

На правах рукописи

ШУХИН Анатолий Александрович

**СПОНТАННОЕ ЧЕТЫРЁХВОЛНОВОЕ СМЕЩЕНИЕ
И ПРОТИВОНАПРАВЛЕННОЕ СПОНТАННОЕ
ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ РАССЕЯНИЕ В ОПТИЧЕСКИХ
ВОЛНОВОДАХ**

01.04.05 – Оптика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Казань – 2020

Работа выполнена в лаборатории нелинейной оптики обособленного структурного подразделения ФИЦ КазНЦ РАН «Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского».

Научный руководитель: **Калачёв Алексей Алексеевич**,
доктор физико-математических наук,
профессор РАН, зам. директора по научной
работе ФИЦ КазНЦ РАН, руководитель
Казанского физико-технического института
им. Е.К. Завойского ФИЦ КазНЦ РАН,
заведующий кафедрой оптики и нанофотоники
Института физики ФГАОУ ВО «Казанский
(Приволжский) федеральный университет».

Официальные оппоненты: **Сазонов Сергей Владимирович**,
доктор физико-математических наук,
профессор, начальник отдела
экспериментальных исследований
конденсированных сред Курчатовского
ядерно-физического комплекса НИЦ
«Курчатовский институт».

Катамадзе Константин Григорьевич,
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник лаборатории
физики квантовых компьютеров ФГБУН
«Физико-технологический институт им. К.А.
Валиева Российской академии наук».

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Московский государственный
университет имени М.В.Ломоносова» (МГУ), г.
Москва**

Защита состоится «17» декабря 2020 г. в 15 ч. 40 мин. на
заседании диссертационного совета КФУ.01.02 при ФГАОУ ВО «Казанский
(Приволжский) федеральный университет» по адресу: 420008 г. Казань ул.
Кремлевская, д. 16а, ауд. 110.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке
им. Н.И. Лобачевского Казанского (Приволжского) федерального
университета (Казань, Кремлевская, д. 35). Электронная версия размещена
на официальных сайтах ВАК при Министерстве науки и высшего
образования РФ (vak2.ed.gov.ru) и Казанского (Приволжского) федерального
университета (kpfu.ru).

Автореферат разослан «__» _____ 2020 г.

Ученый секретарь диссертационного совета:

д.ф.-м.н., профессор

Камалова Д.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. В настоящее время много внимания уделяется разработкам источников неклассических состояний света. Суперпозиционные состояния одиночных фотонов и перепутанные состояния нескольких фотонов составляют основу существующих квантово-оптических технологий, а источники однофотонных и двухфотонных состояний являются необходимыми элементами для работы большинства протоколов в квантовой оптике и квантовой информатике [1, 2].

Одним из перспективных подходов для решения данной задачи является использование нелинейно-оптических эффектов, таких как спонтанное параметрическое рассеяние (СПР) и спонтанное четырёхволновое смешение (СЧВС). Благодаря возможностям перестраивать длину волны излучения в широких пределах, генерировать спектрально-ограниченные волновые пакеты при комнатной температуре, а также получать однофотонные состояния с оповещением, СПР и СЧВС являются одними из самых широко используемых явлений в современной квантовой и нелинейной оптике [3].

К источникам неклассических состояний света предъявляются различные требования, к числу которых, в частности, относятся высокая эффективность генерации, а также малые потери при совмещении с телекоммуникационными сетями и оптическими интегральными схемами. Многообещающим подходом для удовлетворения данным требованиям является использование оптических волноводных структур в качестве нелинейных сред [4, 5]. В случае СПР роль такой среды выполняют оптические волноводы, расположенные в кристалле, а в случае СЧВС – оптические нановолокна или фотонно-кристаллические волокна. Благодаря малому поперечному сечению и геометрии мод, такие структуры позволяют на порядки повысить эффективность нелинейных процессов и идеальным образом согласовывать источники квантовых состояний света с оптическими интегральными схемами и телекоммуникационными сетями. К тому же, наличие значительного эванесцентного поля у оптических нановолокон и пустот у фотонно-кристаллических волокон делает данные среды перспективными с точки зрения совмещения источника квантовых состояний света и квантовой памяти в одном устройстве.

Если говорить о перспективе совмещения источников и квантовой памяти, то важно, чтобы генерируемые состояния обладали малой спектральной шириной, т.к. узкополосные однофотонные волновые пакеты суб-ГГц или ГГц спектральной ширины могут эффективно взаимодействовать с атомными системами и поэтому являются неотъемлемой частью реализации протоколов квантовых вычислений и квантовой связи, включающих оптическую квантовую память [6].

Таким образом, создание источников однофотонных и двухфотонных состояний на основе нелинейных явлений в оптических волноводных структурах является актуальным направлением в квантовой оптике и квантовой информатике. Такой подход в перспективе может привести к созданию источников, которые бы генерировали квантовые состояния с заранее заданными характеристиками и в заданные моменты времени, что является необходимым условием для реализации бозонной выборки, обмена перепутыванием, создания полномасштабного квантового интернета и др. [7].

Другой областью квантово-оптических технологий, где квантовые состояния света играют ключевую роль, являются квантовые сенсоры [8]. Наличие у излучения свойств, отсутствующих в классической оптике, позволяет создать сенсоры нового типа и повысить чувствительность при измерении различных физических величин, к числу которых относится показатель преломления. Измерение показателя преломления остаётся важной задачей в различных областях науки и техники, поскольку даёт важную информацию о качественном и количественном составе исследуемой среды. Разработка методов, позволяющих с высокой чувствительностью определять показатель преломления сред за счёт использования квантовых состояний света, является актуальной научно-практической задачей.

