

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Факультет
информационных технологий
и электроники
наименование факультета

Кафедра
Нано – и микроэлектроника
наименование кафедры

Направление подготовки 11.03.04. Электроника и наноэлектроника
код и наименование

Профиль «Микроэлектроника и твердотельная электроника»
наименование профиля

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

ПензГУ 02. 11.03.04. 004 ПЗ
обозначение, присваиваемое кафедрой

на тему

Анализ моделей примесных центров в полупроводниковых структурах для
тема бакалаврской работы
элементов квантовой электроники

Студент группы 21ПД1
номер группы

Веденяпин Д.Р.
подпись, дата 9.06.25, фамилия, иниц.

Руководитель доцент
должность наименование организации

Игошина С.Е.
подпись, дата 9.06.25, фамилия, иниц.

Нормоконтролер ст. преподаватель
должность

Рыжова Т.Н.
подпись, дата 11.06.25, фамилия, иниц.

Работа допущена к защите в ГЭК (протокол заседания кафедры от 09.06.25 № 10)

Заведующий кафедрой Пронин И.А.
подпись, дата 9.06.25, фамилия, иниц.

Работа защищена с оценкой удовл. (протокол ГЭК от 20.06 № 13)

Секретарь ГЭК Вольсков А.А.
подпись, дата 20.06.25, фамилия, иниц.

РЕФЕРАТ

Пояснительная записка состоит из 81 страниц, 9 рисунков, списка использованных источников из 68 наименований и 3-х приложений.

Ключевые слова: радиопоглощающие ферриты, распространение электромагнитных волн, волновое уравнение, отражательная способность, частотная зависимость

Цель: анализ и теоретическое исследование моделей примесных центров в полупроводниковых структурах, а также их потенциального применения в элементах квантовой электроники.

Задачи:

1. Анализ существующих моделей и исследований в области применения квантовомеханических эффектов, передачи и хранения квантовой информации, а также общих принципов кубитов на основе примесных центров в полупроводниковых структурах.

2. Исследование и анализ поведения примесных центров в низкоразмерных полупроводниковых структурах, таких как оксид цинка (ZnO), InSb и CdSe.

3. Теоретическое исследование и сравнительный анализ зависимости энергии связи примеси под воздействием электрического поля в низкоразмерных структурах, важных для создания элементов квантовой электроники.

Актуальность данной работы обусловлена стремительным развитием квантовых технологий, которые обещают революционизировать множество областей — от вычислительной техники и криптографии до медицины и материаловедения. Центральное место в этих технологиях занимают квантовые структуры и управление квантовыми состояниями, особенно на уровне отдельных частиц.

Объект исследования: Квантовые точки на основе оксида цинка (ZnO), InSb и CdSe

					ПГУ 2. 11.03.04. 004 ПЗ	Лист
						2
Изм.	Лист	№докум	Подп.	Дата		

СОДЕРЖАНИЕ

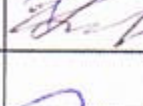
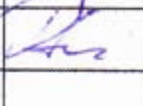
Введение	7
1 Применение квантовомеханических эффектов в системах защиты информации	9
1.1 Теоретические и экспериментальные исследования, посвященные передаче квантовой информации с помощью фотонов	9
1.2 Теоретические и экспериментальные исследования в области хранения квантовой информации	14
1.3 Анализ литературных данных о свойствах полупроводниковых квантовых структур с примесными центрами	18
2 Модели кубитов на основе примесных центров в полупроводниковых оксидах	25
2.1 Общие сведения о кубитах	25
2.2 Некоторые приложения ZnO	30
2.3 Исследование мелких доноров в ZnO	32
3 Теоретическое исследование зависимости энергии связи примеси в низкоразмерных структурах	40
3.1 Влияние электрического поля на электрооптические свойства полупроводниковых квантовых точек типа «ядро/оболочка» на основе AlAs/GaAs	40
3.2 Сравнительный анализ теоретических зависимостей	47
Заключение	48
Список использованных источников	49

					ПГУ 2. 11.03.04. 004 ПЗ	Лист
						3
Изм.	Лист	№докум	Подп.	Дата		

ВВЕДЕНИЕ

В современном мире наблюдается большой темп развития информационных технологий, и одним из наиболее перспективных направлений является область квантовых технологий. Эти технологии, основанные на фундаментальных принципах квантовой механики, таких как суперпозиция, запутанность и туннелирование, обещают значительно превзойти возможности классических систем в решении сложных вычислительных задач, обеспечении безусловной безопасности связи и разработке новых материалов с уникальными свойствами. В основе этих революционных изменений лежат квантовые структуры — наноразмерные объекты, в которых движение носителей заряда ограничено, что приводит к квантованию энергетических уровней и появлению особых оптических и электронных характеристик

Одним из ключевых элементов для построения квантовых компьютеров, квантовых сетей и высокочувствительных сенсоров являются примесные центры в полупроводниковых материалах. Эти локализованные дефекты или внедренные атомы других элементов способны создавать дискретные энергетические состояния в запрещенной зоне полупроводника, которые могут быть использованы в качестве кубитов — базовых единиц квантовой информации. Спинные состояния электронов или ядер, связанных с такими центрами, обладают длительным временем когерентности, что делает их идеальными кандидатами для кодирования и обработки квантовой информации. Кроме того, некоторые примесные центры являются эффективными источниками одиночных фотонов, что критически важно для реализации протоколов квантовой криптографии и создания распределенных квантовых систем.

					ПГУ 2. 11.03.04. 004 ПЗ			
Изм.	Лист	№докум.	Подп.	Дата				
Разраб.		Веденяпин			ВВЕДЕНИЕ			
Пров.		Игошина						
Н.контр		Рыжова		09.06.15				
Утв.					гр. 21ПД1			

Однако, практическая реализация квантовых устройств на основе примесных центров сталкивается с рядом существенных вызовов. К ним относятся необходимость точного контроля над положением и концентрацией примесей на наноуровне, борьба с декогеренцией, вызванной взаимодействием кубитов с окружающей средой, а также масштабирование систем до большого количества взаимодействующих кубитов. Понимание и предсказание поведения примесных центров в различных полупроводниковых структурах, таких как квантовые точки, проволоки и ямы, является фундаментальной задачей для преодоления этих препятствий.

Данная дипломная работа посвящена анализу моделей и теоретическому исследованию примесных центров в полупроводниковых структурах, с акцентом на их применение в элементах квантовой электроники. В работе будет проведен всесторонний обзор современных теоретических и экспериментальных исследований в области квантовой передачи и хранения информации, рассмотрены общие принципы функционирования кубитов и критерии их физической реализации. Особое внимание будет уделено анализу поведения мелких доноров в полупроводниковых оксидах, таких как оксид цинка (ZnO), а также исследованию моделей примесных центров в низкоразмерных структурах на основе антимонида индия (InSb) и селенида кадмия (CdSe). Теоретическое исследование зависимости энергии связи примеси в этих структурах и сравнительный анализ полученных результатов позволят глубже понять физические процессы, лежащие в основе функционирования квантовых элементов, и предложить пути для оптимизации их свойств.

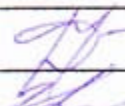
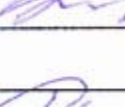
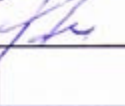
					ПГУ 2. 11.03.04. 004 ПЗ	Лист
						5
Изм.	Лист	№докум	Подп.	Дата		

1 Применение квантовомеханических эффектов в системах защиты информации

1.1 Теоретические и экспериментальные исследования, посвященные передаче квантовой информации с помощью фотонов

Передача квантовой информации является краеугольным камнем развивающихся квантовых технологий, включая квантовые вычисления, квантовую криптографию и квантовые сети. Среди различных носителей квантовой информации, фотоны занимают особое место благодаря своим уникальным свойствам: высокой скорости распространения, слабому взаимодействию с окружающей средой и относительной простоте манипуляций с использованием линейной оптики. Эти характеристики делают фотоны идеальными «летающими кубитами» для передачи квантовых состояний на большие расстояния [1].

Теоретические основы передачи квантовой информации базируются на фундаментальных принципах квантовой механики, таких как суперпозиция, квантовая запутанность и теорема о запрете клонирования. Суперпозиция позволяет фотону находиться одновременно в нескольких состояниях (например, поляризации), что является основой для кодирования квантовой информации. Квантовая запутанность, явление, при котором квантовые состояния двух или более частиц остаются взаимосвязанными независимо от расстояния между ними, играет ключевую роль в протоколах квантовой связи, таких как квантовая телепортация и квантовое распределение ключей [2]. Теорема о запрете клонирования гарантирует невозможность создания идеальной копии произвольного неизвестного квантового состояния, что обеспечивает безусловную безопасность квантовой криптографии [3].

					ПГУ 2. 11.03.04. 004 ПЗ			
Изм.	Лист	№докум	Подп.	Дата	Применение квантовомеханических эффектов в системах защиты информации	Лит.	Лист	Листов
Разраб.		Веденяпин					6	81
Пров.		Игошина						
Н.контр		Рыжова		10.06.15		гр. 21ПД1		
Утв.								

Одним из методов передачи квантовой информации является квантовая телепортация, которая собой метод передачи квантовой информации от отправителя к получателю без физического перемещения частицы, несущей это состояние. Вместо этого передается только квантовая информация. Этот процесс не нарушает теорему о запрете клонирования, так как исходная квантовая информация «уничтожается» в процессе измерения, становясь частью запутанного состояния, и воссоздается на стороне получателя из этого запутанного состояния [2].

Для осуществления квантовой телепортации необходимы три основных компонента: канал связи для передачи двух классических битов информации, средство генерации запутанного состояния Белла (*Bell state*) и его распределения между двумя удаленными точками, выполнение измерения Белла на одном из кубитов состояния Белла и возможность манипулирования квантовым состоянием на стороне получателя [2].

Экспериментальные демонстрации квантовой телепортации значительно продвинулись. В 2012 году группа ученых под руководством Хуана Иня (*Juan Yin*) из Университета науки и технологий Китая (*USTC*) продемонстрировала квантовую телепортацию и распределение запутанности на расстояние более 100 километров по свободному пространству [4]. Другая группа, включая Сяо-Сон Ма (*Xiao-Song Ma*) из Института квантовой оптики и квантовой информации (*IQOQI*) в Вене, продемонстрировала квантовую телепортацию на 143 километра с использованием активной обратной связи [5]. Эти эксперименты показали возможность передачи квантовых состояний на значительные расстояния, что является критически важным для построения глобальных квантовых сетей.

Более поздние исследования сосредоточились на использовании квантовой телепортации для создания взаимодействий между удаленными квантовыми системами, а не только для передачи состояний. Например, в феврале 2025

					ПГУ 2. 11.03.04. 004 ПЗ	Лист
						7
Изм.	Лист	№докум	Подп.	Дата		

года было опубликовано исследование, в котором успешно соединены два отдельных квантовых процессора с помощью фотонной сетевой интерфейсной карты для формирования единого, полностью связанного квантового компьютера. В этом подходе небольшие квантовые устройства связываются между собой, позволяя распределять вычисления по сети. Эти фотонные связи позволяют запутывать кубиты в отдельных модулях, что позволяет выполнять квантовую логику между модулями с использованием квантовой телепортации [6].

Новым направлением в развитии квантовых технологий стала возможность распределения квантовой запутанности на большие расстояния.

Распределение квантовой запутанности на большие расстояния является фундаментальной задачей для создания квантового интернета и защищенных квантовых коммуникаций. Запутанность — это чисто квантово-механическое явление, при котором две или более частицы могут иметь более тесную взаимосвязь, чем это допускается классической физикой, даже если частицы разделены большим расстоянием [7].

Исторически, дальность распределения запутанных фотонов была ограничена около 100 км как по оптическим волокнам, так и по свободному пространству из-за потерь и декогеренции. Однако значительный прорыв был достигнут с использованием спутников. В 2017 году команда под руководством Цзянь-Вэй Пана (*Jian-Wei Pan*) из Университета науки и технологий Китая использовала квантовый спутник *Micius* для распределения запутанных фотонов на расстояние более 1200 км между наземными станциями в Китае [7, 8]. Этот эксперимент продемонстрировал возможность поддержания запутанности фотонов на межконтинентальных расстояниях, что открывает путь к глобальным квантовым сетям. В эксперименте использовались телескопы Кассегрена для фокусировки света в пучок с расходимостью около 10 мкрад, а на Земле фотоны принимались с помощью телескопов диаметром 1.2–1.8 м для проверки поляризации и подтверждения запутанности с помощью теста Белла [7].

					ПГУ 2. 11.03.04. 004 ПЗ	Лист
						8
Изм.	Лист	№ докум	Подп.	Дата		

Для достижения дальнего распределения запутанных фотонных пар необходимы эффективные источники запутанных фотонных пар и эффективные одноканальные детекторы, а также стабильная экспериментальная установка [9]. Исследования также ведутся в области распределения запутанности по оптическим волокнам. Например, были продемонстрированы эксперименты по распределению запутанных по времени фотонных пар на 100 км оптического волокна с использованием детекторов с повышением частоты [9].

Квантовая криптография, в частности квантовое распределение ключей (*Quantum Key Distribution, QKD*), использует фундаментальные законы квантовой физики для обеспечения безусловной безопасности обмена ключами между двумя сторонами. Любая попытка подслушивания в квантовом канале неизбежно изменяет квантовое состояние фотонов, что немедленно обнаруживается законными пользователями, делая перехват информации невозможным без обнаружения [10, 11].

Протокол BB84 (Беннетт-Брассар 1984), один из первых и наиболее известных протоколов *QKD*, использует поляризацию фотонов для кодирования битов информации. Отправитель (Алиса) случайным образом выбирает базис поляризации (например, прямоугольный или диагональный) для каждого фотона, а получатель (Боб) также случайным образом выбирает базис для измерения. После передачи они публично сравнивают выбранные базисы (но не значения битов), оставляя только те биты, для которых базисы совпали, формируя секретный ключ [12].

Эксперименты по *QKD* были успешно проведены на различных расстояниях и в различных средах. Ранние эксперименты демонстрировали *QKD* по оптическим волокнам на десятки и сотни километров. Например, было показано, что поляризационная запутанность достаточно устойчива на расстояниях до 100 км в волокнах [13]. В свободном пространстве были достигнуты расстояния до 144 км [13].

					ПГУ 2. 11.03.04. 004 ПЗ	Лист
						9
Изм.	Лист	№ докум	Подп.	Дата		

Современные исследования сосредоточены на повышении практичности и масштабируемости *QKD*. В мае 2025 года было продемонстрировано распределение квантовых ключей на расстояние более 400 км по стандартному оптическому волокну с использованием коммерческих лазеров, что значительно снижает сложность и стоимость оборудования [11]. Это достигается за счет использования методов, которые позволяют отслеживать частоты фотонов даже при использовании лазеров более низкого качества, например, с помощью быстрого преобразования Фурье [11].

Помимо *QKD*, развивается направление защищенной квантовой прямой связи (*Quantum Secure Direct Communication, QSDC*), которое обеспечивает безопасную и надежную связь по зашумленным и прослушиваемым каналам путем кодирования информации непосредственно в квантовых состояниях. В отличие от *QKD*, где целью является только установление секретного ключа, *QSDC* позволяет передавать само сообщение в квантовом канале с безусловной безопасностью [3].

Вызовы и перспективы

Несмотря на значительные успехи, передача квантовой информации с помощью фотонов сталкивается с рядом вызовов. Основные из них включают:

1. Потери в канале: Потери фотонов в оптических волокнах или в атмосфере ограничивают дальность передачи. Для преодоления этого используются квантовые повторители (*quantum repeaters*), которые позволяют расширять квантовые сети за счет создания запутанности между промежуточными узлами [13].
2. Декогеренция: Взаимодействие фотонов с окружающей средой может привести к потере их квантовых свойств (декогеренции), что снижает качество передаваемой информации. Разработка методов защиты от декогеренции, таких как пространства, свободные от декогеренции (*decoherence-free subspaces*), является важным направлением исследований [14].

					ПГУ 2. 11.03.04. 004 ПЗ	Лист
						10
Изм.	Лист	№ докум	Подп.	Дата		

3. Эффективность источников и детекторов: Для практических применений необходимы высокоэффективные источники одиночных фотонов и детекторы с низким уровнем шума. Прогресс в этой области, включая использование полупроводниковых квантовых точек для генерации одиночных фотонов, способствует развитию квантовых коммуникаций [15].

4. Интеграция с материальными кубитами: Для построения полноценных квантовых сетей и распределенных квантовых компьютеров требуется эффективное взаимодействие между фотонными кубитами (для передачи) и материальными кубитами (для хранения и обработки информации). Разработка надежных свето-материальных интерфейсов, сохраняющих квантовую информацию, является технологически сложной, но ключевой задачей [4, 1].

Будущее передачи квантовой информации с помощью фотонов выглядит многообещающим. Развитие спутниковых квантовых коммуникаций, создание глобальных квантовых сетей, а также интеграция фотонных систем с квантовыми компьютерами обещают революционизировать области связи, вычислений и безопасности. Продолжающиеся исследования в новых материалах, улучшения источников и детекторов, а также разработка более сложных протоколов будут способствовать дальнейшему прогрессу в этой захватывающей области.

1.2 Теоретические и экспериментальные исследования в области хранения квантовой информации

Хранение квантовой информации является не менее важной задачей, чем ее передача, для реализации полномасштабных квантовых технологий. Квантовая память (*quantum memory*) — это устройство, способное когерентно сохранять квантовое состояние фотона или другого кубита, а затем извлекать его по требованию с высокой точностью (*fidelity*) [16, 17]. Такие устройства критически важны для синхронизации вероятностных событий в квантовых вычислениях на основе линейной оптики, для построения квантовых повторителей

					ПГУ 2. 11.03.04. 004 ПЗ	Лист
						11
Изм.	Лист	№ докум	Подп.	Дата		

(*quantum repeaters*) в сетях дальней связи и для создания распределенных квантовых компьютеров [16, 18].

Основные требования к квантовой памяти включают:

- высокая точность (*fidelity*): способность сохранять квантовое состояние без искажений;
- высокая эффективность (*efficiency*): доля успешно сохраненных и извлеченных квантовых состояний;
- длительное время хранения (*storage time*): способность поддерживать когерентность квантового состояния в течение значительного периода;
- извлечение по требованию (*on-demand retrieval*): возможность извлекать сохраненную информацию в заданный момент времени;
- многомодовость (*multimode capability*): способность хранить несколько квантовых состояний одновременно или последовательно.

Теоретические основы квантовой памяти базируются на когерентном отображении квантового состояния света на стационарные состояния материи и обратно. Это достигается за счет сильного и контролируемого взаимодействия между фотонами и атомами или другими квантовыми системами.

Квантовая память на основе атомных ансамблей

Атомные ансамбли, особенно холодные атомы, являются одними из наиболее перспективных платформ для создания квантовой памяти благодаря их длительному времени когерентности и возможности коллективного усиления взаимодействия свет-материя. В таких системах квантовое состояние фотона отображается на коллективное спиновое возбуждение в ансамбле атомов, называемое спиновой волной (*spin wave*) [19, 20].

Одним из ключевых протоколов для реализации квантовой памяти в атомных ансамблях является электромагнитно-индуцированная прозрачность (*Electromagnetically Induced Transparency, EIT*). В рамках *EIT*-схемы интенсивный управляющий лазерный импульс используется для создания прозрачности

					ПГУ 2. 11.03.04. 004 ПЗ	Лист
						12
Изм.	Лист	№докум	Подп.	Дата		

среды для сигнального фотона, который затем когерентно поглощается и сохраняется в виде коллективного атомного возбуждения. Повторное применение управляющего импульса позволяет извлечь сохраненный фотон по требованию [19, 21]. Эксперименты с холодными атомами рубидия (Rb) продемонстрировали время жизни квантовой памяти, превышающее 6 мс, что на два порядка превышает ранее сообщавшиеся значения [22]. Также были достигнуты длительные времена жизни для фотонных поляризационных кубитов (*photonic polarization qubits*) в холодных атомах с использованием *EIT*-схемы [23].

Другие подходы включают использование спонтанного комбинационного рассеяния (*spontaneous Raman scattering*) для создания запутанности между спиновыми волнами и фотонами, что позволяет реализовать обмен запутанностью (*entanglement swapping*) между удаленными узлами памяти [20]. Например, была продемонстрирована квантовая телепортация между двумя удаленными узлами квантовой памяти на основе атомных ансамблей ($\sim 10^8$ атомов рубидия), соединенных 150-метровым оптическим волокном, с точностью 88(7)% [24].

