

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

*На правах рукописи*

**БОРЩЕВСКАЯ НАДЕЖДА АЛЕКСЕЕВНА**

**Перепутанные состояния света высокой размерности  
на основе спонтанного параметрического рассеяния**

01.04.21 – лазерная физика

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2019

Работа выполнена на кафедре квантовой электроники физического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова

**Научный руководитель** — *Кулик Сергей Павлович,  
доктор физико-математических наук,  
профессор*

**Официальные оппоненты** — *Тихонова Ольга Владимировна,  
доктор физико-математических наук,  
профессор  
МГУ имени М. В. Ломоносова, профессор*

*Власов Игорь Иванович,  
кандидат физико-математических наук,  
Институт общей физики имени  
А. М. Прохорова РАН,  
заведующий лабораторией*

*Халили Фарит Явдатович,  
доктор физико-математических наук,  
профессор, Международный центр  
квантовой оптики и квантовых  
технологий, руководитель группы*

Защита диссертации состоится 21 ноября 2019 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета МГУ.01.13 Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова по адресу: 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, МГУ, д. 1. стр. 62, корпус нелинейной оптики, аудитория им. С. А. Ахманова.

Е-mail: diss.sov.31@physics.msu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на сайте ИАС «ИСТИНА»: <https://istina.msu.ru/dissertations/235640727/>

Автореферат разослан «\_\_\_» сентября 2019г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат физико-математических наук  
А. А. Коновко

## **Актуальность работы**

Одним из важнейших отличий квантовой физики от классической является возможность приготовления перепутанных квантовых состояний. Это понятие возникло для описания составных квантовых систем, состояние которых определено точно (является чистым), в то время как состояние каждой из подсистем, их составляющих, может принимать разные значения с определенной вероятностью (является смешанным).

Простейшей перепутанной системой являются две перепутанные системы размерности два. Увеличение количества и размерности перепутанных систем позволяет существенно увеличить степень перепутанности, которая является важнейшим ресурсом в задачах квантовой оптики и квантовой информатики.

В задачах квантовой связи увеличение размерности перепутанных систем позволяет увеличить скорость передаваемой информации и чувствительность к атакам на системы квантового распределения ключа [1,2]. Увеличение количества перепутанных систем позволяет использовать протоколы коллективного использования данных (quantum secret sharing), позволяющие распределять секретный ключ между несколькими пользователями [3,4]. В задачах квантовых вычислений увеличение количества и размерности перепутанных состояний света позволяет приготовить высокоразмерные кластерные состояния, являющиеся основой однонаправленных квантовых вычислительных систем, основанных на измерениях (measurement-based one-way quantum computation) [5]. В метрологических задачах степень перепутывания также напрямую связана с разрешающей способностью квантовых измерительных приборов [6].

В оптике основным источником перепутанных состояний света высокой размерности служит эффект спонтанного параметрического рассеяния (СПР) второго порядка [7]. На его основе можно получить пары фотонов, перепутанных по частотным и пространственным переменным. Эти степени свободы являются непрерывными и потенциально допускают получение состояний бесконечной размерности, поскольку описываются в бесконечномерном пространстве.

На практике эффективная размерность состояния ограничена шириной спектра накачки и характеристиками нелинейной среды. В связи с этим одна из глав работы посвящена сбору излучения с максимально широким спектром (т. е. обладающего высокой степенью перепутанности по частотным переменным) в одномодовый световод. Это позволяет далее минимизировать потери при передаче излучения по оптическим линиям связи, а также эффективно использовать двухфотонное излучение в метрологических приборах.

Для систем, описываемых пространственными переменными, при приготовлении многомодовых состояний существует проблема выделения отдельных мод. Обычно это делается путем детектирования СПР после набора щелей, установленных в исходный непрерывный спектр [8,9]. В таком случае

теряется бифотонное поле, блокируемое щелями, а часть прошедшего излучения отбрасывается при постселекции, т.к. не обладает нужными корреляционными характеристиками. В данной работе разработан метод приготовления перепутанных пространственных состояний пар фотонов в не перекрывающихся между собой пространственных модах.

Увеличить количество перепутанных оптических систем можно при переходе к процессу СПР третьего порядка (3-СПР) [10], при котором фотон лазерного излучения накачки разделяется на три перепутанных фотона. Более того, такие состояния обладают гораздо более широким распределением, как по частотным, так и по пространственным переменным, что увеличивает их размерность [11,12]. Несмотря на то, что с момента теоретического предсказания этого эффекта прошло несколько десятков лет, экспериментальная реализация до сих пор затруднена благодаря очень низкой эффективности процесса. В данной работе был проведен детальный расчет скорости генерации и необходимого времени измерений 3-СПР в нелинейных кристаллах с учетом частотных и пространственных характеристик существующих однофотонных детекторов. В качестве возможного решения проблемы малой эффективности нелинейного процесса многими научными группами предлагалось использовать в качестве источника нелинейные оптоволоконные световоды [11,13], в частности – с высоким содержанием оксида германия [14]. В настоящей работе было выявлено, что в таких волноводах вместе с исследуемым трехфотонным полем присутствует паразитное излучение люминесценции, и были исследованы способы ее подавления. Таким образом, сделан ряд шагов к более эффективной регистрации 3-СПР.

