

## ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора физико-математических наук, профессора кафедры физики твёрдого тела Санкт-Петербургского государственного университета Вербина Сергея Юрьевича (адрес: 198504, Санкт-Петербург, Петродворец, ул. Ульяновская, д.1, телефон: +7 (812) 428-45-46, e-mail: [s.verbin@spbu.ru](mailto:s.verbin@spbu.ru))

на диссертацию

**Рахлина Максима Владимировича**

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

представленную в диссертационный совет № 34.01.02  
при Физико-техническом институте им. А.Ф.Иоффе РАН  
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук  
по специальности 01.04.10 – физика полупроводников.

Диссертация Максима Владимировича Рахлина посвящена определению физических основ функционирования и методов реализации активных областей однофотонных источников в видимом спектральном диапазоне (500-780 нм) на основе квантовых точек (КТ) CdSe/ZnSe и InAs/AlGaAs.

**Актуальность и востребованность** этих исследований не вызывает сомнений, поскольку речь идет о разработке неклассических источников света, способных излучать с высокой внешней квантовой эффективностью либо один фотон на определенной частоте, либо пару запутанных, для использования их в квантовой криптографии и линейных оптических квантовых вычислениях, поскольку теоретические разработки в этих областях намного опережают успехи в технологии создания таких источников. Результаты работ М. В. Рахлина, на которых основана его диссертация, хорошо известны специалистам в области технологии создания и исследования физических свойств таких неклассических источников света.

Диссертация состоит из Введения, 5 глав и заключения. В списке литературы, помимо списка работ автора, вошедших в диссертацию (10 статей, включая 2 статьи в Письмах в ЖЭТФ и статьи в ФТТ, ФТП, *phys.stat.sol.*) – 87 публикаций.

Актуальность вошедших в диссертацию исследований, их новизна и практическая значимость убедительно аргументированы во Введении. Сформулированы цели диссертационной работы и основные положения, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации работы, кратко описаны структура диссертации и содержание ее глав.

В первой главе диссертации рассмотрены характеристики и принципы работы экспериментальных установок микро-фотолюминесценции и мощностного интерферометра типа Хэнбери Брауна-Твисса, использованных при исследованиях изучаемых гетероструктур.

В главах 2-5 диссертации М. В. Рахлина получен большой объем новых прикладных и фундаментальных результатов, среди которых я хотел бы выделить следующие:

1. Достижение однофотонного излучения из одиночных квантовых точек CdSe/ZnSe при условии их пространственного ограничения путем формирования цилиндрических меза-структур.
2. Экспериментальное обнаружение зависимости длины волны излучения КТ InAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As ( $x \sim 0.4$ ) от наличия тонкой прослойки GaAs между ними и нижним барьерным слоем.
3. Автором установлено, что величина расщепления основного состояния экситона, определяемого анизотропной частью обменного взаимодействия, не превышает 20 мкэВ в высокоэнергетической части спектра излучения ансамбля КТ InAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As ( $x \sim 0.4$ ), формируемых с прослойкой GaAs.
4. Весьма впечатляющие результаты получены диссертантом при изготовлении и исследовании волноводных оптических наноантенн с градиентным сечением, которые позволили реализовать высокочастотное (до десятков МГц) излучение одиночных фотонов при температурах вплоть до азотных.

**Достоверность результатов**, полученных в диссертации, подтверждается полной технологической разработкой и выращиванием исследуемых гетероструктур с требуемыми параметрами, созданием установки для измерения корреляционной функции второго порядка в одиночных КТ при пониженных температурах, тщательностью проведения экспериментов на ней и анализа полученных результатов.

Результаты диссертации М. В. Рахлина могут быть рекомендованы к использованию в организациях, проводящих исследования в области физики полупроводников и физики конденсированных сред, например, МГУ, СПбГУ, ИФМ РАН, ИФП СО РАН, ИФТТ РАН и других организациях.

Высокая **научная новизна и практическая значимость** этих результатов обусловлена тем, что в диссертации разработана оптимальная конструкция структур на основе КТ CdSe/ZnSe и InAs/AlGaAs, предназначенных для получения однофотонного излучения в видимом спектральном диапазоне и перспективных для использования в системах квантовой криптографии.

Диссертация не лишена некоторых, впрочем, весьма незначительных, **недостатков**.

1. В п. 1.2 первой главы диссертации при описании установки для измерения корреляционной функции следовало бы более подробно описать временные характеристики применённых в ней импульсного анализатора и лавинных фотодиодов, в частности, их времён нарастания и «мёртвого», чтобы оценка реального временного разрешения всей установки была более явной.
2. В п. 2.2 второй главы диссертации при описании изготовления апертур диаметром 500 нм в золотой плёнке и полученных впоследствии спектров микрофотолюминесценции никак не объясняется выбор именно такого диаметра апертур.
3. В этом же пункте при обсуждении температурной зависимости фотолюминесценции гетероструктур CdSe/ZnSe типа А имело бы смысл сравнить результаты с полученными ранее в ФТИ А.Н.Резницким с соавторами при исследовании аналогичных гетероструктур.
4. Из Рис. 4.3 (стр. 50) видно, что величина корреляционной функции вблизи её «провала» незначительно, но превышает единицу. Этот результат и возможные причины, к нему приводящие, в диссертации никак не обсуждаются.
5. В диссертации имеются небрежности, как носящие характер опечаток, например, «signal quantum dot» вместо «single quantum dot» в ссылке 25 списка литературы, так и смысловые, например, неоднократное использование термина «интенсивность», примененное к физической величине, измеряемой в частотных единицах.

Указанные недостатки ни в коей мере не уменьшают ценности диссертации, выполненной на очень высоком и современном научном уровне.

В целом диссертационная работа М. В. Рахлина «Источники одиночных фотонов видимого спектрального диапазона на основе эпитаксиальных квантовых точек InAs/AlGaAs и CdSe/ZnSe» заслуживает самой высокой оценки благодаря высокому научному уровню ее выполнения, новизне результатов, ясности изложения.

Автореферат и опубликованные статьи правильно и достаточно полно отражают содержание диссертации М. В. Рахлина, которая является законченным исследованием, имеющим важное научное и прикладное значение для физики. Таким образом,

диссертационная работа М. В. Рахлина «Источники одиночных фотонов видимого спектрального диапазона на основе эпитаксиальных квантовых точек InAs/AlGaAs и CdSe/ZnSe» полностью отвечает всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Максим Владимирович Рахлин заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – физика полупроводников.

Заведующий кафедрой физики твёрдого тела  
профессор Санкт-Петербургского  
государственного университета, д. ф.-м. н.

С. Ю. Вербин

Подпись С. Ю. Вербина удостоверяю:

---

Документ подготовлен  
в порядке исполнения  
трудовых обязанностей

9