Квантовая память на основе твердотельных систем

Твердотельные системы предлагают преимущества с точки зрения масштабируемости и интеграции. Особый интерес представляют кристаллы, легированные редкоземельными ионами (*rare-earth ion-doped crystals*), такие как $^{151}\text{Eu}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$, благодаря их уникальным оптическим и спиновым когерентным свойствам при низких температурах (около 4 К) [25, 26, 27].

Одним из наиболее успешных протоколов для твердотельной квантовой памяти является метод атомного частотного гребня (*Atomic Frequency Comb, AFC*). Этот метод позволяет когерентно сохранять квантовые состояния света в коллективных спиновых возбуждениях и извлекать их по требованию. В 2008 году была продемонстрирована первая квантовая память в твердом теле с использованием *AFC*-техники, хранящая слабые когерентные состояния с менее чем одним фотоном на импульс [26]. Интегрированные спин-волновые

					ПГУ 2. 11.03.04. 004 ПЗ	Лист
						13
Изм.	Лист	№ докум	Подп.	Дата		

квантовые памяти на основе лазерно-записанных волноводов в кристаллах, легированных $^{151}\text{Eu}^{3+}$ (европием), также показали высокую точность хранения ($94.9\% \pm 1.2\%$) для кубитов, закодированных на уровне одиночных фотонов [28].

Другими перспективными твердотельными системами являются азотно-вакансионные центры (*Nitrogen-Vacancy centers, NV-centers*) в алмазе. Эти дефекты обладают длительным временем когерентности спинового состояния электрона при комнатной температуре и могут быть оптически поляризованы и считываться, что делает их привлекательными для квантовой памяти и распределенных квантовых вычислений.

Квантовая память на основе захваченных ионов

Захваченные ионы (*trapped ions*) являются одной из ведущих платформ для квантовых вычислений и памяти благодаря их длительным временам когерентности и высокому уровню контроля. Ионы, удерживаемые в электромагнитных ловушках, могут использоваться как кубиты, а их внутренние электронные состояния служат для хранения квантовой информации [29].

Квантовая информация может быть передана между ионами через их коллективное квантованное движение или посредством фотонов. Ионы и фотоны образуют идеальную пару для квантовой сети, где ионы выступают в роли стационарных кубитов памяти, а фотоны — в роли «летающих» кубитов связи [30]. Исследования в Оксфорде показали создание надежной квантовой памяти в узле квантовой сети на основе захваченных ионов. Они смогли сохранить информацию на ионе памяти более 10 секунд, что как минимум в 1000 раз дольше, чем возможно с использованием одного иона стронция. Это достижение является важным шагом к распределенной квантовой обработке информации [31].

Несмотря на значительные успехи, создание практической и масштабируемой квантовой памяти сталкивается с рядом серьезных вызовов:

					ПГУ 2. 11.03.04. 004 ПЗ	Лист
						14
Изм.	Лист	№докум	Подп.	Дата		

1 Декогеренция: Квантовые состояния чрезвычайно чувствительны к взаимодействиям с окружающей средой, что приводит к быстрой потере когерентности. Увеличение времени жизни памяти является одной из главных задач.

2 Эффективность и точность: Достижение одновременно высокой эффективности и точности хранения и извлечения информации остается сложной задачей.

3 Масштабируемость: Для построения крупных квантовых систем необходимо разрабатывать методы, позволяющие создавать многомодовые памяти, способные хранить большое количество кубитов.

4 Интеграция: Интеграция квантовой памяти с другими компонентами квантовых систем, такими как источники одиночных фотонов и квантовые логические элементы, является ключевым шагом к практическим приложениям.

5 Рабочие температуры: Многие перспективные системы квантовой памяти требуют криогенных температур, что усложняет их практическое применение. Разработка систем, работающих при более высоких температурах, является важным направлением.

Будущее квантовой памяти тесно связано с развитием квантовых сетей и квантовых вычислений. Достижения в области материаловедения, новые протоколы взаимодействия свет-материя и инженерные решения для миниатюризации и интеграции обещают значительный прогресс. Долгоживущие, высокоэффективные и многомодовые квантовые памяти станут основой для создания глобального квантового интернета, защищенных коммуникаций и мощных распределенных квантовых компьютеров.

1.3 Анализ литературных данных о свойствах полупроводниковых квантовых структур с примесными центрами

Полупроводниковые квантовые структуры, такие как квантовые точки (*quantum dots*, *QDs*), квантовые проволоки (*quantum wires*) и квантовые ямы (*quantum wells*), представляют собой наноразмерные объекты, в которых

					ПГУ 2. 11.03.04. 004 ПЗ	Лист
						15
Изм.	Лист	№докум	Подп.	Дата		

движение носителей заряда (электронов и дырок) ограничено в одном, двух или трех измерениях соответственно. Это ограничение приводит к квантованию энергетических уровней, что придает этим структурам уникальные оптические и электронные свойства, отличные от свойств объемных полупроводников. Введение примесных центров в такие структуры дополнительно модифицирует их свойства, открывая новые возможности для создания элементов квантовой электроники, включая кубиты, источники одиночных фотонов и высокочувствительные сенсоры [32, 33].

Примесные центры в полупроводниках — это атомы других элементов или структурные дефекты, которые нарушают периодичность кристаллической решетки и создают локализованные энергетические состояния в запрещенной зоне полупроводника. В зависимости от типа примеси они могут быть донорами (отдают электроны в зону проводимости) или акцепторами (принимают электроны из валентной зоны). В квантовых структурах взаимодействие носителей заряда с примесными центрами усиливается из-за эффектов пространственного ограничения, что приводит к изменению энергии связи примеси, оптических переходов и времени жизни носителей [34, 35].

1.3.1 Типы примесных центров и их роль в квантовых структурах. В контексте квантовой электроники примесные центры могут выполнять несколько ключевых функций:

1. Кубиты на основе спина примеси: Спиновые состояния электронов или ядер, локализованных на примесных центрах, могут использоваться в качестве кубитов. Такие кубиты обладают длительным временем когерентности благодаря слабой связи спина с окружающей средой. Наиболее изученными примерами являются доноры фосфора (P) в кремнии (Si) [36] и азотно-вакансионные центры (*Nitrogen-Vacancy centers, NV-centers*) в алмазе [37]. Хотя алмаз не является традиционным полупроводником, NV-центры являются ярким примером дефектов, используемых в квантовых технологиях. В кремнии, ядерный

					ПГУ 2. 11.03.04. 004 ПЗ	Лист
						16
Изм.	Лист	№докум	Подп.	Дата		

спин атома Р может быть считан и манипулирован с помощью электронного спина, что делает его перспективной платформой для масштабируемых квантовых компьютеров [36].

2. Источники одиночных фотонов: Некоторые примесные центры и дефекты в полупроводниковых квантовых точках могут служить в качестве эффективных источников одиночных фотонов. Это критически важно для квантовой криптографии и квантовых сетей. Например, дефекты в квантовых точках GaAs или InAs могут излучать одиночные фотоны при оптической или электрической накачке [38]. Локализованные экситоны, связанные с примесными центрами, имеют дискретные энергетические уровни и могут быть использованы для генерации одиночных фотонов с высокой чистотой и яркостью [39].

3. Управление оптическими свойствами: Введение примесей позволяет настраивать оптические свойства квантовых структур, такие как энергия излучения, интенсивность люминесценции и время жизни экситонов. Например, легирование квантовых точек Mn (марганцем) или Co (кобальтом) приводит к появлению магнитных свойств, что позволяет управлять спином носителей заряда и оптическими переходами с помощью внешнего магнитного поля [40].

1.3.2 Моделирование примесных центров в низкоразмерных структурах. Теоретическое моделирование играет ключевую роль в понимании и предсказании свойств примесных центров в квантовых структурах. Различные подходы используются в зависимости от масштаба и требуемой точности:

1. Приближение эффективной массы (*Effective Mass Approximation, EMA*): Это наиболее простой и широко используемый подход для описания мелких примесей в полупроводниках. В рамках *EMA* электрон (или дырка) рассматривается как квазичастица с эффективной массой, движущаяся в потенциале, создаваемом примесным центром и ограниченной структурой. Уравнение Шредингера для примеси в квантовой точке может быть записано как:

					ПГУ 2. 11.03.04. 004 ПЗ	Лист
						17
Изм.	Лист	№докум	Подп.	Дата		

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2m^*} \nabla^2 + V_{QD}(r) + V_{imp}(r) \right] \Psi(r) = E \Psi(r), \quad (1.1)$$

где m^* — эффективная масса носителя, $V_{QD}(r)$ — потенциал квантовой точки, а $V_{imp}(r)$ — потенциал примеси. *ЕМА* хорошо работает для мелких примесей, чьи волновые функции распространяются на многие атомные расстояния [34, 41].

2. Методы сильной связи (*Tight-Binding Models*): Эти модели учитывают атомную природу кристаллической решетки и используются для описания более глубоких примесей или когда *ЕМА* становится неприменимым из-за сильной локализации волновой функции примеси. Они основаны на разложении волновой функции по атомным орбиталям [42].

3. *Ab initio* расчеты (из первых принципов): Эти методы, такие как теория функционала плотности (*Density Functional Theory, DFT*), не используют эмпирических параметров и позволяют рассчитывать электронную структуру и свойства примесей с высокой точностью. Они особенно полезны для изучения глубоких дефектов и сложных примесных комплексов, где *ЕМА* не применим [43]. Однако, *ab initio* расчеты требуют значительных вычислительных ресурсов.

4. Методы Монте-Карло и молекулярной динамики: Используются для моделирования влияния беспорядка, случайного распределения примесей и температурных эффектов на свойства квантовых структур с примесями [44].

1.3.3 Экспериментальные исследования примесных центров в полупроводниковых квантовых структурах. Экспериментальные методы позволяют подтвердить теоретические предсказания и исследовать реальные свойства примесных центров:

1. Фотолюминесценция (*Photoluminescence, PL*): Один из наиболее распространенных методов для изучения энергетических уровней и оптических

					ПГУ 2. 11.03.04. 004 ПЗ	Лист
						18
Изм.	Лист	№докум	Подп.	Дата		

переходов, связанных с примесями. Примеси могут создавать новые пики в спектре *PL* или изменять интенсивность существующих, что позволяет определить энергию связи примеси и тип переходов [45]. Например, в квантовых точках ZnO, легированных Al (алюминием) или Ga (галлием), наблюдается изменение спектров *PL*, связанное с мелким донорным уровнем [46].

2. Электронный парамагнитный резонанс (*Electron Paramagnetic Resonance, EPR*): Метод, чувствительный к неспаренным электронам, позволяет исследовать спиновые свойства примесных центров, их локальное окружение и взаимодействие с кристаллической решеткой. *EPR* широко используется для характеристики спиновых кубитов, таких как доноры P в Si [47].

3. Сканирующая туннельная микроскопия (*Scanning Tunneling Microscopy, STM*): Позволяет визуализировать отдельные атомы примесей на поверхности полупроводника и исследовать их электронные свойства на атомном уровне [48].

4. Магнитооптические измерения: Применение внешнего магнитного поля позволяет исследовать эффект Зеемана и другие магнитооптические явления, связанные с примесными центрами, что дает информацию о *g*-факторах носителей заряда и спиновых взаимодействиях [49].

5. Времяразрешенная фотолюминесценция (*Time-Resolved Photoluminescence, TRPL*): Используется для измерения времени жизни экситонов и носителей заряда, связанных с примесными центрами, что важно для понимания динамики рекомбинации и эффективности источников одиночных фотонов [50].

1.3.4 Примеры полупроводниковых материалов и примесных центров

1. Кремний (Si) с донорами фосфора (P): Система P в Si является одной из наиболее перспективных платформ для спиновых кубитов. Длительное время когерентности ядерного спина P (до нескольких секунд) и возможность контроля электронного спина делают ее идеальной для квантовых вычислений.

					ПГУ 2. 11.03.04. 004 ПЗ	Лист
						19
Изм.	Лист	№докум	Подп.	Дата		

Исследования показали возможность создания однокубитных и двухкубитных логических операций с высокой точностью [36, 51].

2. Оксид цинка (ZnO) с мелким донорами: ZnO — широкозонный полупроводник, представляющий интерес для оптоэлектроники. Мелкие доноры, такие как водород (H), Al, Ga, In (индий), создают локализованные состояния, которые могут влиять на проводимость и оптические свойства. В низкоразмерных структурах ZnO, таких как нанопроволоки и квантовые точки, мелкие доноры могут быть использованы для создания экситонных кубитов или для управления излучением [46, 52].

3. Арсенид галлия (GaAs) и квантовые точки на его основе: В GaAs-квантовых точках примеси и дефекты могут приводить к появлению локализованных состояний, которые влияют на излучение одиночных фотонов. Контроль над этими дефектами является ключевым для повышения эффективности и чистоты источников одиночных фотонов [38].

4. Антимонид индия (InSb) и селенид кадмия (CdSe): Эти материалы являются узкозонными полупроводниками (InSb) или полупроводниками с прямой запрещенной зоной (CdSe), широко используемыми для инфракрасных детекторов и светоизлучающих устройств. В квантовых точках InSb и CdSe примеси значительно влияют на их электронные и оптические свойства. Например, в CdSe квантовых точках легирование магнитными примесями (например, Mn) приводит к сильному обменному взаимодействию между спином носителя заряда и спином примеси, что открывает возможности для спинтроники и магнитооптических приложений [40, 53]. Исследования моделей примесных центров в низкоразмерных структурах на основе InSb и CdSe позволяют понять влияние размера и формы наноструктур на энергию связи примеси и оптические переходы, что важно для оптимизации их свойств [54].

					ПГУ 2. 11.03.04. 004 ПЗ	Лист
						20
Изм.	Лист	№докум	Подп.	Дата		

1.3.4 Вызовы и перспективы. Несмотря на значительный прогресс, ряд направлений остается в исследовании и применении примесных центров в полупроводниковых квантовых структурах:

1. Контроль над положением и концентрацией примесей: Точное размещение отдельных примесных атомов в наноструктуре является сложной задачей. Методы, такие как ионная имплантация с высоким разрешением или *delta*-легирование, развиваются для достижения этой цели [55].

2. Увеличение времени когерентности: Декогеренция, вызванная взаимодействием примесного центра с окружающей средой (фононами, ядерными спинами матрицы), остается основной проблемой для спиновых кубитов. Разработка материалов с низким содержанием ядерных спинов (например, изотопически чистый Si) и методов подавления шума является критически важной [56].

3. Масштабируемость: Для создания полноценных квантовых процессоров необходимо разработать методы для создания и контроля большого количества примесных кубитов и их взаимодействия.

4. Интеграция: Интеграция примесных центров с другими элементами квантовых схем, такими как резонаторы для усиления излучения одиночных фотонов или волноводы для передачи информации, является важным направлением [57].

Будущее примесных центров в полупроводниковых квантовых структурах выглядит многообещающим. Продолжающиеся исследования в области материаловедения, нанотехнологий и квантовой инженерии будут способствовать созданию новых функциональных элементов для квантовых компьютеров, защищенных коммуникаций и высокочувствительных сенсоров. Понимание и контроль над свойствами примесных центров на атомном уровне является ключевым для реализации этих перспективных технологий.

					ПГУ 2. 11.03.04. 004 ПЗ	Лист
						21
Изм.	Лист	№докум	Подп.	Дата		

2 Модели кубитов на основе примесных центров в полупроводниковых оксидах

2.1 Общие сведения о кубитах

Кубит (*qubit*), или квантовый бит, является фундаментальной единицей информации в квантовых вычислениях, аналогичной классическому биту в традиционных компьютерах. Однако, в отличие от классического бита, который может находиться только в одном из двух состояний (0 или 1), кубит может существовать в суперпозиции этих состояний одновременно. Это свойство, наряду с квантовой запутанностью (*entanglement*), лежит в основе преимуществ квантовых компьютеров перед классическими в решении определенных типов задач [58].

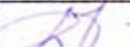
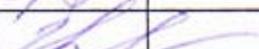
Математически состояние кубита описывается вектором в двумерном комплексном векторном пространстве, известном как пространство Гильберта. Общее состояние кубита может быть представлено как:

$$|\Psi\rangle = \alpha |0\rangle + \beta |1\rangle, \quad (2.1)$$

где $|0\rangle$ и $|1\rangle$ — базисные состояния кубита (аналоги классических 0 и 1), а α и β — комплексные амплитуды вероятности, удовлетворяющие условию нормировки $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$. Величины $|\alpha|^2$ и $|\beta|^2$ представляют вероятности обнаружения кубита в состоянии $|0\rangle$ или $|1\rangle$ соответственно при измерении. Это означает, что до измерения кубит находится в неопределенном состоянии, а измерение "коллапсирует" его в одно из базисных состояний [58].

Принципы квантовых вычислений на основе кубитов

1. Суперпозиция (*Superposition*): Как упоминалось, кубит может находиться в суперпозиции состояний. Это позволяет квантовому компьютеру

					ПГУ 2. 11.03.04. 004 ПЗ						
Изм.	Лист	№докум	Подп.	Дата							
Разраб.		Веденяпин			Модели кубитов на основе примесных центров в полупроводниковых оксидах			Лит.	Лист	Листов	
Пров.		Игошина								22	81
Н.контр		Рыжова		11.06.25				гр. 21ПД1			
Утв.											

обрабатывать множество возможных решений одновременно, что является основой для квантового параллелизма. Например, система из n кубитов может находиться в суперпозиции 2^n состояний, что резко увеличивает вычислительную мощность по сравнению с n классическими битами [59].

2. Запутанность (*Entanglement*): Это явление, при котором два или более кубита становятся взаимосвязанными таким образом, что состояние одного кубита мгновенно влияет на состояние другого, независимо от расстояния между ними. Запутанность является ключевым ресурсом для многих квантовых алгоритмов, таких как алгоритм Шора (*Shor's algorithm*) для факторизации больших чисел и алгоритм Гровера (*Grover's algorithm*) для поиска в неструктурированных базах данных [60].

3. Когерентность (*Coherence*): Способность кубита сохранять свою суперпозицию и запутанность в течение определенного времени. Декогеренция (*decoherence*) — это потеря когерентности из-за взаимодействия кубита с окружающей средой, что приводит к разрушению квантового состояния и является основным препятствием на пути создания стабильных квантовых компьютеров. Время когерентности (*coherence time*) — это мера того, как долго кубит может поддерживать свои квантовые свойства [61].

Критерии ДиВинченцо для физической реализации кубитов

Для того чтобы физическая система могла быть использована в качестве кубита и стать основой для квантового компьютера, она должна удовлетворять ряду требований, сформулированных Дэвидом ДиВинченцо (*David DiVincenzo*) в 2000 году [61]. Эти критерии являются ориентиром для исследователей, работающих над различными платформами квантовых вычислений:

1. Масштабируемая физическая система с хорошо определенными кубитами: Должна быть возможность создавать и контролировать большое количество кубитов. Каждый кубит должен быть четко идентифицируемым и изолированным от других.

					ПГУ 2. 11.03.04. 004 ПЗ	Лист
						23
Изм.	Лист	№докум	Подп.	Дата		

2. Возможность инициализации состояний кубитов в заданное начальное состояние: Кубиты должны быть приведены в известное начальное состояние (например, $|0\rangle$) с высокой точностью. Это необходимо для начала вычислений.

3. Длительное время когерентности, значительно превышающее время выполнения операций: Время, в течение которого кубиты сохраняют свои квантовые свойства, должно быть намного больше времени, необходимого для выполнения одной квантовой логической операции. Это позволяет выполнять сложные вычисления до того, как декогеренция разрушит информацию.

4. Универсальный набор квантовых логических операций: Должна быть возможность выполнять однокубитные операции (например, вращения) и двухкубитные операции (например, управляемый НЕ — *Controlled-NOT*, *CNOT*), которые вместе составляют универсальный набор для реализации любого квантового алгоритма.

5. Возможность считывания состояния кубитов: Должна быть возможность измерять конечное состояние кубитов с высокой точностью после выполнения вычислений.

Дополнительные критерии, добавленные позже:

6. Возможность преобразования летающих кубитов в стационарные и обратно: Важно для квантовых коммуникаций и распределенных квантовых вычислений, где информация должна передаваться между удаленными узлами.

7. Возможность преобразования стационарных кубитов в летающие и обратно: Аналогично предыдущему, для построения квантовых сетей.

