Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физический институт им П.Н. Лебедева Российской академии наук

На правах рукописи

Воробьев Вадим Владиславович

# Исследование эффективных спин-фотонных интерфейсов на базе центров окраски в алмазе

Специальность: 01.04.05 – Оптика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физическом институте им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН).

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор,

Сорокин Вадим Николаевич, главный научный сотрудник ФИАН

Официальные оппоненты:

Наумов Андрей Витальевич, доктор физико-математических наук, доцент, заместитель директора по научной работе Института спектроскопии РАН;

Кулик Сергей Павлович, доктор физико-математических наук, доцент, профессор лаборатории квантовых оптических технологий физического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе Российской академии наук

Защита состоится 25 декабря 2017 года в 12 часов на заседании диссертационного совета Д 002.023.03 при ФИАН по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский проспект, д. 53

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФИАН по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский проспект, д. 53, а также на сайте института www.lebedev.ru

Автореферат разослан «____» _____ 2017 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 002.023.03

доктор физико-математических наук А.С. Золотько

# I. Общая характеристика работы

## Актуальность темы исследования

Развитие современного общества тесно переплетено с развитием информационных технологий. Компьютеры стали неотъемлемой частью нашей реальности. В последнее время большой скачок произошел в области мобильной сотовой сети и мобильного интернета. С ростом доступности информации все более остро встает вопрос её безопасности. Одним из возможных решений проблемы является разработка квантовых линий связи [1], которые позволяют обеспечить защиту передаваемой информации на уровне фундаментальных физических законов. Принцип защиты квантовых линий связи базируется на невозможности копирования единичного квантового состояния [2], что защищает информацию от копирования злоумышленниками. Квантовые линии связи на расстояние до 150 километров были реализованы, например, в работе [3]. Однако, в силу экспоненциально растущих с длиной потерь в волоконном канале передачи, для создания сети, способной работать на больших расстояниях, необходимы квантовые повторители, позволяющие копировать квантовую информацию, но при этом обеспечивающие защиту от прослушивания злоумышленниками. Существуют различные типы повторителей [4–6], сводящих экспоненциальную зависимость потерь от расстояния к полиномиальной. Реализация таких систем нуждается в надежной квантовой памяти [7], а также в источниках детерминированных, в том числе однофотонных и перепутанных, состояний света. Несмотря на существование экспериментальных демонстраций отдельных элементов (однофотонных источников света [8–10], квантовой памяти [11]), их использование ограничено отсутствием технологии эффективных и надежных интерфейсов для взаимодействия с квантовыми системами, лежащими в их основе.

Развитие вычислительных систем имеет естественное развитие в области

квантовых вычислений. Впервые идея квантовых вычислений была предложена в 1976 году Романом Ингарденом [12]. Чуть позже в своей лекции 1981 года в Массачусетском Технологическом Институте Р. Фейнман замечает [13], что невозможно эффективно промоделировать эволюцию квантовой системы на классическом компьютере, и предложил для этой задачи использовать квантовый компьютер. В настоящее время, метод увеличения скорости вычислений за счет уменьшения размера транзистора испытывает все большие трудности в поддержании роста производительности вычислительных систем в соответствии с законом Мура [14]. Одним из перспективных решений проблемы считается идея использовать вместо дискретной логики битов 0 и 1 квантовую логику, оперирующую со всевозможным суперпозициями 0 и 1 в комплексном пространстве. Показано, что такие машины способны эффективно решать задачи, трудные в решении для классического компьютера, например, задачу разложения большого числа на простые множители [15], или вычисление энергетических уровней сложных молекул [16], что открывает новые возможности в повышении скорости и точности вычислений. Экспериментально была продемонстрирована работоспособность квантовых симуляторов и квантовых вычислительных систем на базе различных физических систем: охлажденных ионов в ловушке Паули [17, 18], сверхпроводящих контактов Джозефсона [16, 19, 20], квантовых точек [21], центров окраски в алмазе [22] и других систем. Однако ясно, что создание массового компьютера нового поколения потребует использования твердотельной чип-совместимой технологии.

Квантовые сенсоры являются естественным развитием классических аналогов. Поведение квантовых систем сильно зависит от свойств окружающей среды, позволяя тем самым измерять температуру [23], давление [24], ускорение [25], величину магнитного и электрического полей [26], плотность электромагнитных мод [27], вращение [28–30] или время [31] с высокой точностью и пространственным разрешением. Создание подобных сенсоров проходит этап

перехода из стадии научно-исследовательских работ и подтверждения принципа работы к стадиям опытно-конструкторских работ и созданию первых прототипов. Однако, характеристики таких сенсоров могут быть существенно улучшены за счет создания эффективного интерфейса для их чувствительных элементов, т.е. эффективной оптической системы сбора фотонов.

Среди множества кандидатов на квантовую ячейку памяти центры окраски в алмазе обладают рядом конкурентных преимуществ, которые делают их одним из наиболее перспективных кандидатов для использования в квантовых приложениях. Среди этих дефектов можно выделить ряд наиболее интересных и исследуемых систем: Азот-Вакансия (NV), Кремний-Вакансия (SiV), Германий-Вакансия (GeV), Олово-Вакансия (SnV). Благодаря расположению в кристаллической решетке алмаза [32, 33] они совместимы с чип-технологией, стабильны при комнатной температуре, а также отличаются высокой температурной, химической и фото стабильностью. Совместимость с чип-технологией позволит создать масштабируемое производство подобных систем [34]. Особенности спиновой динамики делают центры окраски в алмазе пригодными для большинства требований квантовых приложений, так, например, в работе [35] время когерентности электронного спина в NV центре достигло нескольких миллисекунд, что позволяет осуществлять более $10^5$ универсальных операций со спином. Таким образом, развитие квантовых вычислительных технологий, так же как квантовых линий связи и квантовых сенсоров, в существенной мере нуждается в развитии квантовых интерфейсов, в частности на базе центров окраски в алмазе. Из сказанного выше следует, что тема настоящей диссертационной работы является актуальной.

Для создания эффективных интерфейсов для одиночных квантовых систем необходимо решить задачу увеличения эффективности сбора излучения, а также задачу увеличения скорости спонтанной эмиссии системы для увеличения количества фотонов излучаемых системой.

