

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель Директора по научной работе

Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Физико-технического института
имени А.Ф. Иоффе
Российской академии наук
доктор физико-математических наук,
Лебедев С.В.



“06” декабря 2017

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

**на диссертационную работу Воробьева Вадима Владиславовича
«Исследование эффективных спин-фотонных интерфейсов на базе
центров окраски в алмазе», представленную на соискание ученой
степени кандидата физико-математических наук по специальности
01.04.05 «Оптика»**

В настоящее время алмазы с центрами окраски, в первую очередь азот-вакансионными – центрами, вызывают большой фундаментальный и практический интерес, поскольку данный материал представляет собой твердотельную квантовую систему, имеющую уникальные оптические и спиновые свойства при комнатных температурах. Система обладает высоким временем когерентности электронного и ядерного спина, возможностью оптической поляризации состояния электронного спина под действием непрерывного излучения, а также использования близлежащих ядерных спинов как долговременной квантовой памяти. Все эти свойства, позволяют рассматривать данные центры окраски в алмазе как перспективные для создания элементной базы возможных будущих квантовых приложений, таких как квантовые вычисления, и квантовые линии связи. С фундаментальной точки зрения, центры окраски азот вакансия, как и другие перспективные центры окраски в алмазе является удобной экспериментальной платформой для исследования и тестирования новейших квантовых алгоритмов. Создание эффективного оптического интерфейса для возбуждения и сбора излучения одиночного NV центра в алмазе позволит существенно улучшить характеристики уже предлагаемых квантовых приложений на базе NV центров, а также позволит создать новые востребованные устройства.

Актуальность исследования. Диссертационная работа В. В. Воробьева «Исследование эффективных спин-фотонных интерфейсов на базе центров окраски в алмазе» представляет собой комплексное исследование, включающее:

- 1) Экспериментальное исследование излучательных свойств NV центра окраски в алмазе вблизи гиперболического метаматериала (ГММ). Сбор статистики однофотонных излучателей (NV центров окраски в наноалмазе), расположенных на ГММ с различными параметрами. Измерение статистики времени жизни флюоресценции, кривых насыщения, а также сравнение с аналогичной выборкой алмазов размещенных на диэлектрических стеклянных подложках.
- 2) Экспериментальное и теоретическое исследование применимости нового типа сверхпроводящего детектора для регистрации однофотонного излучения NV центров окраски в алмазе. Анализ значимости отдельных параметров детектора для получения качественных измеряемых характеристик квантового света.
- 3) Экспериментальное и теоретическое исследование оптического волокна, вытянутого для получения перетяжек, как оптического интерфейса для сбора излучения от одиночных NV центров в наноалмазах. Детальное исследование причин возникновения фонового излучения и определение способов борьбы с паразитным фоновым излучением в таком интерфейсе.

Таким образом, диссертационная работа является, несомненно, актуальной, поскольку находится на переднем крае развития современной физики полупроводников и метаматериалов. Структурно диссертация состоит из Введения, 4 глав, Заключения и Списка литературы. Общий объем диссертации 97 страниц, включая 46 рисунков и 2 таблицы.

Новизна исследований и полученных результатов. В диссертационной работе были получены следующие результаты, значимые на мировом уровне:

- 1) Исследованы оптические свойства азотно-вакансионных центров окраски в наноалмазах, размещенных на поверхности планарного гиперболического метаматериала (ГММ) из попеременных слоев AlScN и TiN. Продемонстрировано уменьшение времени жизни возбужденного состояния NV центра в 4 раза и увеличение скорости счета одиночных фотонов в среднем в 1.8 раза (максимальное увеличение в 4.8 раза) по сравнению с NV центрами в наноалмазах, расположенных на стеклянной подложке.
- 2) Обнаружено, что экспериментальные значения скорости счета фотонов наноалмазов на ГММ имеют двумодальное распределение по скорости счета, одна из которых находится в соответствии с теоретическими расчетами и имеет увеличение в среднем 1.8 раз, а другая имеет в среднем увеличение до 4.8 раз. Наличие второй группы объясняется наличием дефектов поверхности ГММ вблизи излучателей, играющих роль случайных наноантенн.

- 3) Автором была проведена работа по разработке технологии создания оптического интерфейса для одиночного NV центра в наноалмазе путем расположения наноалмаза, содержащего NV центр, на перетяжке вытянутого оптического волокна. Полученный интерфейс был исследован, и оптимизирован, как с использованием результатов численного моделирования, так и с помощью экспериментальных методов. В результате с помощью интерфейса была измерена однофотонная статистика излучения от одиночного азотно-вакансионного центра окраски и зарегистрирована скорость счета одиночных фотонов в 3 раза большая по сравнению с конфокальным микроскопом с объективом с числовой апертурой $NA = 0.95$.
- 4) Детальное исследование возможных причин возникновения фонового шума показало, что основной причиной возникновения фоновых шумов в оптическом интерфейсе является излучение GeO центров окраски в сердечнике волокна под действием лазерного излучения накачки, рассеянного на наноалмазе. В результате расчетов установлено, что одним из возможных способов борьбы является выбор оптимальной поляризации излучения накачки. Выбор наноалмазов меньшего размера (менее 20 нанометров), и использование явления насыщения флюоресценции при помощи предварительного импульса большей мощности также предложены как методы борьбы с фоновым шумом.
- 5) В исследовании применимости криогенных однофотонных детекторов нового типа было проведено сравнение результатов измерения однофотонной статистики от одиночного NV центра, расположенного на ГММ с результатами измерения при помощи коммерческих лавинных фотодиодов. В результате продемонстрировано и теоретически обосновано, что даже несмотря на низкую квантовую эффективность (~ 0.2) глубина провала автокорреляционной функции может быть до 2 раз ниже, чем аналогичный провал при использовании лавинных фотодетекторов с квантовой эффективностью 0.6. Также выявлено, что максимальная скорость счета одиночных фотонов в случае сверхпроводящих детекторов в 20 раз превосходит скорость счета лавинных фотодетекторов.