Физические реализации кубитов

В настоящее время активно исследуется множество физических платформ для реализации кубитов, каждая из которых имеет свои преимущества и недостатки:

					ПГУ 2. 11.03.04. 004 ПЗ	Лист
						24
Изм.	Лист	№докум	Подп.	Дата		

1. Сверхпроводящие кубиты (*Superconducting qubits*): Основаны на сверхпроводящих цепях, которые ведут себя как искусственные атомы с дискретными энергетическими уровнями. Эти кубиты могут быть большими по размеру, что облегчает их манипуляцию, и демонстрируют относительно длительное время когерентности. Ведущие компании, такие как *IBM* и *Google*, активно развивают эту технологию [62]. Например, *Google* достигла «квантового превосходства» с помощью 53-кубитного процессора *Sycamore*, выполнив задачу, которая была бы неразрешимой для самых мощных классических суперкомпьютеров в разумные сроки [63].

2. Захваченные ионы (*Trapped ions*): Используют отдельные ионы, удерживаемые в вакууме с помощью электромагнитных полей. Энергетические уровни электронов в ионах служат кубитами. Эти системы обладают очень длительным временем когерентности и высокой точностью логических операций. Однако масштабирование до большого количества ионов является сложной задачей [57, 58].

3. Фотоны (*Photons*): Поляризация, фаза или временное положение одиночных фотонов могут использоваться для кодирования информации. Фотоны идеальны для передачи квантовой информации на большие расстояния благодаря их слабой декогеренции в оптических волокнах или свободном пространстве. Однако хранение и взаимодействие между фотонами является сложной задачей [1, 56].

4. Квантовые точки (*Quantum dots*): Полупроводниковые наноструктуры, которые ограничивают движение электронов, создавая дискретные энергетические уровни. Спиновые состояния электронов в квантовых точках могут использоваться в качестве кубитов. Они обладают потенциалом для масштабирования благодаря совместимости с существующими полупроводниковыми технологиями [60].

					ПГУ 2. 11.03.04. 004 ПЗ	Лист
						25
Изм.	Лист	№докум	Подп.	Дата		

5. Атомы нейтральных газов (*Neutral atoms*): Используют холодные атомы, удерживаемые оптическими ловушками. Эти системы демонстрируют длительное время когерентности и могут быть масштабированы путем создания массивов атомов. Например, атомы ридберга (*Rydberg atoms*) могут использоваться для создания сильных взаимодействий между кубитами [61].

6. Азотно-вакансионные центры в алмазе (*Nitrogen-Vacancy centers in diamond, NV-centers*): Дефекты в кристаллической решетке алмаза, состоящие из атома азота, замещающего атом углерода, и вакансии в соседнем узле. Электронный спин *NV*-центра может использоваться как кубит, обладающий длительным временем когерентности даже при комнатной температуре [63].

7. Топологические кубиты (*Topological qubits*): Гипотетический тип кубитов, основанный на экзотических квазичастицах, называемых майорановскими фермионами (*Majorana fermions*). Эти кубиты кодируют информацию в топологических свойствах системы, что делает их чрезвычайно устойчивыми к декогеренции. Однако их экспериментальная реализация остается крайне сложной задачей [65].

Несмотря на значительный прогресс в разработке различных платформ кубитов, создание полномасштабного, отказоустойчивого квантового компьютера сталкивается с рядом серьезных вызовов:

1. Декогеренция и ошибки: Основная проблема заключается в сохранении когерентности кубитов и минимизации ошибок, вызванных взаимодействием с окружающей средой. Разработка методов коррекции квантовых ошибок (*quantum error correction*) является критически важной для создания отказоустойчивых квантовых компьютеров [66].

2. Масштабируемость: Создание систем с большим количеством взаимосвязанных кубитов, сохраняющих когерентность, является сложной инженерной задачей. Каждая платформа имеет свои уникальные проблемы масштабирования.

					ПГУ 2. 11.03.04. 004 ПЗ	Лист
						26
Изм.	Лист	№докум	Подп.	Дата		

3. Контроль и считывание: Точное управление состояниями кубитов и эффективное считывание результатов вычислений требуют сложных технологий и высокой точности.

4. Криогенные температуры: Многие перспективные платформы (сверхпроводящие кубиты, квантовые точки) требуют работы при экстремально низких температурах (милликельвины), что усложняет их эксплуатацию и масштабирование.

Будущее квантовых вычислений и технологий, основанных на кубитах, выглядит многообещающим. Продолжающиеся исследования и разработки в области материаловедения, физики конденсированного состояния, оптики и инженерии будут способствовать преодолению существующих вызовов. Ожидается, что квантовые компьютеры найдут применение в таких областях, как разработка новых материалов и лекарств, оптимизация сложных систем, криптография и искусственный интеллект, открывая новые горизонты для научных открытий и технологических инноваций.

2.2 Некоторые приложения ZnO

Мелкий донор в оксиде цинка (ZnO) является перспективным полупроводниковым спиновым кубитом с оптическим доступом. Одиночные доноры индия изолированы в коммерческой подложке ZnO с использованием плазменного сфокусированного ионного пучка (*PFIB*). Квантовые излучатели идентифицируются оптически путем пространственной и частотной фильтрации. Присвоение индиевого донора основано на энергии перехода оптически связанного экситона и его магнитной зависимости. Излучение одиночного донора является стабильным по интенсивности и частоте с шириной линии перехода менее чем в два раза превышающей предел, определяемый временем жизни. Изоляция оптически стабильных одиночных доноров после изготовления с помощью *FIB* является перспективной для интеграции оптических устройств, необходимых

					ПГУ 2. 11.03.04. 004 ПЗ	Лист
						27
Изм.	Лист	№докум	Подп.	Дата		

для масштабируемых квантовых технологий, основанных на одиночных доно-рах в полупроводниках с прямой запрещенной зоной.

Оптически доступные дефекты твердого тела обладают благоприятными свойствами для фотонных приложений в квантовых вычислениях и квантовой связи. ZnO, полупроводник II-VI с прямой запрещенной зоной, является перспективным материалом для спиновых кубитов с доступом оптических методов исследования. ZnO сочетает эффективную электронно-фотонную связь, присутствующую в полупроводниках III-V с прямой запрещенной зоной, с низким спин-орбитальным взаимодействием, характеристиками, присутствующими как в кремнии, так и в алмазе, что привело к длительному времени спиновой когерентности. Предыдущие работы, изучающие нейтральные мелкие донорные ансамбли в ZnO с естественным изотопным содержанием, в частности ансамбли Al, Ga и In, замещающих Zn, показали многообещающие оптические и спиновые свойства, включая узкие ансамблевые оптические ширины линий, достаточные для оптического манипулирования спином, продольное время жизни спина до 0,5 с и время когерентности до 50 мкс, которые ограничены чистотой подложки. Эти излучатели демонстрируют оценочный фактор Хуанга-Риса 0,06 и силу осциллятора 0,35 (Дополнительный материал, раздел I). Недавняя работа по имплантированным ансамблям In также выявила большое, 100 МГц сверхтонкое взаимодействие спина электрона In-1/2 с ядерным спином In-9/2. Таким образом, существует путь к детерминированному формированию доноров In с доступом к ядерной спиновой памяти.

Большинство квантовых информационных приложений требуют индивидуально адресуемых кубитов. Проблема изоляции одиночных доноров в ZnO связана с низкой химической чистотой доступных подложек по сравнению с материалами-хозяевами, такими как кремний и алмаз. Эта трудность усугубляется легкостью образования точечных дефектов замещения одиночных атомов по сравнению с дефектными комплексами, такими как центр азотно-вакансии и

					ПГУ 2. 11.03.04. 004 ПЗ	Лист
						28
Изм.	Лист	№докум	Подп.	Дата		

кремниевое-вакансионный центр в алмазе и центры радиационного повреждения в кремнии. Коммерчески доступные кристаллы ZnO с общей концентрацией доноров, превышающей 10^{16}см^{-3} , делают оптическую изоляцию одиночных доноров недостижимой с помощью оптической конфокальной визуализации. Альтернатива состоит в уменьшении объема материала и фокусировке на примесях с более низкой плотностью, таких как In. Хотя одиночные доноры в полупроводнике ZnSe с прямой запрещенной зоной были изолированы в очень узких квантовых ямах, существует высокий уровень неоднородности, вызванный потенциалом квантовой ямы. Здесь мы ищем решения, которые сохраняют объемные донорные и донорно-связанные экситонные свойства. Фрезерование сфокусированным ионным пучком (*FIB*) широко используется для извлечения и формирования материалов в наномасштабе, что позволяет изготавливать эффективные устройства для извлечения фотонов для квантовых дефектов. Однако изготовление с помощью *FIB* приводит к поврежденному слою материала, который может ухудшить оптические и спиновые свойства некоторых квантовых дефектов. Учитывая, что ZnO является радиационно-стойким материалом, фрезерование с помощью *FIB* может быть жизнеспособным методом для изоляции одиночных доноров In без ухудшения их благоприятных спиновых и оптических свойств.

2.3 Исследование мелких доноров в ZnO

В работе [67] демонстрируется возможность оптической изоляции одиночных доноров In в ZnO с помощью плазменного *FIB* (*PFIB*) фрезерования Xe^+ . После обработки *PFIB* оптические свойства ZnO сильно ухудшаются; однако отжиг в кислороде в течении часа восстанавливает резкие линии фотолюминесценции (PL) донорно-связанного экситона (D^0X) к донорно-связанному электрону (D^0). Кандидаты на одиночные доноры In оптически изолируются с помощью спектральной и пространственной фильтрации. Проверка излучателей, соответствующих донорам In, достигается путем сбора перехода двухэлектронного

					ПГУ 2. 11.03.04. 004 ПЗ	Лист
						29
Изм.	Лист	№докум	Подп.	Дата		

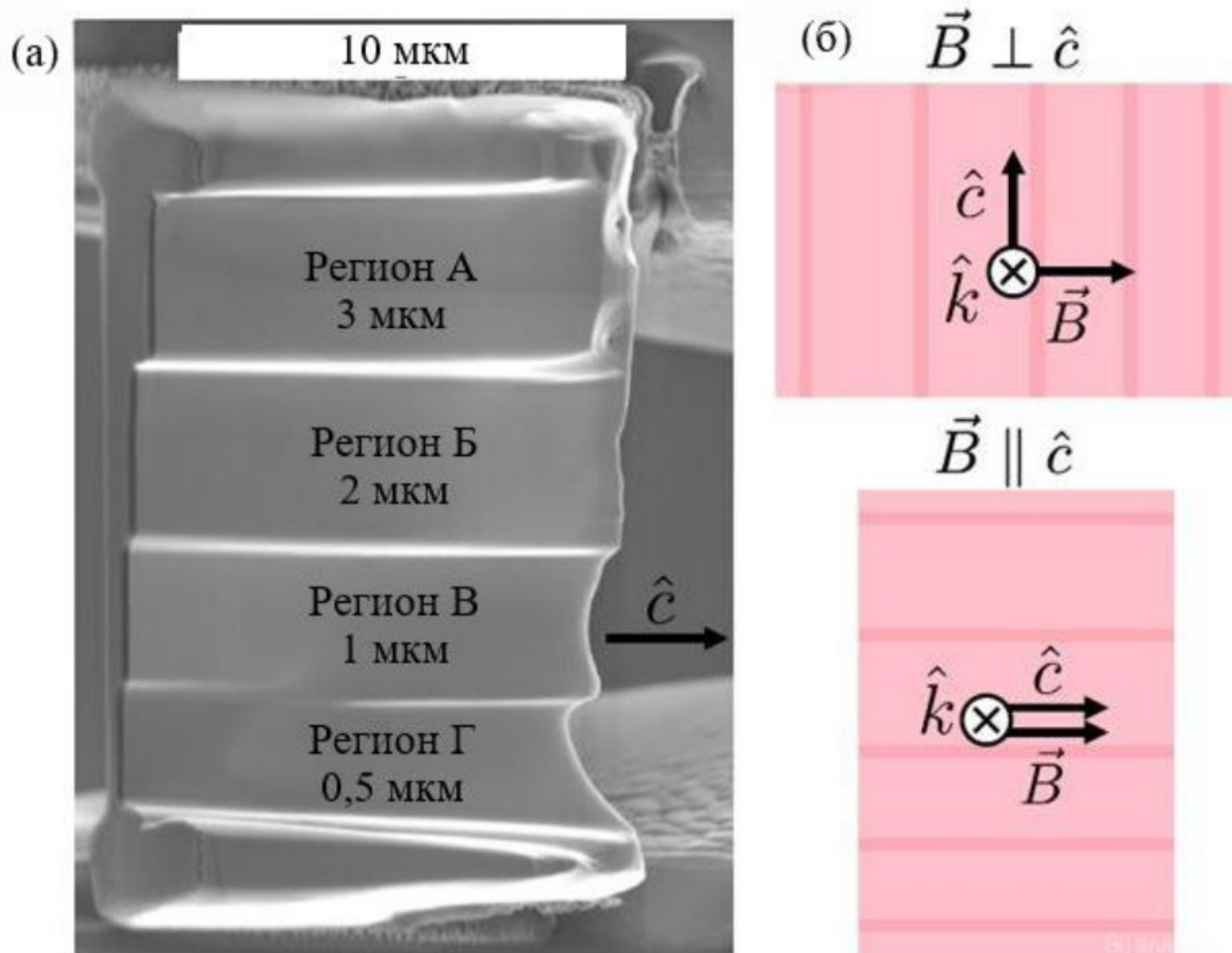
сателлита при резонансном возбуждении и магнито-фотолюминесценции. Измерения времени жизни показывают десятикратное уменьшение времени жизни по сравнению с объемным ZnO, что указывает на нерадиационные каналы. Однако измеренные ширины линий менее чем в два раза шире измеренного предела времени жизни. Дальнейшие улучшения материалов и изготовление устройств, в сочетании с интеграцией устройств для усиления эффекта Перселла, могут быть использованы для повышения радиационной эффективности.

Для этой работы в качестве исходной подложки использовался кристалл ZnO толщиной 360 мкм (*Tokyo Denpa*), с кристаллической осью, перпендикулярной поверхности подложки. Мы наблюдаем донорно-связанные экситоны Al, Ga и In (Al^0X , Ga^0X , и In^0X) в подложке. Концентрации доноров, измеренные на задней поверхности, были определены методом масс-спектрометрии вторичных ионов (*SIMS*) как $5.3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ для Al и $4.4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ для Ga (Дополнительный материал, раздел II). Концентрация In была ниже предела обнаружения *SIMS*. Поскольку концентрация доноров может варьироваться по подложке, эти значения дают оценку порядка величины.

Традиционно технологии *FIB* используют пучки Ga^+ , которые могли бы непреднамеренно вводить высокую плотность доноров Ga в ZnO, поэтому мы используем *PFIB* с источником инертного ионного газа Xe^+ для вырезания поперечного сечения (ламели) толщиной 5 мкм из исходной подложки ZnO. Используя стандартные методы извлечения, микроманипуляторной иглой удалили ламель и положили ее на траншею, вырезанную *PFIB* на пластине SiO_2 . Края ламели были закреплены Pt, осажденным путем крекинга металлоорганического газа (подаваемого с использованием стандартной системы впрыска газа) с помощью пучка Xe^+ . Многоуровневые ступени толщиной от 0,5 мкм до 3 мкм были вырезаны с использованием пучка 30 кэВ, при этом кристаллическая ось $\hat{c}$ была параллельна краям ступеней. Затем ламель была отполирована пучком 5 кэВ с обеих сторон для удаления повторно распыленного материала и

					ПГУ 2. 11.03.04. 004 ПЗ	Лист
						30
Изм.	Лист	№докум	Подп.	Дата		

аморфных повреждений, которые часто возникают во время процессов фрезерования с более высокой энергией. Ламель (рисунок 2.1а) была отожжена при 700°C в течение 1 часа в потоке O₂ для уменьшения оставшихся повреждений от фрезерования.



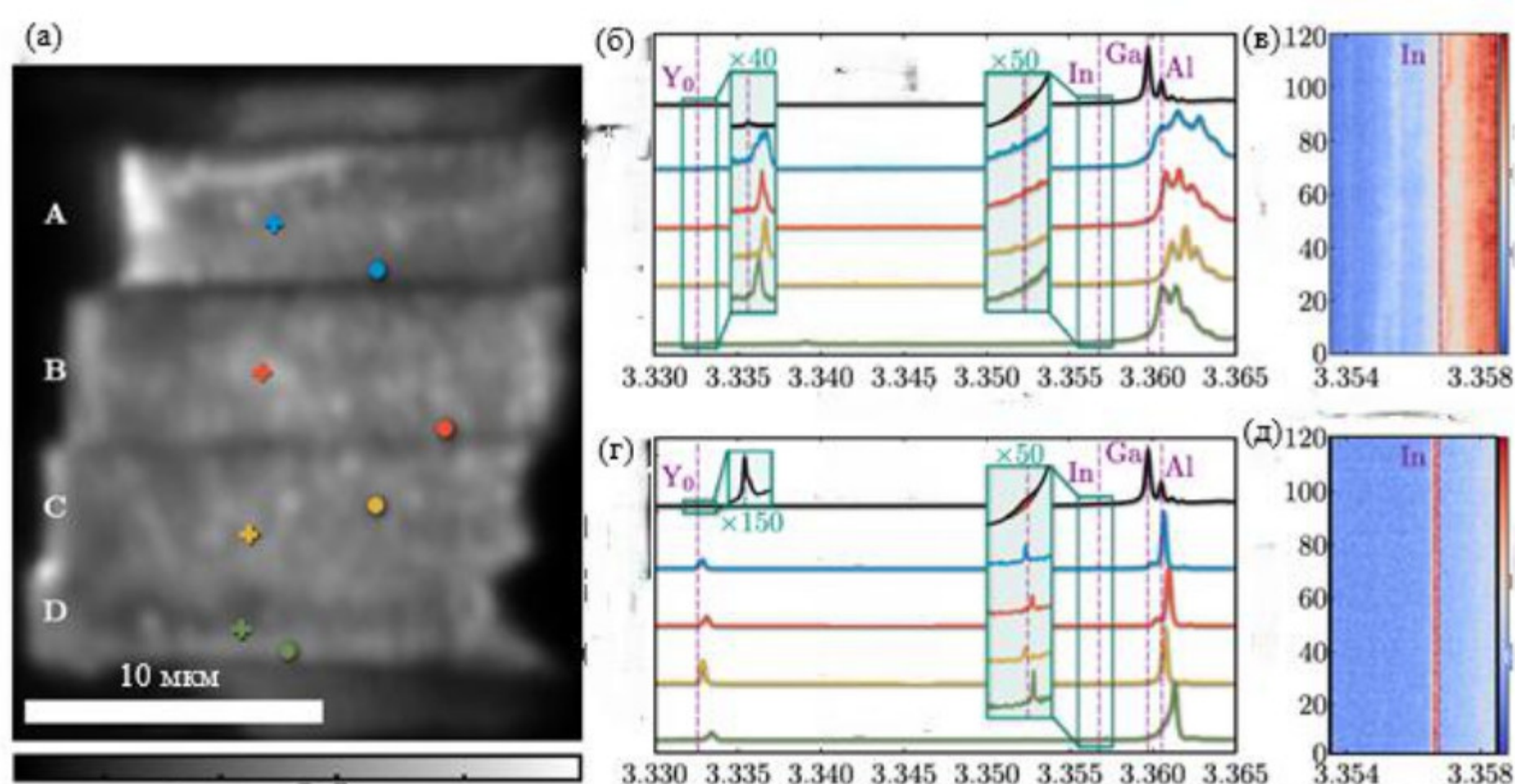
а) изображение ламели, полученное с помощью сканирующего электронного микроскопа; б) ориентация кристаллической оси ($\hat{c}$) и оптических осей ($\hat{k}$) относительно магнитного поля B

Рисунок 2.1 - Изображение ламели

Все измерения проводились с помощью конфокального микроскопа, который отображает ламель внутри криостата с гелиевым погружением со сверхпроводящим магнитом. Магнитное поле B всегда параллельно плоскости ламели. Мы получаем доступ к двум ориентациям магнитного поля, $B \parallel \hat{c}$ и $B \perp \hat{c}$, вращая ламель (рисунок 2.1б).