Таким образом, в работе рассматриваются способы увеличения размерности и количества перепутанных оптических систем, что делает ее безусловно актуальной как с точки зрения фундаментальных проблем квантовой физики, так и с точки зрения приложений в области квантовых технологий.

**Целью** работы было исследование и генерация двух- и трехфотонных состояний света высокой размерности с заданными частотным и угловыми характеристиками в процессе спонтанного параметрического рассеяния света. Для выполнения цели были поставлены следующие **задачи**:

1. Создать метод получения состояний высокой размерности в частотных переменных, являющихся одновременно с этим пространственно одномодами.
2. Создать метод получения состояний высокой размерности в угловых переменных с не перекрывающимися в пространстве модами Шмидта.
3. Исследовать возможность генерации трехфотонных состояний в процессе 3-СПР в нелинейных кристаллах и световодах с высоким содержанием оксида германия.

**Научная и практическая значимость.** Результаты диссертационной работы востребованы в задачах квантовой метрологии (квантовая оптическая когерентная томография [15], квантовая синхронизация часов [16] и др.), квантовой связи (увеличение скорости и дальности систем квантового распределения ключа) [2] и квантовых вычислений (приготовление кластерных состояний для задач однонаправленных вычислений) [5].

**Обоснованность и достоверность результатов.** Работа была выполнена на современном оборудовании. Ее результаты многократно обсуждались на семинарах лаборатории, кафедры и международных конференциях и были опубликованы в рецензируемых международных научных изданиях.

**Личный вклад автора.** Все результаты были получены автором лично или при его непосредственном участии.

**Структура и объем диссертационной работы.** Работа изложена на 106 страницах и состоит из 4 глав, заключения и списка литературы, включающего 105 источников. Диссертационная работа иллюстрирована 27 рисунками и содержит 3 таблицы.

**Апробация диссертационной работы** происходила на следующих российских и международных конференциях: «23 ежегодном международном семинаре по квантовой физике» (Болгария, София, 2014), «24 ежегодном международном семинаре по квантовой физике» (Китай, Шанхай, 2015), «XIV Международной конференции по квантовой оптике и квантовой информатике» (Белоруссия, Минск, 2015), «25 ежегодном международном семинаре по квантовой физике» (Армения, Ереван, 2016), «Десятом семинаре памяти Д.Н.Клышко» (Россия, Завидово, 2017), "Quantum 2017" (Италия, Турин, 2017), "Quantum 2019" (Италия, Турин, 2019).

Результаты опубликованы в 5 печатных работах в рецензируемых научных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus.

### **Положения, выносимые на защиту:**

1. За счет оптического элемента угловой дисперсии можно эффективно перераспределить энергию между разными частотно-угловыми модами спонтанного параметрического рассеяния и приготовить широкополосное бифотонное поле в одной пространственной моде. При этом уширение спектра происходит с сохранением спектральной интенсивности. В частности, для кристалла ВВО толщиной 2 мм от накачки на длине волны 325 нм достигнуто уширение спектра с 39 до 99 ТГц.
2. Пространственная модуляция лазерной накачки позволяет в процессе спонтанного параметрического рассеяния получить бифотонное поле с пространственно разделенными модами Шмидта в дальней зоне.
3. Регистрация спонтанного параметрического рассеяния третьего порядка в кристаллах возможна в случае использования лазерной накачки на длине волны 266 нм мощностью 10 Вт, кристалла кальцита толщиной 0,1 мм с зеркальным покрытием на длине волны накачки и кремниевых однофотонных детекторов.
4. Основным фактором, препятствующим наблюдению спонтанного параметрического рассеяния третьего порядка в оптических волокнах с повышенным содержанием германия, является паразитная люминесценция, интегральная мощность которой на 12 порядков превышает расчетную мощность трехфотонного излучения.
5. Метод насыщения водородом позволяет на 2 порядка подавить люминесценцию при наблюдении спонтанного параметрического рассеяния третьего порядка в оптических волокнах с повышенным содержанием германия.

## Основное содержание диссертации

**Глава 1** представляет собой введение. Она включает определение понятия «перепутанных состояний», их значение для задач кодирования и передачи информации, метрологических задач и квантовых вычислений. Описан эффект спонтанного параметрического рассеяния света (СПР), который был использован для экспериментальной реализации перепутанных состояний, а также основные его типы. Рассмотрены основные меры степени перепутанности, параметр Федорова [17] и число Шмидта [18], которые используются в последующих главах для характеристики полученных состояний света.

Далее рассмотрены способы реализации перепутанных состояний высокой размерности. К ним, в частности, относятся состояния, описываемые в частотных переменных. Такие состояния имеют широкий частотный спектр, и степень перепутывания растет с увеличением ширины спектра, поэтому интересен вопрос о приготовлении СПР с широким частотным спектром. В этой связи приводится литературный обзор существующих на данный момент методов получения широкополосного СПР, к которым относятся жесткая фокусировка накачки, использование сред с малой длиной взаимодействия и неоднородных нелинейных кристаллов (чирпирование) [19–23]. Предложен метод уширения спектра, реализованного в данной работе, и показано его преимущество по отношению к другим методам.