Настоящая диссертация посвящена решению задач, отвечающих указанным тенденциям в развитии современных квантовых технологий.

Целью данной диссертационной работы является создание источников однофотонных и перепутанных двухфотонных состояний на основе противонаправленного спонтанного параметрического рассеяния в периодически модулированных волноводах титанил-фосфата калия и на основе спонтанного четырёхволнового смешения в оптических нановолокнах и фотонно-кристаллических волокнах, а также разработка метода определения показателя преломления сред на основе спонтанного четырёхволнового смешения в оптических нановолокнах.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. С помощью математического моделирования рассчитать основные величины и функции, характеризующие спонтанное параметрическое рассеяние в периодически модулированном волноводе титанил-фосфата калия и спонтанное четырёхволновое смешение в оптических нановолокнах и фотонно-кристаллических волокнах: эффективные показатели преломления на различных длинах волн и при различных параметрах нелинейных сред, модовые функции, функции фазового синхронизма, совместную спектральную интенсивность, разложение Шмидта, провал Хонга-Оу-Манделя.
2. Экспериментально исследовать противонаправленный режим

СПР в волноводе РРКТР. Определить спектральную ширину противонаправленного режима СПР в указанном волноводе. Измерить корреляционные функции рассеянного поля.

3. Изготовить серию идентичных оптических нановолокон. Измерить их профили и пропускание. Экспериментально исследовать СЧВС в оптических нановолокнах. Измерить основные функции, характеризующие источник однофотонных и коррелированных двухфотонных состояний: кросс-корреляционную функцию, автокорреляционную функцию с оповещением, совместную спектральную интенсивность бифотонного поля.
4. С помощью математического моделирования рассчитать совместную спектральную амплитуду бифотонного поля, рождающегося в нановолокне при различной величине показателя преломления среды, окружающей нановолокно. Рассчитать чувствительность рефрактометрического метода.

Положения, выносимые на защиту:

1. В противонаправленном режиме спонтанного параметрического рассеяния наблюдается сужение спектра генерируемых однофотонных состояний.
2. В режиме спонтанного четырёхволнового смешения в нерегулярных оптических нановолокнах наблюдается генерация частотно-перепутанных двухфотонных состояний. Нерегулярность диаметра оптических нановолокон приводит к модуляции спектра бифотонного поля. Оптимизация параметров накачки и профиля нерегулярного нановолокна позволяет с высокой эффективностью генерировать факторизованные по частоте двухфотонные состояния.
3. Спонтанное четырёхволновое смешение в оптических нановолокнах позволяет с высокой чувствительностью регистрировать изменение показателя преломления окружающей среды в ИК области спектра, детектируя фотоны только в видимой области спектра.

Научная новизна:

1. Впервые экспериментально реализован противонаправленный режим спонтанного параметрического рассеяния, который позволяет генерировать узкополосные однофотонные состояния, необходимые для эффективного взаимодействия излучения с атомными системами для квантовой связи и квантовых вычислений.
2. Предложен метод определения показателя преломления сред, основанный на спонтанном четырёхволновом смешении в оптическом нановолокне, который позволяет исследовать вещества в ИК области

спектра, регистрируя фотоны в видимой области спектра. Тем самым метод позволяет избавиться от низкоэффективной и дорогостоящей аппаратуры для измерения спектров в ИК области.

3. Впервые произведен расчёт функции совместной спектральной интенсивности для нерегулярных оптических нановолокон, что позволяет учесть реальный профиль оптических нановолокон, которые получают при изготовлении.
4. Впервые измерена гистограмма автокорреляции с оповещением и функция совместной спектральной интенсивности бифотонного поля, генерируемого в нерегулярных оптических нановолокнах, что позволяет более полно охарактеризовать источник однофотонных и перепутанных двухфотонных состояний для его дальнейшего использования.

Научная и практическая значимость. Разработан и запатентован метод измерения показателя преломления газообразных, жидких и твердых тел. На основе данного метода может быть создан высокочувствительный сенсор для различных научно-практических задач.

Развита методика расчета спектра бифотонного поля, рождающегося в процессе спонтанного четырёхволнового смешения в нерегулярных оптических волокнах. Данная методика позволяет учитывать интерференционные эффекты, возникающие при наблюдении нелинейных явлений волноводных структурах с переменным сечением, а также способствует более глубокому пониманию процессов, происходящих в нерегулярных волноводах.

Созданы источники однофотонных и коррелированных двухфотонных состояний света на основе спонтанного четырёхволнового смешения и спонтанного параметрического рассеяния. Данные источники могут быть использованы в квантовой информатике и квантовой оптике.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием современного сертифицированного экспериментального оборудования, воспроизводимостью экспериментальных результатов, комплексным сочетанием экспериментальных методов исследования с теоретическими расчетами, многократной апробацией результатов на научных семинарах и конференциях. Результаты находятся в соответствии с результатами, полученными другими авторами.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на международных и всероссийских конференциях: **XVIII–XIX** Международная молодежная научная школа «Когерентная оптика и оптическая спектроскопия» (КФУ, Казань, 2014–2015 гг.); **XI–XII** Конференция молодых учёных «Молодёжь и инновации Татарстана», (КФТИ, Казань, 2014–2015 гг.); **IX–X** семинар памяти Д.Н. Клышко

