

На правах рукописи

Рахлин

РАХЛИН МАКСИМ ВЛАДИМИРОВИЧ

**ИСТОЧНИКИ ОДИНОЧНЫХ ФОТОНОВ ВИДИМОГО
СПЕКТРАЛЬНОГО ДИАПАЗОНА НА ОСНОВЕ
ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК InAs/AlGaAs
И CdSe/ZnSe**

Специальность 01.04.10 – физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург
2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

Научный руководитель:

Торопов Алексей Акимович, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук, главный научный сотрудник лаборатории квантоворазмерных гетероструктур

Официальные оппоненты:

Сапега Виктор Федорович, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, ведущий научный сотрудник лаборатории оптики полупроводников

Вербин Сергей Юрьевич, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский государственный университет", профессор кафедры физики твердого тела

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова"

Защита состоится «26» декабря 2019 г. в 10 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 34.01.02 при ФТИ им. А.Ф. Иоффе по адресу: 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФТИ им. А.Ф. Иоффе и на сайте www.ioffe.ru.

Отзывы об автореферате в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба высылать по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан «числа» месяца 2019 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физико-математических наук


Сорокин Л. М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Квантовая криптография и линейные оптические квантовые вычисления основаны на использовании неклассического источника света [1], способного излучать "по требованию" либо один фотон, либо пару запутанных одиночных фотонов с высокой внешней квантовой эффективностью на определенной частоте [2]. В настоящее время прогресс в области разработки неклассических источников света отстает от развития алгоритмов и схем квантовой обработки информации, что связано с рядом технологических трудностей.

Самоорганизующиеся одиночные квантовые точки (КТ), выращенные с помощью эпитаксиальных методов, являются перспективными кандидатами для создания однофотонных источников благодаря малой ширине линии излучения, большой скорости излучательной рекомбинации, высокой и стабильной квантовой эффективности, а также возможности интеграции с приборами полупроводниковой электроники [3]. Многообразие технологически доступных систем КТ позволяет изготавливать однофотонные излучатели в широком спектральном диапазоне от среднего ультрафиолетового до оптического телекоммуникационного С-диапазона (1.55 мкм) [4, 5, 6]. Вскоре после демонстрации получения однофотонного излучения с помощью электрической и оптической накачки экситонного излучения одиночных полупроводниковых КТ [7] и генерации запутанных фотонных пар при рекомбинации биэкситонного каскада в одиночной КТ [8, 9], стало ясно, что большинство новых квантовых технологий требуют разработки неклассических источников света с улучшенными свойствами, такими как высокая скорость генерации однофотонного излучения (яркость), отсутствие мультифотонного излучения (чистота), идентичность фотонных волновых пакетов (неразличимость фотонов).

Особый интерес представляет практически важный зелено-красный диапазон длин волн (500-780 нм), который соответствует области наибольшей чувствительности современных однофотонных лавинных фотодиодов, а также подходит для разработки защищенных атмосферных и спутниковых оптических линий связи [1]. Уже были продемонстри-

рованы источники одиночных фотонов на основе КТ, работающих при комнатных или близким к ним температурах при оптической и электрической накачке [10, 11, 12], тем не менее, решение, одновременно удовлетворяющее всем необходимым параметрам (чистота и яркость однофотонного излучения) в заданном спектральном диапазоне пока не получено. Альтернативными методами получения однофотонного излучения при повышенных температурах являются одиночные молекулы [13], центры окраски в алмазе [14] и коллоидные КТ [15]. Однако коллоидные КТ подвержены мерцанию, а в оставшихся системах существуют большие трудности с изготовлением электрически управляемых устройств. Кроме того, во всех трех системах радиационное время жизни составляет несколько наносекунд и более, что препятствует достижению высокой скорости генерации однофотонного излучения [16].

Для систем защищенных линий связи особый интерес представляют источники одиночных фотонов с заданной длиной волны, а именно, излучающие в спектральной области максимальной прозрачности атмосферы (380-780 нм) [1]. Основные трудности связаны с получением КТ определенной формы, размера и состава, поскольку именно эти параметры определяют длину волны излучения. Незначительное изменение этих параметров (отклонение 10-20%) может вызвать сдвиг полосы излучения в сотни мэВ. Ключевой проблемой также является получение разреженных массивов КТ для обеспечения их латерального выделения и обеспечение высокой интенсивности однофотонного излучения.

Цель настоящего исследования заключается в определении физических основ функционирования и методов реализации активных областей однофотонных источников в видимом спектральном диапазоне (500-780 нм) на основе КТ CdSe/ZnSe и InAs/AlGaAs.

Научная новизна работы состоит в решении конкретных задач:

1. Выявление оптимального режима роста, позволяющего получить минимальную плотность КТ в результате проведения сравнительной характеристики излучательных свойств КТ CdSe/ZnSe, выращенных методом молекулярно-пучковой эпитаксии с использованием различных технологических приемов.