В отличие от традиционных способов увеличения скорости спонтанной эмиссии, реализуемых за счет использования резонансных структур (резонаторы Фабри-Перо, плазмонные резонансы, резонансы Ми, фотонно-кристаллические резонаторы), способ с использованием метаповерхностей и метаматериаллов дает возможность создавать условия для возникновения эффекта Парселла в широком диапазоне длин волн излучателя. В частности, в рамках данной работы исследуется эффективность использования гиперболического метаматериала (ГММ), свойства которого оптимизированы под диапазон длин волн широкого спектра излучения Азотно-Вакансного (NV) центра в алмазе.

Традиционно для сбора излучения одиночного излучателя используются высоко апертурные объективы (NA = 0.95, 1.49), позволяющие собирать до одной четверти излучения. Однако общий показатель эффективности сбора излучения в установке конфокального микроскопа довольно низок - около 1 %. Естественным способом увеличения эффективности сбора одиночных фотонов и упрощения их доставки до потребителя может стать интеграция одномодового волокна с однофотонным излучателем. Стандартное одномодовое волокно обладает довольно низкой числовой апертурой - порядка 0.1. Для ее увеличения используют так называемые вытянутые оптические волокна. В данной работе исследуется эффективность использования адиабатически вытянутых оптических волокон для целей увеличения эффективности сбора излучения от одиночных квантовых излучателей.

## Цели и задачи диссертационной работы

Основной **целью** работы является создание эффективного квантового интерфейса для считывания информации с центров окраски в алмазе. Эффективность такого интерфейса характеризуется процентом собранного излучения при взаимодействии с центром окраски, а также уровнем шумов в интерфейсе. Важной целью является увеличение скорости спонтанной эмиссии центра окраски, что приводит к ускорению обмена информацией с квантовым объектом. Для достижения поставленных целей необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Исследование и выбор подходящих наноалмазов, содержащих одиночные NV центры, и отработка технологии их нанесения на подложку. Измерение статистики радиационного распада, а также автокорреляционной функции второго порядка излучения NV центра. Оптимизация технологии подготовки алмазно-полимерных пленок для получения одиночных NV центров.

2. С целью увеличения скорости спонтанной эмиссии проведение исследования взаимодействия NV центров с гиперболическими метаматериалами (ГММ) и оценка эффективности использования ГММ для достижения цели работы. В частности, измерение кривых затухания флюоресценции одиночных NV центров на поверхности ГММ с различными параметрами, анализ распределения числа фотонов, полученных от одиночных NV центров на поверхности ГММ, сравнение полученного распределения с аналогичным распределением, полученным от одиночных NV центров на поверхности стекла.

3. С целью увеличения эффективности сбора излучения NV центра сопряжение наноалмаза, содержащего единичный NV-центр, с вытянутым волокном и последующее измерение статистики радиационного распада и

автокорреляционной функции второго порядка через волоконный интерфейс. Для оценки эффективности системы определение количества регистрируемых фотонов через волоконный интерфейс. Создание установки для вытягивания оптического волокна. Отработка технологии вытягивания оптического волокна до диаметра менее 1 мкм с пропусканием более 50%.

4. Повышение характеристик регистрирующей фотоны аппаратуры. Исследование квантовых свойств излучателей при помощи сверхпроводящих детекторов нового поколения, разработанных специально для задач настоящей работы. Сравнение полученных результатов с измерениями при помощи лавинных фотодетекторов.

Исследование оптических свойств и сбор статистики излучения производится на установке конфокального микроскопа с возможностью детектирования одиночных излучателей, имеющегося в лаборатории оптики активных сред ФИАН.

**Научная новизна**

1. Впервые за счет взаимодействия с ГММ реализован способ существенного увеличения скорости спонтанной эмиссии NV центра. Получено среднее значение коэффициента Парселла 4.

2. Впервые за счет взаимодействия с ГММ реализован способ увеличения числа собираемых при помощи конфокального микроскопа фотонов от одиночного NV центра. Достигнуто значение коэффициента увеличения числа регистрируемых фотонов в среднем в 1.8 раз по сравнению с расположением наноалмазов, содержащих одиночные NV центры, на стеклянной подложке. Максимальное увеличение значения скорости регистрации собираемых фотонов достигло 4.8 раз в случае случайно расположенных наноантенн на поверхности ГММ.

3. На основе вытянутого волокна создан интерфейс сбора однофотонного излучения от NV центра, собирающий до трех раз больший поток фотонов в секунду по сравнению с установкой конфокального микроскопа.

4. Модификация времени жизни излучателя приводит к повышенным требованиям к детектору однофотонного излучения. Он должен обладать высоким временным разрешением, широким диапазоном скоростей счета и крайне низким уровнем шумов. С этой целью в рамках настоящей работы было выстроено взаимодействие с группой профессора Г.Н. Гольцмана (Московский педагогический государственный университет), в результате которого был разработан и протестирован автором диссертации однофотонный детектор нового поколения.

**Практическая значимость.**

Практическая значимость состоит в экспериментальном подтверждении ранее высказанной идеи [36] использования ГММ для широкополосного усиления квантовых излучателей.

Было проведено сравнение экспериментальных результатов работы по исследованию NV центров на поверхности ГММ с теоретическими расчетами в работе [37].

Результаты, полученные в ходе выполнения диссертации, могут служить основой для создания прототипа технологии изготовления квантовых интерфейсов.

Волоконно-интерфейсная часть имеет существенное значение в приложениях создания источников одиночных фотонов, а также сенсоров с нанометровой точностью позиционирования. Высокая эффективность сбора, показанная в эксперименте подтверждает теоретические расчеты.

В результате данной работы разработан и исследован сверхпроводящий детектор нового поколения, позволяющий регистрировать однофотонное из-

лучения перспективных центров окраски в алмазе и других квантовых систем в ближнем ИК диапазоне.

## Сведения об апробации результатов

Основные результаты диссертации докладывались на 12 научных конференциях: конференция по лазерам и электро-оптике CLEO, 8-13 июня 2014 г., г. Сан-Хосе, США; конференция по оптике и фотонике SPIE, 17-21 августа 2014 г., г. Сан-Диего, США; конференция по оптике и фотонике SPIE, 9-13 августа 2015 г., г. Сан-Диего, США; шестая Всероссийская молодежная конференция по фундаментальным и инновационным вопросам современной физики, 15-20 ноября 2015 г., г. Москва, Россия; конференция OPTO PHOTONICS WEST, SPIE, 13-18 февраля 2016 г., г. Сан-Франциско, США; конференция Photonics Europe, SPIE, 3-7 апреля, г. Брюссель, Бельгия; конференция по оптике и фотонике SPIE, 28 августа - 2 сентября 2016 г., г. Сан-Диего, США; десятый международный конгресс по современным электромагнитным материалам в микроволновом и оптическом диапазоне, 17-22 сентября 2016, г. Ханья, Крит, Греция; симпозиум по достижениям в электромагнитных исследованиях, 8-11 августа,2016 г., г. Шанхай, Китай; 3-я международная школа - конференция «Санкт-Петербург OPEN 2016: Оптоэлектроника, Фотоника Инженерия и наноструктуры», 28-30 марта, 2016 г., г. Санкт-Петербург, Россия; 25-ая международная конференция по атомной физике, 24-29 июля, 2016 г., г. Сеул, Южная Корея; 12-ая европейская конференция по атомам, молекулам и фотонам, ECAMP12, 5-9 Сентября, 2016 г., г. Франкфурт-на-Майне, Германия; 59-я научная конференция МФТИ с международным участием, 21–26 ноября 2016 г., г. Долгопрудный, Россия.