(МГУ, Москва; Завидово, Московская обл., 2015–2017 гг.); **XII–XIII** международные чтения по квантовой оптике (МПГУ, Москва, 2015 г.; ВлГУ, Владимир, 2019 г.); **XIII** Всероссийский молодежный «Самарский конкурс-конференция научных работ по оптике и лазерной физике» (ФИАН, Самара, 2015 г.); **XII** международная научная школа-семинар «Фундаментальные исследования и инновации: нанооптика, фотоника и когерентная спектроскопия» (Яльчик, Йошкар-Ола, 2017 г.); **XI** международный симпозиум по фотонному эхо и когерентной спектроскопии (Светлогорск, 2017 г.); **IV** Российско-германско-французский симпозиум по лазерной физике (КАИ, Казань, 2018 г.); **VIII** Российско-китайский симпозиум по лазерной физике и фотонике (Казань, 2018 г.); **V** международная конференция по квантовым технологиям, (РКЦ, Москва, 2019 г.); **IX** Российско-германская неделя молодого учёного, (МГУ, Москва, 2019 г.);

Публикации по теме научной работы. По материалам диссертации опубликовано 19 работ. Из них 6 статей в журналах, рекомендованных ВАК, 12 – в сборниках тезисов и трудах конференций, получен патент на изобретение. Список публикаций по теме диссертации приведён в конце автореферата.

Личный вклад автора. Все приведенные численные расчеты и экспериментальные результаты получены лично автором или при его непосредственном участии. Автор принимал активное участие в обсуждении результатов исследований, подготовке результатов к публикации и их апробации на научных конференциях.

Структура и объем работы. Текст диссертации состоит из введения, трёх глав, заключения, благодарностей, списка публикаций автора и библиографического списка цитируемой литературы. Материал изложен на 134 страницах, содержит 52 иллюстрации и список из 251 библиографических наименования.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава имеет обзорный характер по основным вопросам, относящимся к теме диссертационного исследования.

В §1.1 рассматриваются понятия однофотонных и двухфотонных состояний света. Описываются различные методы генерации таких состояний, указываются преимущества и недостатки каждого метода.

В §1.2 приводится описание нелинейно-оптических явлений, изучению

которых посвящена диссертация: спонтанному параметрическому рассеянию и спонтанному четырёхволновому смешению.

§1.3 посвящён рассмотрению нелинейных сред, в которых исследуются СПР и СЧВС в диссертации. В частности, в разделе 1.3.1 внимание уделено кристаллам с периодической модуляцией нелинейности, а также оптическим волноводам, расположенным в кристалле, а в разделе 1.3.2 рассматриваются оптические волокна, нановолокна и фотонно-кристаллические волокна.

§1.4 посвящён однофотонным источникам с оповещением на основе СПР и СЧВС, а также различным состояниям, в которых могут находиться одиночные фотоны и пары фотонов: перепутанным, факторизованным, чистым и смешанным. Описываются методы определения степени перепутанности двухфотонных состояний.

В §1.5 приводится обзор различных методов измерения показателя преломления сред. Основное внимание уделено схемам, основанным на оптических нановолокнах.

Во **второй главе** исследуется противонаправленное спонтанное параметрическое рассеяние в диэлектрических волноводах с периодической модуляцией нелинейности (рис. 1). Выбор последних связан с возможностью

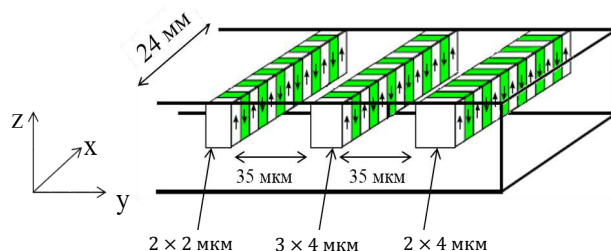


Рисунок 1: Схематичное изображение волноводов, расположенных в кристалле КТР.

существенного увеличения эффективности СПР за счёт малого поперечного сечения мод в волноводах, а также удовлетворения условиям фазового синхронизма на необходимых длинах волн в коллинеарном режиме СПР за счёт модуляции нелинейности.

В §2.1 рассматривается модель диэлектрических волноводов, расположенных в кристалле КТР (CaTiOPO_4). Приводятся результаты численных расчётов модовых функций и эффективных показателей преломления волноводов.

§2.2 посвящён анализу эффективности различных режимов СПР. При фиксированной длине волны поля накачки 532 нм условиям фазового синхронизма удовлетворяют различные комбинации частот, поперечных мод и поляризаций сигнального и холостого полей. В общем случае, бифотонное поле описывается суперпозицией различных троек мод, каждая из которых

характеризуется своей эффективностью (интегралом перекрытия):

$$\eta_{\text{СПР}} = \int u_{m_p n_p}(\rho) u_{m_s n_s}^*(\rho) u_{m_i n_i}^*(\rho) d^2 \rho, \quad d^2 \rho = dy dz, \quad (1)$$

где $u_{m_l n_l}(\rho)$ ($l = p, s, i$) — модовые функции трёх взаимодействующих полей.