2. Достижение высокого внутреннего квантового выхода при повышенных температурах в КТ CdSe за счет снижения вероятности термической активации носителей из КТ в окружающие барьеры ZnSe/ZnSSe/ZnMgSSe.
3. Определение влияния подслоя GaAs, вставленного между нижним барьером и слоем КТ, на величину анизотропного обменного расщепления в тонкой структуре экситонных линий в КТ InAs/AlGaAs.
4. Разработка источника одиночных фотонов для красной области спектра на основе КТ InAs/AlGaAs со скоростью генерации, превышающей 5 МГц.
5. Достижение однофотонного излучения со скоростью генерации более 1 МГц при температуре 77 К в КТ CdSe в диапазоне длин волн 450-600 нм.

Практическая значимость работы заключается в разработке оптимальной конструкции структур на основе КТ CdSe/ZnSe и InAs/AlGaAs, предназначенных для получения однофотонного излучения в видимом спектральном диапазоне. Данные источники однофотонного излучения видимого диапазона на основе эпитаксиальных КТ перспективны для использования в системах квантовой криптографии, предназначенных для безопасной передачи информации в атмосферных оптических линиях связи.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Однофотонное излучение из одиночных квантовых точек CdSe/ZnSe, выращенных с поверхностной плотностью менее 10^{10} см⁻² методом молекулярно-пучковой эпитаксии в режиме термической активации, достижимо при условии их пространственного ограничения путем формирования цилиндрических меза-структур.
2. Спектральный диапазон излучения квантовых точек InAs/Al_xGa_{1-x}As ($x \sim 0.4$) зависит от наличия тонкой прослойки GaAs между ними и нижним барьерным слоем, влияющей на размер точек и, как следствие, на длину волны излучения,

регистрируемой в красной области спектра 630-730 нм без прослойки и в диапазоне 700-1000 нм при ее наличии.

3. Величина расщепления основного состояния экситона, определяемого анизотропной частью обменного взаимодействия, не превышает 20 мкэВ в высокоэнергетической части спектра излучения ансамбля квантовых точек $\text{InAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x \sim 0.4$), формируемых с прослойкой GaAs.
4. Волноводные оптические нанополоски с градиентным сечением позволяют реализовать излучение одиночных фотонов с интенсивностью 5 МГц при 8 К для квантовых точек $\text{InAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x \sim 0.3$) и с интенсивностью 1 МГц при 80 К для квантовых точек CdSe/ZnSe .

Апробация работы. Результаты, вошедшие в данную работу, докладывались на следующих российских и международных конференциях: «44th International school and conference of the physics of semiconductors» (Jaszowiec, Poland, 2015), «17th International conference of II-VI compounds and related materials» (Paris, France, 2015), «Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике» (Санкт-Петербург, 2016, 2017), «4th International school and conference “Saint-Petersburg Open 2017”» (Saint-Petersburg, 2017), «25th International symposium Nanostructures: physics and technology» (Saint-Petersburg, 2017), «Экситоны в полупроводниках и полупроводниковых структурах, к 120-й годовщине со дня рождения Е.Ф. Гросса» (Санкт-Петербург, 2017), «International conference on optics of excitons in confined systems» (Bath, Great Britain, 2017), «34th International conference on the physics of semiconductors» (Montpellier, France, 2018).

Личный вклад. Автор проводил эксперименты по исследованию микро-фотолюминесценции с микронным пространственным разрешением, разрабатывал конструкцию и уточнял параметры исследуемых гетероструктур. Автор создавал установку для измерения корреляционной функции второго порядка в одиночных квантовых точках при пониженных температурах, проводил эксперименты на этой установке, анализировал полученные результаты и выполнял их подготовку к

публикации.

Публикации. По результатам исследований, представленных в диссертации, опубликовано 10 работ в реферируемых журналах включенных в перечень ВАК. Список работ приведен в Заключении.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из Введения, пяти глав, Заключения и списка литературы. Она содержит 84 страницы текста, включая 30 рисунков. Список цитируемой литературы содержит 87 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность проведенных исследований, сформулированы цель и научная новизна работы, перечислены основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** диссертации рассматриваются экспериментальные методики, с помощью которых исследовались изучаемые гетероструктуры. Описаны две использованные экспериментальные установки, их характеристики и принципы работы. Установка микрофотолюминесценции (μ -ФЛ) позволяет получить спектры фотолюминесценции (ФЛ), определенные в заданной пространственной области образца при задании следующих параметров: температура измерения, спектральный диапазон, длина волны и плотность мощности возбуждающего излучения. В другой установке определяется степень однофотонности излучения с помощью измерения корреляционной функции второго порядка в схеме мощностного интерферометра типа Хэнбери Брауна-Твисса.

Вторая глава диссертации посвящена исследованию излучательных свойств КТ CdSe/ZnSe, выращенных различными способами, с целью нахождения оптимального подхода для создания однофотонного источника, работающего при повышенных температурах.

В разделе §2.1 описываются преимущества полупроводниковых самоорганизующихся КТ CdSe, выращенных эпитаксиальными методами, по сравнению с коллоидными КТ, с целью создания однофотонных источников видимого света. Излагается проблема, связанная с реализаци-

ей структуры с КТ, обладающей высокой эффективностью излучения, а также возможные способы ее решения.