Другой путь приготовления перепутанных состояний высокой размерности основан на использовании пространственной степени свободы. Для выделения различных мод проще всего использовать набор щелей, установленных в ближней или дальней зоне после нелинейного кристалла [8,9]. Рассмотрены работы, где был реализован такой подход, и указаны основные его недостатки: наличие в сигнальном пучке фотонов, не имеющих коррелированных с ними фотонов в холостом пучке (и наоборот), и дополнительных потерь в интенсивности излучения, блокируемого щелями. Указанных недостатков можно избежать, если выделять и регистрировать пространственные моды Шмидта. Однако моды Шмидта для излучения СПР, полученного от накачки с гауссовым распределением интенсивности, неудобны в использовании, поскольку имеют сложную пространственную структуру в виде распределения Гаусса-Эрмита или Гаусса-Лагерра [24] и перекрываются между собой, а мода одномодового оптического световода имеет близкую к гауссовой форму. Таким образом, представляет интерес приготовление пространственно разделенных мод Шмидта, которые будут иметь гарантировать полные условные корреляции между сигнальными и холостыми фотонами в соответствующих модах и при этом будут легко регистрироваться.

С точки зрения получения состояний высокой размерности большой интерес вызывает процесс СПР третьего порядка (3-СПР) [10], которому посвящена глава 4. Рассмотрены основные отличия 3-СПР от СПР: низкая

эффективность процесса и уширение частотных и угловых спектров излучения, что привело к сложности экспериментальной демонстрации 3-СПР. В этой главе приведен литературный обзор сведений о генерации 3-СПР в нелинейных кристаллах и световодах. Проводится сравнение различных типов световодов: германатных [14], микроструктурированных [13], вытянутых («tapered») [25], - с точки зрения величины кубичной нелинейности, длины, поглощения накачки и триплетов. Поскольку при использовании германатных волокон, как было выяснено в ходе работы, неизбежно возникает паразитная люминесценция, приведен обзор данных о возможных причинах ее появления и способах ее подавления.

**В главе 2** подробно описан метод получения излучения СПР, обладающего широким частотным спектром и локализованного в одной пространственной моде. Такое излучение обладает не только большой степенью перепутанности, но и может быть передано наиболее эффективно на большие расстояния и использован в различных интерференционных схемах, для которых важно наличие одной пространственной моды [26].

Ширина частотного спектра СПР определяется степенью фокусировки накачки и характеристиками нелинейной среды, в которой проходит процесс распада фотонов накачки на пары сигнальных и холостых фотонов. Для стандартных параметров эксперимента, когда перетяжка накачки составляет десятки микрон, а толщина кристалла – несколько миллиметров, ширина частотного спектра достаточно велика и составляет около 100 ТГц. Однако пространственно это излучение является многомодовым и не может быть сфокусировано в одномодовое волокно.

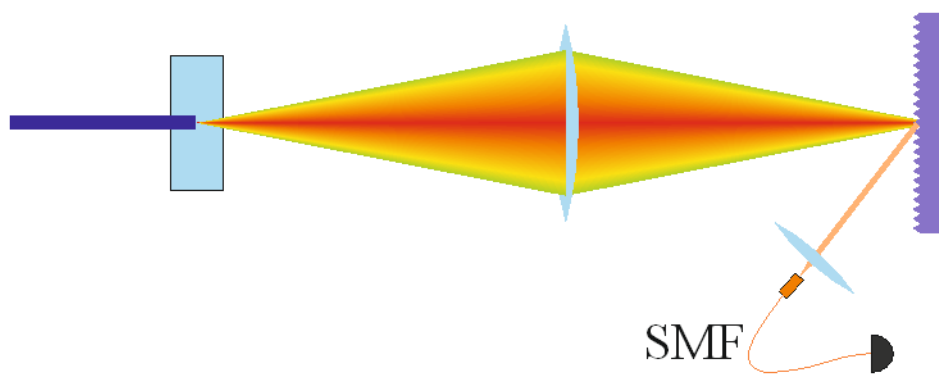


Рис. 1. Идея эксперимента по заведению широкополосного спектра СПР в одномодовый световод.

Метод основан на преобразовании исходного широкого частотного спектра СПР с помощью дифракционной решетки (рис. 1). Перед решеткой установлена система линз, которые изменяют наклон частотно-угловой зависимости бифотонов так, чтобы он совпал с аналогичной характеристикой дифракционной решетки (рис. 2). Тогда все фотоны с разными частотами, падающие на решетку, дифрагируют в первый порядок в одном и том же

направлении, и получается широкополосное излучение в одной пространственной моде.

Ширина углового диапазона, соответствующего одномодовому приему определяется радиусом перетяжки накачки, который в силу эффекта пространственного сноса в кристалле ВВО толщиной  $\sim 2$  мм не может быть меньше 100 мкм.