Другим фактором, влияющим на эффективность различных процессов СПР, является перекрытие между модой накачки в свободном пространстве и модой накачки в волноводе, что определяется следующим выражением:

$$\eta_{m_p n_p} = \int u_{m_p n_p}(\rho) E_{in}(\rho) d^2 \rho, \quad (2)$$

где $E_{in}(\rho)$ — поперечное пространственное распределение поля в падающем на кристалл пучке накачки. Показано, что при возбуждении пучком накачки, имеющим двумерное гауссово пространственное распределение интенсивности в поперечном сечении, наиболее эффективно (47%) возбуждается фундаментальная Эрмит-Гауссова мода накачки в волноводе (TEM_{00}^p) и лишь небольшая часть энергии падающего излучения сконцентрирована в модах более высокого порядка [A2].

Результирующая эффективность различных процессов, равная $\eta = \eta_{m_p n_p} \eta_{\text{СПР}}$, показана на рис. 2. Основной вклад в рассеянное поле вносят

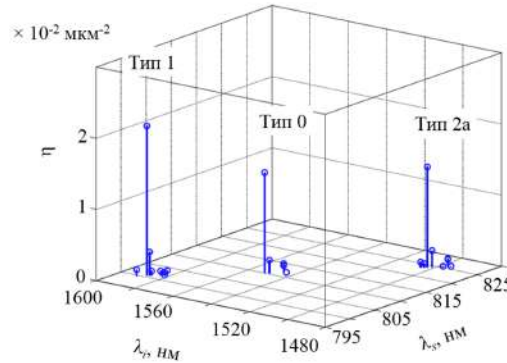


Рисунок 2: Эффективность различных процессов СПР в рассматриваемом волноводе. В каждом случае наибольшее значение соответствует взаимодействию между фундаментальными модами.

процессы $\text{TEM}_{00}^p \rightarrow \text{TEM}_{00}^s + \text{TEM}_{00}^i$, при которых взаимодействие происходит между фундаментальными модами. Остальные процессы имеют более низкую эффективность и, как правило, не наблюдаются.

В §2.3 описывается расчёт длительности, спектральной ширины и чистоты однофотонных состояний на основе интерференции Хонга-Оу-Манделя. Показано, что при оптимальной длительности импульсов накачки 6 пс чистота однофотонных состояний принимает значение, равное 0.96. Длительность однофотонного волнового пакета, испущенного в противоположном направлении (по отношению к накачке) составляет 300 пс, что соответствует спектральной ширине 2.9 ГГц на длине волны 1414 нм.

В §2.4 описан эксперимент по наблюдению противонаправленного режима СПР. Для доказательства квантовой природы излучения проведены измерения автокорреляционной функции с оповещением. Значение данной функции при нулевой задержке составило 0.012 ± 0.004 при средней мощности накачки 15 мВт, что соответствует однофотонной статистике. Скорость генерации пар фотонов составила 63 кГц/мВт.

На основе измерений спектра поля накачки и сигнального поля показано, что противонаправленный режим СПР позволяет генерировать однофотонные состояния, обладающие в разы меньшей спектральной шириной по сравнению с сонаправленным режимом. Для измерения спектра сигнального поля и поля накачки использовался резонатор Фабри-Перо. Ширина линии резонатора составляет 0.03 нм, а теоретически ожидаемая спектральная ширина противонаправленного СПР – 0.006 нм. Экспериментальные результаты также показывают, что спектральная ширина СПР не превышает ширину линии резонатора. Однако для сонаправленного режима спектральная ширина составляет 0.15 нм [9], что не проявляется в эксперименте.

Третья глава посвящена исследованию спонтанного четырёхволнового смешения в оптических нановолокнах (рис. 3). Использование последних в качестве нелинейной среды позволяет

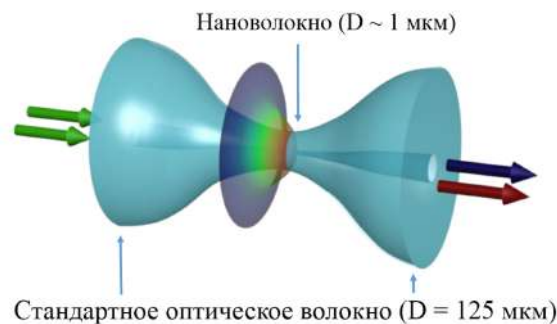


Рисунок 3: Схематичное изображение оптического нановолокна.

существенно увеличить эффективность СЧВС за счёт малого поперечного сечения мод, а также, за счёт согласования мод, избавиться от потерь при совмещении источника с волоконными телекоммуникационными сетями.

В §3.1 рассматривается теория СЧВС в нановолокнах постоянного диаметра (в регулярных нановолокнах). Приводятся результаты численного моделирования функции фазового синхронизма и совместной спектральной амплитуды для регулярного нановолокна. На основе проведённых расчётов определены оптимальные условия для наблюдения сильно невырожденного режима СЧВС на длинах волн 1550 нм и 810 нм. Длина волны накачки составляет 1064 нм, диаметр нановолокна – 925 нм.

Помимо СЧВС в нановолокне происходит комбинационное рассеяние поля накачки, которое вносит нежелательный вклад в регистрируемое

излучение. Для уменьшения вклада комбинационного рассеяния и отделения его от спектра СЧВС по длине волны нановолокно можно охлаждать. Приведены результаты исследования влияния температуры нановолокна на совместную спектральную амплитуду бифотонного поля.