В разделе §2.2 с помощью спектроскопии μ -ФЛ исследуются оптические свойства гетероструктур с КТ CdSe, выращенных по трем различным технологиям с целью формирования массивов КТ с достаточно малой плотностью для пространственного выделения излучения одиночной КТ. Излучательные характеристики одиночных КТ изучаются в апертурах в непрозрачной золотой пленке 500-нм в диаметре.

Кроме стандартного способа роста КТ по методу Станского-Крастанова использовался режим эпитаксиального роста с термической активацией, при котором КТ формируются благодаря уменьшению поверхностной энергии двумерного слоя CdSe при покрытии его слоем аморфного Se с последующей быстрой десорбцией Se-покрытия [17].

Альтернативный метод подразумевает нанесение ультратонкого слоя CdTe (стрессора) до формирования слоя CdSe, что приводит к образованию изолированных КТ с близкими латеральными размерами [18].

Наиболее пригодным с точки зрения однофотонных применений оказался метод термической активации. Измерения μ -ФЛ с пространственным разрешением ~ 1 мкм в КТ CdSe/ZnSe, выращенных методом термической активации, показали наличие отдельных, узких пиков ФЛ с отсутствием фоновой люминесценции и шириной на полувысоте порядка 0.3-0.6 мэВ. Достаточно низкая плотность излучающих КТ ($1.8 \cdot 10^9$ см $^{-2}$) достигается за счет переиспарения части материала во время процесса термической активации, а также за счет безызлучательной рекомбинации носителей в большинстве КТ, в связи с появлением дефектов, которые в свою очередь вызваны релаксацией напряжений в крупных КТ.

В разделе §2.3 изучается возможность создания гетероструктуры на основе КТ CdSe с высоким внутренним квантовым выходом для изготовления источника однофотонного света. Для повышения внутреннего квантового выхода изготавливались структуры с КТ с увеличенными разрывами зон на интерфейсе [19]. Благодаря увеличению разрывов

зона происходит усиление ограничения носителей заряда в КТ и снижение вероятности термического выброса носителей из КТ в окружающие барьеры [20]; тем самым повышается квантовая эффективность излучения при повышенных температурах. Таким образом, исследовались КТ CdSe, выращенные методом термической активации и помещенные в широкозонные барьеры ZnMgSSe.

Для выделения небольшого числа КТ с помощью электронной литографии и ионно-плазменного травления был изготовлен регулярный массив цилиндрических меза-структур размером ~ 200 нм в диаметре.

Спектры μ -ФЛ, измеренные при 8 К, продемонстрировали набор узких одиночных линий. Количество линий в спектре μ -ФЛ в различных меза-структурах находится в диапазоне от 2 до 7, что соответствует плотности КТ менее чем 10^{10} см $^{-2}$. Полученная плотность КТ является пригодной для создания однофотонного источника на основе излучения одиночной КТ.

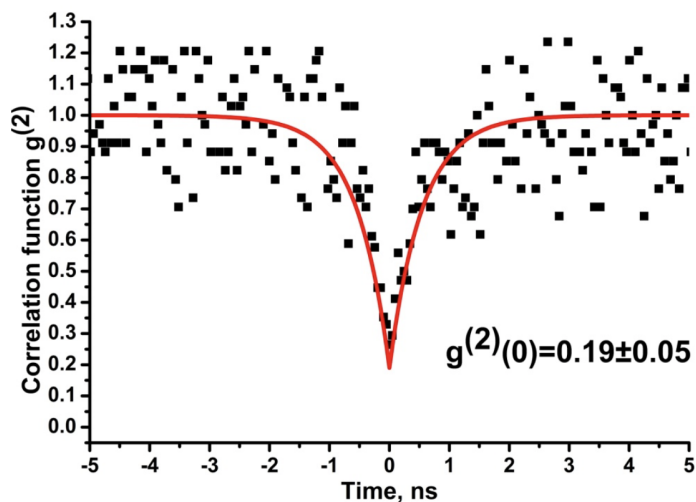


Рис. 1: Автокорреляционная функция однофотонного излучения одиночной КТ CdSe/ZnMgSSe при температуре 8 К, измеренная в мезе диаметром 200 нм.

Исследование спектрально интегрированной интенсивности ФЛ гетероструктуры в зависимости от температуры позволило определить,

что благодаря использованию широкозонных барьеров ZnMgSSe удалось реализовать внутренний квантовый выход излучения в КТ CdSe более 60 % при температуре порядка 200 К.

Корреляционная функция второго порядка, измеренная в одиночной КТ при температуре 8 К, подтвердила однофотонный характер излучения, рис. 1.

В третьей главе диссертации проводится сравнительный анализ оптических свойств КТ $\text{InAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x \sim 0.4$), выращенных МПЭ как с использованием, так и при отсутствии тонкого подслоя GaAs, вставленного между нижним барьером AlGaAs и слоем КТ InAs. Излучательные характеристики одиночных КТ исследуются с помощью спектроскопии μ -ФЛ.