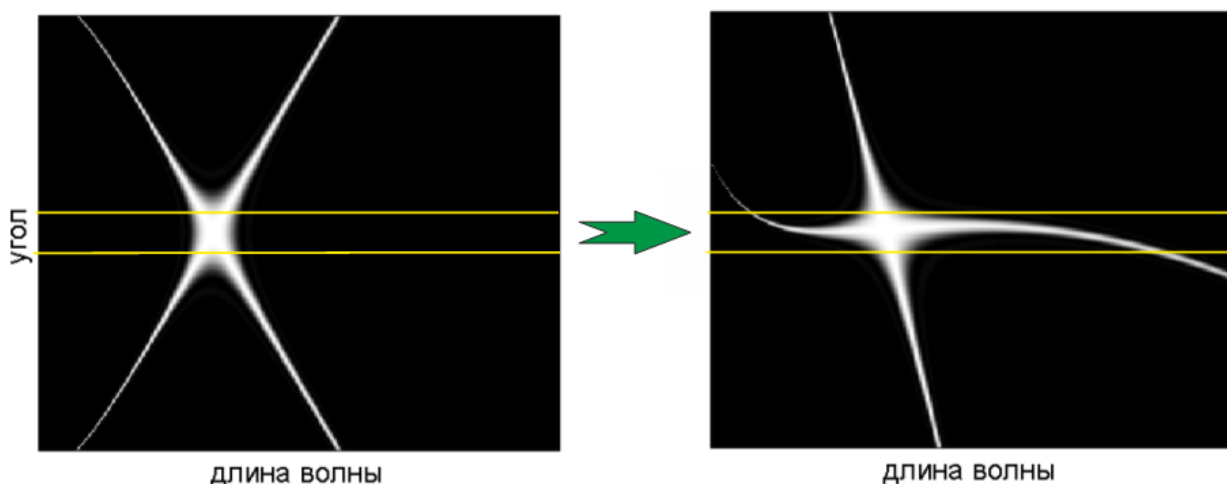


Рис. 2. Преобразование исходного спектра СПР дифракционной решеткой.

В результате спектр СПР на выходе из одномодового световода был уширен с 39 до 99 ТГц (рис. 3). Все ширины вычислялись как отношение площади под распределением скорости счета совпадений детекторов в сигнальном и холостом каналах к значению в максимуме.

Такой результат соответствует значениям, которые позволяют получить другие методы уширения спектра. При этом в отличие от других методов уширение происходит не за счет перераспределения исходной интенсивности по большому числу частотных мод, а за счет добавления к исходному излучению дополнительного на других частотах. Таким образом, полученное излучение имеет большую интенсивность.

**Глава 3** посвящена приготовлению пространственно разделенных мод Шмидта. Это достигается с помощью пространственной модуляции накачки, что приводит к пространственной модуляции СПР (рис. 4) – идея, нашедшая применение в различных задачах, в частности, с использованием орбитального углового момента фотонов [27–29]. В данном случае характеристики накачки подобраны таким образом, что результирующее распределение СПР принимает форму нескольких гауссовых линий, являющихся модами Шмидта. Каждая из них может быть отдельно зарегистрирована без внесения

дополнительных потерь и использования громоздких схем по выделению каждой моды из общего набора.

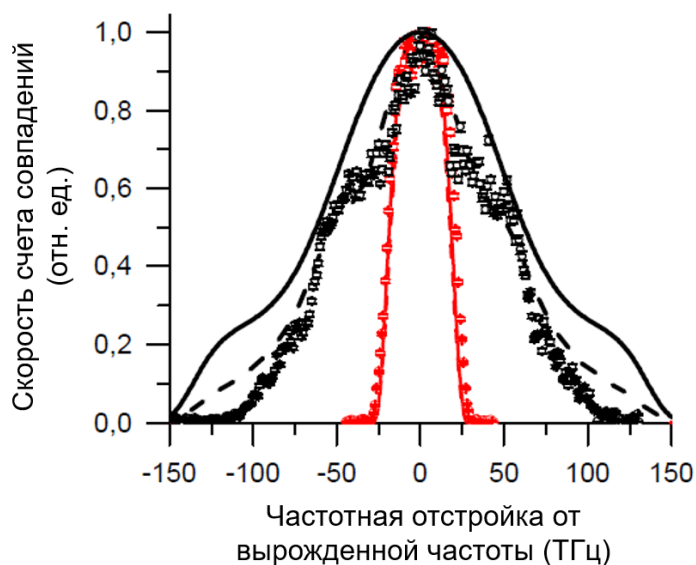


Рис. 3. Спектры совпадений детекторов, установленных в сигнальном и холостом каналах. Красная кривая – расчетный спектр на выходе из одномодового световода до уширения, черные кривые – после уширения (пунктирная линия рассчитана для параметров эксперимента, сплошная построена в предположении постоянного для всех частот коэффициента дифракции на решетке). Точками показаны экспериментальные данные.

В случае выделения пространственных мод из исходного спектра щелями моды не совпадают с модами Шмидта СПР, и часть фотонов из сигнального пучка оказывается некоррелированной с фотонами холостого пучка (и наоборот), а также возникают потери в интенсивности излучения, блокируемого щелями.

Моды Шмидта СПР, полученного от немодулированной пространственно (гауссовой) накачки, имеют вид мод Гаусса-Эрмита или Гаусса-Лагерра и перекрываются между собой, что затрудняет их регистрацию [24].

В описанном эксперименте для преобразования формы накачки использовался пространственный модулятор света (SLM), установленный в дальней зоне относительно кристалла. Фазовая маска SLM подбиралась так, чтобы в дальней зоне относительно кристалла накачка имела вид трех гауссовых пучков, распространяющихся под небольшим углом друг к другу. В результате в угловом спектре СПР будут наблюдаться три моды Шмидта гауссовой формы, пространственно разделенные между собой.