Основные результаты работы опубликованы в трех статьях в рецензируемых научных журналах, входящих в базу данных *Web of Science* и в 12 сборниках трудов конференций. Результаты работы были отражены в главе

книги «From Atomic to Mesoscale: The Role of Quantum Coherehce in Systems of Various Complexities», название главы *Enhancement of Single-Photon Sources with Metamaterials*. Автором был получен патент на полезную модель «Компактное устройство для генерации одиночных фотонов».

## Личный вклад автора

Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами, причем вклад диссертанта был определяющим. Все представленные в диссертации результаты получены лично автором.

## Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, благодарности и библиографии. Общий объем диссертации 97 страниц, включая 46 рисунков и 2 таблицы. Библиография включает 163 наименований.

## Защищаемые положения

1) Время жизни возбужденного состояния азотно-вакансного центра в наноалмазе уменьшается в среднем в 4 раза при его расположении на поверхности гиперболического метаматериала по сравнению с расположением на стекле. При этом скорость счета фотонов конфокальным микроскопом увеличивается в среднем в 1.8 раз, а максимальное усиление достигает 4.8 раза в случае использования случайных наноантенн.

2) Однофотонная статистика излучения с уровнем функции автокорреляции второго порядка в нуле равным 0.05 достигается в режиме ускорения излучения одиночного центра окраски за счет использования гиперболического метаматерила при регистрации сверхпроводящим детектором

нового поколения, разработанным специально для задач настоящей работы и обладающим высоким временным разрешением (около 50 пс), ультранизким уровнем шумов (до $10^{-2}$ отсчетов в секунду) и широким диапазоном скоростей счета (до 300 МГц).

3) Интерфейс азотно-вакансного центра в наноалмазе на основе вытянутого одномодового волокна с перетяжкой обеспечивает в 3 раза большую эффективность сбора фотонов, чем конфокальный микроскоп с объективом NA = 0.95.

4) Источником шума в волоконном канале сбора является люминесценция центров окраски GeO в сердцевине волокна. Подавление данного источника более чем в 4 раза достигается за счет контроля поляризации накачки, и насыщения оптических переходов на дефектах GeO в сердцевине с помощью временной модуляции накачивающего излучения.

## II. Содержание работы

Во **Введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

В **Главе 1 «Излучение центра окраски в алмазе»** наряду с описанием свойств центров окраски в алмазе приведено краткое описание исторического развития области однофотонного излучения, а также способов генерации и методов исследования однофотонного излучения.

В **п. 1.1** приводится классификация алмазов по следующим характеристикам: концентрация азота, изотопический состав, концентрация примесей. Приводится перечень и классификация наиболее интересных с точки зрения квантовых приложений центров окраски в алмазе. В заключении параграфа

приводится подробное описание NV дефекта в алмазе, используемого как однофотонный излучатель в данной работе.

В **п. 1.2** приводится краткое историческое описание исследований в области однофотонного излучения. Описывается функция автокорреляции второго порядка, отличия теплового, когерентного и субпуассоновского излучения в контексте автокорреляционной функции.

В **п. 1.3** изложены наиболее используемые методы генерации однофотонного излучения, в частности ослабление лазерного излучения. Ослабленное лазерное излучение не является однофотонным, однако часто используется вместо него в различных приложениях, параметрическая генерация перепутанных фотонов, одиночные квантовые системы (одиночные ионы, атомы, молекулы, квантовые точки, центры окраски), одиночный электрон в p-i-n переходе.

В **п. 1.4** описывается метод экспериментального определения однофотонного излучения путем измерения автокорреляционной функции второго порядка по схеме эксперимента Л. Манделя [38], в котором впервые был обнаружен провал в автокорреляционной функции второго порядка в излучении резонансной флюоресценции одиночного атома азота.

В **Главе 2 «Широкополосное усиление излучательной способности NV центра, расположенного на гиперболическом метаматериале (ГММ)»** описываются результаты работы по исследованию возможности широкополосного усиления излучения NV центра за счет использования гиперболического метаматериала. Метаматериал изготовлен методом эпитаксиального роста металл-диэлектрической супер кристаллической решетки, состоящий из совместимых с чип-технологиями материалов: нитрида титана, и нитрида алюминия скандия [39]. В ходе данной работы продемонстрировано существенное уменьшение времени жизни возбужденного состояния NV центра и увеличение числа собираемых фотонов в единицу времени. Результат

получен впервые и опубликован в статье [37], а также были представлены на различных международных и отечественных конференциях.

В **п. 2.1** описывается исследование излучения NV центра в алмазе расположенного на поверхности гиперболического метаматериала. В **п. 2.1.1** описывается концепция гиперболического метаматериала и идея широкополосного увеличения локальной плотности электромагнитных состояний за счет неограниченности поверхности показателя преломления в импульсном пространстве (рис. 1). В **п. 2.1.2** описываются оптические свойства используе-