В разделах §3.1 обосновывается выбор системы материалов (In,Ga,Al)As с целью достижения однофотонного излучения в практически важном диапазоне длин волн 630-750 нм, который соответствует области высокой чувствительности однофотонных лавинных фотодиодов и подходит для использования в атмосферных и спутниковых оптических линиях связи [1]. Делается обзор опубликованных данных о расщеплении экситонных состояний ΔE_{ex} в самоорганизующихся КТ InAs/AlGaAs.

В §3.2 исследуются оптические и структурные характеристики гетероструктур с КТ $\text{InAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x \sim 0.4$). Плотность КТ, оцененная с помощью просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ), в двух типах структур оказалась равной $\sim 10^{10} \text{ см}^{-2}$. Данная плотность КТ является пригодной для создания однофотонного источника света. Анализ спектров ФЛ показал, что использование двух подходов позволило получить КТ, излучение которых перекрывает диапазон длин волн от 630 до 1000 нм, рис. 2(а). Спектры μ -ФЛ, измеренные в цилиндрических меза-структурах размером 200-500 нм в диаметре, продемонстрировали набор относительно узких линий ($\sim 100 \text{ мкэВ}$), которые можно отнести к излучению экситонов (X) и электрон-дырочных комплексов: биекситонов (XX) и заряженных экситонов (отрицательных (X^-) и положительных (X^+) трионов) в одиночных КТ. Происхождение кон-

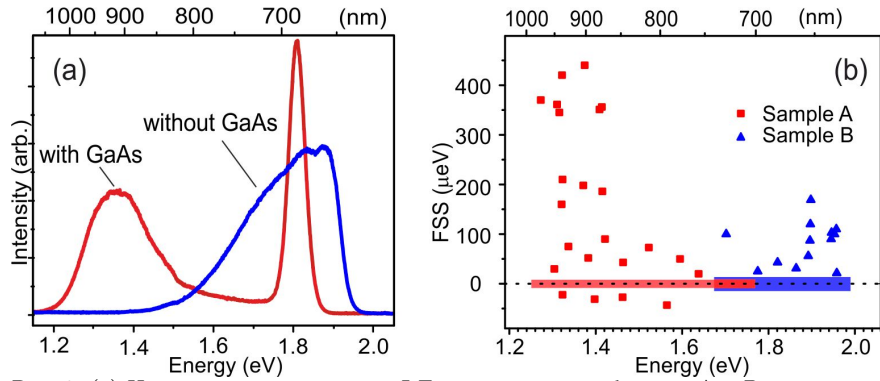


Рис. 2: (a) Нормированные спектры ФЛ, измеренные в образцах А и В при температуре 77 К. (b) Измеренные значения ΔE_{ex} , как функция энергии фотонов для образцов А и В. Красные и синие горизонтальные полосы соответствуют нерасщепленным линиям излучения с практически нулевым значением ΔE_{ex} , обнаруженным в образцах А и В, соответственно

кретных линий было определено с помощью мощностных и поляризационных измерений.

§3.2 посвящен изучению тонкой структуры спектра экситонных состояний. Было обнаружено, что в пределах точности измерений многие линии излучения ($\sim 80\%$) в обоих образцах не расщеплены и не поляризованы. Данные линии относятся либо к излучению экситонов с малой величиной ΔE_{ex} , либо к излучению трионов. Остальная часть КТ в образце А (с подслоем GaAs) демонстрирует различные значения ΔE_{ex} в диапазоне значений от нуля до чрезвычайно большого значения ΔE_{ex} порядка 450 мкэВ. Более того, некоторые линии обладают небольшой, но отчетливой отрицательной величиной ΔE_{ex} . Определенная линейная поляризация наблюдаемых сильно расщепленных линий, вероятно, связана со значительной асимметрией формы КТ и анизотропией деформации напряжений, обуславливающей замешивание состояний тяжелых и легких дырок [21, 22]. Однако в измеренных спектрах было найдено лишь сравнительно небольшое количество таких линий, в то время как большинство линий были слабо расщеплены, что является признаком достаточно симметричных КТ.

Для оценки статистического распределения ΔE_{ex} в зависимости от энергии излучения в образце А было учтено 118 случайно расположенных линий в диапазоне 1.25 - 1.8 эВ. Среди них – 95 линий со значениями ΔE_{ex} , меньшими, чем точность измерения (~ 20 мкэВ), которые рассматривались как нерасщепленные линии, и 23 линии с измеримыми значениями ΔE_{ex} , рис. 2(b). Последние линии можно достоверно отнести к излучению нейтральных экситонов. Величина ΔE_{ex} является большой и положительной при малых энергиях (ниже 1.4 эВ) и быстро уменьшается с увеличением энергии, так что выше ~ 1.5 эВ значения ΔE_{ex} флуктуируют вблизи нуля. Эта зависимость связана с быстрым сокращением величины ΔE_{ex} при уменьшении размера КТ. Симметричный разброс значений ΔE_{ex} вокруг нуля подразумевает, что, по крайней мере, часть ”нерасщепленных” линий являются экситонными состояниями с малой величиной ΔE_{ex} . Таким образом, КТ в образце А, обладающие наименьшим размером, пригодны для использования в системах защищенных атмосферных линий связи, поскольку они излучают свет около 750 нм, имеют небольшую поверхностную плотность, а также обладают пренебрежимо малой величиной ΔE_{ex} .