					ПГУ 2. 11.03.04. 004 ПЗ	Лист
						31
Изм.	Лист	№докум	Подп.	Дата		

Рисунок 2.2а показывает конфокальное PL-изображение ламели после отжига. Спектры PL из подложки и каждой области необработанной ламели показаны на Рисунок 2б. Спектр подложки показывает небольшое плечо при переходе In^0X с пиковой интенсивностью примерно в $3 \cdot 10^{-4}$ раза меньше, чем пик Ga^0X . Основываясь на измеренной плотности Ga и предполагая, что относительная пиковая интенсивность и концентрация доноров пропорциональны, мы оцениваем 10^{12} доноров $\text{In}/\text{см}^3$. При диаметре пятна возбуждения ~ 450 нм, срез подложки толщиной ~ 5 мкм дал бы один донор In на пятно возбуждения, с меньшими концентрациями для ступеней ламели толщиной 0,5-3 мкм.



а) Конфокальное PL -изображение ламели после отжига; б) спектр PL ламели до отжига; в) кинетическая серия PL из области C ламели до отжига; г) спектр PL ламели после отжига; д) кинетическая серия PL из области C ламели после отжига.

Рисунок 2.2 - Возбуждение непрерывной волной при 3,44 эВ, $T=5,2\text{K}$

Слабая линия Y^0 , связанная с экситонами, связанными со структурными дефектами, наблюдается в PL подложки. После изготовления PFIB наблюдается увеличение интенсивности $PL Y^0$ по отношению к линиям Ga^0X и Al^0X , что мы приписываем созданию структурных дефектов во время изготовления (рисунок

					ПГУ 2. 11.03.04. 004 ПЗ	Лист
						32
Изм.	Лист	№докум	Подп.	Дата		

2.2б). Кроме того, наблюдается общий сдвиг PL, варьирующийся по ламели, что согласуется с дифференциальными деформационными средами. В пределах одного пятна возбуждения линии Ga⁰X и Al⁰X также показывают расщепление и уширение, что мы приписываем микроскопической деформации (рисунок 2.2б).

Авторы отслеживали спектры PL как функцию времени: на рисунке 2.2в показана серия из области С. Наблюдается несколько слабых особенностей, с более сильной линией при переходе In⁰X. Аналогичные особенности наблюдаются в нескольких местах ламели. Эти более сильные излучатели при переходе In⁰X демонстрируют дискретные спектральные скачки, поведение, характерное для изолированных одиночных излучателей в нестабильной среде.

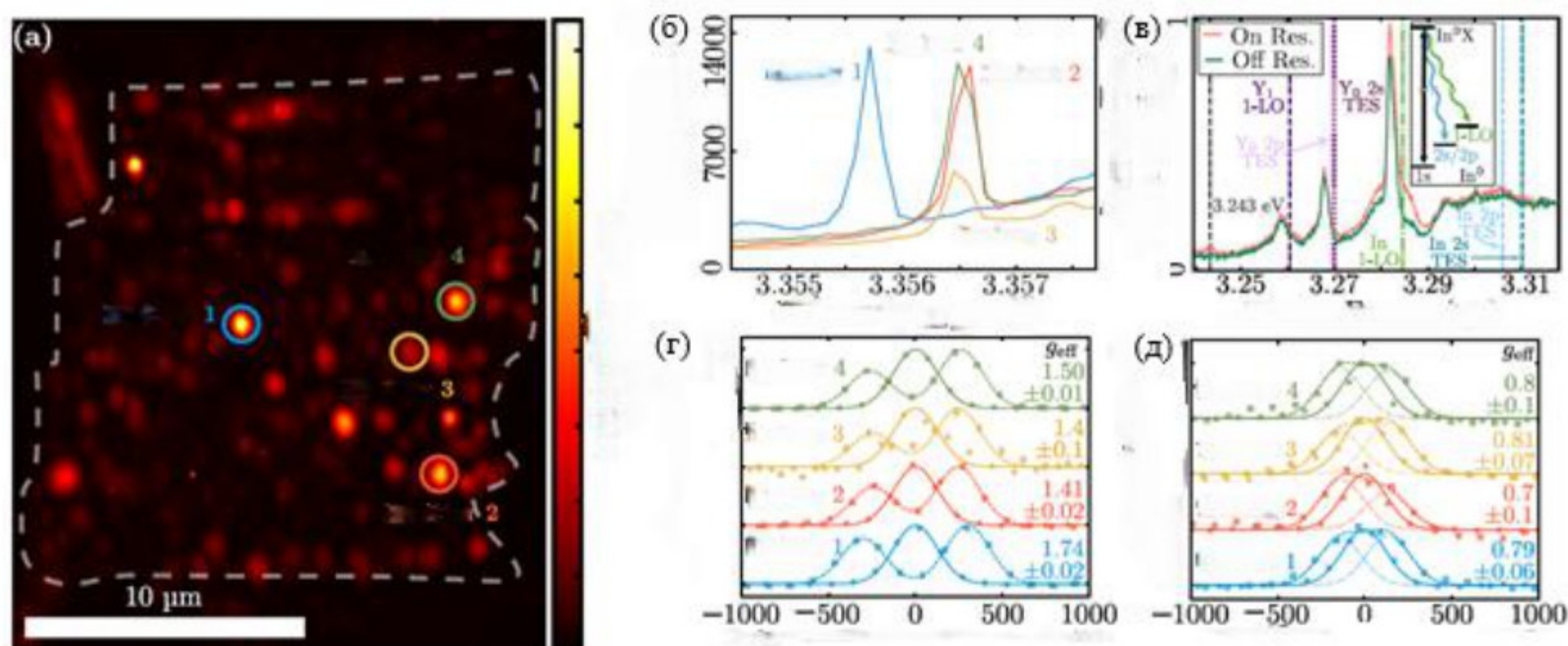
После отжига широкие линии Ga⁰X и Al⁰X становятся одиночными, резкими переходами, что предполагает, что отжиг удалил большую часть повреждений, вызванных фрезерованием (рисунок 2.2г). Небольшой общий сдвиг PL сохраняется после отжига. Интересно, что интенсивность линии Ga⁰X по отношению к линии Al⁰X значительно уменьшается по сравнению с PL подложки. Причина этого уменьшения неизвестна.

Вблизи линии In⁰X мы теперь наблюдаем пятна с сильным, ограниченным разрешением спектрометра излучением (рисунок 2.2г). Типичная кинетическая серия PL показана на рисунке 3.2д. По сравнению с спектром PL до отжига, излучение PL при переходе In⁰X становится сильнее и спектрально стабильнее. Кроме того, более слабые особенности вокруг области In⁰X больше не наблюдаются, что предполагает, что они могли быть поверхностными мелкими дефектами, которые были устранены путем отжига.

Для пространственного разрешения одиночных доноров In мы проводим конфокальные PL-сканирования со спектральной фильтрацией излучения In⁰X; полученное изображение показано на рисунке 2.3а. Наблюдается локализованное излучение с ограниченным разрешением спектрометра шириной линий при In⁰X (рисунок 2.3б). Наибольшая плотность излучателей обнаружена в областях

					ПГУ 2. 11.03.04. 004 ПЗ	Лист
						33
Изм.	Лист	№докум	Подп.	Дата		

B и *C*, а не в более широкой области *A*. Мы отмечаем, что общая интенсивность *PL* также ярче в этих областях (Рисунок 2.2а) и предполагаем, что интенсивность *PL* может быть обусловлена нерадиационной рекомбинацией, связанной с поверхностью. Хотя полировка *PFIB* с энергией 5 кэВ проводилась по всему образцу, различные области полировались на разное количество, что может объяснить вариации в интенсивности *PL*.



а) Конфокальное *PL*-изображение, собирающее 3,354-3,357 эВ. $T=5,2\text{K}$; б) Спектры *PL* четырех излучателей при 5,2 К; в) боковая полоса *PL* излучателя 2 при резонансном возбуждении 3,355948 эВ, $T=5,2\text{K}$, нормированная на пик спектра при резонансе; г) и д) спектры *PL* с $B \perp \hat{c}$ ($T=8,2\text{K}$) и $B \parallel \hat{c}$ ($T=6,6\text{K}$) соответственно

Рисунок 2.3 - Возбуждение непрерывной волной при 3,44 эВ

В оставшейся части статьи авторы сосредоточились на четырех излучателях, положения которых отмечены на рисунок 2.3а. Спектры *PL*, соответствующие каждому излучателю, показаны на рисунке 2.3б, где спектр был сдвинут с использованием положения линий Al^0X и Y^0 для корректировки относительных энергетических смещений.

Для анализа этих излучателей как доноров In мы резонансно возбуждаем переход между состоянием $\text{In}^0(1s)$ и состоянием In^0X и анализируем излучение боковой полосы *PL*, состоящей из 1-*LO* фононного перехода и двухэлектронных

					ПГУ 2. 11.03.04. 004 ПЗ	Лист
						34
Изм.	Лист	№докум	Подп.	Дата		

(*TES*) переходов. Переходы *TES* соответствуют релаксации из низшего состояния In^0X в возбужденные состояния $2s$ и $2p$ In^0 (рисунок 2.3в). Рисунок 2.3в показывает боковую полосу PL для излучателя 2 как при резонансном, так и при нерезонансном возбуждении. Для излучателей 2-4 наблюдается резонансное усиление *PL* при переходах $\text{In } 1\text{-}LO$, $2s$ и $2p$ *TES*, а также неопознанный In -связанный переход при 3,243 эВ. Авторы наблюдают большой фон в боковой полосе PL In . Мы полагаем, что это боковая полоса PL от хвостов гораздо более ярких переходов безфононной линии Al^0X и Ga^0X , на которых находится переход In^0X . В отличие от боковой полосы *PL*, приписанной In , фон боковой полосы *PL* смещается с энергией лазерного возбуждения. Резонансное усиление боковой полосы не наблюдается для излучателя 1.

Авторы проводили измерения магнито-фотолюминесценции (магнито-*PL*) как с $B \perp \hat{c}$, так и с $B \parallel \hat{c}$, чтобы убедиться, что наблюдаемые расщепления Зеемана согласуются с излучением от нейтральных доноров. Рисунок 2.3г и рисунок 2.3д показывают *PL* каждого излучателя при 0T и 6T с B ($B \parallel \hat{c}$). В обеих ориентациях авторы собирают только линейно поляризованное излучение, перпендикулярное кристаллической оси $\hat{c}$, которое, как ожидается, будет в 50 раз больше, чем линейно поляризованное излучение, параллельное $\hat{c}$. Эта сильная зависимость от поляризации также наблюдается экспериментально (. Эффективный g -фактор (g_{eff}) для каждой ориентации рассчитывается по формуле

$$g_{eff} = \frac{\Delta E}{\mu_B B}, \quad (2.1)$$

где ΔE обозначает энергетическое расщепление переходов связанного экситона, а μ_B обозначает магнетон Бора. Это расщепление является результатом расщепления Зеемана дырки $D^0\text{X}$ и расщепления Зеемана электрона D^0 . g -фактор дырки ($g_{h||\perp}$) затем рассчитывается по формуле

					ПГУ 2. 11.03.04. 004 ПЗ	Лист
						35
Изм.	Лист	№докум	Подп.	Дата		

$$gh \perp = g_{eff} \perp - g_e \perp (gh \parallel = g_e \parallel - g_{eff} \parallel), \quad (2.2)$$

где $g_e \perp \simeq g_e \parallel = 1.95$.

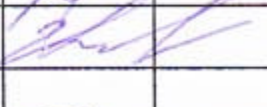
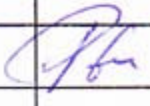
В обеих ориентациях излучение всех излучателей расщепляется на два пика, линейно зависящих от поля (Дополнительный материал, раздел IX), что согласуется с присутствием донора. Если донорный электрон отсутствует, как в случае ионизированного донорно-связанного экситона, электронно-дырочное взаимодействие приводит к нелинейной зависимости. Измеренные g-факторы дырки согласуются с ансамблевыми измерениями. При $B \parallel \hat{c}$ мы находим, что $gh \parallel$ находится в диапазоне от -1,14 до -1,2 для всех излучателей. При $B \perp \hat{c}$ авторы находят $gh \perp = 0,22$ для излучателя 1 и от 0,46 до 0,54 для излучателей 2-4, что качественно соответствует литературе, где сообщаемые значения $gh \perp$ варьируются от 0,1 до 0,34.

					ПГУ 2. 11.03.04. 004 ПЗ	Лист
						36
Изм.	Лист	№докум	Подп.	Дата		

3 Теоретическое исследование зависимости энергии связи примеси в низкоразмерных структурах

3.1 Влияние электрического поля на электрооптические свойства полупроводниковых квантовых точек типа «ядро/оболочка» на основе AlAs/GaAs

Даже в очень низких концентрациях, атомы донора или акцептора в материалах полупроводника оказывают серьезное влияние на свои физические свойства. Эта оригинальная особенность полупроводников используется в различных областях применения. В отличие от примесей в объемных полупроводниках, свойства которых теперь хорошо установлены, сокращение размера и симметрия наноматериалов радикально изменяют ограниченное поведение дефекта. Чтобы демистифицировать свойства примеси в этом виде полупроводников, много исследований подчеркнули проблему ограниченных дефектов, особенно водородоподобных примесей в квантовых системах. Пусть водородоподобная примесь расположена в центре квантовой точки, которая находится во внешнем электрическом поле, направленном вдоль оси z . Задача нашего исследования заключается в подробном изучении координатной зависимости энергии связи водородоподобной донорной примеси в квантовой точке со сферическим «ядром/оболочкой» на основе AlAs/GaAs.

					ПГУ 2. 11.03.04. 004 ПЗ			
Изм.	Лист	№докум	Подп.	Дата	Теоретическое исследование зависимости энергии связи примеси в низкоразмерных структурах	Лит.	Лист	Листов
Разраб.		Веденяпин					37	81
Пров.		Игошина						
Н.контр		Рыжова		10.06.16		гр. 21ПД1		
Утв.								

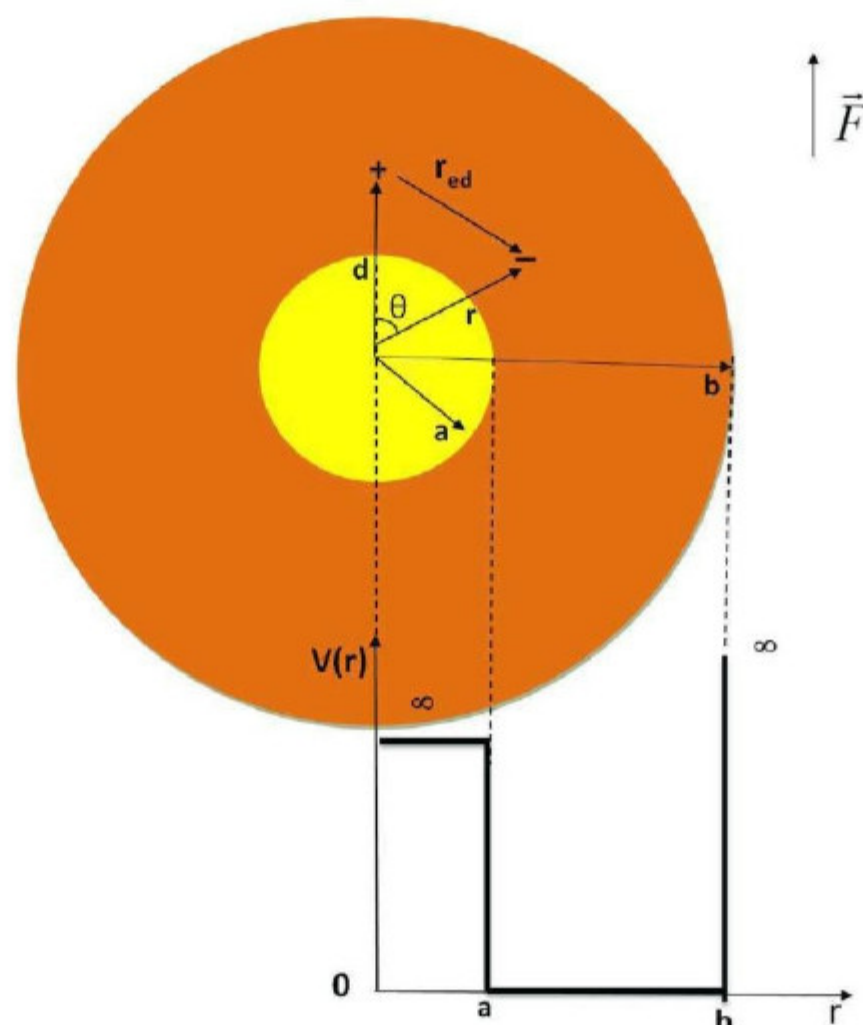


Рисунок 3.1– Модель квантовой ямы, содержащей водородоподобную примесь

Рассчитаем энергетический спектр изучаемой водородоподобной примеси в квантовой яме в приближении скалярной эффективной массы с помощью стационарного уравнения Шредингера [51].

$$\left\{ -\frac{\hbar^2}{2m^*} \nabla^2 + V(z) - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\epsilon\sqrt{x^2 + y^2 + (z - z_0)^2}} \right\} \Psi(r) = E\Psi(r), \quad (3.1)$$

где $V(z)$ – потенциальная энергия носителя заряда в КЯ, z_0 – координата примесного иона в КЯ. Решения этого уравнения существенным образом зависят от ширины квантовой ямы a относительно боровского радиуса r_B основного состояния примеси в объемном полупроводнике, из которого состоит КЯ.

Для бесконечно глубокой КЯ при $a \ll r_B = \frac{4\pi\epsilon_0\hbar^2}{e^2} \frac{1}{m^*}$, так как $x, y \sim r_B, a|z - z_0| \sim a$ уравнение (3.1) существенно упрощается и допускает решение методом разделения переменных в следующем виде:

$$\Psi_{nm}(r) = f_n(r_{\perp})\varphi_m(z), \quad (3.2)$$

					ПГУ 2. 11.03.04. 004 ПЗ	Лист
						38
Изм.	Лист	№докум	Подп.	Дата		

где $\Psi_{nm}(r)$ – огибающая волновой функции уровней размерного квантования в КЯ, $f_n(r_{\perp})$ – огибающая волновой функции примесных состояний двумерной водородоподобной примеси, являющаяся решением уравнения (3.3).

$$\left\{ -\frac{\hbar^2}{2m^*} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) - \frac{e^2}{4\pi\epsilon\epsilon_0\sqrt{x^2+y^2}} \right\} f_n(r_{\perp}) = E_n f_n(r_{\perp}). \quad (3.3)$$

Граничные условия будут следующими: $f = 0$ на бесконечности. Собственные значения функций (3.3) приведены выражением (3.2.4)

$$E_{nm} = E_n + E_m = E_m - R^* \left(n - \frac{1}{2} \right)^{-2}, n = 1, 2, \dots, \infty. \quad (3.4)$$

Таким образом, учитывая особенности поведения мелких водородоподобных примесей в квантовой яме, запишем гамильтониан для предложенной модели. Вид гамильтониана представлен формулой (3.5).

$$H = -\frac{\epsilon_0(0)}{\epsilon_0(P)} \Delta - \frac{\epsilon_0(0)}{\epsilon_0(P)} \frac{2}{r_{ed}} + V_w(r) + fr \cos(\theta). \quad (3.5)$$

Энергия основного состояния и волновая функция основного состояния для донора могут быть определены путем решения уравнения Шредингера:

$$H\Psi = E\Psi. \quad (3.6)$$

При отсутствии аналитического решения можно попытаться решить это уравнение численно, используя вариационный метод, основанный на выборе волновой функции, содержащей вариационные параметры. Для этого выбирается следующий вид волновой функции:

$$\Psi(r) = \Psi_0(r) + Bfr \cos \theta \Psi_0(r), \quad (3.7)$$

где

$$\Psi_0(r) = \frac{\sin\left[\pi\frac{r-a}{b-a}\right]}{r} \exp(-\alpha r_{ed}). \quad (3.8)$$

Здесь α и β — вариационные параметры. Экспоненциальный член введен для учета кулоновских взаимодействий между электроном и ионизованным донором. Основные константы для исследуемого материала приведены в таблице 3.1.