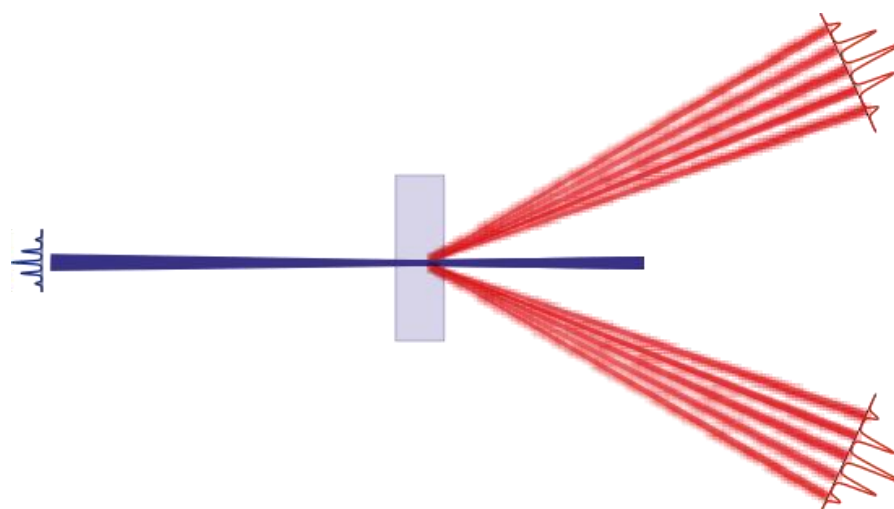


Рис. 4. Пространственная модуляция СПР за счет пространственной модуляции накачки.

Результаты измерения угловых спектров СПР представлены на рис. 5. К дополнительному уширению спектров привело использование достаточно широких щелей и недостаточно узкополосных частотных фильтров при регистрации бифотонного поля. Для сравнения на рис. 5 приведены также расчетные спектры для идеальных параметров в детектирующей части установки (изображены пунктиром).

Таким образом, при выполнении указанных условий предлагаемый метод позволяет получать разделенные в пространстве моды Шмидта в угловом спектре СПР и легко управлять их количеством и формой.

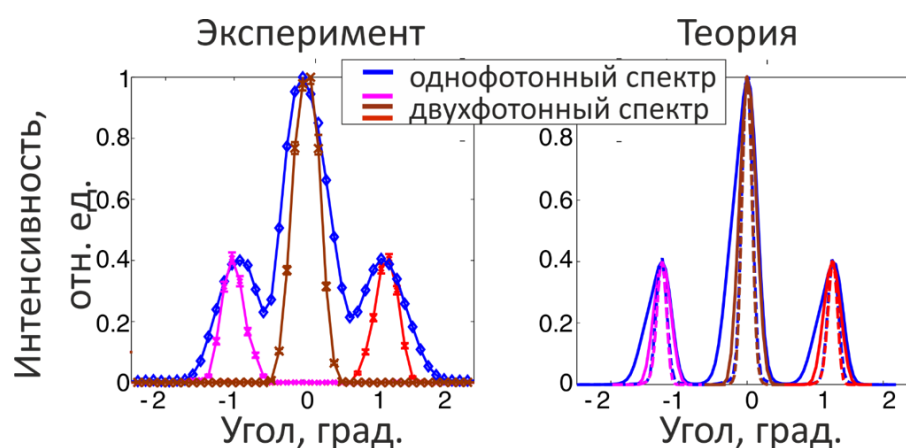


Рис. 5. Угловое распределение однофотонных (синие кривые) и двухфотонных (розовые, коричневые, красные кривые) спектров СПР. Сплошные теоретические кривые рассчитаны для параметров эксперимента, пунктирные – для идеальных условий.

В главе 4 рассмотрена возможность экспериментальной реализации эффекта 3-СПР. В качестве нелинейных сред были выбраны кристаллы со сравнительно большим значением кубичной восприимчивости, кальцит и рутил, а также световоды с повышенным содержанием оксида германия [30].

В первой части главы для нелинейных кристаллов выведены выражения для скорости генерации 3-СПР типа о-еее и е-оое. Кроме того, поскольку синхронизм 3-СПР очень широк как по частоте, так и по пространству, при его регистрации возможны ситуации, когда зарегистрирована может быть только его часть, т.е. когда диапазон чувствительности детектора меньше, чем диапазон, в котором генерируется излучение. Поэтому в расчетах были учтены характеристики существующих на данный момент детекторов, причем одновременно для каждого фотона из генерируемой тройки.

Ввиду очень низкой эффективности процесса 3-СПР даже слабые шумы однофотонных детекторов становятся критическими для его наблюдения. Поэтому было рассчитано минимальное время накопления результирующего излучения для того, чтобы его можно было достоверно выделить на фоне шума при регистрации двойных или тройных совпадений в схеме, приведенной на рис. 6.

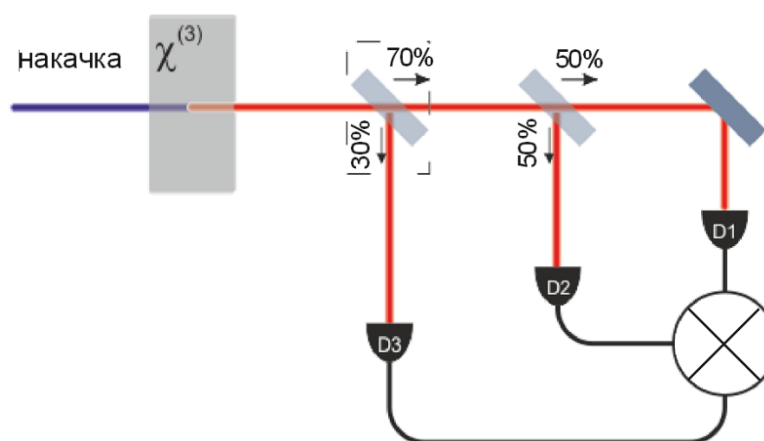


Рис. 6. Схема совпадений для регистрации 3-СПР в коллинеарном вырожденном режиме генерации.