В образце В (без подслоя GaAs) статистическое распределение значений ΔE_{ex} существенно отличается от образца А, рис. 2(b). Среди 84 измеренных линий было обнаружено только 13 с измеримым значением ΔE_{ex} . Эти линии появляются между 1.7 и 1.97 эВ, при этом соответствующие средние значения ΔE_{ex} слабо зависят от энергии излучения фотона. Знак ΔE_{ex} всегда положителен, а его амплитуда колеблется в диапазоне 10-180 мкэВ. Отсутствие отрицательных значений ΔE_{ex} подразумевает, что большинство ”нерасщепленных” линий, наблюдаемых в этом образце, соответствуют излучению трионов. Следует отметить, что применение синглетных трионных состояний для сверхбыстрой генерации одиночных фотонов является предпочтительным по сравнению с нейтральными экситонами из-за отсутствия темного состояния [23].

Четвертая глава диссертации посвящена сравнительной характеристике оптических свойств КТ InAs в микрорезонаторах с полупроводниковыми и диэлектрическими брэгговскими зеркалами, а также в фо-

тонных наноантеннах, представляющих собой цилиндрический волновод с переменным поперечным сечением, сформированный в слое GaAs, с целью определения оптимального способа для создания источника одиночных фотонов для красной области спектра с высокой интенсивностью излучения.

Стандартная конструкция колончатых микрорезонаторов Фабри-Перо представляет собой резонатор толщиной кратной длине волны излучения, расположенный между нижним и верхним распределенными брэгговскими зеркалами. Данная конструкция способствует трехмерному ограничению света и обладает узкой диаграммой направленности. Микрорезонаторы позволяют с высокой эффективностью генерировать близкие к идеальным однофотонные состояния как при оптической, так и при электрической накачке.

Фотонные наноантенны представляют собой колончатые (цилиндроподобные) волноводы переменного сечения высотой несколько мкм и диаметром порядка длины волны света. Данный тип структур позволяет эффективно направлять излучение встроенного квантового излучателя в основную пространственную моду HE_{11} , распространяющуюся вдоль осевого направления волновода, и формировать узкую диаграмму направленности при ее адиабатическом изменении в плавно сужающейся верхней части. Этот подход отличается высокой эффективностью извлечения фотонов в широком спектральном диапазоне, составляющем несколько десятков нанометров.

Для всех трех типов структур продемонстрировано однофотонное излучение с корреляционной функцией второго порядка $g^{(2)}(0)$ меньше 0.2, что делает возможным их использование в различных системах квантовой фотоники. Показано, что применение полупроводниковых и диэлектрических брэгговских зеркал позволило достичь интенсивности излучения 640 и 1000 кГц, что увеличило поток излучаемых фотонов в красной области спектра более чем в 6-10 раз, по сравнению с обычной меза-структурой (~ 100 кГц). Наиболее эффективным однофотонным источником оказалась волноводная фотонная наноантенна, позволившая реализовать интенсивность излучения однофотонного источника

более чем 5 МГц.

В **пятой главе** диссертации представлено исследование излучательных характеристик источника квантового света на основе гетероструктуры с квантовыми точками CdSe/ZnSe и цилиндрического волновода с переменным поперечным сечением, сформированного в слое диэлектрика методом электронно-лучевой литографии.

КТ CdSe были помещены между широкозонными барьерами, состоящими из слоев ZnMgSSe толщиной 47 нм, ZnSSe толщиной 1.5 нм и ZnSe толщиной 0.5 нм с целью улучшения ограничения носителей заряда.

Для повышения эффективности вывода излучения из одиночной КТ применялся метод, в основе которого лежит изготовление гибридной фотонной наномантенны, состоящей из диэлектрика и полупроводника. Для реализации данной технологии поверх выращенной гетероструктуры наносился толстый слой (1.4 мкм) электронного фоторезиста SU-8 с показателем преломления $n=1.6$. Данный фоторезист оптически прозрачен в интересующем спектральном диапазоне. Результатом электронно-лучевой литографии и ионно-лучевого травления ионами Ag явились цилиндрические структуры с переменным поперечным сечением, высотой ~ 1 мкм и диаметром основания 180 нм. Анализ исследуемой структуры с помощью ПЭМ выявил наличие островков, которые можно характеризовать как КТ благодаря характерным латеральным размерам 5-9 нм. Измеренная плотность КТ, согласно данным на ПЭМ изображении, составила $\sim 5 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$.

Типичный спектр μ -ФЛ (измеренный с пространственным разрешением ~ 1 мкм) одиночной фотонной структуры включает узкие линии, относящиеся к излучению малого числа отдельных КТ, находящихся внутри структуры, рис. 3. Ширина запрещенной зоны КТ уменьшается по мере увеличения температуры, и как следствие, линия излучения смещается в сторону более длинных волн. При этом, полуширина линии излучения увеличивается от 0.4 мэВ при 8 К до 3.5 мэВ при 80 К. Благодаря системе широкозонных барьеров ZnSe/ZnSSe/ZnMgSSe обеспечивается отсутствие гашения интегральной интенсивности отдельных линий излучения в диапазоне температур от 8 до 80 К.