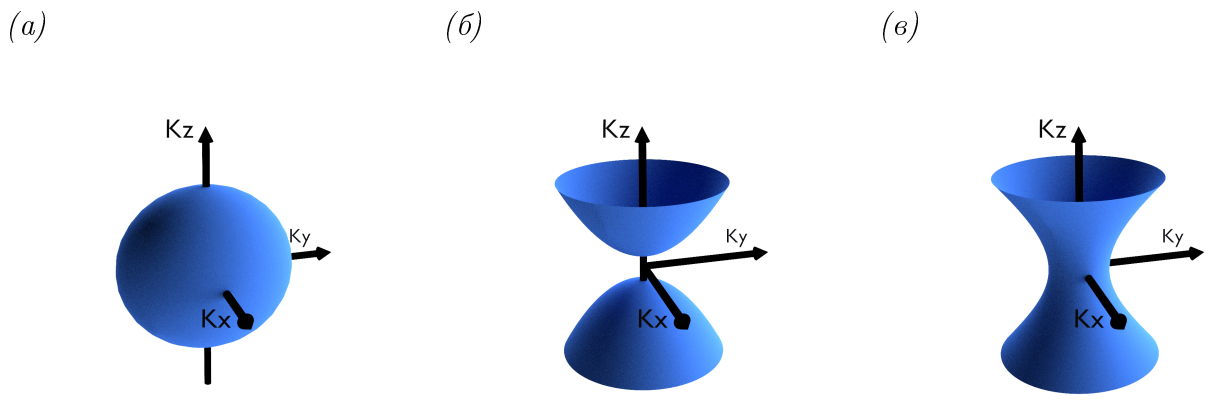


Рис. 1: Поверхность показателя преломления в импульсном пространстве для различных материалов: а) диэлектрическая среда, б) ГММ типа I, в) ГММ типа II. Неограниченность поверхности показателя преломления приводит к увеличению плотности электромагнитных мод, и увеличению скорости спонтанного излучения

мого в работе гиперболического метаматериала, в частности приводятся измеренные вещественные и мнимые составляющие константы диелектрической проницаемости используемых материалов, и на их основе приведен численный расчет распределения ближнего поля электрического диполя расположенного вблизи гиперболического метаматериала. В **п. 2.1.3** приводятся основные экспериментальные результаты, полученные в рамках данной работы. Кратко описывается методология исследования излучения одиночных NV дефектов расположенных на поверхности ГММ. Приведено сравнение распределения

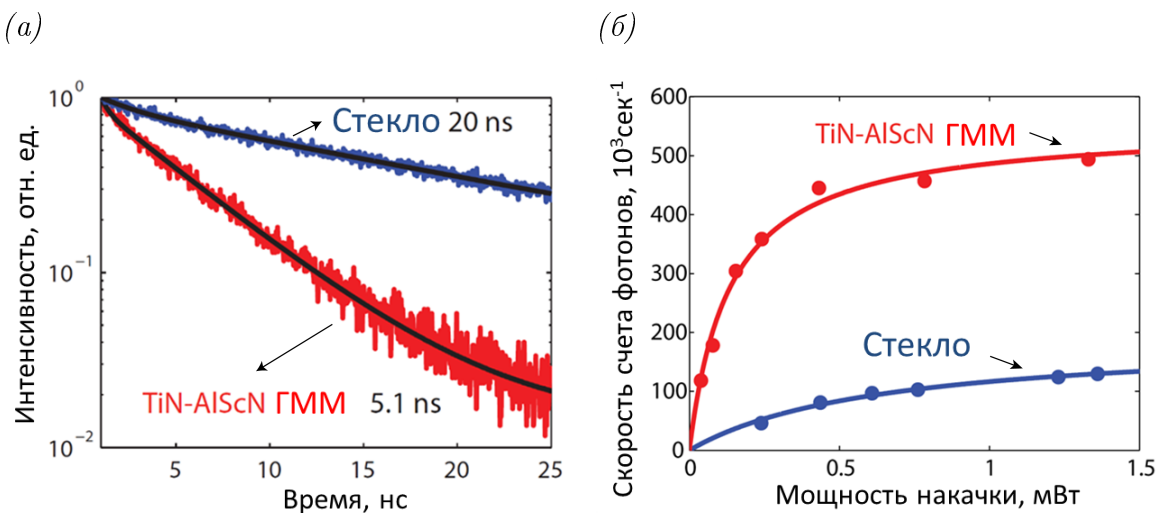


Рис. 2: Пример данных, учитываемых в статистике. Слева: кривая распада флюоресценции NV центра в наноалмазе размещенного на стеклянной подложке и на ГММ (указано стрелкой). Справа: кривая зависимости числа отсчетов от мощности накачки на стекле и на образце ГММ (указано стрелкой). Образец ГММ с толщинами слоев 10 нм.

времени жизни возбужденного состояния NV центров на ГММ с распределением времени жизни возбужденного состояния NV центров на стеклянных подложках (рис. 2). В результате уменьшение времени жизни возбужденного состояния в среднем составило 4, а максимальное увеличение числа отсчетов достигло 4.8 раз. Вместе с тем были выявлены оптимальные параметры ГММ для увеличения числа собираемых фотонов в секунду от NV центра в алмазе, в частности, было показано, что оптимальная толщина слоев ГММ составляет 10 нм.

в **п. 2.2** описана технология подготовки образцов для исследования в конфокальном микроскопе. В п. **2.2.1** описывается технология подготовки алмазных растворов, для использования при подготовке образцов. Разработанная в ходе работы технология включала в себя процессы очистки алмазов, создания водного раствора поливинилового спирта с алмазной суспензией. В п.

**2.2.2** описывается метод нанесения алмазной смеси на используемые подложки для создания образцов методом раскручивания подложки (spin-coating). В **п. 2.2.3** описывается способ подготовки (очистки) поверхности подложки к нанесению алмазной смеси.

В **п. 2.3** описывается установка конфокального микроскопа, используемая в рамках данной работы, построенный в лаборатории. В **п.2.3.1** описывается методология проведения измерений в режиме временной корреляции

В **Главе 3 «Однофотонный сверхпроводящий детектор для видимого и ближнего инфракрасного диапазона»** описывается исследование применимости сверхпроводящего однофотонного детектора нового поколения для задач детектирования однофотонного излучения усиленных одиночных квантовых систем. В **п. 3.1** описывается устройство детектора, и приводятся главные характеристики детектора, измеренные в ходе его тестирования в рамках данной работы (рис. 3)