					ПГУ 2. 11.03.04. 004 ПЗ	Лист
						39
Изм.	Лист	№докум	Подп.	Дата		

Таблица 3.1— Основные физические величины для КТ на основе *GaAs*

Ма- териал	$\frac{m_e^*}{m_0}$	ε	a_D^* (нм)	R_D^* (МэВ)	$F_i \left(\frac{\text{кВ}}{\text{см}} \right)$
<i>GaAs</i>	0,067	13,13	10,37	5,29	5,1

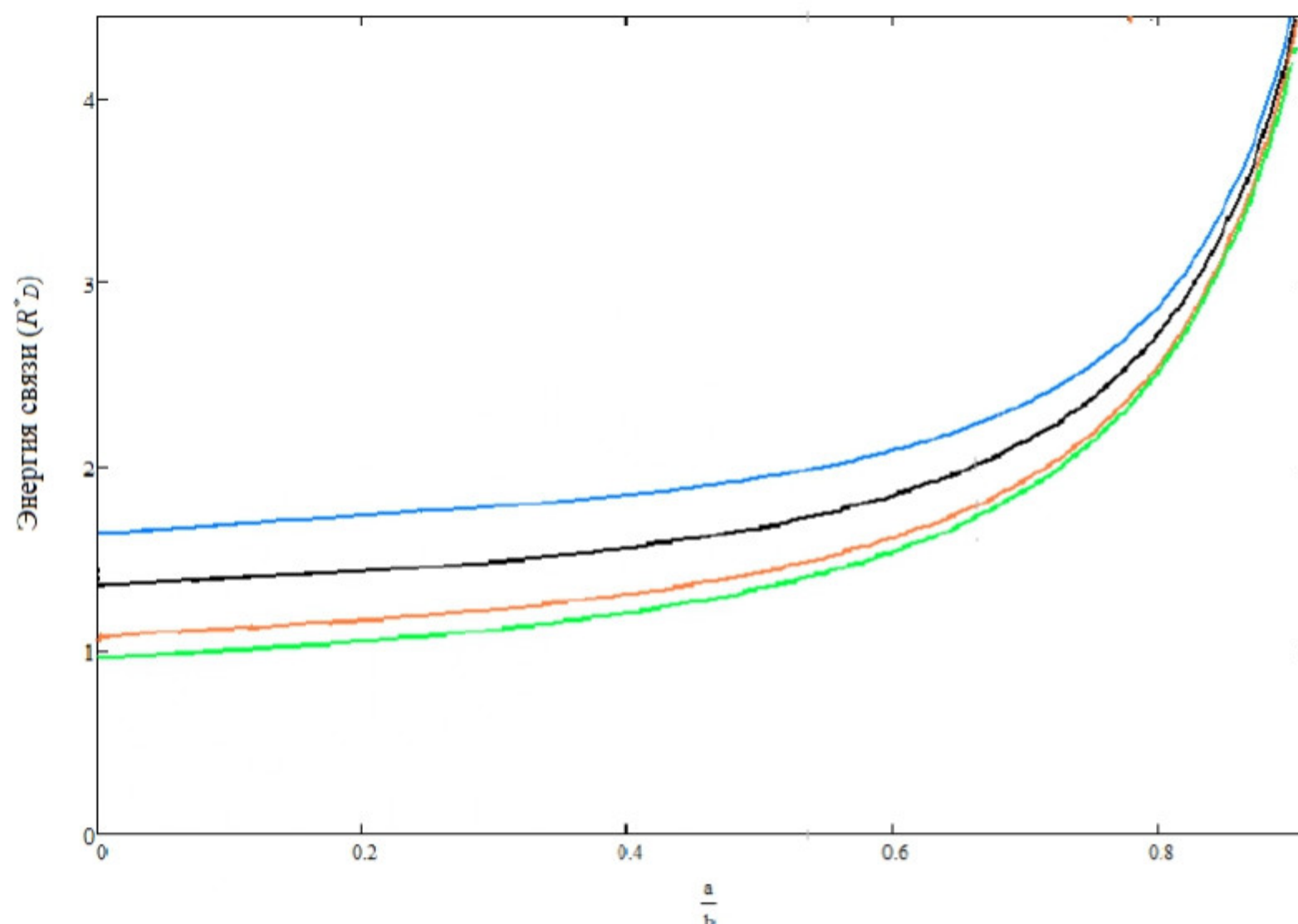
Выражение для расчета энергии связи дается следующей формулой:

$$E_T = \min_{\alpha, B} \frac{\langle \Psi | \hat{H} | \Psi \rangle}{\langle \Psi | \Psi \rangle}. \quad (3.9)$$

Электрическая поляризуемость является количественной мерой того, в какой степени электрическое поле, приложенное к системе, вызывает поляризацию и деформацию атомных орбиталей из-за небольшого смещения вдоль направления электрического поля положительного и отрицательного. Энергетические уровни системы, таким образом, изменяются; такой эффект также известен как Штарковский сдвиг. Для большинства линейных диэлектрических систем поляризуемость (α) может быть определена из средних значений разности дипольного момента (p) с приложенным электрическим полем и без него.

					ПГУ 2. 11.03.04. 004 ПЗ	Лист
						40
Изм.	Лист	№ докум	Подп.	Дата		

На рисунке 3.2 энергия связи представлена как функция отношения a/b для $b=3a^*_D$ и в то же время как функцию различных значений электрического поля: $E=0$; 0,4;0,8 и 1. Пусть донор находится в центре ядра $d=(a+b)/2$. Мы видим, что энергия связи сильно зависит от отношения a/b по мере его увеличения от 0 до 1.



синий- $b=3a^*_D, f=0$, черный- $b=3a^*_D, f=0.4$, оранжевый- $b=3a^*_D, f=0.8$, зеленый- $b=3a^*_D, f=1$

Рисунок 3.2 – Зависимость величины энергии связи от отношения a/b при различных параметрах

Из поведения кривых видно, что энергия связи уменьшается по мере увеличения электрического поля, следовательно, влияние электрического поля становится менее выраженным, когда соотношение $\left(\frac{a}{b}\right) \rightarrow 0$.

Из рисунка 3.2 можно сделать два важных вывода:

Первое: когда $(a/b) \rightarrow 0$, ситуация соответствует сферической гомогенной КТ радиуса b , энергия связи которой уменьшается с увеличением внешнего радиуса b . И наконец, стремится к $1R^*_D$ - энергии связи объемного материала.

					ПГУ 2. 11.03.04. 004 ПЗ	Лист
						41
Изм.	Лист	№докум	Подп.	Дата		

Второе: когда $a/b = 1$ для всех значений внешнего радиуса b , энергия донора стремится к $4R_D^*$, соответствующая известному $2D$ пределу.

На рисунке 3.3 представлена зависимость величины энергии связи водородоподобной примеси от ее положения внутри КЯ.

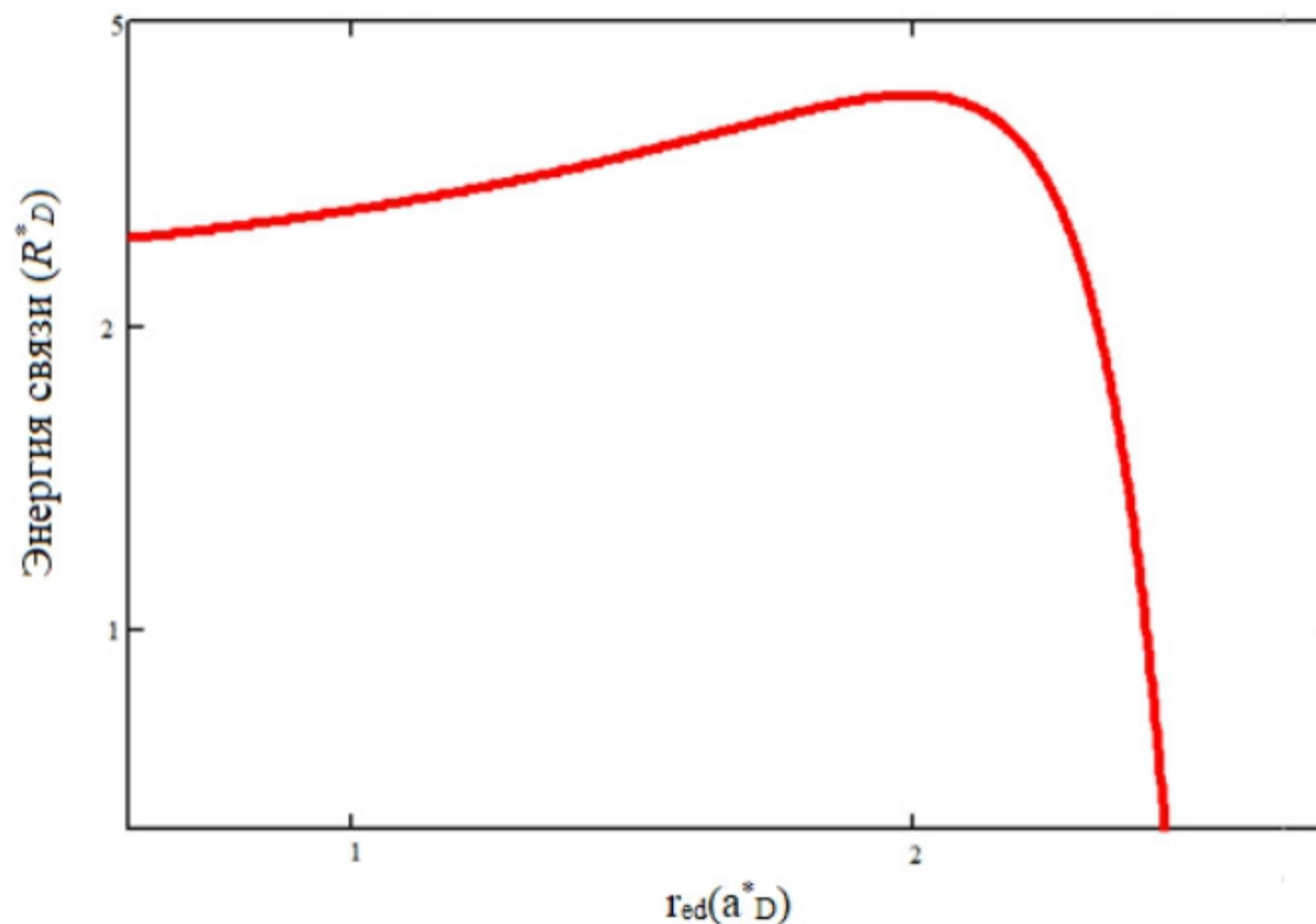


Рисунок 3.3 – Зависимость величины энергии связи донорной примеси от ее положения внутри квантовой ямы

На рисунке 3.4 представлена зависимость величины энергии связи донорной примеси в КЯ от радиальной координаты в выбранной модели.

					ПГУ 2. 11.03.04. 004 ПЗ	Лист
						42
Изм.	Лист	№ докум	Подп.	Дата		

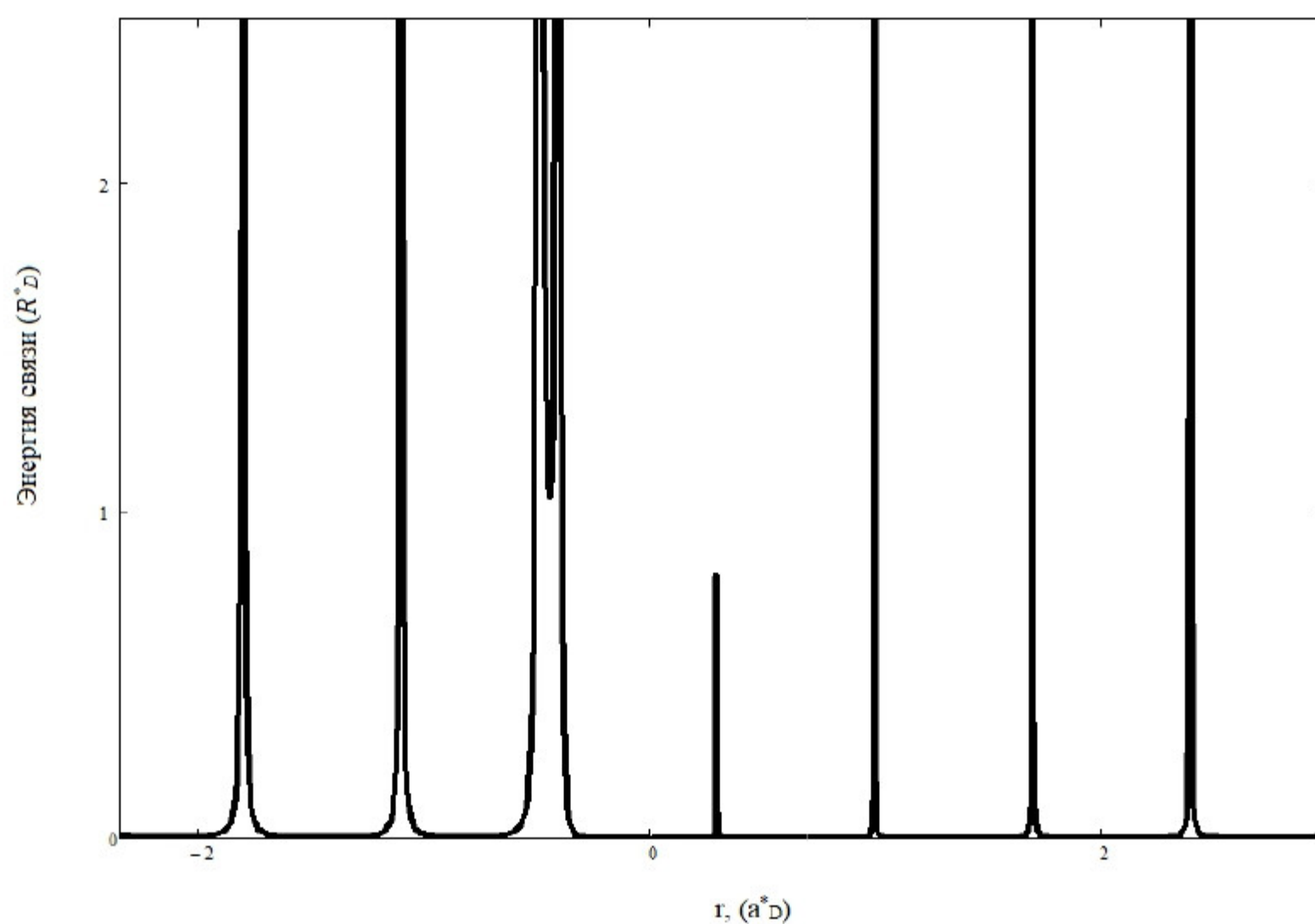


Рисунок 3.4 – Радиальная зависимость энергии связи донорной примеси в КЯ

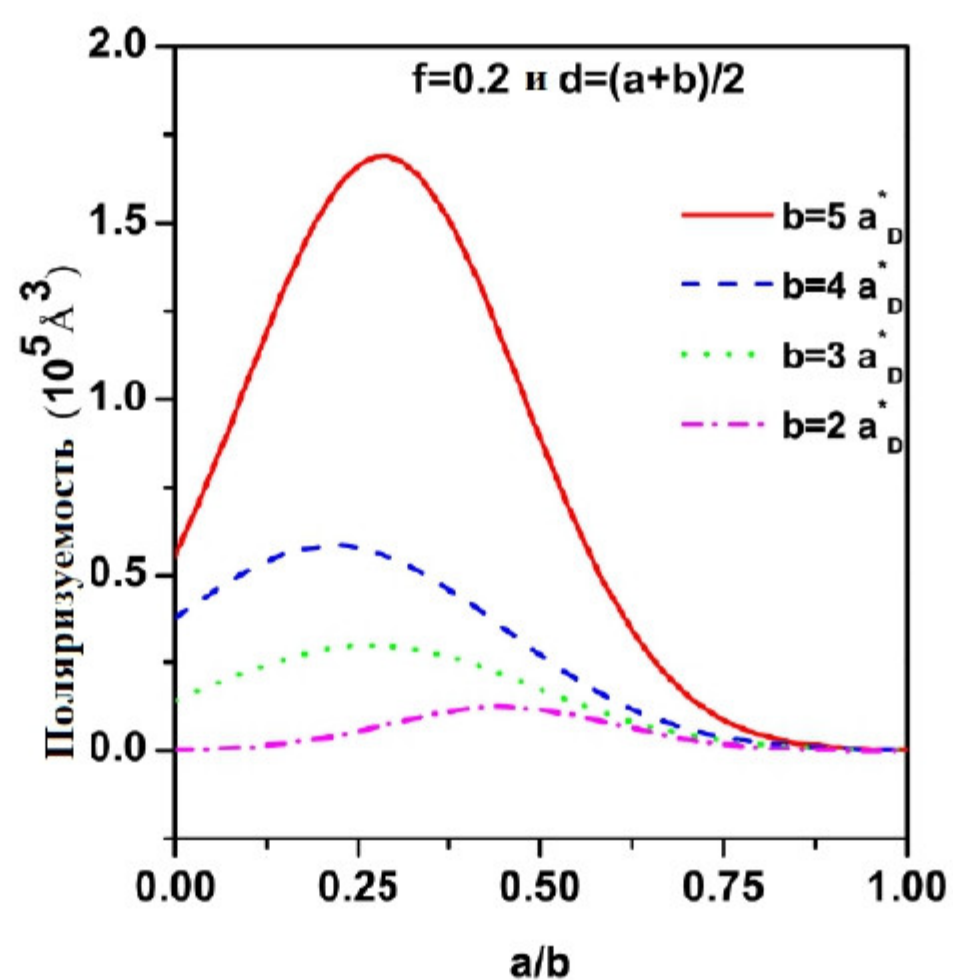


Рисунок 3.5 – Зависимость величины поляризуемости от отношения радиуса ядра к радиусу оболочки $CSQD$, при $f=0.2$ и $d = \frac{(a+b)}{2}$

					ПГУ 2. 11.03.04. 004 ПЗ	Лист
						43
Изм.	Лист	№ докум	Подп.	Дата		

Поляризуемость как функция отношения (a/b) для разных значений величины внешнего радиуса b и при фиксированной напряженности электрического поля ($f = 0:2$) представлена на рисунке 3.5. Донор расположен в центре оболочки: $d = (a + b)/2$. Из рисунка видно, что при больших значениях отношения (a/b) величина пространственного ограничения растёт и значение поляризуемости примеси становится меньше, а также уменьшается влияние геометрических размеров КТ на величину поляризуемости. Однако при малых значениях отношения (a/b) (больших значениях b) преобладает влияние электрического поля. Поляризуемость сильно зависит от размера $CSQD$. Следовательно, поляризуемость уменьшается с увеличением отношения (a/b) .

3.2 Сравнительный анализ теоретических зависимостей

Таким образом, в ходе исследования влияния внешнего электрического поля на квантовую точку типа «ядро/оболочка» были получены следующие результаты:

1. Энергия связи системы уменьшается по мере увеличения электрического поля, что объясняется квантоворазмерным эффектом Штарка. В частности, влияние электрического поля становится незначительным в случае, когда отношение радиусов ядра и оболочки стремится к нулю;

2. Когда отношение радиусов ядра и оболочки стремится к нулю, то система становится подобной сферической гомогенной квантовой точке радиуса b , энергия связи которой обратно пропорциональна её радиусу.

3. При больших значениях отношения (a/b) величина пространственного ограничения растёт и значение поляризуемости примеси становится меньше, а также уменьшается влияние геометрических размеров КТ на величину поляризуемости. Однако при малых значениях отношения (a/b) преобладает влияние электрического поля. Поляризуемость сильно зависит от размера КТ. Следовательно, поляризуемость уменьшается с увеличением отношения (a/b) .

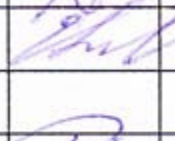
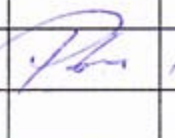
					ПГУ 2. 11.03.04. 004 ПЗ	Лист
						44
Изм.	Лист	№ докум	Подп.	Дата		

4 Анализ влияния освещенности научно-исследовательской лаборатории на работу инженера-исследователя

Научно-исследовательская работа инженера-исследователя осуществляется на рабочих местах, представляющих собой прямоугольные столы стандартного размера (1500x700) мм, с расположенными на них комплектами оборудования:

- вакуумной насос;
- компьютером, включающим в свой состав системный блок, жидкокристаллический монитор, клавиатуру и мышь;
- вакуумметр ионизационно термопарный ВИТ2;
- насос ВН 250;
- установка вакуумного напыления УВН-71П-3;
- поршневой компрессор *FUBAG HP 3*;
- алмаз – М для скрайбирования;
- биноккулярный стереоскопический микроскоп;
- шкаф для компонентов.

