

УТВЕРЖДАЮ

декан физического факультета
федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«~~Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова~~
физико-математических наук,
профессор Н.Н. Сысоев

«Н» ноября 2019 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу

Рахлина Максима Владимировича

**«Источники одиночных фотонов видимого спектрального диапазона на основе
эпитаксиальных квантовых точек InAs/AlGaAs и CdSe/ZnSe»,**

представленную на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

по специальности 01.04.10 - Физика полупроводников

Диссертационная работа Рахлина посвящена экспериментальному исследованию оптических свойств эпитаксиальных одиночных квантовых точек, излучающих в видимом спектральном диапазоне. Исследования в данном направлении ведутся широким фронтом во многих лабораториях мира, что обуславливается как фундаментальным интересом к данной области, так и перспективой создания приборов для систем квантовой криптографии, предназначенных для безопасной передачи информации в атмосферных оптических линиях связи. Ввиду этого, результаты, полученные в диссертации М. В. Рахлина, являются весьма актуальными и востребованными в современной физике полупроводников.

Диссертация состоит из Введения, 5-ти глав, заключения и списка литературы (с 87 источниками). Во Введении формулируется основная цель диссертационной работы: определение методов реализации активных областей однофотонных источников на основе квантовых точек в видимом спектральном диапазоне. Обосновывается научная новизна и

практическая ценность работы, сформулированы основные защищаемые положения, кратко описана структура диссертации.

Первая глава посвящена рассмотрению экспериментальных методик измерения спектров микро-фотолуминесценции с микронным пространственным разрешением и корреляционной функции второго порядка в схеме Хэнбери Брауна-Твисса, с помощью которых исследовались изучаемые гетероструктуры.

Во второй главе диссертации М.В. Рахлин, исследуя оптические свойства квантовых точек CdSe, определяет оптимальный способ роста с точки зрения создания однофотонного источника. Показано, что метод термической активации больше всего подходит для этих целей, так как позволяет получить достаточно низкую плотность излучающих квантовых точек ($1.8 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$) за счет безызлучательной рекомбинации носителей в большинстве квантовых точек. Кроме того, продемонстрирована возможность использования системы широкозонных барьеров ZnMgSSe вместо ZnSe с целью повышения квантовой эффективности.

Третья глава посвящена определению влияния подслоя GaAs, вставленного между нижним барьером и слоем квантовых точек, на излучательные характеристики гетероструктур InAs/Al_xGa_{1-x}As ($x \sim 0.4$). Использование гетероструктур с подслоем GaAs и без него позволило получить квантовые точки, излучение которых перекрывает диапазон длин волн от 630 до 1000 нм. Также показано, что квантовые точки наименьших размеров, выращенные поверх подслоя GaAs, обладают достаточно малой величиной расщепления экситонных состояний (менее 20 мкэВ), что является предпосылкой для генерации запутанных фотонных пар.

В четвёртой главе проводится сравнительный анализ различных способов получения источников однофотонного излучения в красной области спектра, обладающих высокой интенсивностью излучения. Сравниваются такие конструкции, как фотонные наноантенны и микрорезонаторы с полупроводниковыми и диэлектрическими брэгговскими зеркалами. Определено, что наибольшей интенсивности излучения позволяет достичь фотонная наноантенна со средней скоростью генерации фотонов порядка 5 МГц.

В пятой главе изучаются оптические свойства однофотонного источника, на основе квантовых точек CdSe/ZnSe, помещенных в цилиндрический волновод с переменным сечением. За счет конструкции фотонной наноантенны продемонстрировано однофотонное излучение с интенсивностью около одного миллиона фотонов в секунду на первой линзе при температуре жидкого азота.

По диссертации имеются следующие замечания:

1) В главе 1 диссертации отмечается, что для возбуждения ФЛ квантовых точек использовались полупроводниковые лазеры с длинами волн 405 и 664 нм, а для измерения автокорреляционной функции $g(2)$ – вторая гармоника титан-сапфирового лазера с длиной волны 400 нм. Из текста диссертации не ясно – из каких соображений были выбраны именно эти источники оптической накачки и какие механизмы возбуждения однофотонного излучения реализовывались в конкретных описываемых экспериментах – надбарьерное, резонансное, квазирезонансное и т.д.?

2) В 4-й и 5-й главах диссертации автор приводит значения интенсивности однофотонного излучения “на первой линзе”. Из текста диссертации не ясно, как именно выполнялось измерение интенсивности “на первой линзе”, и как это измеренное значение соотносится с интенсивностью излучения на выходе источника одиночных фотонов и на однофотонном детекторе, осуществляющем регистрацию интенсивности.

Указанные замечания не снижают хорошего общего впечатления о работе.

В целом, диссертационная работа М. В. Рахлина выполнена на очень высоком и современном научном уровне и является весомым вкладом в развитие однофотонных источников на основе квантовых точек. Основные результаты этой работы опубликованы в ведущих реферируемых научных журналах (Scientific Reports, Письма в ЖЭТФ, Physics of Status Solidi C, ФТТ), доложены на многих международных и Российских конференциях, они хорошо известны и признаны специалистами.

Автореферат адекватно отражает содержание диссертации. Представленная диссертация соответствует всем требованиям ФТИ им. А.Ф. Иоффе, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Ее автор Максим Владимирович Рахлин, несомненно, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 - Физика полупроводников.

Отзыв на диссертацию и автореферат обсужден 11.11.2019 на кафедре квантовой электроники физического факультета федерального государственного бюджетного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова».

Научный руководитель Центра квантовых технологий
д.ф.-м.н., профессор

С. П. Кулик