

# Отзыв официального оппонента

на диссертацию Федорова Ильи Алексеевича «Нелокальное управление квантовым состоянием света», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 – «оптика».

Диссертационная работа Федорова Ильи Алексеевича посвящена приготовлению, преобразованию и измерению различных квадратурных состояний света. Основной акцент делается на нелокальном управлении перепутанными квантовыми состояниями за счет воздействия на одну из подсистем. В последнее время развитие квантовой оптики достигло того уровня, когда результаты исследований уже ложатся в основу новой отрасли: квантово-оптических технологий. По всему миру развиваются квантовые сети для секретной передачи информации, квантовые свойства света позволяют создавать измерительные приборы, предельно чувствительные к изменению оптической фазы, и, наконец, ведутся активные исследования, направленные на создание полномасштабного квантового компьютера. В связи с этим, задачи управления квантовыми состояниями света являются **актуальными и востребованными** в современном мире.

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Текст изложен на 107 страницах, содержит 47 рисунков, одну таблицу и 184 библиографических ссылки.

Во **введении** содержится краткая история развития квантовой оптики, обоснована актуальность работы, указана научная новизна и практическая значимость полученных результатов; сформулированы положения, выносимые на защиту и указан личный вклад автора.

**Первая глава** посвящена исследованию эффекта «квантового вампира». Этот эффект заключается в том, что действие оператора уничтожения фотона на многомодовое состояние света, перепутанное по числу фотонов, приводит к тому, что фотон удаляется сразу из всех мод, а распределение энергии между модами остается неизменным. Эффект был продемонстрирован на простом примере: однофотонное или двухфотонное фокковское состояние разделялось фазовой пластинкой на две поляризационные моды, затем в одной из мод производилось вероятностное вычитание фотона. Для этого использовался светоделитель со слабым коэффициентом отражения. Регистрация фотона в отраженном канале свидетельствовала об отщеплении фотона. Затем обе моды обратно сводились в одну второй фазовой пластинкой и измерялось квадратурное состояние поля на выходе. Были проведены расчеты квадратурных распределений для случаев, когда фотон вычитается лишь из одной моды, и когда он вычитается из обеих мод сразу, и экспериментально измеренное квадратурное распределение совпало со вторым случаем.

**Вторая глава** посвящена дистилляции перепутанности Эйнштейна-Подольского-Розена. Эффект показан на примере двухмодового сжатого вакуума. Моды, находящиеся в таком состоянии, перепутаны по квадратурным переменным, но при внесении в любую из мод оптических потерь степень перепутанности падает. Для восстановления перепутанности производится бесшумовое усиление поля посредством вероятностного подмешивания однофотонного состояния. По сути, такое усиление представляет собой

отбор наиболее ярких состояний из ансамбля с малой средней яркостью. В результате эксперимента удалось увеличить степень перепутанности до уровня превышающего степень перепутанности исходного состояния до внесения оптических потерь.

**Третья глава** посвящена томографии многомодовых квантовых процессов. Задача заключается в том, чтобы восстановить матрицу квантового процесса в некотором базисе. Для этого нужно подать на вход квантового процесса полный набор различных суперпозиций базисных состояний и для каждого случая провести полный набор проекционных измерений выходного состояния. Для описания многомодового квантового процесса как правило используется базис фоковских состояний света. Однако, в работе показано, что для восстановления матрицы процесса в фоковском базисе достаточно использовать когерентные состояния, которые являются простейшими для приготовления суперпозициями фоковских состояний. В качестве примера демонстрируется томография светоделиителя. В результате, точность восстановления составила от 70% до 95% в зависимости от размерности фоковского пространства.

**Четвертая глава** носит обзорный и технический характер. В ней приведены основные и теоретические методы, использовавшиеся в ходе работы. Описаны методы контроля параметров лазерного излучения, приведено теоретическое описание и детали экспериментальной реализации гомодинных измерений. Приведено теоретическое описание сжатых состояний света и описана методика их приготовления. Также приведены методики исследования различных нелинейных оптических процессов (генерация второй гармоники и разностной частоты) и приготовления фоковских состояний света.

В **заключении** приводятся основные результаты, полученные в диссертации.

В качестве наиболее ярких результатов, обладающих **научной новизной** можно выделить следующие:

1. Продемонстрирован «нелокальный» характер операции уничтожения фотонов при воздействии на одну из мод перепутанного многомодового состояния света
2. Разработан и реализован метод дистилляции запутанности состояния Эйнштейна-Подольского-Розена, основанный на вероятностном бесшумовом усилении света за счет подмешивания однофотонного состояния
3. Разработан и апробирован метод квантовой томографии многомодового процесса. Показано, что для восстановления матрицы процесса в фоковском базисе достаточно подавать на вход процесса простые в приготовлении когерентные состояния света.

Достоверность представленных научных исследований обеспечивается использованием современных средств и методик проведения исследований и согласием между экспериментальными данными и результатами расчета. Также новизна и достоверность подтверждаются публикациями в авторитетных рецензируемых научных журналах и докладами на международных конференциях.

Сама диссертация представляет собой законченную работу, состоящую из решения логически связанных между собой задач. Результаты работы могут быть использованы при планировании новых экспериментов по приготовлению, преобразованию и измерению квантовых состояний света.

