H_y}{\partial z}; \quad \mathcal{E}_z(x, z) = \frac{ic}{\omega \varepsilon_i} \frac{\partial H_y}{\partial x};$$

$$E_x(z) = \frac{ic}{\omega \varepsilon_i} \frac{dH_y}{dz}; \quad E_z(z) = -\frac{c}{\omega \varepsilon_i} k_x H_y(z),$$

что можно получить из уравнений Максвелла с учетом планарности задачи. Моды $H(z)$, а также волновые числа k_x , k_s , β определяются из волнового

уравнения и граничных условий. Волновое уравнение дает зависимость поля $H_y(z)$ для каждой из областей:

$$\frac{d^2 H_y}{dz^2} + \left[\frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon_i - k_x^2 \right] H_y = 0$$

с граничными условиями $H_y(z = -0) = H_y(z = +0)$, $E_x(z = -0) = E_x(z = +0)$, которые полностью определяют структуру каждой моды при $x < 0$ и $x > 0$.

Полученные результаты удовлетворяют закону сохранения энергии: $P^i = P^R + P^T + P^{sp}$, при этом:

$$P_x^i = \frac{c^2}{4\pi\omega} \int_0^\infty I_\beta I_\beta^* k_x^{(1)} d\beta = \frac{c}{8\pi} \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_1}} C_0^2 W_0 \frac{\pi}{2} - \text{падающее излучение,}$$

$$P_x^R = \frac{c^2}{8\pi\omega} \int_0^\infty (R_\beta^+ R_\beta^{+*} + R_\beta^- R_\beta^{-*}) k_x^{(1)} d\beta - \text{отраженное объемное излучение,}$$

$$P_x^T = \frac{c^2}{8\pi\omega} \left[TT^* k_s + \int_0^\infty T_\beta T_\beta^* k_x^{(2)} d\beta \right] - \text{прошедшее излучение,}$$

P^{sp} – поток поверхностного поляритона,

где I_β и R_β^\pm — амплитуды падающей и отраженной волн, а T_β и T — соответственно амплитуды объемного излучения и поверхностной волны.

Результаты вычислений соответствующих потоков в зависимости от величин диэлектрических проницаемостей представлены в таблице.

Зависимости величин потоков от значений диэлектрических проницаемостей

ε_2	ε_3	ε_4	P^R	P^T	P^{sp}
-20	1	11.7	0.45	0.45	0.1
-50	5	12.0	0.54	0.29	0.17
-100	10	12.2	0.67	0.14	0.21
-1000	15	12.4	0.79	0.09	0.12

Рассмотренные в главе процессы дифракции электромагнитного излучения в пассивной волноведущей среде относятся к той ситуации, когда нелинейные добавки к диэлектрической проницаемости малы настолько, что процессы дифракции практически не зависят от интенсивности полей и их расчет основывается на линейной модели.

В **заключении** сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе.

Основные результаты и выводы

1. Произведен расчет зонной структуры гетероперехода $Al_xGa_{1-x}As(Si)/GaAs$ с использованием кусочно-линейной аппроксимации потенциального профиля для решения уравнения Больцмана путем совместного решения уравнений Шредингера и Пуассона, позволяющий получить аналитические зависимости времени электрон-электронного взаимодействия.

2. Произведен расчет времени электрон-электронных взаимодействий для умеренно и сильно легированного гетероперехода с учетом ослабления кулоновского взаимодействия между электронами за счет поляризуемости кристаллической решетки полупроводника.

3. Построены теоретические температурные и концентрационные зависимости времени электрон-электронного взаимодействия и продемонстрировано качественное соответствие теоретических и экспериментальных результатов, показавшие применимость используемого метода для структур с аналогичной геометрией. Показано, что в случае сильнолегированного гетероперехода при заполнении второй подзоны размерного квантования возникают аномалии в зависимостях, связанные с межподзонным взаимодействием. Получены матричные элементы кулоновской экранировки для различных каналов с учетом предлагаемой модели.

4. Произведен спектральный анализ диэлектрической функции, объясняющий возникновение аномалий в температурных зависимостях. Показано, что диэлектрическая функция имеет в комплексной плоскости частот особую точку, поэтому следует вначале проводить суммирование по волновым векторам, после чего – интегрирование по частоте. Необходимо отметить, что в большинстве работ по исследованию электрон-электронных взаимодействий используется статический предел, но в нашей задаче функция распределения имеет достаточно сложную структуру, поэтому необходимо ожидать резонансные отклики на непрерывный спектр потенциала внешнего возмущения. Таким образом, решение поставленной задачи требует исследования частотной зависимости с использованием приближения хаотических фаз, суть которого состоит в пренебрежении связью между изменениями Фурье-образов плотностей, относящихся к разным длинам волн.