В §3.2 приводится анализ влияния профиля нановолокон на спектр бифотонного поля. Диаметр изготавливаемых нановолокон в действительности не является постоянной величиной, а изменяется вдоль продольной координаты. Такие нановолокна называются нерегулярными. В этом случае в соответствии с методом поперечных сечений [10] нерегулярное нановолокно разбивается на короткие (по сравнению с длиной нановолокна) сечения, диаметр которых можно считать постоянным. Тогда расчёт спектральной амплитуды бифотонного поля во всём нановолокне сводится к расчёту амплитуд в каждом сечении и последующему их сложению с соответствующими амплитудами и фазами. Функция фазового синхронизма в этом случае принимает вид:

$$\mathcal{J}(\omega_s, \omega_i) = \sum_{q=1}^N \left(\text{sinc}\left(\frac{\Delta k_q(\omega_s, \omega_i)l}{2}\right) \exp\left(\frac{i\Delta k_q(\omega_s, \omega_i)l}{2}\right) \times \right. \\ \left. \exp\left(i \sum_{n=q+1}^N \Delta k_n(\omega_s, \omega_i)l\right) \eta_{m_p n_p, m_p n_p, m_s n_s, m_i n_i}^q \right), \quad (3)$$

где q – номер сечения, N – число сечений, l – длина сечения, $\Delta k_q = 2k_p^q - k_s^q - k_i^q$ – расстройка волновых векторов в сечении с индексом q , η^q – интеграл перекрытия между четырьмя взаимодействующими модами в сечении с индексом q , m и n – индексы поперечных мод. Выражение (3) описывает общий случай СЧВС в нановолокнах с переменным

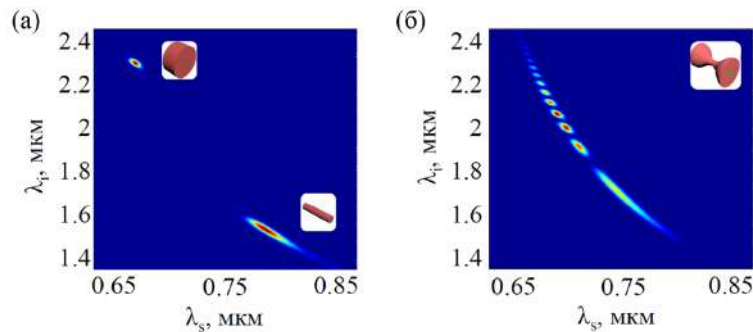


Рисунок 4: Совместная спектральная интенсивность для регулярного нановолокна, стандартного оптоволоконна (а) и нерегулярного нановолокна (б).

сечением. Численные расчёты показывают, что учёт нерегулярности профиля нановолокна позволяет выявить модуляцию спектра бифотонного поля (рис. 4). Подбирая профиль нановолокна, можно управлять спектром СЧВС и генерировать частотно-перепутанные двухфотонные состояния в широком диапазоне частот.

В §3.3 проведён анализ возможности генерации факторизованных двухфотонных состояний в нановолокнах с переменным сечением. Идеальный однофотонный источник на основе СЧВС должен генерировать чистые (неразличимые) однофотонные состояния. В случае источников, основанных на СПР или СЧВС это приводит к требованию факторизации совместной спектральной амплитуды бифотонного поля. Показано, что, используя фемтосекундную накачку (37 фс) на длине волны 490 нм, можно эффективно генерировать факторизованные двухфотонные состояния и широкополосные однофотонные состояния с высокой степенью чистоты в нановолокне со средним диаметром 925 нм (рис. 5). Важно отметить, что

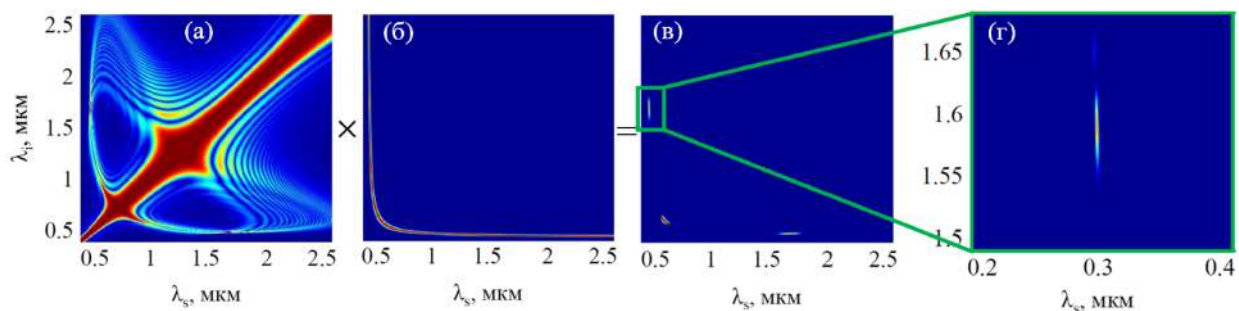


Рисунок 5: График функции фазового синхронизма, рассчитанный по выражению (3) (а), функция накачки (б) и их произведение – совместная спектральная амплитуда (в,г). График спектральной амплитуды вытянут вдоль одной из осей, что означает факторизацию двухфотонного состояния.

генерация холостых фотонов при этом происходит в телекоммуникационном диапазоне длин волн, а благодаря нерегулярности профиля нановолокна удаётся достичь эффективности невырожденного режима СЧВС, сравнимой с вырожденным режимом [А6]. Подбирая параметры нановолокна и излучения накачки, можно генерировать подобные однофотонные состояния в широком диапазоне длин волн.