Влияние освещения на производительность труда человека, по-видимому, более критично в современной жизни, следовательно, большую часть времени человек проводит в помещении в различных условиях освещения. От офисных до домашних работ условия освещения оказывают существенное влияние на общее качество внутренней среды, производительность и комфорт пользователя. В то же время оптимальное освещение для определенной цели на рабочем месте будет способствовать многим атрибутам устойчивой физической среды. Существуют рекомендуемые уровни освещения для определенной цели, предложенные национальными органами власти в разных странах. Однако исследователи

					ПГУ 2. 11.03.04. 004 ПЗ				
Изм.	Лист	№докум	Подп.	Дата	Анализ влияния освещенности научно-исследовательской лаборатории на работу инженера- исследователя	Лит.	Лист	Листов	
Разраб.		Веденяпин					45	81	
Пров.		Игошина							
Н.контр		Рыжова		11.06.25		гр. 21ПД1			
Утв.									

освещенностью и производительностью человека по-прежнему остается неясной и повышает дальнейшую потребность в исследованиях в этой области. Настоящее исследование рассматривает связь между освещенностью, цветовым контрастом задачи и производительностью задачи, чтобы определить любую конкретную освещенность для максимальной производительности человека. В работе [] описан эксперимент, который проводился на группе аспирантов аналогичного возраста. На основе эксперимента, проводимого в научной лаборатории, влияние освещения на работоспособность проводилось на этих 71 субъекте, в ходе которого изучалось, как различные уровни освещенности и контрастности влияют на производительность задачи. Анкетный опрос, проводимый в ходе каждого сеанса, также позволял оценить субъективное впечатление от освещения при использовании четырех различных уровней освещенности в ходе эксперимента.

Более ранние исследования показали, что существует противоречие в типе задачи, и многие утверждали, что тип задачи может влиять на выполнение задачи и не будет справедливо оцениваться в отношении связи с освещенностью. Чтобы избежать усложнения, связанного с задачей, типом задачи, выбранным в текущем исследовании, являлась карта Ландольта С, которая была впервые представлена британским исследователем Уэстоном в 1945 году (Эрик, С. 1986. Рабочие места: психология физической среды в офисах и на фабриках). Диаграмма Ландольта С с двумя различными контрастами и двумя различными схематическими комбинациями были представлены участникам в хронологическом порядке.

Освещенность влияет на производительность человека. На основе текущего эксперимента, вывести конкретную связь между производительностью задачи и освещенностью оказалось сложно. Из анализа было замечено, что увеличение освещенности может повысить производительность до определенного

					ПГУ 2. 11.03.04. 004 ПЗ	Лист
						46
Изм.	Лист	№докум	Подп.	Дата		

уровня, но чрезмерная освещенность вызывает падение производительности, а также отражает более высокий уровень неудовлетворенности.

У настоящего исследования также есть некоторые ограничения. Эксперимент был основан только на четырех различных уровнях освещенности. Результат мог быть другим для более высоких, чем 400 лк или ниже, чем 50 лк. С другой стороны, уровень освещенности был увеличен с 200 лк до 400 лк напрямую, без какого-либо измеренного между ними уровня производительности. Постепенное увеличение освещенности с 200 лк до 400 лк может указывать на наивысшую производительность определенной освещенности, а после этого уровня производительность начала падать. Что является недостатком исследования.

Выполнение задания не предсказывает субъективные впечатления от освещения. С данными, полученными в ходе эксперимента, было видно, что при одинаковых уровнях освещения разные субъекты демонстрируют разную производительность и даже имеют разную реакцию в зависимости от уровня их удовлетворенности. Литература и более ранние исследования не проводили широкой оценки связи контраста и производительности.

Настоящее исследование ясно показывает, что цветовой контраст оказывает значительное влияние на производительность. Из анализа было видно, что более высокая контрастность обеспечивает лучшую производительность, а также повышенную удовлетворенность среди субъектов.

Согласно представленному выше анализу, можно сделать вывод, что изменение и улучшение освещения влияет на производительность, что также отмечалось во многих более ранних исследованиях, но в настоящем исследовании рассматривается обновленный сценарий в лабораторной среде. Текущее исследование показывает, что повышение уровня освещенности в первую очередь повышает производительность человека. После определенного уровня, который в этом эксперименте составлял 400 люкс, наблюдается тенденция к снижению

					ПГУ 2. 11.03.04. 004 ПЗ	Лист
						47
Изм.	Лист	№докум	Подп.	Дата		

производительности. Кроме того, анализ показывает, что освещенность оказывает значительное влияние на уровень удовлетворенности испытуемых. С другой стороны, изменение контрастности показывает четкое последовательное изменение производительности задач. Высококонтрастное изображение на картинке стимулирует улучшение производительности человека. В исследовании оценка взаимосвязи между освещенностью, уровнями контрастности и производительностью задач представлена в виде ряда сравнений. Таким образом, текущее исследование представляет собой сценарий человеческой производительности при различных уровнях освещенности в спроектированной лабораторной среде, тем самым оно служит методологией и базой данных для поддержки будущих исследований, сообщая об освещенности для строительства внутренней среды и помогая соответствующим специалистам оценить текущее исследование для дальнейших исследований.

Как известно, минимальная освещенность рабочего места согласно нормативам, (E) определяется уравнением:

$$E = \frac{F \cdot m \cdot e \cdot p \cdot Y}{1000 \cdot K_3 \cdot h}, \quad (4.1)$$

где F – световой поток светильника, лм;

m – коэффициент, учитывающий отраженную составляющую света и действие удаленных светильников (1,05 – 1,2);

$e = e_1 + e_2 + \dots + e_i$ – условная освещенность, которая создавалась бы i -м светильником при установке в нем лампы 1000 лм;

p – расстояние от плоскости, в которой расположена контрольная точка, до проекции светильника, м;

$Y = Y_1 + Y_2 + \dots + Y_i$ – коэффициент, учитывающий переход от горизонтальной плоскости к вертикальной;

K_3 – коэффициент запаса, учитывающий запыление светильников и износ источников света (1,5-2);

					ПГУ 2. 11.03.04. 004 ПЗ	Лист
						48
Изм.	Лист	№докум	Подп.	Дата		

h – высота подвеса светильников над расчётной поверхностью, м.

Будем анализировать условия для научно-исследовательской работы в лаборатории, которая представляет собой помещение длиной 6.10 м, шириной 5 м и высотой 3,5 м, установлено 15 светильников типа ОД с прямым косинусным светораспределением. В каждом из светильников установлено 2 люминесцентные лампы ЛБ-80 (световой поток 5200 лм). На рисунке 4.1 представлено расположение светильников в помещении.

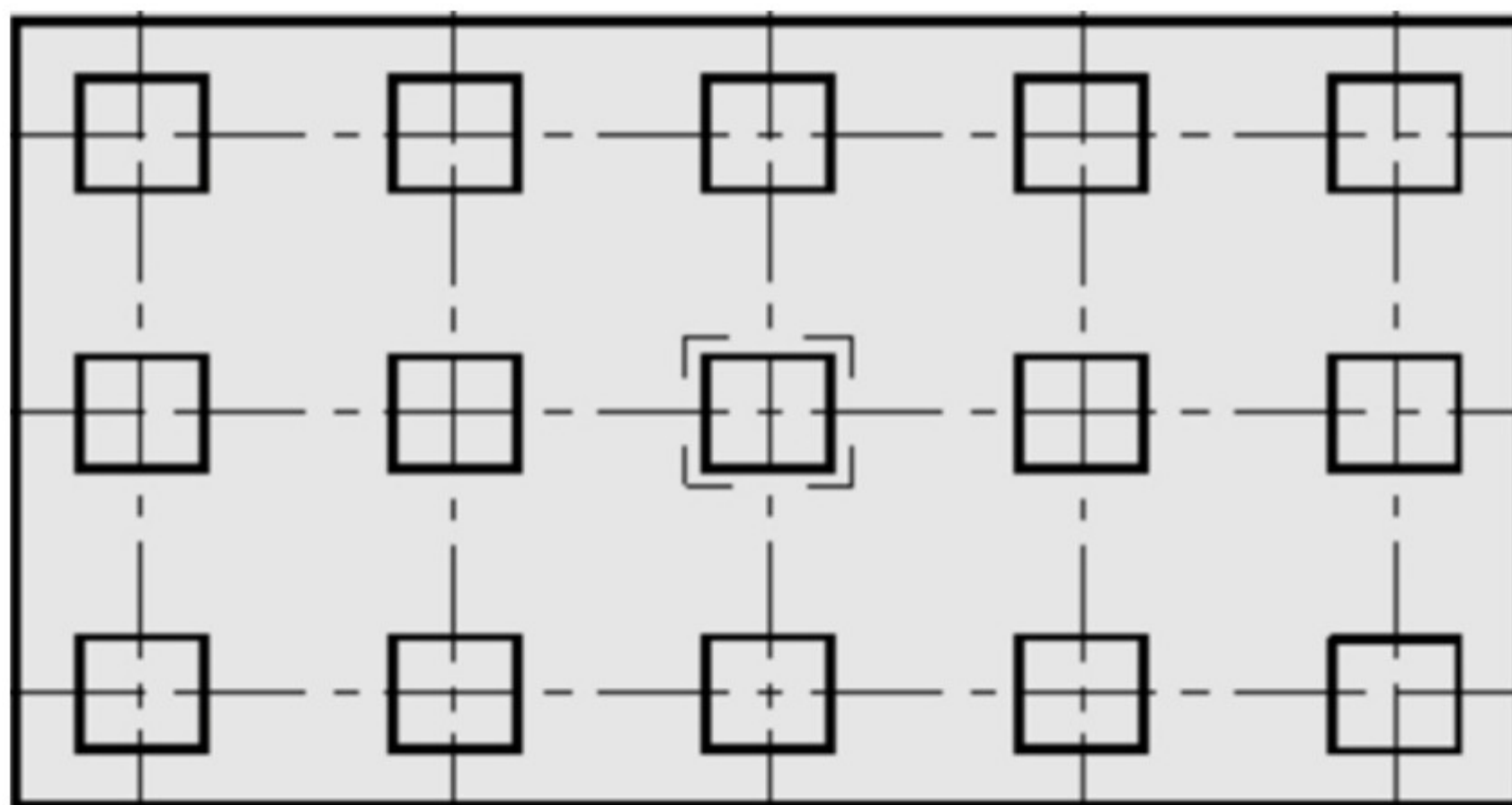


Рисунок 4.1 – Расположение светильников в научно-исследовательской лаборатории:

Рассчитаем общий световой поток от ламп в лаборатории: ЛБ-80, имеющие световой поток 5200 лм, то $F = 2 \cdot 5200 \text{ лм} = 10400 \text{ лм}$.

Для светодиодных ламп известен коэффициент, который учитывает составляющую света, которая отражается и действие удаленных светильников $m = 1.1$.

В научно-исследовательской лаборатории небольшое выделение пыли, поэтому примерный коэффициент запаса светильников светодиодных ламп $K_3 = 1,5$

					ПГУ 2. 11.03.04. 004 ПЗ	Лист
						49
Изм.	Лист	№докум	Подп.	Дата		

Высота плоскости нормирования освещенности определяется высоте 0,8 м от пола, можно рассчитать высоту подвеса светильников над рабочей поверхностью:

$$h = 3,4 \text{ м} - 0,8 \text{ м} = 2,6 \text{ м}$$

Таким образом, можно рассчитать условную освещенность, которая будет создаваться i -м светильником при включении лампы 1000 лк, что видно из уравнения:

$$e_i = \frac{I_\alpha \cos^3 \alpha_i}{h^2}, \quad (4.2)$$

где I_α – сила света по направлению к точке:

α_i – угол между нормалью к поверхности, которой принадлежит точка и лучом падающего света, определяемый выражением:

$$\alpha_i = \arctg\left(\frac{d_i}{h}\right), \quad (4.3)$$

где d_i – расстояние от контрольной точки A до проекции светильника.

$$d_1 = d_2 = d_3 = d_4 = \sqrt{1,5^2 \text{ м} + 1,5^2 \text{ м}} = 2,1 \text{ м} \quad (4.4)$$

Определим α_i :

$$\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4 = \arctg\left(\frac{2,1 \text{ м}}{2,6 \text{ м}}\right) = 38^\circ \quad (4.5)$$

Определим e_i :

$$I_1 = I_2 = I_3 = I_4 = 225 \text{ кд}, \quad (4.6)$$

$$e_1 + e_2 + e_3 + e_4 = \frac{225 \text{ кд} * \cos^3 38^\circ}{(2,6)^2} = 16,3 \text{ лк} \quad (4.7)$$

Исходя из условной освещенности, которая создавалась бы i -м светильником, определим:

					ПГУ 2. 11.03.04. 004 ПЗ	Лист
						50
Изм.	Лист	№докум	Подп.	Дата		

$$e = e_1 + e_2 + e_3 + e_4 = 16,3 \text{ лк.} \quad (4.8)$$

Рассчитаем Y_i , по выражению:

$$Y_i = \cos \theta + \frac{d_i}{h} \sin \theta. \quad (4.9)$$

где θ - угол наклона вертикальной плоскости, равный 90° ;

$$Y_1 = Y_2 = Y_3 = Y_4 = 0,27, \quad (4.10)$$

С учетом всего выше изложенного, рассчитаем освещенность рабочего места инженера исследователя по выражению (7.1):

$$E = \frac{10400 * 1,5 * 1,1 * 16,3 * 0,27}{1000 * 1,5 * 2,6} = 19_{лк} \quad (4.11)$$

Мы получили данные расчёта для освещенности рабочего места инженера-исследователя: $E = 19$ лк вполне удовлетворяют СНиП 23-05-95. Таким образом, система освещения, реализованная в научно-исследовательской лаборатории, полностью удовлетворяет требованиям безопасности труда и удобства работы.

В лаборатории в соответствии с ГОСТ 12.1.004-91 приняты все меры противопожарной безопасности: рубильники прямого доступа для быстрого отключения установки от сети; огнетушители ОХП-10 и ОХПВ-10; напротив лаборатории имеется выход на запасную лестницу для быстрой эвакуации в случае пожара.

					ПГУ 2. 11.03.04. 004 ПЗ	Лист
						51
Изм.	Лист	№докум	Подп.	Дата		

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены модели кубитов на основе примесных центров в полупроводниковых оксидах.

Проведено исследование и анализ поведения примесных центров в низкоразмерных полупроводниковых структурах, таких как оксид цинка (ZnO).

Изучены особенности поведения мелких водородоподобных примесей в квантовой яме в перспективе использования полученных эффектов для разработки кубитов на основе КТ.

					ПГУ 2. 11.03.04. 004 ПЗ	Лист
						52
Изм.	Лист	№докум	Подп.	Дата		

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Achar S. et al. Single and entangled photon pair generation using atomic vapors for quantum communication applications /Frontiers in Quantum Science and Technology. – 2024. – Т. 3. – С. 1438340.*
2. *Wang M., Long G. L. Quantum secure direct communication: whispering with photons /National Science Review. – 2025. – С. nwaf096.*
3. *Yin J. et al. Quantum teleportation and entanglement distribution over 100-kilometre free-space channels /Nature. – 2012. – Т. 488. – №. 7410. – С. 185-188.*
Ma, X.-S., Herbst, T., Scheidl, T., Wang, D., Kropatschek, S., et al. Quantum teleportation over 143 kilometres using active feed-forward. Nature. 2012. Vol. 489, no. 7415. P. 269–273. DOI: 10.1038/nature11472.
4. *Main D. et al. Distributed quantum computing across an optical network link //Nature. – 2025. – С. 1-6.*
5. *Yin J. et al. Satellite-based entanglement distribution over 1200 kilometers //Science. – 2017. – Т. 356. – №. 6343. – С. 1140-1144.*
6. *Physicists Just Smashed a Record to Achieve Quantum Entanglement in Space. ScienceAlert. URL: <https://www.sciencealert.com/physicists-just-quantum-entangled-photons-between-earth-and-space> (дата обращения: 26.05.2025).*
7. *Honjo T. et al. Long-distance distribution of time-bin entangled photon pairs over 100 km using frequency up-conversion detectors //Optics express. – 2007. – Т. 15. – №. 21. – С. 13957-13964.*
8. *Krenn M. et al. Quantum communication with photons //Optics in our Time. – 2016. – Т. 18. – С. 455.*
9. *Zhang L. et al. Experimental Mode-Pairing Quantum Key Distribution Surpassing the Repeaterless Bound //Physical Review X. – 2025. – Т. 15. – №. 2. – С. 021037.*

					ПГУ 2. 11.03.04. 004 ПЗ	Лист
						53
Изм.	Лист	№ докум	Подп.	Дата		

10. *Quantum Cryptography Analogy Demonstration Kit*. Thorlabs. URL: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=9869 (дата обращения: 26.05.2025).
11. *Long-Distance Quantum Cryptography with Entangled Photons*. Austrian Academy of Sciences. URL: https://www.oeaw.ac.at/fileadmin/Institute/IQOQI-Vienna/PDF/publications-zeilinger/2007_-Quantum_Communications_Realized-_Long-Distance_Quantum_Cryptography_with_Entangled_Photons.pdf (дата обращения: 26.05.2025).
12. *Quantum communication with single photons (Chapter 5) - Introduction to Optical Quantum Information Processing*. Cambridge University Press. URL: <https://www.cambridge.org/core/books/introduction-to-optical-quantum-information-processing/quantum-communication-with-single-photons/436A5E764640731219014636214B0400> (дата обращения: 26.05.2025).
13. *Vajner D. A. et al. Single-Photon Advantage in Quantum Cryptography Beyond QKD* //arXiv preprint arXiv:2412.14993. – 2024.
14. *Heshami K. et al. Quantum memories: emerging applications and recent advances* //Journal of modern optics. – 2016. – Т. 63. – №. 20. – С. 2005-2028.
15. *Ma L., Slattery O., Tang X. Optical quantum memory and its applications in quantum communication systems* //Journal of research of the National Institute of Standards and Technology. – 2020. – Т. 125. – С. 125002.
16. *Optical Quantum Memories in Atomic Ensembles at University of Birmingham* on FindAPhD.com. URL: <https://www.findaphd.com/phds/project/optical-quantum-memories-in-atomic-ensembles/?p182707> (дата обращения: 26.05.2025).
17. *Entanglement swapping with spatially multiplexed modes in an atomic-ensemble quantum memory in a single excitation regime*. Optica Publishing Group. URL: <https://opg.optica.org/optica/abstract.cfm?uri=optica-12-2-274> (дата обращения: 26.05.2025).

					ПГУ 2. 11.03.04. 004 ПЗ	Лист
						54
Изм.	Лист	№докум	Подп.	Дата		

18. *Controllably releasing long-lived quantum memory for photonic polarization qubit into multiple spatially-separate photonic channels. PMC. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC5036204/> (дата обращения: 26.05.2025).*
19. *Long-lived quantum memory. ePrints Soton - University of Southampton. URL: <https://eprints.soton.ac.uk/175767/> (дата обращения: 26.05.2025).*
20. *Quantum teleportation between remote atomic-ensemble quantum memories. PNAS. URL: <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.1207329109> (дата обращения: 26.05.2025).*
21. *Solid State Quantum Memories. QPSA ICFO. URL: <http://qpsa.icfo.es/research/solid-state-quantum-memories/> (дата обращения: 26.05.2025).*
22. *Quantum Memories :: qram. URL: <https://www.unige.ch/gap/qic/qram/quantum-memories> (дата обращения: 26.05.2025).*
23. *Towards a Long-Lived and Efficient Photonic Quantum Memory in a Thulium-Doped Crystal. URL: <https://resolver.tudelft.nl/uuid:61c88b1b-1269-4cec-9e09-4b1ac0622d4f> (дата обращения: 26.05.2025).*
24. *Integrated spin-wave quantum memory. National Science Review. URL: <https://academic.oup.com/nsr/article/11/11/nwae161/7660993> (дата обращения: 26.05.2025).*
25. *Ion-Photonic Quantum Networks. URL: <https://iontrap.duke.edu/research/ion-photonic-quantum-networks/> (дата обращения: 26.05.2025).*
26. *Robust quantum memory in a trapped-ion quantum network node. URL: <https://www.quantumcity.org.uk/news/robust-quantum-memory-in-a-trapped-ion-quantum-network-node> (дата обращения: 26.05.2025).*
27. *Quantum Dots: A Review of their Properties and Applications. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7912239/> (дата обращения: 27.05.2025).*

					ПГУ 2. 11.03.04. 004 ПЗ	Лист
						55
Изм.	Лист	№ докум	Подп.	Дата		

28. *Impurity states in semiconductor quantum dots.* URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0953-8984/20/39/393201/meta> (дата обращения: 27.05.2025).
29. *Impurity states in low-dimensional semiconductor structures: a review.* URL: https://www.researchgate.net/publication/286127451_Impurity_states_in_low-dimensional_semiconductor_structures_a_review (дата обращения: 27.05.2025).
30. *Quantum Dot Impurity States: A Review.* URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136980011830022X> (дата обращения: 27.05.2025).
31. *Silicon quantum computing.* URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Silicon_quantum_computing (дата обращения: 27.05.2025).
32. *Nitrogen-vacancy center.* URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Nitrogen-vacancy_center (дата обращения: 27.05.2025).
33. *Single-photon sources based on quantum dots.* URL: <https://www.nature.com/articles/s41578-020-00244-x> (дата обращения: 27.05.2025).
34. *Quantum dot single-photon sources: a review.* URL: <https://www.spiedigitallibrary.org/journals/journal-of-nanophotonics/volume-13/issue-01/012501/Quantum-dot-single-photon-sources-a-review/10.1117/1.JNP.13.012501.full> (дата обращения: 27.05.2025).
35. *Magnetic impurities in semiconductor quantum dots.* URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0953-8984/19/43/436224/meta> (дата обращения: 27.05.2025).
36. *Effective mass approximation for quantum dots.* URL: https://www.researchgate.net/publication/262799341_Effective_mass_approximation_for_quantum_dots (дата обращения: 27.05.2025).