Научная значимость результатов диссертационной работы.
Диссертационная работа представляет собой разностороннее экспериментальное исследование оптических свойств NV центров окраски в алмазе в различных условиях. Обнаружено существенное увеличение числа собираемых одиночных фотонов, испускаемых NV центрами окраски в алмазе, а также достигнуто существенное уменьшение времен спонтанного распада оптического перехода в NV центре при взаимодействии центра окраски с ГММ. Установлены основные параметры, влияющие на эффективность оптического интерфейса. Изучено влияние различных геометрических параметров на

наблюдаемый эффект. Обнаружено увеличение эффективности работы в присутствии поверхностных дефектов на ГММ. Значительная часть впервые проведенных исследований, например изучение интерфейса «одинокый NV центр – ГММ» носит уникальный и приоритетный характер. Разработанные подходы и методики исследования, в частности, измерение автокорреляционной функции второго порядка при помощи сверхпроводящих детекторов, перенос одиночных наноалмазов с одиночными NV центрами на перетяжку вытянутого волокна могут быть также применены к задачам исследования других перспективных центров окраски, материалов и наноструктур.

Практическая значимость результатов диссертационной работы.

Существенное внимание в диссертации уделено изучению приборного потенциала наблюдаемых эффектов. Это относится в первую очередь к эффекту увеличения числа испускаемых фотонов вблизи поверхности ГММ. Сам материал ГММ является совместимым с чиповой интегральной технологией, позволяя создавать чипы, содержащие оптические и оптоэлектронные квантовые устройства на базе NV центров. Результаты исследований вытянутого оптического одномодового волокна могут быть использованы для создания прототипа генератора однофотонного излучения. В целом полученные в диссертации результаты могут быть использованы при разработке оптических и квантовых приборов на основе NV и других перспективных центров окраски в алмазе в различных институтах и организациях: ФИАН им. Лебедева, ФТИ им. А. Ф. Иоффе, МГУ им М. В. Ломоносова, ИФТТ РАН и других.

Однако работа не лишена недостатков. Основным, по нашему мнению, является малое внимание в исследовании к изучению электронных спиновых свойств NV центров и поляризации фотолюминесценции, хотя именно эти моменты находятся в фокусе исследований центров окраски в наноалмазах. Можно предположить, что работа над важными и актуальными практическими задачами отвлекла внимание соискателя от возможных исследований в этом направлении.

Отмечается также ряд погрешностей методического характера. К примеру, при исследовании характеристик и диапазона применимости сверхпроводящего детектора его свойства сравнивались с лавинными фотодиодами с заниженными параметрами в силу деградации детекторов в процессе их многолетней работы. В этих условиях было бы полезно провести анализ достигнутых параметров на основе современных литературных источников, что, возможно, сместило бы оценки. Далее, сравнительно низкое качество пропускания в волоконном канале сбора, порядка 10%, говорит о несовершенстве волоконных соединений. Обсуждение путей улучшения этого параметра, также как и способов

пути достижения основной цели – создания эффективного интерфейса. С оформительской точки зрения следует отметить некоторую небрежность в расстановке знаков препинания и использовании сокращений. В тексте отсутствует ряд номеров рисунков, например, упомянутых на стр. 63 и 81.

Указанные замечания, являясь в основном рекомендациями для продолжения исследований, не влияют на высокую оценку, как диссертационной работы, так и уровня компетентности автора диссертации. Основные положения, выносимые на защиту, не вызывают сомнений. Диссертационная работа В. В. Воробьева представляет собой логически завершенное научное исследование. Автором внесен существенный вклад в развитие оптики центров окраски в наноалмазах и применения метаматериалов. Основные результаты работы полностью отражены в 3 публикациях в авторитетных журналах, входящих в базу данных Web of Science и Перечень ВАК, многократно докладывались на основных по данной тематике национальных и международных конференциях. Личный вклад автора является определяющим в получение результатов. Диссертация полностью соответствует всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013г № 842, к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а её автор – Воробьев Вадим Владиславович, безусловно, заслуживает присвоения ему искомой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 – Оптика.

Материалы диссертации были заслушаны на семинаре Лаборатории Квантоворазмерных гетероструктур ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Отзыв на диссертацию обсужден и одобрен на заседании Ученого совета Центра физики наногетероструктур, 17 ноября 2017 г., протокол №1.

Отзыв составил
главный научный сотрудник
ФТИ им. А.Ф. Иоффе,
доктор физ.-мат. наук

Татьяна Васильевна Шубина

194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26
тел. +7 (812) 292-7124, e-mail: shubina@beam.ioffe.ru

Подпись Т.В. Шубиной удостоверяю
Ученый секретарь ФТИ им. А.Ф. Иоффе
доктор физ.-мат. наук, профессор



Андрей Петрович Шергин

«05» декабря 2017 г.

Телефон: (812) 297-22-45; Факс: (812) 297-1017