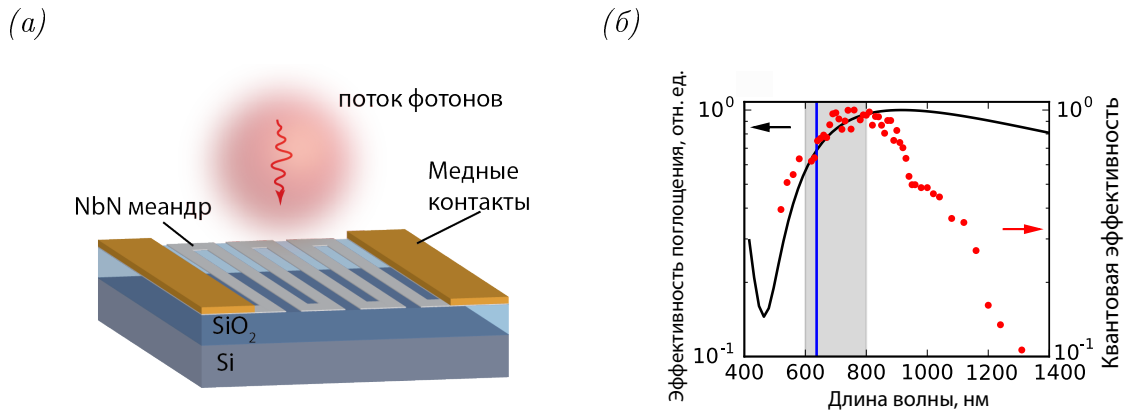


Рис. 3: а) Схема работы чувствительного элемента сверхпроводящего детектора. б) Точками - спектральная зависимость квантовой эффективности детектора, кривая - зависимость поглощения фотона в детекторе

В **п. 3.2** описывается исследование характеристик детектора при его использовании на максимальных скоростях счета фотонов. В **п. 3.3** описывает-

ся тестирование детектора в реальном эксперименте. Исследуется одиночный NV центр размещенный на поверхности ГММ. Усиленный дефекта обладает меньшим временем жизни (рис. 4). Производится сравнение результата из-

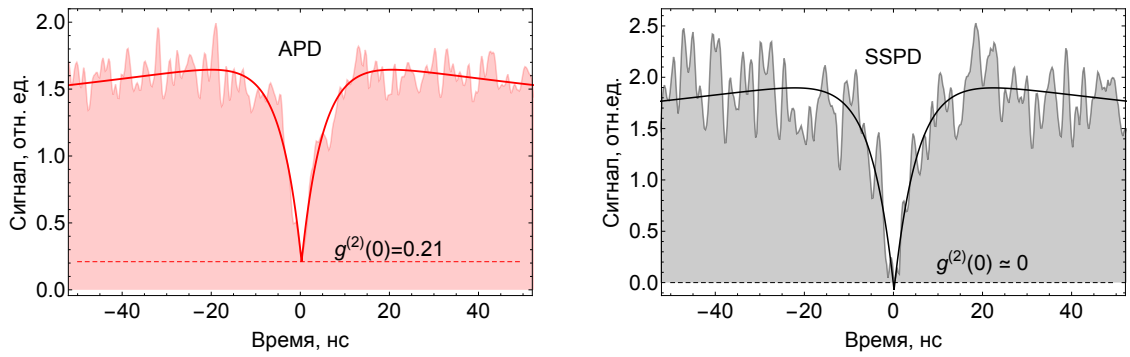


Рис. 4: Сравнение автокорреляционной функции с одного и того же NV центра, полученной с помощью лавинного фотодиода, и с помощью сверхпроводящего фотодиода. Времена накопления идентичны

мерения автокорреляционной функции второго порядка измеренного парой сверхпроводящих детекторов с результатом, измеренным парой коммерческих лавинных фотодиодов. В **п 3.4** приводятся основные выводы исследования.

В **Главе 4 «Создание оптоволоконного интерфейса для NV центра»** описывается исследование сбора излучения от одиночных NV центров в наноалмазе с помощью вытянутого одномодового волокна.

В **п.4.1** описывается вытянутое волокно, и его преимущества в качестве основы для создания интерфейса, такие как высокая числовая апертура, и эффективность сбора излучения от ненаправленных источников.

В **п.4.2** описывается технология вытягивания оптического волокна, используемая в данной работе.

В **п.4.3** описывается численное моделирование взаимодействия вытянутого волокна и одиночного диполя, расположенного вблизи волокна. Целью данного моделирования была оптимизация диаметра перетяжки волокна, для максимизации эффективности сбора излучения. Было обнаружено, что опти-

мальным диаметром волокна для длины волны около 700 нанометров является диаметр 450-500 нм.

В **п.4.4** описывается оптический эксперимент по исследованию сбора излучения одиночного NV центра при помощи вытянутого волокна до диаметра 500 нм (рис. 5). В результате эксперимента, удалось собрать однофотонное из-

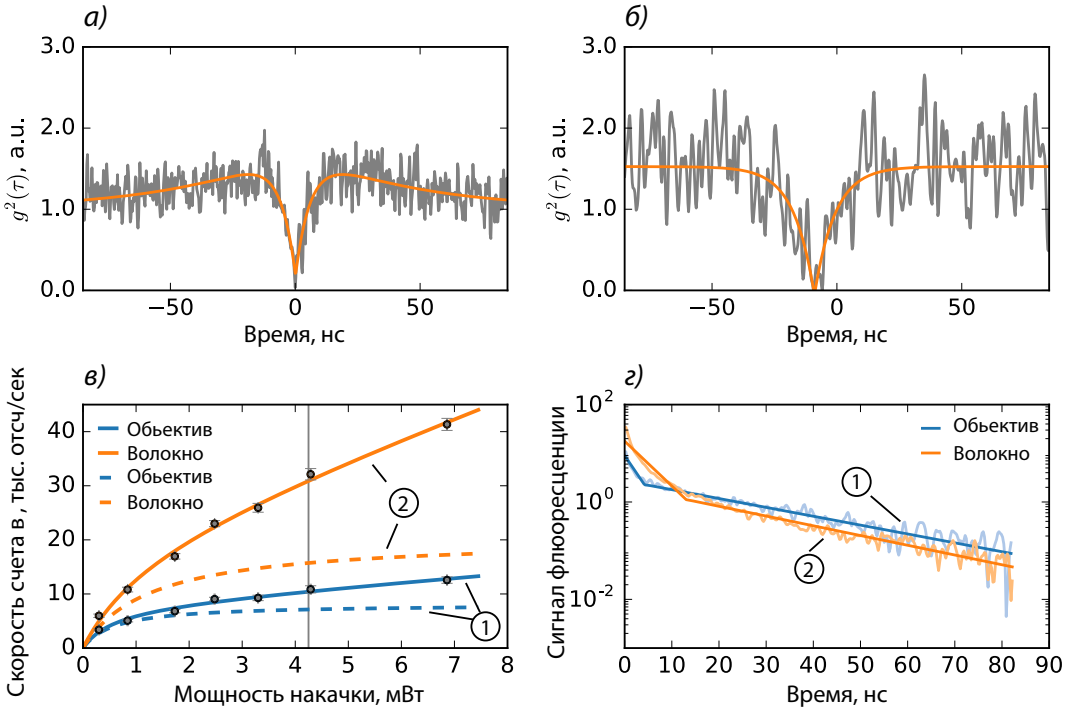


Рис. 5: Экспериментальные результаты а) Автокорреляционная функция $g^2(\tau)$ одиночного Nv центра на поверхности волокна, собранная при помощи объектива. б)Автокорреляционная функция $g^2(\tau)$ одиночного Nv центра на поверхности волокна, собранная при помощи волокна. в) Кривая насыщения для каналов сбора оранжевая (2) - сбор при помощи волокна, синяя (1) - при помощи объектива. Пунктирная линия - с учетом вычета линейной компоненты г) Статистика времени жизни NV центра, собранная двумя разными способами. (1 - объектив, 2- волокно)

лучение NV центра напрямую через волоконный интерфейс. Число отсчетов в насыщении в такой реализации оказались в 3 раза большими по сравнению со сбором через высокоапертурный объекти (NA = 0.95). При этом замечает-

ся, что в случае сбора через волокно замечается увеличенное число шумовой составляющей излучения.