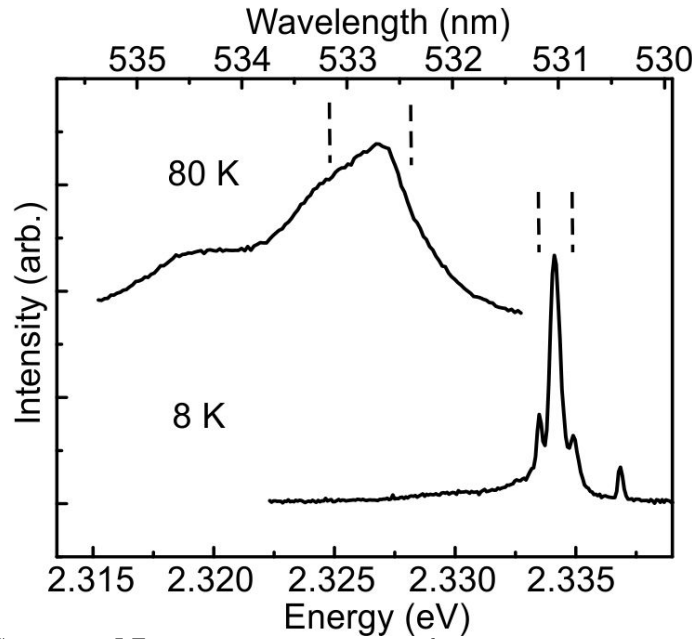


Рис. 3: Спектры μ -ФЛ, измеренные в одиночной фотонной структуре при температурах 8 и 80 К.

Измерения автокорреляционной функции были проведены в спектральных диапазонах, обозначенных пунктирными линиями. Интенсивность однофотонного излучения составила порядка 1 МГц на первой линзе как при 8, так и при 80 К. Похожие значения скоростей излучения, измеренные при различных температурах, указывают на небольшое количество дефектов, а также на хорошее структурное качество исследуемой структуры. Измеренное значение $g^{(2)}(0)$ оказалось меньше 0.2, что подтверждает однофотонную природу света.

В **Заключении** обобщены основные результаты работы:

- Выполнена сравнительная характеристика излучательных свойств КТ CdSe/ZnSe, выращенных в различных условиях. Наиболее пригодным с точки зрения однофотонных применений оказался метод термической активации. Измерения μ -ФЛ с пространственным разрешением ~ 1 мкм в КТ CdSe/ZnSe, выращенных методом терми-

ческой активации, показали наличие отдельных, узких пиков ФЛ с отсутствием фоновой люминесценции и шириной на полувысоте порядка 0.3-0.6 мэВ. Сравнительная характеристика плотности КТ, полученной из измерений μ -ФЛ и ПЭМ, свидетельствует о том, что в большинстве КТ носители рекомбинируют безызлучательно, вследствие появления дефектов, связанных с релаксацией напряжений в крупных КТ. Это наблюдение указывает на то, что изготовление КТ методом термической активации требует очень точного контроля над временем и температурой отжига для изготовления однофотонных излучателей с высокой квантовой эффективностью.

- Использование широкозонных барьеров ZnMgSSe позволило достичь внутреннего квантового выхода излучения в КТ CdSe более 60 % при температуре порядка 200 К, получаемой с помощью термоэлектрических холодильников. Корреляционная функция второго порядка, измеренная в одиночной КТ при температуре 8 К, подтвердила однофотонный характер излучения.
- Представлена сравнительная характеристика оптических свойств самоорганизующихся КТ InAs/Al_xGa_{1-x}As ($x \sim 0.4$), выращенных с подслоем GaAs и без него. Использование двух подходов позволило получить КТ, излучение которых перекрывает диапазон длин волн от 630 до 1000 нм.
- Определено влияние подслоя GaAs на вид экситонного спектра КТ InAs/AlGaAs. КТ, выращенные поверх подслоя GaAs, излучают свет в диапазоне длин волн от 700 до 1000 нм. Наиболее полезными для разработки красных однофотонных источников являются точки наименьших размеров, демонстрирующие малую спектральную плотность экситонных линий в спектральном диапазоне 700-780 нм. Также, данные КТ демонстрируют малую величину ΔE_{ex} экситона, что является предпосылкой для генерации запутанных фотонных пар. В свою очередь, КТ InAs/AlGaAs, выращенные без подслоя GaAs, подходят для однофотонной генерации на максимально коротких длинах волн, вплоть до 630 нм. Данные характеристики

отдельных КТ InAs/AlGaAs делают их перспективными для разработки микрорезонаторных или фотонных волноводных структур, предназначенных для генерации интенсивного и чистого квантового света в красном спектральном диапазоне.