§3.4 посвящён разработке метода определения показателя преломления сред на основе СЧВС в оптических нановолокнах. Показано, что помещение нановолокна, в котором наблюдается СЧВС, в среду с линией поглощения в области длин волн холостого поля за счет условий фазового синхронизма приводит к сдвигу длины волны как холостого, так и сигнального поля (рис. 6). С практической точки зрения важным является частный случай, когда длина волны холостого поля находится в ИК области, а сигнального – в видимой. В этом случае корреляционные свойства бифотонного поля позволяют определять величину показателя преломления сред в ИК области, регистрируя фотоны только в видимой области спектра. Поскольку эффективность ИК детекторов крайне низка ($\sim 1\%$ при $T = 300\text{K}$) по сравнению с детекторами видимого диапазона ($\sim 50\%$ при $T = 300\text{K}$), данный метод рефрактометрии позволяет избавиться от ИК детекторов и тем самым повысить эффективность определения показателя преломления. Чувствительность рефрактометрических сенсоров определяется отношением

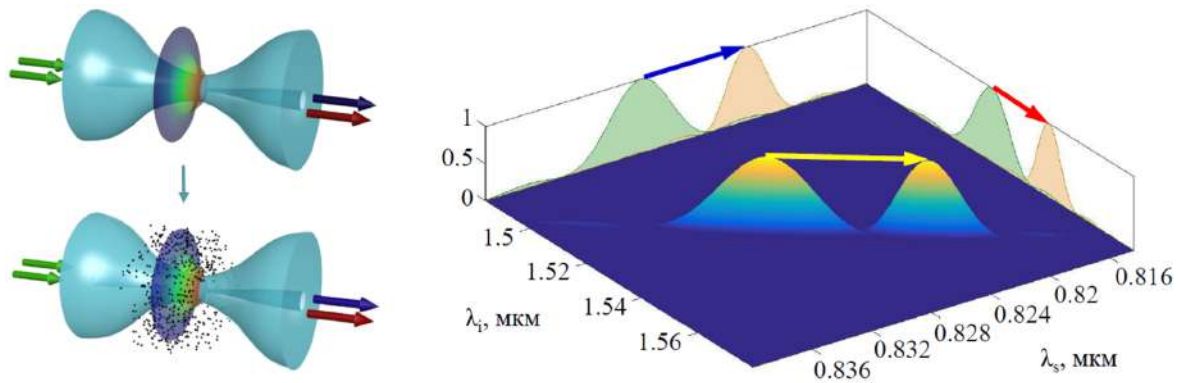


Рисунок 6: Помещение оптического нановолокна в исследуемую среду (слева), сдвиг совместной спектральной интенсивности и соответствующие сдвиги спектров сигнального и холостого полей (справа).

величины сдвига длины волны к величине изменения показателя преломления при помещении нановолокна в исследуемую среду: $S = \Delta\lambda/\Delta n$.

Чувствительность данного метода составляет 10^5 нм/RIU, где RIU – единицы показателя преломления (Refractive Index Units), тогда как рекордная чувствительность, достигнутая на 2019 г. составляет 10^4 нм/RIU [11].

В §3.5 исследуется возможность генерации чистых однофотонных состояний в фотонно-кристаллических волокнах. Приводится расчёт совместной спектральной амплитуды бифотонного поля, генерируемого в фотонно-кристаллическом волокне. Внимание уделено анализу степени чистоты однофотонных состояний с помощью разложения Шмидта. Показано, что, используя коммерческое фотонно-кристаллическое волокно с нулевой дисперсией на длине волны 800 нм, можно генерировать однофотонные состояния с высокой степенью чистоты. Определены оптимальные параметры поля накачки, при которых чистота однофотонных волновых пакетов является максимальной, а число Шмидта является минимальным и составляет 1.0451, что близко к идеальному значению, равному 1. Генерация холостых фотонов при этом осуществляется в телекоммуникационном диапазоне длин волн.

В §3.6 приводятся результаты экспериментов по изготовлению и характеризации оптических нановолокон. Данные эксперименты были выполнены в сотрудничестве с группой проф. Хакуты в Центре фотонных инноваций университета электро-коммуникаций, Токио.

В процессе изготовления стандартное кварцевое оптическое волокно ($D_{\text{ядра}} \approx 10$ мкм, $D_{\text{оболочки}} = 125$ мкм) закрепляется напротив неподвижного пламени на двух трансляторах. Задавая параметры движения трансляторов, волокно вытягивается так, что диаметр перетяжки становится сравним с длиной волны видимого света. Для контроля адиабатичности профиля в процессе вытягивания измерялся коэффициент пропускания нановолокна. По окончании изготовления пропускание нановолокон составило 99.6% на

длине волны 680 нм. Диаметр нановолокна, необходимый для наблюдения сильно невырожденного режима СЧВС и генерации холостых фотонов в телекоммуникационном диапазоне длин волн по теоретическим расчётам составляет ≈ 890 нм. Профиль изготовленного нановолокна был измерен с помощью сканирующего электронного микроскопа. Все изготовленные нановолокна имеют диаметр 890 ± 12 нм и длину перетяжки 14 мм. После изготовления нановолокна были запечатаны в бокс для защиты от пыли и транспортировки в Казанский физико-технический институт для проведения дальнейших экспериментов.

§3.7 посвящён экспериментам по генерации однофотонных и двухфотонных состояний света на основе СЧВС в оптических нановолокнах.