В **п. 4.5** описывается детальное исследование шума, возникающего в интерфейсе, и способов борьбы с ним. В результате исследований удалось уменьшить количестве шума более чем в 4 раза.

В **п. 4.6** описывается методика подготовки раствора наноалмазов, разработанная в ходе выполнения работы. В **п. 4.6.1** описывается метод химической функционализации поверхности наноалмазов.

В **п. 4.7** описываются способы нанесения ансамбля алмазов на не плоские поверхности. В частности, в **п. 4.7.1** описывается способ нанесения алмазов на оптическое волокно, а в **п. 4.7.2** методы нанесения наноалмазов на вытянутое волокно.

## III. Основные результаты

**В Заключении** диссертационной работы приведены основные научные результаты работы:

1. Проведены исследования излучательных свойств NV центр в наноалмазах на поверхности ГММ состоящего из 10, 20 пар попеременных слоев AlScN/TiN толщиной 5, 10 и 20 нм. Экспериментально показано, что время жизни возбужденного состояния NV центра в среднем уменьшается в 4 раз, а скорость счета одиночных фотонов в среднем увеличивается в 1.8 раз по сравнению с NV центром в наноалмазе, расположенным на стеклянной подложке. Также было обнаружено, что статистика скорости счета фотонов имеет две группы по скорости счета. Первая группа соответствует теоретическим расчетам и имеет в среднем увеличение скорости счета в 1.8 раз. Вторая группа имеет среднее значение увеличения скорости счета в 4.8 раз (более 500 000 фотонов в секунду). Этот факт объясняется наличием дефектов поверхности ГММ

вблизи излучателей.

2. Реализована технология адиабатического вытягивания волокна, которая позволила получить пропускание волокна с перетяжкой до 95 %. При этом диаметр перетяжки волокна составлял 400 - 600 нм, при длине около трех сантиметров. Разработана технология создания оптического интерфейса за счет размещения отобранного заранее одиночного наноалмаза с NV центром на перетяжке вытянутого оптического волокна. Проведены исследования эффективности работы интерфейса и выбраны оптимальные условия его работы. В условиях эксперимента достигнута скорость счета одиночных фотонов в канале интерфейса в 3 раза больше чем в канале сбора конфокального микроскопа с объективом NA = 0.95. Проведенный анализ показал, что указанную скорость можно увеличить за счет использования более совершенных волоконных компонентов до 5 раз. Установлено, что основным источником шумов в интерфейсе является люминесценция GeO центров окраски в центральной жиле волокна, вызванная излучением накачки, рассеянного на наноалмазе и захваченного модой волокна. Анализ показал, что снизить уровень можно в более 10 раз используя наноалмазы размером менее 20 нм, в 1.5-2 раза за счет выбора поляризации накачки, и в 2 раза за счет тушения люминесценции за счет предварительного импульса мощного излучения.

3. Исследованы криогенные сверхпроводящие однофотонные детекторы нового поколения на основе нитрида ниобия при 4 градусах Кельвина с подводом излучения по одномодовому волноводу. Показано, что при квантовой эффективности 0.2 провал в автокорреляционной функции был до 0.05 и оказался глубже в 2 раза, чем аналогичный провал при использовании лавинных фотодетекторов с квантовой эффективностью 0.6. Максимальная скорость счета при использовании криогенных сверхпроводящих детекторов в 20 раз превосходит таковую для лавинных фотодетекторов.

# IV. Список публикаций автора по теме диссертации

## Научные журналы, входящие в базу данных *Web of Science*

1. Enhancement of single-photon emission from nitrogen-vacancy centers with TiN/(Al,Sc)N hyperbolic metamaterial, M. Y. Shalaginov, V. V. Vorobyov, J. Liu, M. Ferrera, A. V. Akimov, A. Lagutchev, V. M. Shalaev, Laser Photon. Rev., Vol. 9, Issue 1, pp. 120–127 (2015)

2. Coupling of single NV Center to adiabatically tapered optical single mode fiber, V. V. Vorobyov, V. V. Soshenko, S. V. Bolshedvorskii, J. Javadzade, N. Lebedev, A. N. Smolyaninov, V. N. Sorokin, A. V. Akimov, Eur. Phys. J. D, Vol. 12, Issue 70, pp. 269-277 (2016)

3. Superconducting detector for visible and near-infrared quantum emitters, V. V. Vorobyov, A. Y. Kazakov, V. V. Soshenko, A. A. Korneev, M. Y. Shalaginov, S. V. Bolshedvorskii, V. N. Sorokin, A. V. Divochiy, Y. B. V, K. V. Smirnov, B. M. Voronov, V. M. Shalaev, A. V. Akimov, and G. N. Goltsman, Opt. Mat. Expr., Vol. 7, Issue 2, pp. 513-526 (2017)

## Тезисы докладов в сборниках трудов конференций

1. «Coupling of single NV center to the tapered optical fiber», V. V. Vorobyov, V. V. Soshenko, S. V. Bolshedvorskii, V. N. Sorokin, A. N. Smolyaninov, A. V. Akimov,, Proc. SPIE 9920, Active Photonic Materials VIII, 992012 (16 September 2016); doi: 10.1117/12.2237844; http://dx.doi.org/10.1117/12.2237844

2. «Towards light-matter interface for the NV center in diamond», (invited), Vadim V. Vorobyov, Vladimir Soshenko, Stepan Bolshedvorskii, Javid Javadzade, Nikolay Lebedev, Andrey N. Smolyaninov, Vadim N. Sorokin, Alexey V. Akimov, 2016 Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS), Shanghai, 2016, pp. 2578-2578. doi: 10.1109/PIERS.2016.7735052