Далее были проведены оценки для конкретных кристаллов кальцита и рутила, обладающих сравнительно большими значениями кубической нелинейности. Были рассмотрены все возможные способы регистрации: кремниевые и InGaAs однофотонные детекторы, фотоумножители и сверхпроводящие детекторы. Кроме того, для увеличения эффективности процесса была рассмотрена возможность напыления зеркального покрытия на грани кристаллов на длине волны накачки, что приводит к усилению интенсивности внутри резонатора. Тип лазера накачки определялся, исходя из спектрального диапазона чувствительности используемых детекторов.

Результаты расчетов (табл. 1) показывают, что при существующем оборудовании время накопления триплетов слишком велико. Единственный практически осуществимый, но все равно практически сложный, вариант – это случай регистрации 3-СПР типа е-ооо в кальците с накачкой на длине волны 266 нм кремниевым однофотонным детектором. При этом должно быть осуществлено напыление зеркального покрытия на грани кристалла.

| $\lambda_p$<br>(нм) | Кристалл           | $\chi_{eff}^{(3)}$<br>( $10^{-15}$ СГС) | $W_p$<br>(Вт) | Детектор  | Напыление | Скорость<br>счета (Гц) | $T_3$<br>(дней)     | $T_2$<br>(дней)     |
|---------------------|--------------------|-----------------------------------------|---------------|-----------|-----------|------------------------|---------------------|---------------------|
| 266                 | Кальцит<br>(е-ооо) | 0,32                                    | 10            | Si APD    | -         | $4,0 \cdot 10^{-5}$    | 94                  | 15                  |
|                     |                    |                                         |               |           | +         | $4,0 \cdot 10^{-2}$    | $9,4 \cdot 10^{-2}$ | $1,4 \cdot 10^{-2}$ |
| 325                 | Кальцит<br>(е-ооо) | 0,59                                    | 0,05          | Si APD    | +         | $1,1 \cdot 10^{-5}$    | 5 200               | 750                 |
|                     |                    |                                         |               | SuperCond |           | $3,4 \cdot 10^{-6}$    | 18 000              | 1 000               |
| 405                 | Кальцит<br>(е-ооо) | 0,76                                    | 0,5           | PMT       | +         | $1,8 \cdot 10^{-4}$    | $8,1 \cdot 10^{10}$ | $2,0 \cdot 10^{11}$ |
|                     |                    |                                         |               | SuperCond |           | $9,5 \cdot 10^{-6}$    | 6 200               | 370                 |
| 532                 | Кальцит<br>(е-ооо) | 0,88                                    | 10            | PMT       | +         | $1,8 \cdot 10^{-4}$    | $8,2 \cdot 10^{10}$ | $2,0 \cdot 10^{11}$ |
|                     |                    |                                         |               | SuperCond |           | $5,0 \cdot 10^{-6}$    | 1 200               | 690                 |
| 532                 | Рутил<br>(о-еее)   | 71,6                                    | 10            | PMT       | -         | $1,5 \cdot 10^{-2}$    | $1,1 \cdot 10^7$    | $2,8 \cdot 10^7$    |
|                     |                    |                                         |               | SuperCond |           | $8,9 \cdot 10^{-7}$    | $6,6 \cdot 10^4$    | $3,9 \cdot 10^3$    |

Табл. 1. Расчет скорости генерации 3-СПР, а также времени накопления триплетов при регистрации двойных ( $T_2$ ) и тройных ( $T_3$ ) совпадений детекторов в схеме, представленной на рис. 6, для кристаллов кальцита и рутила. SiAPD – кремниевый однофотонный детектор, SuperCond – сверхпроводящий, PMT – фотоумножитель.

Использование световодов, по сравнению с кристаллами, позволяет сузить пространственный спектр 3-СПР, а также значительно увеличить длину нелинейной среды. Поэтому вторая часть данной главы посвящена изучению 3-СПР в германатных световодах. Их получают путем сильного допирования оксидом германия стандартных кварцевых световодов со ступенчатым профилем показателей преломления. В результате достигается достаточный контраст показателей преломления сердцевины и оболочки, что необходимо для поддержания мод накачки и 3-СПР, участвующих в фазовом синхронизме. По сравнению с другими типами световодов, которые были предложены для генерации 3-СПР, а именно, вытянутыми («tapered») [25] и микроструктурированными [13], германатные световоды обладают наибольшей стойкостью и поэтому могут иметь наибольшую длину (сотни метров), и кроме того они сравнительно просты в изготовлении.

В ходе эксперимента по регистрации 3-СПР была обнаружена люминесценция от накачки на длине волны 532 нм, значительно превышающая по яркости трехфотонное излучение. В связи с этим были исследованы факторы, влияющие на интенсивность люминесценции. Схема установки изображена на рис. 7. Поскольку интенсивность люминесценции не менялась существенно при сильных изгибах волокна и при помещении световода в иммерсионную жидкость с показателем преломления, близким к показателю преломления оболочки, был сделан вывод, что источник люминесценции находится в сердцевине. Вместе с тем, при уменьшении концентрации  $\text{GeO}_2$  в сердцевине интенсивность люминесценции существенно снижалась. Следовательно, люминесценция была вызвана наличием  $\text{GeO}_2$ , однако уменьшение его количества было невозможно из-за невыполнения условий фазового синхронизма.