5. Рассчитана дифракция электромагнитной волны на наноструктуре в рамках модового метода. Предложен модовый метод расчета планарного волновода на полупроводниковой гетероструктуре. Использование модового метода не накладывает принципиальных требований ни на геометрию структуры, ни на структуру электромагнитных полей. То есть модель может

быть использована для расчета дифракции для различных типов (ТЕ и ТМ) поляризации.

Личный вклад автора

1. Определены условия применимости метода приближения хаотических фаз для решения уравнения Больцмана и дальнейшего анализа полупроводниковой гетероструктуры $Al_xGa_{1-x}As(Si)/GaAs$.

2. Получено решение интегродифференциального уравнения Больцмана для времени электрон-электронного взаимодействия с учетом ослабления кулоновского взаимодействия между электронами за счет поляризуемости кристаллической решетки полупроводника.

3. Построены и обоснованы фейнмановские диаграммы для схемы-модели затухания квантования Ландау в сильно легированном гетеропереходе $Al_xGa_{1-x}As(Si)/GaAs$.

4. Решена задача о распространении поверхностного поляритона в многослойной среде («металл – нелинейная пленка – полупроводник») с учетом дисперсии диэлектрической функции.

Основные публикации по теме диссертационного исследования

1. **[Входит в перечень ВАК]** Дюбуа А.Б., Зилотова М.А., Кучерявый С.И., Сафoshкин А.С. Кинетические процессы в умеренно легированном гетеропереходе // Вестник РГРТУ. 2013. №3 (выпуск 45). С. 88-92. Рязань, РГРТУ.

2. **[Входит в перечень ВАК]** Ambartsumyan V.A., Andryushchenko E.A., Bukhenskyu K.V., Dubois A.B., Dvoretzkova E.A., Gordova T.V., Ivanova N.I., Kucheryavyu S.I., Mashnina S.N., **Safoshkin A.S.** Channels of electron-electron interactions in highly doped heterojunction // Nanosystems: physics, chemistry, mathematics. 2014. Vol. 5, Issue 3. P. 343-353.

3. **[Входит в список Scopus]** Bukhenskyu K.V., Dubois A.B., Gordova T.V., Kucheryavyu S.I., Mashnina S.N., **Safoshkin A.S.** Electron-electron interactions in highly doped heterojunction // Physics Procedia. 2015. Vol. 71. P. 359-363.

4. **[Входит в список Scopus]** Baskakova A.V., Bukhenskyu K.V., Dubois A.B., Kucheryavyu S.I., Mashnina S.N., **Safoshkin A.S.** Kinetic processes in heavily doped semiconductor heterojunctions // Journal of Physics: Conference Series. 2016. Vol. 747. P. 012026.

5. **[Входит в список Scopus]** Bukhenskyu K.V., Dubois A.B., Kucheryavyu S.I., Mashnina S.N., **Safoshkin A.S.**, Baukov A.A., Shchigorev E.Yu. Temperature dependences of the time of electron-electron

interactions in two-dimensional heterojunction // Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 941. P. 012059.

6. **[Входит в перечень ВАК]** Бухенский К.В., Дюбуа А.Б., Конюхов А.Н., Кучерявый С.И., Машнина С.Н., **Сафошкин А.С.** Особенности решения интегро-дифференциальных уравнений Максвелла и возбуждения поверхностного поляритона на планарной структуре // Журнал Средневолжского математического общества. 2017. Т. 19. № 3. С. 73–81.

Личный вклад соискателя в работах с соавторами заключается в следующем:

[1, 3] – расчет зонной структуры гетероперехода, **[2, 4, 5]** – расчет матричных элементов, используемый для расчета времени электрон-электронных взаимодействий, **[6]** – расчет дифракции электромагнитной волны.

Список цитируемой литературы.

1. Glazov S.Yu., Kurbakova E.S., Meshcheryakova N.E. Electron systems with a superstructure under stark quantization conditions // Phys. Of Wave Phenomena. Vol. 18. P. 313 (2010).
2. Slutzky M., Entin-Wohlman O., Berk Y., Palevski A. and Shtrikman H. Electron-electron scattering in coupled quantum wells // Phys. Rev. B 53.P. 4065 (1996).
3. Пайнс Д., Нозьер Ф. Теория квантовых жидкостей. М.: Мир, 1967. 382 с.
4. Kadushkin V.I., Dubois A.B. The Role of Electron – Electron Relaxation in Landau Quantization Damping // Phys. Low-Dim. Struct. Vol. 11/12. P. 27-37 (2002).
5. Поверхностные поляритоны // под ред. В.М. Аграновича, Д.М. Миллса. М.: Наука, 1986.

Сафошкин Алексей Сергеевич

**КИНЕТИКА ВЫРОЖДЕННОГО КВАЗИДВУМЕРНОГО
ЭЛЕКТРОННОГО ГАЗА В ЛЕГИРОВАННЫХ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КВАНТОВЫХ
ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Подписано в печать _____. Формат бумаги 60×84 1/16.

Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз.

Рязанский государственный радиотехнический университет
имени В.Ф. Уткина.

390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.