3. «New material platforms and metasurface designs for quantum nanophotonics» (invited), M. Y. Shalaginov, S. Bogdanov, R. Chandrasekar, Zh. Wang, V. Vorobyov, J. Liu, X. Meng, A. S. Lagutchev, A. V. Kildishev, J. Irudayaraj, A. Boltasseva, A. V. Akimov, and V. M. Shalaev, Metamaterials 2016, Crete, Greece, September 17-22, 2016, pp. 79-80

4. «Toward efficient fiber-based quantum interface», V. Soshenko, V. V. Vorobyov, S. Bolshedvorsky, N. Lebedev, A. Smolyaninov, A. V. Akimov $ V. Sorokin, SPIE Photonics Europe, Brussels, Belgium, April 29, 2016, pp. 392-393

5. «Quantum photonics with color centers in diamond and nanophotonic structures» (invited), S. Bogdanov, M. Y. Shalaginov, J. Liu, V. V. Vorobyev, P. V. Kapitanova, M. Ferrera, A. S. Laguchev, A. V. Akimov, P. A. Belov, A. V. Kildishev, J. Irudayaraj, A. Boltasseva, V. M. Shalaev, SPIE Photonics West OPTO, San Francisco, CA, USA, February 13-18, 2016, pp.219-220

6. «Fiber Integrated Single Photon Source Based on NV Center in Diamond», Stepan Bolshedvorskii, Vadim Vorobyov, Vladimir Soshenko, Javid Javadzade, Nikolay Lebedev, Vadim Sorokin, Andrey Smolyaninov, Alexey Akimov, The 25th International Conference on Atomic Physics (ICAP 2016), Seoul, Korea, 24-29 July 2016, p. 413

7. «Robust Optical Fiber Interface for NV Center Nanodiamonds», Stepan Bolshedvorskii, Vadim Vorobyov, Vladimir Soshenko, Javid Javadzade, Nikolay Lebedev, Vadim Sorokin, Andrey Smolyaninov, Alexey Akimov, 12th European Conference on Atoms Molecules and Photons (ECAMP12), Frankfurt, Germany, 5-9 September 2016, p.313

8. «Волоконный интерфейс для NV центров в наноалмазах», С.В. Большедворский, В.В. Воробьев, В.В. Сошенко, В.Н. Сорокин, А.В. Акимов, 59-я научная конференция МФТИ с международным участием ,Москва,

Россия, 21-26 ноября 2016 года.
Доступно по ссылке: http://conf59.mipt.ru/static/reports_pdf/2283.pdf

9. «Создание эффективных квантовых интерфейсов на базе NV-центров в алмазе» В. В. Воробьев, В. Сошенко, С. Большедворский VI Всероссийская молодежная конференция по фундаментальным и инновационным вопросам современной физики, ФИАН, Москва, 15-20 ноября 2015 г., стр. 30

10. «Nitrogen-vacancy single-photon emission enhanced with nanophotonic structures (Presentation Recording)», Vladimir M. Shalaev, Mikhail Y. Shalaginov, Vadim V. Vorobyov, Simeon Bogdanov, Alexey V. Akimov, Alexei Lagutchev, Alexander V. Kildishev, Alexandra Boltasseva, Proc. SPIE 9544, Metamaterials, Metadevices, and Metasystems 2015, 95440L (5 October 2015);
doi: 10.1117/12.2190251; http://dx.doi.org/10.1117/12.2190251

11. «Single photon source based on NV center in nanodiamond coupled to TiN-based hyperbolic metamaterial», M. Y. Shalaginov, V. V. Vorobyov, J. Liu, M. Ferrera, A. V. Akimov, A. Lagutchev, A. N. Smolyaninov, V. V. Klimov, J. Irudayaraj, A. V. Kildishev, A. Boltasseva, V. M. Shalaev, Conference on Lasers and Electro-Optics 2014, San Jose, CA, USA, June 8-13, 2014, доступно по ссылке:
https://doi.org/10.1364/CLEO_ AT.2014.JTu4A.38

12. «Single-photon source based on NV center in nanodiamond coupled to TiN-based hyperbolic metamaterial» (invited), V. M. Shalaev, M. Y. Shalaginov, V. V. Vorobyov, J. Liu, M. Ferrera, A. V. Akimov, A. Lagutchev, A. N. Smolyaninov, V. V. Klimov, J. Irudayaraj, A. V. Kildishev, A. Boltasseva, SPIE Optics + Photonics, San Diego, CA, USA, August 17-21, 2014, p. 5

### Другие публикации

1. «Компактное устройство для генерации одиночных фотонов», В. В. Воробьев, В. В. Сошенко , А. В. Акимов, А. Н. Смолянинов, патент на полезную модель №161214, приоритет от 10.02.2015.

2. M. Y. Shalaginov, S. Bogdanov, V. V. Vorobyov, A. S. Lagutchev, A. V. Kildishev, A. V. Akimov, A. Boltasseva, and V. M. Shalaev, «Enhancement of Single-Photon Sources with Metamaterials», chapter in book «From Atomic to Mesoscale: The Role of Quantum Coherehce in Systems of Various Complexities»; Eds: S. A. Malinovskaya and I. Novikova, World Scientific Publishing Co. PTE. LTD, ISBN: 978-981-4678-69-8, pp. 123-148 (2015)

## Цитированная литература


1. Bennett C. H., Brassard G. Quantum cryptography: Public key distribution and coin tossing // International Conference on Computers, Systems & Signal Processing, Bangalore, India, Dec 9-12, 1984. 1984. P. 175–179.
2. Wootters W. K., Zurek W. H. A single quantum cannot be cloned // Nature. 1982. Vol. 299, no. 5886. P. 802–803.
3. Ursin R., Tiefenbacher F., Schmitt-Manderbach T. et al. Entanglement-based quantum communication over 144 km // Nature physics. 2007. Vol. 3, no. 7. P. 481–486.
4. Childress L., Taylor J., Sørensen A. S., Lukin M. Fault-tolerant quantum communication based on solid-state photon emitters // Physical review letters. 2006. Vol. 96, no. 7. P. 070504.
5. Briegel H.-J., Dür W., Cirac J. I., Zoller P. Quantum repeaters: the role of imperfect local operations in quantum communication // Physical Review Letters. 1998. Vol. 81, no. 26. P. 5932.