Исследована зависимость скорости фотоотсчётов между сигнальным и холостым каналами от задержки между ними (кросс-корреляционная функция). Пик при нулевой задержке свидетельствует о двухфотонной статистике регистрируемого излучения. Скорость фотоотсчётов в сигнальном канале проявляет квадратичную зависимость от средней мощности накачки, что свидетельствует о преобладающем вкладе бифотонного поля в регистрируемое излучение.

Приведены результаты экспериментальных измерений и теоретических расчётов совместной спектральной интенсивности бифотонного поля. Показано, что СЧВС в нерегулярных нановолокнах позволяет генерировать широкополосные частотно-перепутанные двухфотонные состояния (рис. 7). Центральные длины волн сигнального и холостого полей равны 1310 нм

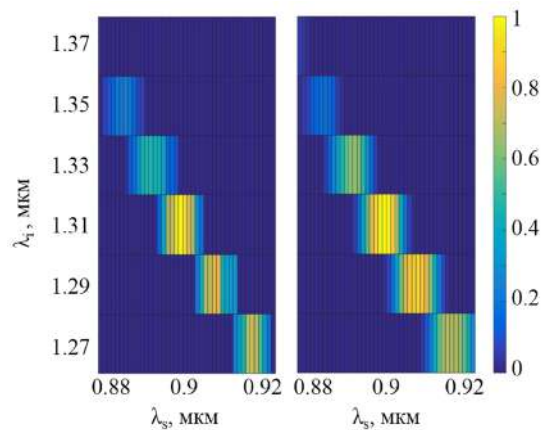


Рисунок 7: Экспериментально измеренная (а) и численно рассчитанная (б) совместные спектральные интенсивности бифотонного поля, генерируемого в нановолокне. Наклон данного графика относительно частотных осей свидетельствует о частотной-корреляции между фотонами пары.

и 900 нм, а их спектральные ширины — $\Delta\lambda_s \approx 40$ нм и $\Delta\lambda_i \approx 60$ нм, соответственно. Наблюдаемая скорость генерации составила 60 пар/с при средней мощности накачки 127 мВт.

Представлены результаты измерений гистограммы автокорреляции с оповещением, которые свидетельствуют об однофотонной статистике

сигнального поля, что позволяет использовать двухфотонный источник для получения однофотонных состояний с оповещением.

В **заклучении** сформулированы основные результаты диссертационной работы:

1. Создан источник однофотонных и перепутанных двухфотонных состояний света на основе противонаправленного спонтанного параметрического рассеяния света в волноводе РР КТР. Данный режим позволяет генерировать узкополосные однофотонные состояния света.
2. Произведен учёт нерегулярного профиля оптических нановолокон. Нерегулярность профиля оптических нановолокон приводит к модуляции спектра бифотонного поля.
3. Разработан метод определения показателя преломления сред. С помощью спонтанного четырёхволнового смешения в оптических нановолокнах можно с высокой чувствительностью измерять показатель преломления сред в ИК области, регистрируя фотоны только в видимой области спектра. Метод позволяет отказаться от использования дорогостоящей и низкоэффективной аппаратуры.
4. Изготовлена и охарактеризована серия идентичных оптических нановолокон. Создан и охарактеризован источник однофотонных и двухфотонных состояний света на основе спонтанного четырёхволнового смешения в оптических нановолокнах. Оптические нановолокна позволяют генерировать перепутанные двухфотонные, а также однофотонные состояния, с перестройкой по длине волны в широких пределах.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых журналах:

- A1. Heralded single-photon and correlated-photon-pair generation via spontaneous four-wave mixing in tapered optical fibers / A.A. Shukhin, J. Keloth, K. Nakuta, A.A. Kalachev // Phys. Rev. A. 2020. V. 101, № 5. P. 053822.
- A2. Simulating single-photon sources based on backward-wave spontaneous parametric down-conversion in a periodically poled KTP waveguide / A.A. Shukhin, D.O. Akatiev, I.Z. Latypov, A.V. Shkalikov, A.A. Kalachev // Journal of Physics: Conference Series. 2015. V.613, №1. P. 012015.

- A3. Backward-wave spontaneous parametric down-conversion in a periodically poled KTP waveguide / I.Z. Latypov, A.A. Shukhin, D.O. Akat'ev, A.V. Shkalikov, A.A. Kalachev // Quantum Electronics. 2017. V. 47, № 9. P. 827.
- A4. Shukhin, A.A. Spectral features of spontaneous four-wave mixing in tapered nanofibers / A.A. Shukhin, A.A. Kalachev // Computer Optics. 2016. V. 40, № 2. P. 141–146.
- A5. Generation of pure single-photon states in commercial photonic-crystal fibers on telecommunication frequencies / A.A. Talipov, A.G. Shmelev, A.A. Shukhin, I.Z. Latypov // Наносистемы: физика, химия, математика. 2017. Т.8, № 3.
- A6. Шухин, А.А. Генерация чистых однофотонных состояний в режиме спонтанного четырехволнового смешения в нановолокнах с переменным сечением / А.А. Шухин, А.А. Калачёв // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2016. Т. 80, № 7. С. 861–864.
- Тезисы и материалы конференций:**
- A7. Shukhin, A.A. Spontaneous Four-Wave Mixing in an Irregular Nanofiber / A.A. Shukhin, A.A. Kalachev // EPJ Web of Conferences. 2015. V. 103. P. 06009.
- A8. Shukhin, A.A. Spontaneous four-wave mixing in optical nanofibers at low temperatures / A.A. Shukhin, A.A. Kalachev // EPJ Web of Conferences. 2017. V. 161. P. 03016.
- A9. Шухин, А.А. Теоретическое исследование спонтанного четырехволнового смешения в суженных оптических нановолокнах / А.А. Шухин, А.А. Калачёв // Ежегодник КФТИ. 2016. С. 142–145.
- A10. Шухин, А.А. Интегральный однофотонный источник на основе оптических нановолокон / А.А. Шухин, А.А. Калачёв // Ежегодник КФТИ. 2017. С. 85–86.
- A11. Шухин, А.А. Бифотонная рефрактометрия на основе спонтанного четырёхволнового смешения в нановолокнах / А.А. Шухин, А.А. Калачёв // XI Международный симпозиум по фотонному эхо и когерентной спектроскопии: Сборник тезисов. 2017. С. 203.
- A12. Исследование нелинейного волновода РР КТР для наблюдения противонаправленного спонтанного параметрического рассеяния / А.А. Шухин, И.З. Латыпов, А.В. Шкаликков и А.А. Калачёв // Когерентная оптика и оптическая спектроскопия: XVII Международная молодёжная научная школа: Сборник тезисов. 2014. С. 220–224.
- A13. Шухин, А.А. Разработка однофотонного источника на основе нелинейных явлений в оптических волокнах / А.А. Шухин, А.А. Калачёв // 6-я республиканская конференция "Молодёжь и инновации Татарстана: Сборник тезисов". 2014. С. 15–17.