					ПГУ 2. 11.03.04. 004 ПЗ	Лист
						56
Изм.	Лист	№ докум	Подп.	Дата		

37. *Tight-binding model for semiconductor nanostructures.* URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123736604000020> (дата обращения: 27.05.2025).
38. *First-principles calculations of defects in semiconductors.* URL: <https://journals.aps.org/rmp/abstract/10.1103/RevModPhys.87.1133> (дата обращения: 27.05.2025).
39. *Monte Carlo simulation of impurity distribution in semiconductor nanostructures.* URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0268-1242/26/1/015002/meta> (дата обращения: 27.05.2025).
40. *Photoluminescence spectroscopy of semiconductor quantum dots.* URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S003810980700052X> (дата обращения: 27.05.2025).
41. *Doping of ZnO nanostructures for optoelectronic applications.* URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136980011400030X> (дата обращения: 27.05.2025).
42. *Electron paramagnetic resonance of donors in silicon.* URL: <https://journals.aps.org/prb/abstract/10.1103/PhysRevB.80.115201> (дата обращения: 27.05.2025).
43. *Scanning tunneling microscopy of semiconductor surfaces.* URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079656508700028> (дата обращения: 27.05.2025).
44. *Magneto-optical properties of semiconductor quantum dots.* URL: <https://www.worldscientific.com/worldscibooks/10.1142/6530> (дата обращения: 27.05.2025).
45. *A two-qubit logic gate in silicon.* URL: <https://www.nature.com/articles/nature12123> (дата обращения: 27.05.2025).

					ПГУ 2. 11.03.04. 004 ПЗ	Лист
						57
Изм.	Лист	№ докум	Подп.	Дата		

46. *Deterministic placement of single dopants in silicon.* URL: <https://www.nature.com/articles/nnano.2012.21> (дата обращения: 27.05.2025).
47. *Coherence in silicon quantum dots.* URL: <https://www.nature.com/articles/s41565-021-00994-x> (дата обращения: 27.05.2025).
48. *Integrated quantum photonics with quantum dots.* URL: <https://www.nature.com/articles/s41566-020-0613-y> (дата обращения: 27.05.2025).
49. Nielsen, M. A., & Chuang, I. L. *Quantum Computation and Quantum Information.* Cambridge University Press, 2010.
50. Preskill, J. *Quantum Computation. Lecture Notes, California Institute of Technology,* 1998.
51. *What is a Qubit?.* IBM Quantum. URL: <https://www.ibm.com/quantum-computing/what-is-quantum-computing/what-is-a-qubit/> (дата обращения: 27.05.2025).
52. Devitt, S. J., et al. *Quantum error correction for beginners. Reports on Progress in Physics,* 2013, 76(7), 076001.
53. DiVincenzo, D. P. *The Physical Implementation of Quantum Computation. Fortschritte der Physik.* 2000. Vol. 48, no. 9–11. P. 771–783. DOI: 10.1002/1521-3978(200009)48.
54. Kjaergaard, M., et al. *Superconducting qubits: Current state of play. Annual Review of Condensed Matter Physics,* 2020, 11, 369-395.
55. *Superconducting Qubits.* IBM Quantum. URL: <https://www.ibm.com/quantum-computing/what-is-quantum-computing/superconducting-qubits/> (дата обращения: 27.05.2025).

					ПГУ 2. 11.03.04. 004 ПЗ	Лист
						58
Изм.	Лист	№ докум	Подп.	Дата		

56. Arute, F., Arya, K., Babbush, R., Bacon, D., Bardin, J. C., et al. Quantum supremacy using a programmable superconducting processor. *Nature*. 2019. Vol. 574, no. 7779. P. 505–510. DOI: 10.1038/s41586-019-1663-9.
57. Cirac, J. I., & Zoller, P. Quantum Computations with Cold Trapped Ions. *Physical Review Letters*, 1995, 74(21), 4091.
58. Trapped Ions. IonQ. URL: <https://ionq.com/technology/trapped-ions> (дата обращения: 27.05.2025).
59. O'Brien, J. L., et al. Photonic quantum technologies. *Nature Photonics*, 2009, 3(12), 687-695.
60. Loss, D., & DiVincenzo, D. P. Quantum computation with quantum dots. *Physical Review A*, 1998, 57(1), 120.
61. Saffman, M., et al. Quantum information with Rydberg atoms. *Reviews of Modern Physics*, 2010, 82(3), 2313.
62. Henriksen, M. R., et al. Neutral atom quantum computing. *Nature Reviews Physics*, 2024, 6(1), 2-17.
63. Jelezko, F., & Wrachtrup, J. Nitrogen-vacancy centers in diamond: A review. *Physica Status Solidi (a)*, 2006, 203(13), 3207-3215.
64. Nayak, C., et al. Topological quantum computation. *Reviews of Modern Physics*, 2008, 80(3), 1083.
65. Alicea, J. New directions in the pursuit of Majorana fermions in solid state systems. *Reports on Progress in Physics*, 2012, 75(7), 076501.
66. Gottesman, D. An introduction to quantum error correction. *Quantum Information Science and Technology*, 2009, 1, 1-28.
67. Hansen E. R. et al. Isolation of Single Donors in ZnO // *Physical Review Letters*. – 2024. – T. 133. – №. 14. – С. 146902.
68. Rahman S. Effect of Illuminance on Human Work Performance, an assessment based on Lighting Laboratory experiment // *AUST Journal Of Science and Technology*. – 2018. – T. 7. – №. 1-2.

					ПГУ 2. 11.03.04. 004 ПЗ	Лист
						59
Изм.	Лист	№ докум	Подп.	Дата		

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(обязательное)

Задание на выпускную квалификационную работу

					ПГУ 2. 11.03.04. 004 ПЗ	Лист
						60
Изм.	Лист	№докум	Подп.	Дата		

«Утверждаю»
зав. кафедрой НиМЭ
Пронин И.А.
(фамилия, инициалы)
«05» июня 2025 г.

З А Д А Н И Е
на бакалаврскую работу

1. Студент(ка) гр. 21ПД1 факультета информационных технологий и электроники

Направление подготовки 11.03.04. «Электроника и нанoeлектроника»

Профиль Микроэлектроника и твердотельная электроника

Веденяпин Даниил Романович

(фамилия, имя, отчество)

2. Руководитель Игошина Светлана Евгеньевна

(фамилия, имя, отчество)

3. Тема бакалаврской работы Анализ моделей примесных центров в полупроводниковых структурах для элементов квантовой электроники

Тема утверждена приказом ПГУ № 582/0 от «25» 04 2025 г.

4. Техническое задание на бакалаврскую работу (вид работы: разработка, проектирование, исследование, и т.д.; назначение; основные параметры; условия функционирования и т.д.)

1. Моделирование поведения примесных центров в низкоразмерных структурах на основе InSb и CdSe

2. Моделирование влияния электрического поля на свойства квантовых точек типа «ядро/оболочка» на основе AlAs/GaAs

3. Анализ экспериментальных результатов исследования поведения мелких доноров в оксиде цинка (ZnO)

5. Объем и содержание основной части бакалаврской работы

5.1. Пояснительная записка (перечень вопросов, подлежащих разработке, обоснований, описаний, расчетов и т.д.)

1. Применение квантовомеханических эффектов в системах защиты информации.

1.1. Теоретические и экспериментальные исследования, посвященные передаче квантовой информации с помощью фотонов

1.2. Теоретические и экспериментальные исследования в области хранения квантовой информации

1.3. Анализ литературных данных о свойствах полупроводниковых квантовых структур с примесными центрами

2. Модели кубитов на основе примесных центров в полупроводниковых оксидах

2.1. Общие сведения о кубитах	
2.2. Анализ результатов исследования поведения мелких доноров в оксиде цинка (ZnO)	
2.3. Исследование моделей примесных центров в низкоразмерных структурах на основе InSb и CdSe	
3. Теоретическое исследование зависимости энергии связи примеси в низкоразмерных структурах	
3.1. Влияние электрического поля на электрооптические свойства полупроводниковых квантовых точек типа «ядро/оболочка» на основе AlAs/GaAs	
3.2. Сравнительный анализ теоретических зависимостей	
4. Анализ влияния освещенности научно-исследовательской лаборатории на работу инженера-исследователя	
5.2. Иллюстративная часть (перечень и содержание чертежей и слайдов презентации)	
Слайд 1-3 Постановка задачи. Цели работы	
Слайд 4-6 Объект и методы исследования	
Слайд 7-9 Анализ результатов исследования современных источников	
Слайд 9-11 Математическая модель поставленной задачи, полученные результаты	
Слайд 12-13 Анализ экспериментальных зависимостей.	
Слайд 14 Выводы	

6. Консультанты и содержание дополнительных разделов

6.1. _____

Консультант _____

7. Календарный график по выполнению бакалаврской работы

Наименование этапов работы	Объем работы	Срок выполнения	Подпись руководителя, консультанта
Моделирование поведения примесных центров в низкоразмерных структурах на основе InSb и CdSe	20%	05.06.2025	
Моделирование влияния электрического поля на свойства квантовых точек типа «ядро/оболочка» на основе AlAs/GaAs	20%	06.06.2025	
Анализ экспериментальных результатов исследования поведения мелких доноров в оксиде цинка (ZnO)	20%	07.06.2025	
Иллюстративная часть ВКР	20%	08.06.2025	
Оформление пояснительной записки	20%	09.06.2025	

Руководитель бакалаврской работы

подпись

Игошина С.В.

фамилия, инициалы

Дата выдачи задания

«05»

июня

2025 г.

Задание к исполнению принял

подпись

Веденяпин Д.Р.

фамилия, инициалы

«05»

июня

2025 г.

Бакалаврскую работу к защите допустить

Декан факультета

подпись

Кревчик В.Д.

фамилия, инициалы

«10»

06

2025 г.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(обязательное)

Заявление и протокол проверки ВКР на оригинальность в системе
«Антиплагиат.ВУЗ»

					ПГУ 2. 11.03.04. 004 ПЗ	Лист
						64
Изм.	Лист	№докум	Подп.	Дата		

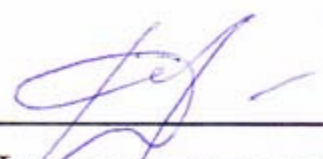
Ректору Пензенского государственного
университета Гулякову А.Д.
от студента 4 курса ФИТЭ очной формы
обучения
Веденяпина Даниила Романовича

ЗАЯВЛЕНИЕ

Я, Веденяпин Даниил Романович, студент 4 курса очной формы обучения направления подготовки 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника», микроэлектроника и твердотельная электроника, прошу провести проверку с использованием системы «Антиплагиат.ВУЗ» бакалаврской выпускной квалификационной работы на тему «Анализ моделей примесных центров в полупроводниковых структурах для элементов квантовой электроники», выполненной мной самостоятельно, на содержание элементов плагиата.

Все прямые заимствования из печатных и электронных источников, а также из защищенных ранее выпускных квалификационных работ, кандидатских и докторских диссертаций имеют соответствующие ссылки.

Я ознакомлен с действующим Стандартом университета «Выпускная квалификационная работа обучающихся по образовательным программам высшего образования - программам бакалавриата, программам специалитета и программам магистратуры», согласно которому обнаружение плагиата является основанием для недопуска ВКР к защите и отчисления из университета.


Подпись студента

ВКР представлена на проверку «04» 06 2025 г.

Руководитель ВКР  Игошина С.Е.

Протокол проверки ВКР на оригинальность

Протокол

проверки на оригинальность в системе «Антиплагиат.ВУЗ» выпускной бакалаврской работы на тему «Анализ моделей примесных центров в полупроводниковых структурах для элементов квантовой электроники» студента 4 курса Веденяпина Даниила Романовича направления подготовки 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника», профиль «Микроэлектроника и твердотельная электроника»
Руководитель ВКР Игошина С.Е.



СПРАВКА

о результатах проверки текстового документа
на наличие заимствований

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Пензенский государственный
университет»

ПРОВЕРКА ВЫПОЛНЕНА В СИСТЕМЕ АНТИПЛАГИАТ.ВУЗ

Автор работы: Веденяпин Даниил Романович
Самоцитирование
рассчитано для: Веденяпин Даниил Романович
Название работы: Анализ моделей примесных центров в полупроводниковых структурах для элементов квантовой электроники
Тип работы: Выпускная квалификационная работа
Подразделение: Кафедра «Нано- и микроэлектроника»

РЕЗУЛЬТАТЫ

■ ОТЧЕТ О ПРОВЕРКЕ КОРРЕКТИРОВАЛСЯ: НИЖЕ ПРЕДСТАВЛЕНЫ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕРКИ ДО КОРРЕКТИРОВКИ

СОВПАДЕНИЯ	21.27%	СОВПАДЕНИЯ	21.27%
ОРИГИНАЛЬНОСТЬ	78.73%	ОРИГИНАЛЬНОСТЬ	78.73%
ЦИТИРОВАНИЯ	0%	ЦИТИРОВАНИЯ	0%
САМОЦИТИРОВАНИЯ	0%	САМОЦИТИРОВАНИЯ	0%

ДАТА ПОСЛЕДНЕЙ ПРОВЕРКИ: 04.06.2025

ДАТА И ВРЕМЯ КОРРЕКТИРОВКИ: 04.06.2025 13:57

Структура документа: Проверенные разделы: основная часть с.13-49, введение с.1-13, выводы с.50
Модули поиска: Переводные заимствования; Диссертации НББ; Шаблоны фразы; Коллекция НБУ; Медицина; ИПС Адилет; Цитирование; СПС ГАРАНТ: нормативно-правовая документация, СПС ГАРАНТ: аналитика; СМИ России и СНГ; Патенты СССР, РФ, СНГ; Публикации eLIBRARY, IEEE; Кольцо вузов; Сводная коллекция ЭБС; Публикации РГБ (переводы и перефразирования); Переводные заимствования IEEE; Перефразирования по коллекции IEEE; Публикации eLIBRARY (переводы и перефразирования); Публикации РГБ; Переводные заимствования по коллекции Гарант; аналитика; Перефразированные заимствования по коллекции Интернет в английском сегменте; Кольцо вузов (переводы и перефразирования); Перефразирования по СПС ГАРАНТ; аналитика; Переводные заимствования по коллекции Интернет в русском сегменте; Перефразирова...

Работу проверил: Головацкий Алексей Николаевич

ФИО проверяющего

Дата подписи: 04.06.2025

Подпись проверяющего



Чтобы убедиться
в подлинности справки, используйте QR-код,
который содержит ссылку на отчет.

Ответ на вопрос, является ли обнаруженное заимствование
корректным, система оставляет на усмотрение проверяющего.
Предоставленная информация не подлежит использованию
в коммерческих целях.

«04» 06 2025 год

подпись

Игошина С.Е.
фамилия, инициалы

СПРАВКА

о результатах проверки текстового документа
на наличие заимствований

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования "Пензенский государственный
университет"

ПРОВЕРКА ВЫПОЛНЕНА В СИСТЕМЕ АНТИПЛАГИАТ.VUZ

Автор работы: Веденяпин Даниил Романович
Самоцитирование
рассчитано для: Веденяпин Даниил Романович
Название работы: Анализ моделей примесных центров в полупроводниковых структурах для элементов квантовой электроники
Тип работы: Выпускная квалификационная работа
Подразделение: Кафедра "Нано- и микроэлектроника"

РЕЗУЛЬТАТЫ

■ ОТЧЕТ О ПРОВЕРКЕ КОРРЕКТИРОВАЛСЯ: НИЖЕ ПРЕДСТАВЛЕНЫ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕРКИ ДО КОРРЕКТИРОВКИ

СОВПАДЕНИЯ	21.27%	СОВПАДЕНИЯ	21.27%
ОРИГИНАЛЬНОСТЬ	78.73%	ОРИГИНАЛЬНОСТЬ	78.73%
ЦИТИРОВАНИЯ	0%	ЦИТИРОВАНИЯ	0%
САМОЦИТИРОВАНИЯ	0%	САМОЦИТИРОВАНИЯ	0%

ДАТА ПОСЛЕДНЕЙ ПРОВЕРКИ: 04.06.2025

ДАТА И ВРЕМЯ КОРРЕКТИРОВКИ: 04.06.2025 13:57

Структура документа: Проверенные разделы: основная часть с.13-49, введение с.1-13, выводы с.50
Модули поиска: Переводные заимствования; Диссертации НББ; Шаблонные фразы; Коллекция НБУ; Медицина; ИПС Адилет; Цитирование; СПС ГАРАНТ: нормативно-правовая документация; СПС ГАРАНТ: аналитика; СМИ России и СНГ; Патенты СССР, РФ, СНГ; Публикации eLIBRARY; IEEE; Кольцо вузов; Сводная коллекция ЭБС; Публикации РГБ (переводы и перефразирования); Переводные заимствования IEEE; Перефразирования по коллекции IEEE; Публикации eLIBRARY (переводы и перефразирования); Публикации РГБ; Переводные заимствования по коллекции Гарант; аналитика; Перефразированные заимствования по коллекции Интернет в английском сегменте; Кольцо вузов (переводы и перефразирования); Перефразирования по СПС ГАРАНТ: аналитика; Переводные заимствования по коллекции Интернет в русском сегменте, Перефразирова...

Работу проверил: Головяшкин Алексей Николаевич
ФИО проверяющего

Дата подписи: 04.06.25



Подпись проверяющего



Чтобы убедиться
в подлинности справки, используйте QR код,
который содержит ссылку на отчет

Ответ на вопрос, является ли обнаруженное заимствование
корректным, система оставляет на усмотрение проверяющего
Предоставленная информация не подлежит использованию
в коммерческих целях.

ПРИЛОЖЕНИЕ В
(обязательное)
Презентация ВКР

					ПГУ 2. 11.03.04. 004 ПЗ	Лист
						67
Изм.	Лист	№докум	Подп.	Дата		



ФГБОУ ВО «Пензенский
государственный университет»
Кафедра «Нано- и микроэлектроника»

Анализ моделей примесных центров
в полупроводниковых структурах
для элементов квантовой
электроники

Докладчик: студент гр. 21ПД1

Веденяпин Д.Р.

Руководитель: к.ф.-м.н., доцент

Игошина С.Е.

Пенза, 2025 год

Актуальность:

- Обусловлена стремительным развитием квантовых технологий, которые обещают революционизировать вычислительную технику, криптографию, медицину и материаловедение.
- Центральное место в этих технологиях занимают квантовые структуры и управление квантовыми состояниями на уровне отдельных частиц.
- Примесные центры в полупроводниках являются ключевыми элементами для создания кубитов — базовых единиц квантовой информации — благодаря длительному времени когерентности спиновых состояний.

Проблема:

- Практическая реализация квантовых устройств сталкивается с рядом проблем: необходимостью точного контроля над положением примесей, борьбой с декогеренцией и масштабированием систем;
- Понимание и предсказание поведения примесных центров в различных полупроводниковых структурах является фундаментальной задачей для преодоления этих препятствий.

Цель работы:

•Анализ и теоретическое исследование моделей примесных центров в полупроводниковых структурах, а также их потенциального применения в элементах квантовой электроники.

Задачи исследования:

1.На основе анализа литературных источников изучить общие принципы физической реализации кубитов на основе примесных центров;

2.Анализ поведения примесных центров в низкоразмерных полупроводниковых структурах, в частности в оксиде цинка (ZnO), общие принципы кубитов на основе примесных центров;

3.Провести теоретическое исследование и сравнительный анализ зависимости энергии связи примеси под воздействием электрического поля в низкоразмерных структурах, важных для создания элементов квантовой электроники.