Было показано, что для подавления люминесценции эффективен метод воздействия на световод молекулярным водородом под давлением порядка 100 атм. Он привел к уменьшению интенсивности люминесценции на 2 порядка, однако интенсивность люминесценции все еще оставалась слишком большой для регистрации 3-СПР. Таким образом, регистрация 3-СПР в германатных световодах возможна при дальнейшем подавлении люминесценции.

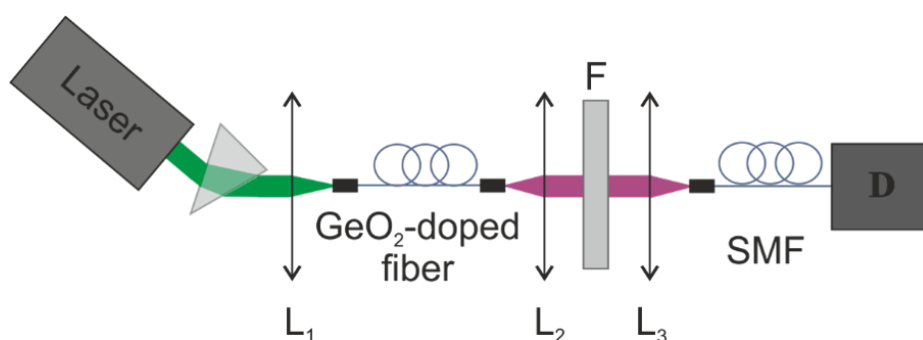


Рис. 7. Схема установки по исследованию люминесценции в германатных световодах.

### **Основные результаты работы:**

1. Предложен и реализован метод создания источника пространственно одномодового двухфотонного света с широким частотным спектром, основанный на частотно-угловой дисперсии. Для кристалла ВВО толщиной 2 мм и накачки на длине волны 325 нм ширина спектра составила 99 ТГц.
2. Предложен и реализован метод создания двухфотонного света с пространственно разделенными угловыми модами Шмидта, основанный на модуляции углового спектра накачки.
3. Рассчитана скорость единичных отсчетов детекторов при регистрации трехфотонного света с учетом частотных и угловых распределений существующих на данный момент детекторов, а также при регистрации парных и тройных совпадений для нелинейных кристаллов с высокой кубической восприимчивостью.
4. Исследованы способы подавления люминесценции в волокнах с высоким содержанием оксида германия в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах от накачки на длине волны 532 нм. Показано, что метод насыщения водородом позволяет подавить люминесценцию на два порядка.

### **Публикации по теме работы, индексируемые Web of Science и Scopus:**

1. Katamadze K.G., Borshchevskaya N.A., Dyakonov I.V., Paterova A.V., Kulik S.P. Broadband biphotons in a single spatial mode // *Phys. Rev. A*. 2015. Vol. 92, № 023812. P. 1–7, импакт фактор 2.907.
2. Borshchevskaya N.A., Katamadze K.G., Kulik S.P., Fedorov M.V. Three-photon generation by means of third-order spontaneous parametric down-conversion in bulk crystals // *Laser Phys. Lett.* 2015. Vol. 12, № 115404. P. 1–8, импакт фактор 2.328.
3. Tsvetkov S., Katamadze K., Borshchevskaya N., Sysolyatin A., Fedorov M., Kulik S., Salganskii M., Belanov A. Phase-matching of the HE<sub>11</sub> and HE<sub>13</sub> modes of highly doped GeO<sub>2</sub>–SiO<sub>2</sub> fiber waveguides at 1596 nm and 532 nm, respectively, for triple-photon generation // *Laser Phys. Lett.* 2016. Vol. 13, № 025104. P. 1–6, импакт фактор 2.328.
4. Borshchevskaya N.A., Katamadze K.G., Kulik S.P., Klyamkin S.N., Chuvikov S.V., Sysolyatin A.A., Tsvetkov S.V., Fedorov M.V. Luminescence in germania – silica fibers in a 1 – 2  $\mu$ m region // *Opt. Lett.* 2017. Vol. 42, № 15. P. 2874–2877, импакт фактор 3.866.
5. Borshchevskaya N.A., Just F., Katamadze K.G., Cavanna A., Chekhova M.V. Separated Schmidt modes in the angular spectrum of biphotons // *Laser Phys. Lett.* 2019. Vol. 16, № 8. P. 085207, импакт фактор 2.328.