По диссертационной работе можно высказать следующие замечания:

1. Текст диссертации не логично структурирован. По сути, весь обзорный материал, к которому идет отсылка по всему тексту работы, вынесен в последнюю главу. Там же дано и описание некоторых деталей схем экспериментальных установок, которые приведены в основных главах и дана расшифровка некоторых аббревиатур, которые до этого использовались по всему тексту. Было бы разумнее привести весь обзорный материал в начале текста, приводить ключевые детали эксперимента в основных главах, а несущественные технические детали вынести в приложение.
2. Раздел 2.1 посвящен методу генерации сжатого состояния света с помощью двух кристаллов типа 1, показывается, что такая схема гораздо лучше стандартной, в которой используется один кристалл типа 2, однако в основном эксперименте, посвященном бесшумовому усилению сжатого состояния, используется стандартная схема. В связи с этим роль раздела 2.1 остается непонятной.
3. В работе не совсем корректно используется термин «невыврожденный процесс СПР». Как правило он обозначает, что сигнальный и холостой фотоны не вырождены по энергии – имеют разные длины волн. В работе же этот термин используется в более широком смысле для обозначения того, что фотоны распространяются в разных модах (которые могут отличаться не только по длине волны, но и по направлению или поляризации).
4. Из текста работы видно, что автор читал мало научных работ на русском языке. Из-за этого в тексте используются грамматические конструкции, характерные для английского языка, но неприемлемые в русском («не-пренебрежимо мал» и др.), что затрудняет понимание. Кроме того, в разделе 4.3 приведены ссылки на пионерские работы в области исследования эффекта спонтанного параметрического рассеяния света (СПР), среди которых ни одной ссылки на работы российских (советских) ученых. В то время, как эффект СПР был независимо открыт в СССР и в США в 1967 году, и после этого его исследования активно велись в обеих странах.

Отмеченные недостатки, однако, носят частный характер и не снижают общей высокой оценки диссертации. Результаты, полученные в работе, достаточно полно обосновывают научные положения, вынесенные на защиту. Автореферат правильно и полностью отражает содержание диссертации. Основные результаты опубликованы в 3 научных статьях в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК РФ.

Диссертационная работа «Нелокальное управление квантовым состоянием света» является законченной научно-квалификационной работой и удовлетворяет требованиям

ВАК РФ, предъявляемым к работам на соискание научной степени кандидата физико-математических наук, а ее автор, Федоров Илья Алексеевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 – «оптика».

Официальный оппонент:  
к. ф.-м. н., научный сотрудник  
ФТИАН РАН, г. Москва

  
/Катамадзе Константин Григорьевич/  
дата: 19.03.2016

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технологический институт Российской академии наук (ФТИАН РАН)  
117218, Россия, Москва, Нахимовский проспект, 36/1, ФТИАН  
тел.+7 (499) 129-63-66, e-mail: k.g.katamadze@gmail.com

Подпись Катамадзе Константина Григорьевича удостоверяю:  
Ученый секретарь ФТИАН РАН  
кандидат технических наук  
Кальнов Владимир Александрович

  
М. П.  


## Список

публикаций официального оппонента Катамадзе Константина Григорьевича, опубликованных за последние пять лет по теме диссертации Федорова Ильи Алексеевича «Нелокальное управление квантовым состоянием света», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 – «оптика».

1. Katamadze K. G. et al. Intracavity generation of broadband biphotons in a thin crystal: article // Laser Phys. Lett. 2013. Vol. 10, № 4. P. 45203.
2. Gatto Monticone D. et al. Beating the Abbe Diffraction Limit in Confocal Microscopy via Nonclassical Photon Statistics // Phys. Rev. Lett. 2014. Vol. 113, № 14. P. 143602.
3. Borshchevskaya N. A. et al. Three-photon generation by means of third-order spontaneous parametric down-conversion in bulk crystals: Quantum Physics // Laser Phys. Lett. IOP Publishing, 2015. Vol. 12, № 11. P. 115404.
4. Katamadze K. G. et al. Broadband biphotons in a single spatial mode // Phys. Rev. A. 2015. Vol. 92, № 2. P. 23812.
5. 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, № 2. P. 25104.
6. Богданов Ю. И. и др. Статистическое восстановление оптических квантовых состояний на основе взаимно-дополнительных квадратурных квантовых измерений // Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики. 2016. т. 123, № 2. С. 246–253.
7. Богданов Ю. И. и др. Исследование статистики фотонов с использованием компаунд-распределения Пуассона и квадратурных измерений // Автотометрия. 2016. т. 52, № 5. С. 71–83.

Официальный оппонент:

к. ф.-м. н., научный сотрудник

ФТИАН РАН



/Катамадзе Константин Григорьевич/

дата: 19.08.2016

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технологический институт Российской академии наук (ФТИАН РАН)

117218, Россия, Москва, Нахимовский проспект, 36/1, ФТИАН

тел.+7 (916) 792 52 56, e-mail: k.g.katamadze@gmail.com

Подпись Катамадзе Константина Григорьевича удостоверяю:

Ученый секретарь ФТИАН РАН

кандидат технических наук

Кальнов Владимир Александрович



М. П.