- Исследованы оптические свойства эффективных источников одиночных фотонов для красной области спектра на основе КТ InAs/AlGaAs в микрорезонаторах с распределенными полупроводниковыми и диэлектрическими брэгговскими зеркалами, а также в фотонных наноантеннах. Для всех трех типов структур продемонстрировано однофотонное излучение, что делает возможным их использование в различных системах квантовой фотоники.
- Показано, что исследуемые способы достижения высокой интенсивности излучения, такие как брэгговские зеркала и фотонные наноантенны, позволили увеличить поток излучаемых фотонов в красной области спектра более чем в 10-50 раз, по сравнению с обычной меза-структурой. Наиболее эффективным однофотонным источником оказалась волноводная фотонная наноантенна, позволившая реализовать интенсивность излучения однофотонного источника более чем 5 МГц.
- Исследованы излучательные характеристики фотонных наноструктур с КТ CdSe. Продемонстрированы одиночные линии излучения отдельных КТ, расположенных в фотонной наноструктуре высотой 1 мкм и диаметром основания 180 нм.
- В фотонных наноструктурах с CdSe КТ продемонстрировано однофотонное излучение со средней частотой около 1 МГц при практически важной температуре жидкого азота. Измеренное значение $g^{(2)}(0)$ составило меньше 0.2, что позволяет применять данные гетероструктуры в системах квантовой криптографии, используемых в атмосферных линиях связи.

Основные результаты диссертационной работы изложены в публикациях:

- [A1] M.V. Rakhlin, S.V. Sorokin, I.V. Sedova, A.A. Usikova, S.V. Gronin, K.G. Belyaev, S.V. Ivanov, A.A. Toropov. Micro-photoluminescence studies of CdSe/ZnSe quantum dot structures grown under different conditions // *Acta Phys. Pol. A* **129**, 117-119 (2016).
- [A2] M.V. Rakhlin, I.V. Sedova, S.V. Sorokin, S.V. Gronin, A.A. Usikova, A.A. Sitnikova, P.N. Brunkov, S.V. Ivanov, A.A. Toropov. Comparative studies of CdSe/ZnSe quantum dot structures epitaxially grown either with or without a sub-monolayer CdTe stressor // *Phys. Stat. Sol. C* **13**, 7-9, 514-517 (2016).
- [A3] M.V. Rakhlin, K.G. Belyaev, S.V. Gronin, I.S. Mukhin, S.V. Ivanov, A.A. Toropov. Emission properties of individual InAs/Al_{0.44}Ga_{0.56}As quantum dots // *J. Phys.: Conf. Ser.* **917**, 062023 (2017).
- [A4] M.V. Rakhlin, K.G. Belyaev, S.V. Sorokin, I.S. Mukhin, S.V. Ivanov, A.A. Toropov. Optical properties of blue-green single-photon sources based on self-assembled CdSe quantum dots // *J. Phys.: Conf. Ser.* **993**, 012023 (2018).
- [A5] M.V. Rakhlin, K.G. Belyaev, G.V. Klimko, I.S. Mukhin, S.V. Ivanov, A.A. Toropov. Red single photon emission from InAs/AlGaAs quantum dots // *Semiconductors* **52**, 511 (2018).
- [A6] M.V. Rakhlin, K.G. Belyaev, G.V. Klimko, I.S. Mukhin, D.A. Kirilenko, T.V. Shubina, S.V. Ivanov, A.A. Toropov. InAs/AlGaAs quantum dots for single photon emission in a red spectral range // *Sci. Rep.* **8**, 5299 (2018).
- [A7] М.В. Рахлин, К. Г. Беляев, С.В. Сорокин, И.В. Седова, Д.А. Кириленко, А.М. Можаров, И.С. Мухин, М.М. Кулагина, Ю.М. Задиранов, С.В. Иванов, А.А. Торопов. Однофотонный источник при 80 К на основе диэлектрической наноантенны с CdSe/ZnSe квантовой точкой // *Письма в ЖЭТФ* **108**, 3, 201-204 (2018).
- [A8] K.G. Belyaev, M.V. Rakhlin, G.V. Klimko, Yu. M. Zadiranov, M.M. Kulagina, I.V. Sedova, S.V. Ivanov, A.A. Toropov. Single photon emitters based on hybrid microcavities with InAs/Al_xGa_{1-x}As quantum dots // *J. Phys.: Conf. Ser.* **1038**, 012120 (2018).
- [A9] М.В. Рахлин, К.Г. Беляев, Г.В. Климко, И.С. Мухин, С.В. Иванов, А.А. Торопов. Однофотонное излучение квантовых точек InAs/AlGaAs // *ФТТ* **60**, 4, 687-690 (2018).

- [A10] М.В. Рахлин, К. Г. Беляев, Г.В. Климко, И.В. Седова, М.М. Кулагина, Ю.М. Задиранов, С.И. Трошков, Ю.А. Гусева, Я.В. Терентьев, С.В. Иванов, А.А. Торопов. Эффективный полупроводниковый источник одиночных фотонов красного спектрального диапазона // Письма в ЖЭТФ **109**, 3, 147-151 (2019).