Объект исследования:

- Модели примесных центров в полупроводниковых структурах на примере полупроводниковых структур оксида цинка (ZnO);
- Модели примесных центров в низкоразмерных структурах на примере сферической квантовой точки (КТ) типа "ядро/оболочка" (на основе AlAs/GaAs)

Методы теоретического исследования

- **Приближение эффективной массы (ЕМА):** Широко используемый подход для описания мелких примесей. Электрон рассматривается как квазичастица с эффективной массой, движущаяся в потенциале примесного центра и квантовой структуры.

- Уравнение Шредингера для примеси в КТ:

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2m^*} \nabla^2 + V_{QD}(r) + V_{imp}(r) \right] \Psi(r) = E \Psi(r)$$

- **Вариационный метод:** Используется для численного решения уравнения Шредингера при отсутствии аналитического решения. Основан на выборе пробной волновой функции с вариационными параметрами для минимизации энергии.

- **Методы моделирования:**

- **Методы сильной связи (*Tight-Binding*):** Учитывают атомную природу решетки, применяются для глубоких примесей.

- ***Ab initio* расчеты (из первых принципов):** Высокоточные расчеты электронной структуры без эмпирических параметров, ресурсоемки.

Методы экспериментального исследования

Для подтверждения теоретических моделей и изучения реальных свойств примесных центров применяются следующие экспериментальные методы:

- Фотолюминесценция (PL):** Основной метод для изучения энергетических уровней и оптических переходов, связанных с примесями.

- Магнито-фотолюминесценция:** Применение магнитного поля позволяет исследовать эффект Зеемана, что дает информацию о g-факторах и спиновых взаимодействиях.

- Сканирующая конфокальная микроскопия:** Позволяет получать оптические изображения с высоким пространственным разрешением для изоляции и изучения одиночных излучателей.

- Фрезеровка сфокусированным ионным пучком (FIB):** Используется для изготовления наноструктур (ламелей) для оптической изоляции одиночных дефектов в материале.

Анализ результатов литературных источников

Передача квантовой информации

- **Фотон как "летающий кубит":** Фотоны являются идеальными носителями для передачи квантовой информации на большие расстояния благодаря высокой скорости и слабому взаимодействию со средой.
- **Квантовая телепортация:** Продemonстрирована передача квантовых состояний на расстояния свыше 100 км в свободном пространстве и 143 км с активной обратной связью.
- **Распределение запутанности:** Спутник "Micius" успешно распределил запутанные фотоны на расстояние более 1200 км, открывая путь к глобальным квантовым сетям.
- **Квантовая криптография (QKD):** Протоколы, такие как BB84, используют фотоны для создания абсолютно защищенных ключей шифрования. Недавние эксперименты показали возможность QKD по стандартному оптоволокну на расстояние более 400 км.
- **Основные проблемы:** Потери в канале, декогеренция и эффективность источников/детекторов остаются ключевыми проблемами.

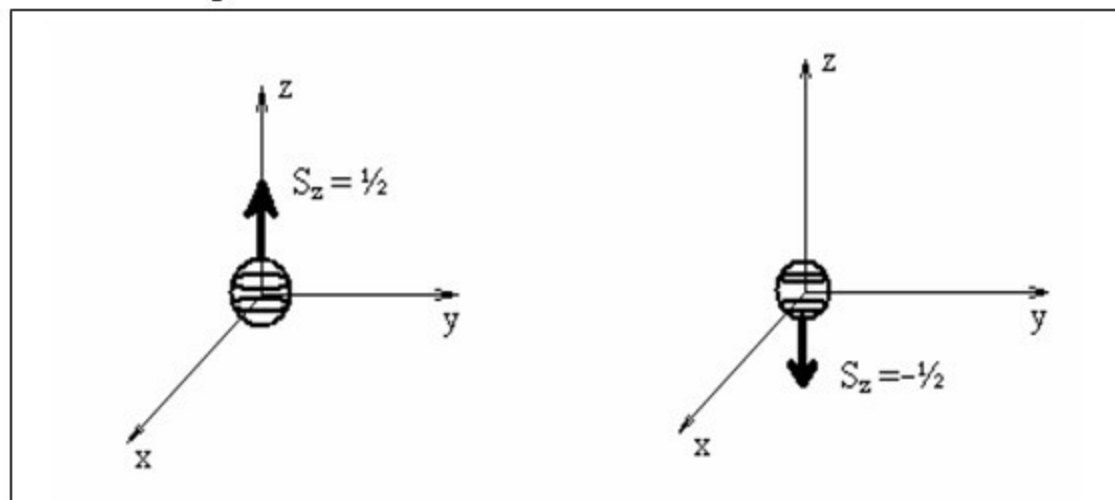


Рисунок 1 – Спин электрона

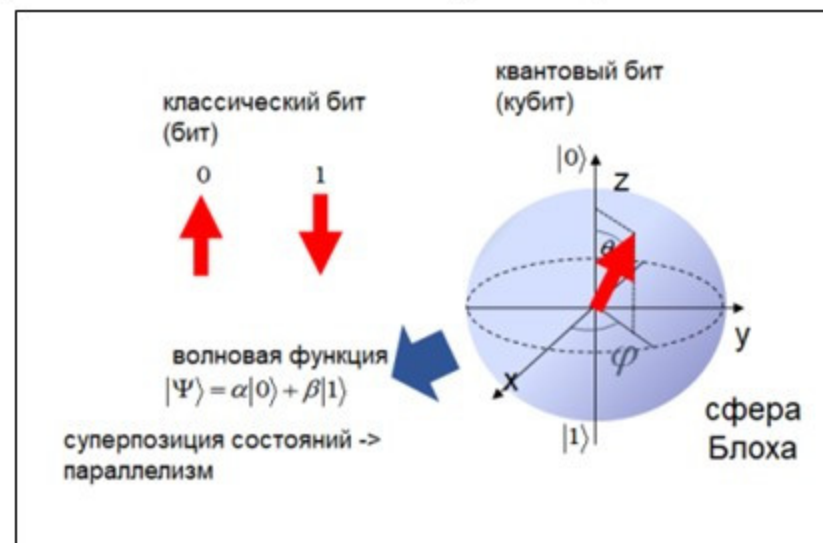


Рисунок 2 - Кубит

Анализ результатов исследования: Хранение информации

- **Квантовая память:** Устройства для когерентного сохранения и извлечения квантовых состояний, критически важные для квантовых повторителей и компьютеров.
- **Атомные ансамбли:** Являются одной из ведущих платформ. С помощью метода электромагнитно-индуцированной прозрачности (EIT) достигнуто время хранения более 6 мес.
- **Твердотельные системы:**
 - **Кристаллы, легированные редкоземельными ионами (например, $^{151}\text{Eu}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$):** Используют протокол атомного частотного гребня (AFC) для хранения фотонов.
 - **NV-центры в алмазе:** Обладают длительным временем когерентности спина при комнатной температуре.
- **Захваченные ионы:** Одна из ведущих платформ для квантовых вычислений, где ионы служат стационарными кубитами памяти. Продемонстрировано время хранения более 10 секунд.
- **Основные проблемы:** Декогеренция, эффективность, масштабируемость и необходимость криогенных температур.

Анализ результатов исследования: Математическая модель примеси в КТ "ядро/оболочка"

Задача: Исследование зависимости энергии связи водородоподобной примеси в сферической квантовой точке (КТ) типа "ядро/оболочка" (на основе AlAs/GaAs) под влиянием внешнего электрического поля.

• **Действие ограничивающего потенциала :**
$$V_w(r) = \begin{cases} 0, & a < r < b, \\ \infty, & 0 \leq r \leq a \text{ и } r \geq b. \end{cases}$$

• **Полный Гамильтониан:**
$$H = -\Delta - \frac{2}{r_{ed}} + V_w(r) + fr \cos(\theta)$$

$f = (e a_D^* / R_D^*) F$ (безразмерный параметр поля)

• **Уравнение Шредингера:** $H\Psi = E\Psi$

Результат: определение энергии основного состояния и волновой функции основного состояния для донора

При отсутствии аналитического решения, используется вариационный метод, основанный на выборе пробной волновой функции:

$$\Psi(r) = \Psi_0(r) + \beta fr \cos \theta \Psi_0(r)$$

Модель рассматриваемой квантовой точки представлена на рисунке 3.

Здесь r_{ed} - расстояние между электроном и примесным центром; θ - угол между вектором положения примеси d и вектором положения электрона r , a и b - радиусы ядра и оболочки соответственно: $\vec{F}$ - вектор направления действия внешнего электрического поля (вдоль оси z)

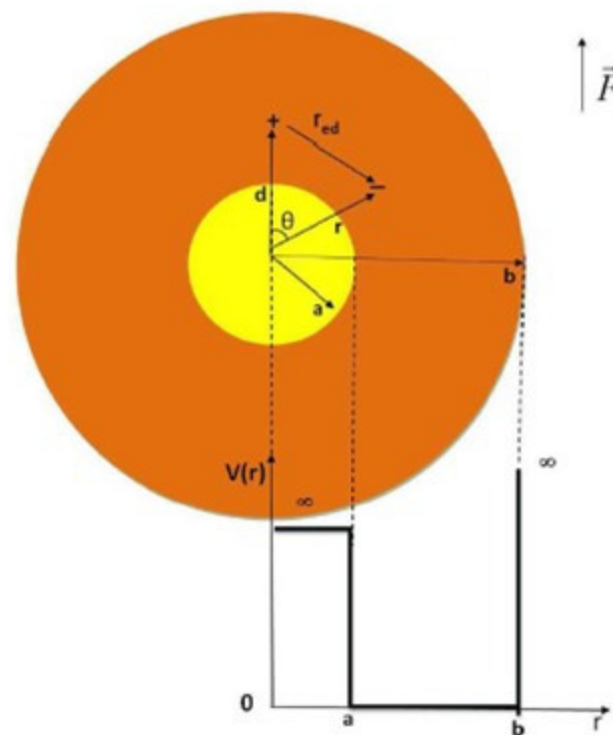


Рисунок 3 – модель квантовой точки «ядро/оболочка» с донорным центром

На рисунке 4 энергия связи представлена как функция отношения a/b для $b=3a * D$ и в то же время как функция значения электрического поля, которое принимает следующие значения: $f=0; 0,4; 0,8$ и 1 . Положение донора принимается равным $d=(a+b)/2$. На графике синяя кривая соответствует значениям – $b=3aD *$, $f=0$, черная кривая – $b=3aD *$, $f=0.4$, оранжевая кривая – $b=3aD *$, $f=0.8$, зеленая кривая – $b=3 aD *$, $f=1$.

На графиках изображенных на рисунке 4 наглядно показано, что энергия связи сильно зависит от отношения a/b по мере его увеличения от 0 до 1. Из поведения кривых видно, что энергия связи уменьшается по мере увеличения электрического поля, следовательно, влияние электрического поля становится более выраженным, когда соотношение $a/b \rightarrow 0$.

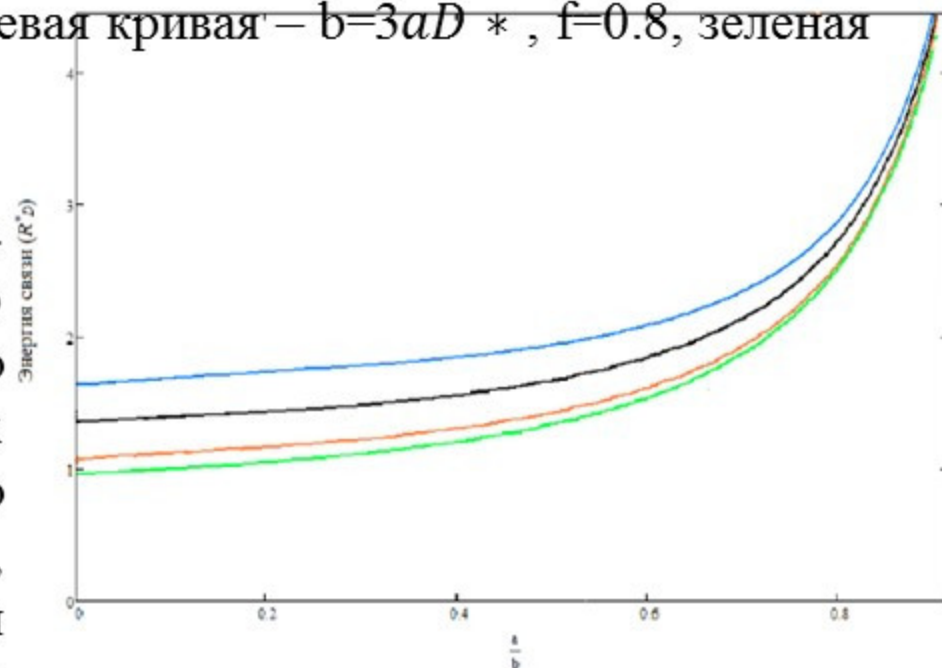


Рисунок 4 – зависимость величины энергии связи от отношения a/b при различных параметрах

Результаты теоретического моделирования

Зависимость энергии связи от геометрии и поля:

- Энергия связи примеси уменьшается с ростом электрического поля из-за эффекта Штарка.
- При увеличении отношения a/b от 0 до 1 (переход от объемной КТ к 2D-слою), энергия связи возрастает.
- В пределе $a/b \rightarrow 0$, система стремится к гомогенной КТ, и энергия связи стремится к объемному значению $1R \cdot D$.
- В пределе $a/b \rightarrow 1$, энергия связи стремится к $4R \cdot D$, что соответствует 2D-пределу.
- Показано, что энергия связи достигает своего максимального значения, когда примесный центр локализован в центре области оболочки квантовой точки ($d=(a+b)/2$). Минимум энергии связи соответствует граничному положению примеси в оболочке, что позволит рассматривать поведение примесного центра под влиянием внешнего электрического поля в качестве кубита.

Анализ эксперимента: изучение возможности изоляции одиночных доноров в ZnO

Цель эксперимента: изоляция и характеристика одиночных доноров индия (In) в оксиде цинка (ZnO) для использования в качестве кубитов.

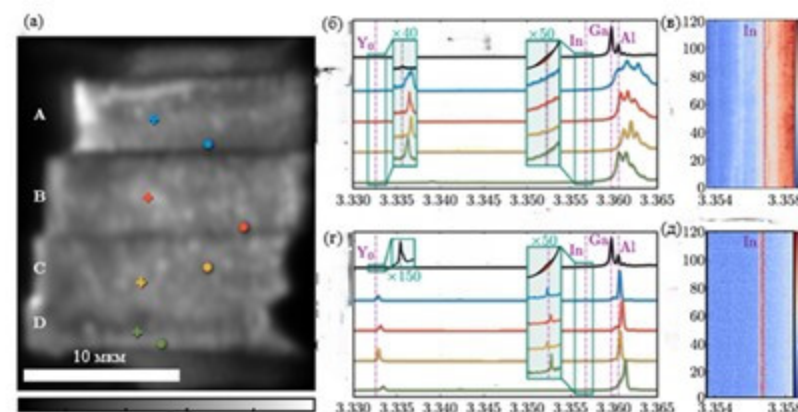
Методика:

1. Из коммерческой подложки ZnO с помощью плазменного сфокусированного ионного пучка (PFIB) вырезается тонкая ламель.
2. Для удаления дефектов, внесенных при фрезеровке ионным пучком, проводится отжиг образца в кислороде.
3. Одиночные доноры In идентифицируются и изучаются с помощью конфокальной фотолюминесценции (PL) при криогенных температурах.

Результаты до и после отжига:

• **До отжига:** Спектры PLE показывают уширенные линии и наличие дефектов (линия Y_0), вызванных фрезеровкой. Наблюдаются нестабильные сигналы от одиночных излучателей (рисунк 3в).

• **После отжига:** Линии PL становятся узкими и стабильными, что указывает на восстановление кристаллической структуры. Интенсивность излучения от доноров In возрастает (рисунк 3д).



а) Конфокальное PL-изображение ламели после отжига; б) спектр PL ламели до отжига; в) кинетическая серия PL из области C ламели до отжига; г) спектр PL ламели после отжига; д) кинетическая серия PL из области C ламели после отжига.

Рисунок 5 - Возбуждение непрерывной волной при 3,44 эВ, $T=5,2\text{K}$

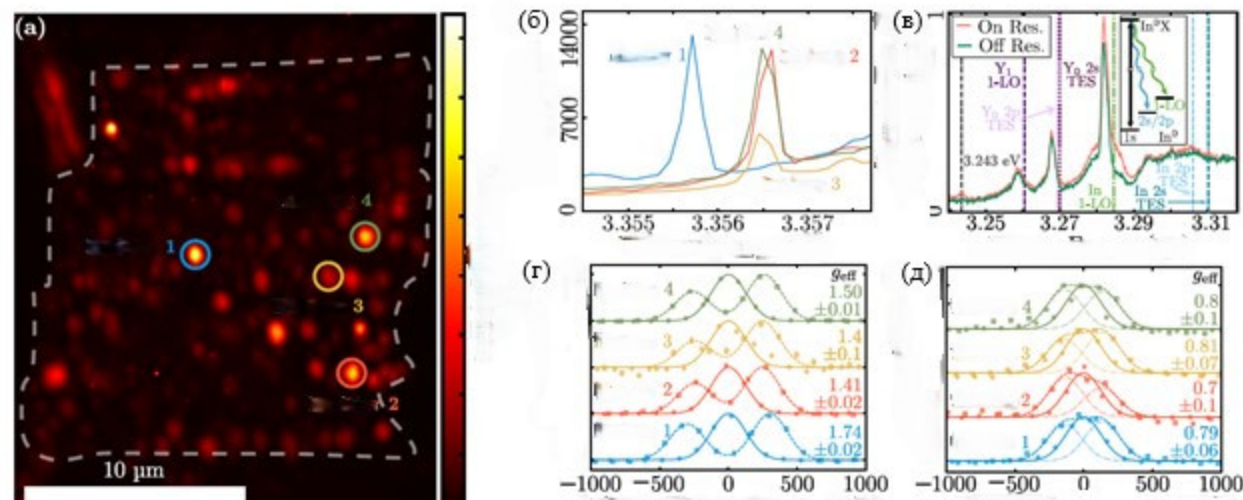
Анализ экспериментальных зависимостей: Характеристика доноров In

Идентификация доноров In:

- **Пространственное разрешение:** Конфокальное сканирование со спектральной фильтрацией позволяет локализовать отдельные излучатели, предположительно являющиеся донорами In.
- **Резонансное возбуждение:** При резонансном возбуждении наблюдается усиление PL на переходах, характерных для доноров In (двухэлектронные сателлитные переходы, TES), что подтверждает их природу.
- **Магнито-фотолюминесценция:**
 - Приложенное магнитного поля приводит к расщеплению линий PL (эффект Зеемана).
 - Линейная зависимость расщепления от величины поля подтверждает, что излучение исходит от нейтральных доноров.

Вывод:

• Эксперимент демонстрирует успешную изоляцию и идентификацию одиночных оптически стабильных доноров In в ZnO, что является важным шагом к созданию масштабируемых квантовых технологий на их основе.



а) Конфокальное PL изображение в области энергий 3,354-3,357 эВ при T=5,2K; б) спектры PL четырех излучателей при 5,2K; в) боковая полоса PL излучателя 2 при резонансном возбуждении 3,355948 эВ, T=5.2K, нормированная на пик спектра при резонансе; г) и д) спектры PL $B \perp \hat{c}$ (T=8,2K) и $B \parallel \hat{c}$ (T=6,6K) соответственно

Выводы

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Проведен анализ существующих моделей и исследований, который показал, что примесные центры в полупроводниковых наноструктурах являются одной из наиболее перспективных платформ для реализации кубитов и других элементов квантовой электроники.
2. Рассмотрены модели кубитов на основе примесных центров в полупроводниковых оксидах, в частности, исследовано поведение примесных центров в полупроводниковых структурах оксида цинка (ZnO).
3. Теоретически исследована зависимость энергии связи примеси в квантовой точке типа "ядро/оболочка" от внешнего электрического поля и геометрии структуры. Установлено, что эффективное управление этим параметром может иметь важное значение для разработки квантовых устройств.
4. Проанализированы экспериментальные данные по изоляции и идентификации одиночных доноров индия в ZnO. Результаты подтверждают возможность создания оптически стабильных одиночных донорных центров, что открывает перспективы для их использования в качестве кубитов с доступом к оптическому управлению.