Цитированная литература:

1. Zhong T. et al. Photon-efficient quantum key distribution using time-energy entanglement with high-dimensional encoding // New J. Phys. IOP Publishing, 2015. Vol. 17. P. 022002.
2. Bechmann-Pasquinucci H., Tittel W. Quantum cryptography using larger alphabets // Phys. Rev. A. 2000. Vol. 61, № 6. P. 62308.
3. Takesue H., Inoue K. Quantum secret sharing based on modulated high-dimensional time-bin entanglement // Phys. Rev. A. 2006. Vol. 74, № 012315.
4. Cleve R., Gottesman D., Lo H. How to Share a Quantum Secret // Phys. Rev. Lett. 1999. Vol. 83, № 3. P. 648–651.
5. Nielsen M.A. Optical quantum computation using cluster states // Phys. Rev. Lett. 2004. Vol. 93, № 4. P. 040503–1.
6. Giovannetti V., Lloyd S., Maccone L. Quantum-enhanced measurements: beating the standard quantum limit. // Science. 2004. Vol. 306, № 5700. P. 1330–1336.
7. Klyshko D.N. Coherent photon decay in a nonlinear medium // JETP Lett. 1967. Vol. 6, № 1. P. 23.
8. Ghosh D. et al. Spatially correlated photonic qutrit pairs using pump beam modulation technique // OSA Contin. 2018. Vol. 1, № 3. P. 996–1011.
9. Neves L. et al. Generation of Entangled States of Qudits using Twin Photons // Phys. Rev. Lett. 2005. Vol. 94, № 10. P. 100501.
10. Elyutin P. V, Klyshko D.N. Three-photon squeezing: exploding solutions and possible experiments // Phys. Lett. A. 1990. Vol. 149, № 5. P. 241–247.
11. Corona M., Garay-Palmett K., U'Ren A.B. Experimental proposal for the generation of entangled photon triplets by third-order spontaneous parametric downconversion in optical fibers. // Opt. Lett. 2011. Vol. 36, № 2. P. 190–192.
12. Chekhova M. et al. Spectral properties of three-photon entangled states generated via three-photon parametric down-conversion in a  $\chi^{(3)}$  medium // Phys. Rev. A. 2005. Vol. 72, № 2. P. 023818.
13. Cavanna A. et al. Hybrid photonic-crystal fiber for single-mode phase matched generation of third harmonic and photon triplets // Optica. 2016. Vol. 3, № 9. P. 952–955.
14. Bencheikh K. et al. Phase-matched third-harmonic generation in highly germanium-doped fiber // Opt. Lett. 2012. Vol. 37, № 3. P. 289–291.
15. Abouraddy A.F. et al. Quantum optical coherence tomography with dispersion cancellation // Phys. Rev. A. Aps, 2001. Vol. 65, № 5. P. 19.
16. Valencia A., Scarcelli G., Shih Y. Distant clock synchronization using entangled photon pairs // Appl. Phys. Lett. 2004. Vol. 85, № 13. P. 2655.
17. Fedorov M. V et al. Packet narrowing and quantum entanglement in photoionization and photodissociation // Phys. Rev. A. 2004. Vol. 69, № 5. P. 52117.
18. Law C., Eberly J. Analysis and Interpretation of High Transverse Entanglement in Optical Parametric Down Conversion // Phys. Rev. Lett.

2004. Vol. 92, № 12. P. 1–4.
19. Katamadze K.G. et al. Intracavity generation of broadband biphotons in a thin crystal // *Laser Phys. Lett.* 2013. Vol. 10, № 4. P. 45203.
  20. Carrasco S. et al. Spatial-to-spectral mapping in spontaneous parametric down-conversion // *Phys. Rev. A.* 2004. Vol. 70, № 4. P. 43817.
  21. Carrasco S. et al. Spectral engineering of entangled two-photon states // *Phys. Rev. A.* 2006. Vol. 73, № 6. P. 1–6.
  22. Kalashnikov D.A., Katamadze K.G., Kulik S.P. Controlling the spectrum of a two-photon field: Inhomogeneous broadening due to a temperature gradient // *JETP Lett.* 2009. Vol. 89, № 5. P. 224–228.
  23. Катамадзе К.Г. et al. Управление частотным спектром бифотонного поля за счет электрооптического эффекта // *Письма в ЖЭТФ.* 2011. Vol. 94, № 4. P. 284–288.
  24. Straupe S.S. et al. Angular Schmidt modes in spontaneous parametric down-conversion // *Phys. Rev. A.* 2011. Vol. 83, № 6. P. 60302.
  25. Grubsky V., Savchenko A. Glass micro-fibers for efficient third harmonic generation. // *Opt. Express.* 2005. Vol. 13, № 18. P. 6798–6806.
  26. Nasr M.B. et al. Demonstration of Dispersion-Cancelled Quantum-Optical Coherence Tomography // *Phys. Rev. Lett. American Physical Society*, 2003. Vol. 91, № 8. P. 8–11.
  27. Mair A. et al. Entanglement of the orbital angular momentum states of photons. // *Nature.* 2001. Vol. 412, № 6844. P. 313–316.
  28. Torres J.P., Deyanova Y., Torner L. Preparation of engineered two-photon entangled states for multidimensional quantum information // *Phys. Rev. A.* 2003. Vol. 67, № 052313. P. 1–5.
  29. Kovlakov E. V, Straupe S.S., Kulik S.P. Quantum state engineering with twisted photons via adaptive shaping of the pump beam // *Phys. Rev. American Physical Society*, 2018. Vol. 98, № 060301(R). P. 1–6.
  30. Tsvetkov S. et al. Phase-matching of the HE 11 and HE 13 modes of highly doped GeO<sub>2</sub>–SiO<sub>2</sub> fiber waveguides at 1596 nm and 532 nm, respectively, for triple-photon generation // *Laser Phys. Lett. IOP Publishing*, 2016. Vol. 13, № 025104. P. 1–6.