Список литературы

- [1] Quantum cryptography / N. Gisin, G. Ribordy, W. Tittel, H. Zbinden // *Rev. Mod. Phys.* — 2002. — Vol. 74. — Pp. 145–195.
- [2] *Rudolph T.* Why I am optimistic about the silicon-photon route to quantum computing // *Appl. Phys. Lett. Photon.* — 2017. — Vol. 2, no. 3. — P. 030901.
- [3] Single-photon devices and applications / Ed. by C. Santori, D. Fattal, Y. Yamamoto. — Wiley-VCH, Weinheim, Germany, 2010.
- [4] Photon correlation studies of single GaN quantum dots / C. Santori, S. Götzinger, Y. Yamamoto et al. // *Appl. Phys. Lett.* — 2005. — Vol. 87, no. 5. — P. 051916.
- [5] Room temperature single photon emission from an epitaxially grown quantum dot / O. Fedorych, C. Kruse, A. Ruban et al. // *Appl. Phys. Lett.* — 2012. — Vol. 100, no. 6. — P. 061114.
- [6] Telecom-wavelength single-photon emission from InP-based quantum dots / M. Benyoucef, M. Yacob, J. Reithmaier et al. // *Appl. Phys. Lett.* — 2013. — Vol. 103. — P. 162101.
- [7] Electrically driven single-photon source / Z. Yuan, B. E. Kardynal, R. M. Stevenson et al. // *Science.* — 2002. — Vol. 295, no. 5552. — Pp. 102–105.
- [8] Entangled photon pairs from semiconductor quantum dots / N. Akopian, N. H. Lindner, E. Poem et al. // *Phys. Rev. Lett.* — 2006. — Vol. 96. — P. 130501.
- [9] Triggered polarization-entangled photon pairs from a single quantum dot up to 30 K / R. Hafenbrak, S. M. Ulrich, P. Michler et al. // *New J. of Phys.* — 2007. — Vol. 9. — P. 315.

- [10] CdSe quantum dots in ZnSe nanowires as efficient source for single photons up to 200 K / T. Aichele, A. Tribu, G. Sallen et al. // *J. of Cryst. Growth.* — 2009. — Vol. 311. — Pp. 2123–2127.
- [11] Electrically driven polarized single-photon emission from an InGaN quantum dot in a GaN nanowire / S. Deshpande, J. Heo, A. Das, P. Bhattacharya // *Nature Communications.* — 2013. — Vol. 4. — P. 1675.
- [12] Room-temperature triggered single photon emission from a III-nitride site-controlled nanowire quantum dot / M. J. Holmes, K. Choit, S. Kako et al. // *Nano Lett.* — 2014. — Vol. 14. — Pp. 982–986.
- [13] Lounis B., Moerner W. Single photons on demand from a single molecule at room temperature // *Nature.* — 2000. — Vol. 407. — Pp. 491–493.
- [14] A diamond nanowire single-photon source / T. Babinec, B. Hausmann, M. Khan et al. // *Nature Nanotech.* — 2010. — Vol. 5. — Pp. 195–199.
- [15] Colloidal CdSe/ZnS quantum dots as single-photon sources / X. Brokmann, G. Messin, P. Desbiolles et al. // *New J. of Phys.* — 2004. — Vol. 6. — P. 99.
- [16] Buckley S., Revoire K., Vucković J. Engineered quantum dot single-photon sources // *Rep. Prog. Phys.* — 2012. — Vol. 75. — P. 126503.
- [17] Rabe M., Lowishch M., Henneberger F. Self-assembled CdSe quantum dots formation by thermally activated surface reorganization // *J. of Cryst. Growth.* — 1998. — Vol. 184-185. — Pp. 248–253.
- [18] Influence of CdTe sub-monolayer stressor on CdSe quantum dot self-assembling in ZnSe / I. V. Sedova, O. G. Lyublinskaya, S. V. Sorokin et al. // *Phys. Stat. Sol. C.* — 2006. — Vol. 3. — Pp. 916–919.
- [19] Temperature dependence of optical properties of InAs/Al_yGa_{1-y}As self-organized quantum dots / A. Polimeni, A. Patane, M. Henini et al. // *Phys. Rev. B.* — 1999. — Vol. 59. — P. 7.

- [20] Electrically driven single quantum dot emitter operating at room temperature / R. Arians, A. Gust, T. Kummel et al. // *Appl. Phys. Lett.* — 2008. — Vol. 93. — P. 173506.
- [21] Optical and magnetic anisotropies of the hole states in Stranski-Krastanov quantum dots / A. V. Koudinov, I. A. Akimov, Y. G. Kusrayev, F. Henneberger // *Phys. Rev. B.* — 2004. — Vol. 70. — P. 241305(R).
- [22] Impact of heavy hole-light hole coupling on optical selection rules in GaAs quantum dots / T. Belhadj, T. Amand, A. Kunold et al. // *Appl. Phys. Lett.* — 2008. — Vol. 97. — P. 051111.
- [23] High-frequency single-photon source with polarization control / S. Strauf, N. G. Stoltz, M. T. Rakher et al. // *Nature Photon.* — 2007. — Vol. 1. — Pp. 704–708.