- A14. Шухин, А.А. Спонтанное четырёхволновое смешение в нерегулярных нановолокнах / А.А. Шухин, А.А. Калачёв // XIII Всероссийский молодёжный самарский конкурс-конференция научных работ по оптике и лазерной физике: Сборник конкурсных докладов". 2015. С. 198—204.
- A15. Шухин, А.А. Теоретический анализ спонтанного четырёхволнового смешения в оптическом волокне и нановолокне / А.А. Шухин, А.А. Калачёв // Итоговая конференция молодых учёных КФТИ: Сборник материалов конференции". 2015. С. 13—18.
- A16. Шухин, А.А. Бифотонная рефрактометрия на основе спонтанного четырёхволнового смешения в суженных волокнах / А.А. Шухин, А.А. Калачёв // Итоговая конференция молодых учёных КФТИ: Сборник материалов конференции". 2016. С. 43—44.
- A17. Источник неклассических состояний света и оптических сенсор на основе нановолокон / А.А. Шухин, А.А. Shukhin, J. Keloth, K. Nakuta, А.А. Калачёв // XIII Международные чтения по квантовой оптике (IWQO – 2019): Сборник тезисов. 2019. С. 246. 247.
- A18. Шухин, А.А. Спонтанное четырёхволновое смешение в нерегулярных нановолокнах / А.А. Шухин, А.А. Калачёв // XII Международные чтения по квантовой оптике (IWQO – 2015): Сборник статей. 2015. С. 152—154.

Патент:

- A19. Шухин А.А., Калачёв А.А.. Способ определения показателя преломления среды. 2018. URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU2685754C1_20190423; RU2685754C1.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. O'Brien, J. L. Photonic quantum technologies / J. L. O'Brien, A. Furusawa, J. Vuckovic // *Nature Photonics*. — 2009. — Vol. 3, № 12. — P. 687.
2. Flamini, F. Photonic quantum information processing: a review / F. Flamini, N. Spagnolo, F. Sciarrino // *Reports on Progress in Physics*. — 2018. — Vol. 82, № 1. — P. 016001.
3. Invited review article: Single-photon sources and detectors / M. D. Eisaman, J. Fan, A. Migdall, S. V. Polyakov // *Review of scientific instruments*. — 2011. — Vol. 82, № 7. — P. 071101.
4. Stegeman, G. I. Waveguides and fibers for nonlinear optics / G. I. Stegeman, R. H. Stolen // *JOSA B*. — 1989. — Vol. 6, № 4. — P. 652–662.
5. Nonlinear optics in photonic nanowires / M. A. Foster, A. C. Turner, M. Lipson, A. L. Gaeta // *Optics Express*. — 2008. — Vol. 16, № 2. — P. 1300–1320.
6. Quantum repeaters based on atomic ensembles and linear optics / N. Sangouard, C. Simon, H. De Riedmatten, N. Gisin // *Reviews of Modern Physics*. — 2011. — Vol. 83, № 1. — P. 33.
7. Single-photon generation and detection: physics and applications / A. Migdall, S. V. Polyakov, J. Fan, J. C. Bienfang. — Academic Press, 2013. — Vol. 45.
8. Advances in photonic quantum sensing / S. Pirandola, B. R. Bardhan, T. Gehring [et al.] // *Nature Photonics*. — 2018. — Vol. 12, № 12. — P. 724–733.
9. A wavelength-tunable fiber-coupled source of narrowband entangled photons / A. Fedrizzi, T. Herbst, A. Poppe [et al.] // *Optics Express*. — 2007. — Vol. 15, № 23. — P. 15377–15386.
10. Katsenelenbaum, B. Theory of irregular waveguides with slowly varying parameters / B. Katsenelenbaum // *Izd. Akad. Nauk SSSR, Moscow*. — 1961. — P. 226.
11. Optical refractive index sensors with plasmonic and photonic structures: promising and inconvenient truth / Y. Xu, P. Bai, X. Zhou [et al.] // *Advanced Optical Materials*. — 2019. — Vol. 7, № 9. — P. 1801433.