6. Van Loock P., Ladd T., Sanaka K. et al. Hybrid quantum repeater using bright coherent light // Physical review letters. 2006. Vol. 96, no. 24. P. 240501.
7. Jiang L., Taylor J. M., Nemoto K. et al. Quantum repeater with encoding // Physical Review A. 2009. Vol. 79, no. 3. P. 032325.
8. Kurtsiefer C., Mayer S., Zarda P., Weinfurter H. Stable solid-state source of single photons // Physical review letters. 2000. Vol. 85, no. 2. P. 290.
9. Eisaman M., Fan J., Migdall A., Polyakov S. Invited review article: Single-photon sources and detectors // Review of scientific instruments. 2011. Vol. 82, no. 7. P. 071101.
10. Sipahigil A., Evans R. E., Sukachev D. D. et al. Single-Photon Switching and Entanglement of Solid-State Qubits in an Integrated Nanophotonic System // arXiv preprint arXiv:1608.05147. 2016.
11. Heshami K., England D. G., Humphreys P. C. et al. Quantum memories: emerging applications and recent advances // Journal of Modern Optics. 2016. P. 1–24.
12. Ingarden R. S. Quantum information theory // Reports on Mathematical Physics. 1976. Vol. 10, no. 1. P. 43 – 72.
13. Feynman R. P. Simulating Physics with Computers // International Journal of Theoretical Physics. 1982. Vol. 217, no. 6.
14. Schaller R. R. Moore's law: past, present and future // IEEE spectrum. 1997. Vol. 34, no. 6. P. 52–59.
15. Shor P. W. SIAM // J. Computing. 1997. Vol. 26. P. 1484.
16. O'Malley P., Babbush R., Kivlichan I. et al. Scalable Quantum Simulation of Molecular Energies // Physical Review X. 2016. — jul. Vol. 6, no. 3. P. 031007.
17. Monz T., Schindler P., Barreiro J. T. et al. 14-qubit entanglement: Creation and coherence // Physical Review Letters. 2011. Vol. 106, no. 13. P. 130506.
18. Barreiro J. T., Müller M., Schindler P. et al. An open-system quantum simulator with trapped ions // Nature. 2011. Vol. 470, no. 7335. P. 486–491.

19. Lucero E., Barends R., Chen Y. et al. Computing prime factors with a Josephson phase qubit quantum processor // Nature Physics. 2012. Vol. 8, no. 10. P. 719–723.
20. Majer J., Chow J., Gambetta J. et al. Coupling superconducting qubits via a cavity bus // Nature. 2007. Vol. 449, no. 7161. P. 443–447.
21. Politi A., Matthews J. C. F., O'Brien J. L. Shor's Quantum Factoring Algorithm on a Photonic Chip // Science. 2009. Vol. 325, no. 5945. P. 1221–1221. http://science.sciencemag.org/content/325/5945/1221.full.pdf.
22. Wrachtrup J., Jelezko F. Processing quantum information in diamond // Journal of Physics: Condensed Matter. 2006. Vol. 18, no. 21. P. S807.
23. Kucsko G., Maurer P. C., Yao N. Y. et al. Nanometre-scale thermometry in a living cell // Nature. 2013. — jul. Vol. 500, no. 7460. P. 54–58.
24. Momenzadeh S. A., de Oliveira F. F., Neumann P. et al. Thin Circular Diamond Membrane with Embedded Nitrogen-Vacancy Centers for Hybrid Spin-Mechanical Quantum Systems // Physical Review Applied. 2016. Vol. 6, no. 2. P. 024026.
25. Dragan A., Fuentes I., Louko J. Quantum accelerometer: Distinguishing inertial Bob from his accelerated twin Rob by a local measurement // Physical Review D. 2011. Vol. 83, no. 8. P. 085020.
26. Jensen K., Budvytyte R., Thomas R. A. et al. Non-invasive detection of animal nerve impulses with an atomic magnetometer operating near quantum limited sensitivity // Scientific Reports. 2016. — jul. Vol. 6. P. 29638.
27. Beams R., Smith D., Johnson T. W. et al. Nanoscale fluorescence lifetime imaging of an optical antenna with a single diamond NV center // Nano letters. 2013. Vol. 13, no. 8. P. 3807–3811.
28. Gustavson T., Landragin A., Kasevich M. Rotation sensing with a dual atom--interferometer Sagnac gyroscope // Classical and Quantum Gravity. 2000. Vol. 17, no. 12. P. 2385.

29. Ajoy A., Cappellaro P. Stable three-axis nuclear-spin gyroscope in diamond // Physical Review A. 2012. Vol. 86, no. 6. P. 062104.
30. Canuel B., Leduc F., Holleville D. et al. Six-axis inertial sensor using cold-atom interferometry // Physical Review Letters. 2006. Vol. 97, no. 1. P. 010402.
31. Ludlow A. D., Boyd M. M., Ye J. et al. Optical atomic clocks // Reviews of Modern Physics. 2015. Vol. 87, no. 2. P. 637.
32. Jelezko F., Wrachtrup J. Single defect centres in diamond: A review // physica status solidi (a). 2006. Vol. 203, no. 13. P. 3207–3225.
33. Chu Y., Lukin M. D. Quantum optics with nitrogen-vacancy centers in diamond // arXiv preprint arXiv:1504.05990. 2015.
34. Burek M. J., de Leon N. P., Shields B. J. et al. Free-standing mechanical and photonic nanostructures in single-crystal diamond // Nano letters. 2012. Vol. 12, no. 12. P. 6084–6089.
35. Balasubramanian G., Neumann P., Twitchen D. et al. Ultralong spin coherence time in isotopically engineered diamond // Nature materials. 2009. Vol. 8, no. 5. P. 383–387.
36. Poddubny A., Iorsh I., Belov P., Kivshar Y. Corrigendum: Hyperbolic metamaterials // Nature Photonics. 2013. Vol. 8, no. 1. P. 78–78.
37. Shalaginov M. Y., Vorobyov V. V., Liu J. et al. Enhancement of single-photon emission from nitrogen-vacancy centers with TiN/(Al,Sc)N hyperbolic metamaterial // Laser & Photonics Reviews. 2015. — jan. Vol. 9, no. 1. P. 120–127.
38. Kimble H. J., Dagenais M., Mandel L. Photon Antibunching in Resonance Fluorescence // Phys. Rev .Lett. 1977. Vol. 39. P. 691.
39. Saha B., Naik G. V., Saber S. et al. TiN/(Al,Sc)N metal/dielectric superlattices and multilayers as hyperbolic metamaterials in the visible spectral range // Phys. Rev. B. 2014. — Sep. Vol. 90. P. 125420.