

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу

«Нелокальное управление квантовым состоянием света»

Федорова Ильи Алексеевича,

представленную на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

по специальности 01.04.05 – оптика

Активное развитие квантовой оптики в последние десятилетия оказало большое влияние на становление и прогресс в области квантовой информатики, при этом оптические квантовые коммуникации вышли уже на уровень практического использования. Эти успехи в значительной степени обусловлены тем, что экспериментаторы-оптики получили возможность приготавливать неклассические состояния света, обладающие неизвестными ранее свойствами, детектировать с высокой вероятностью единичные фотоны и т. д. Более того, поскольку фотоны способны распространяться на большие расстояния, сохраняя при этом своё начальное квантовое состояние, то такие исключительные свойства света делают его одним из ключевых элементов в разрабатываемых квантовых технологиях.

Осуществление детерминированных изменений квантовых свойств света является самостоятельной сложной проблемой. Стоит отметить, что разработка совершенных способов управления квантовым состоянием света содержащим, например, тысячу фотонов будет эквивалентно созданию квантового компьютера, способного решать задачи, недоступные для любого классического компьютера. Для решения этой проблемы предстоит пройти еще большой путь, где очень точное управление квантовым состоянием света, выделение и измерение параметров отдельных фотонов, изучение влияния однофотонных процессов на общую эволюции квантовой системы будут иметь большое значение. Эти актуальные проблемы квантовой оптики являются темой диссертации Федорова Ильи Алексеевича, демонстрирующей возможности неклассических (нелокальных) способов управления параметрами света.

Диссертационная работа посвящена изучению трех взаимно дополняющих основных задач: 1 – исследование возможностей процедуры уничтожения фотона для реализации нелокальных операций над запутанным квантовым состоянием света, 2 - разработка методов дистилляции квантовой запутанности с помощью бесшумового усиления света и 3 - характеристика неизвестного многомодового квантового процесса. Для достижения

поставленных целей Федоровым И.А. был решен целый ряд задач с использованием современных теоретических и экспериментальных методов квантовой оптики, зарекомендовавших себя надежными и эффективными.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, включающей 182 наименования.

Введение диссертации написано глубоко и содержательно. В нем автор демонстрирует всестороннее понимание теории, истоки и тенденции развития квантовой физики, описывает современные актуальные темы исследования, в том числе в области квантовой информатики. Вполне обоснованно автором аргументируется большое значение квантовой теории света для развития этой науки, обусловленного исключительно полезными свойствами фотонов. При этом он также показывает и с какими проблемами приходится сталкиваться исследователям при работе со светом на однофотонном уровне, где преимущества фотонов распространяться на большие расстояния, слабо взаимодействуя с окружением, сильно затрудняют управление светом, в том числе в сохранении его квантового состояния и реализации наперед заданных изменений в его эволюции. Наконец, во введении обосновывается актуальность, новизна, научная значимость и достоверность полученных результатов, формулируются выносимые на защиту основные научные положения.

Первая глава посвящена исследованию нелокальных свойств оператора уничтожения фотонов. Известно, что в общем случае при использовании световых полей, находящихся в произвольных (не однофотонных) квантовых состояниях, детектирование отдельного фотона не будет вызывать полного исчезновения светового поля. Автором ставится задача изучения квантовых особенностей влияния детектирования отдельных фотонов на свойства таких (многофотонных) полей. В соответствии с основными представлениями квантовой теории измерений, экспериментально показывается, как, выделяя (уничтожая) заданным образом отдельные фотоны из исходного светового поля, можно дистанционно осуществлять неклассические манипуляции с многофотонными полями. Эти манипуляции обладают пространственной нелокальностью, характерной для квантовой теории. При этом возникающие квантовые изменения состояния света могут не приводить к каким-либо изменениям его пространственных свойств, не сопровождаясь, например, появлением пространственной тени после поглощающего атома, или системы атомов, как это характерно для классической оптики, что и послужило основанием автору дать этому эффекту название «квантового вампира». Не обсуждая, насколько это название приживется в будущем, отмечу,

что предлагаемые автором сугубо квантовые манипуляции световыми полями представляются обоснованными, интересными и безусловно заслуживающими дальнейшего исследования и практического применения, например, в пространственно распределенных системах квантовых коммуникаций.

Во второй главе, первоначально в разделе 2.1 автор описывает разработанный в диссертации оригинальный двух-кристальный метод приготовления двумодово-сжатого состояния света и затем проводит его экспериментальную реализацию. При этом автором достигнуто рекордное сжатие квадратурных компонент света, равное 2.36 dB, что значительно превышает величину 1.5 dB, получаемую обычно в аналогичных нелинейных оптических процессах. Представленный в главе материал и полученные экспериментальные результаты демонстрируют высокий уровень владения автором теорией сжатых состояний света и уникальных знаний в области постановки современного эксперимента. Следует высоко оценить способность автора теоретически описывать неочевидные экспериментальные результаты, например, данные, полученные для квадратурных измерений двумодового сжатого поля и представленные на Рис. 2.5.

В разделах 2.2-2.3 второй главы автор описывает концепцию бесшумового усиления света и его экспериментальную реализацию — квантовый катализ, а затем демонстрирует экспериментальную реализацию этой процедуры для восстановления ЭПР-корреляций в двумодово-сжатом состоянии света, когда одна мода претерпевает сильные потери. В диссертации приводится детальное описание проведенного эксперимента. Следует отметить, что для его осуществления потребовалось провести большой комплекс работ по настройке установки, приготовлению квантовых состояний, калибровке и синхронизации работы всей аппаратуры, разработке метода по восстановлению фазы светового излучения, сбору и сохранению данных и т.д. Автором показывается, что предложенная в работе техника дистилляции квантовых состояний света позволяет экспериментально восстанавливать квантовую запутанность состояний света даже в ситуации, когда световое поле претерпевает сколь угодно сильные световые потери. Этот результат совершенно неочевиден и будет представлять большую ценность для последующих исследований. Считаю, что проведенный эксперимент и полученные в нем результаты ярко демонстрируют не только высокий уровень диссертанта, но и возможности современной экспериментальной квантовой оптики по дистилляции квантовых состояний, достигнутые при самом непосредственном участии Федорова Ильи Алексеевича.

В третьей главе диссертации представлены результаты исследования, посвященного

разработке многомодовой квантовой томографии, которая основана на использовании многомодовых когерентных состояний света и является обобщением подхода к квантовой томографии, предложенного ранее для одномодовых полей в работах руководителя диссертации [см., например, A. Anis and A. I. Lvovsky, New J. Phys. 14, 105021 (2012) - ссылка [73] в диссертации].

Разработка методов квантовой томографии, которые способны наиболее строго описывать все свойства произвольного квантового устройства, дающего отклик на произвольный входной сигнал, является одной из ключевых задач экспериментальной квантовой оптики и привлекает внимание многих исследователей. Решенная в диссертации задача многомодовой квантовой томографии представляется весьма актуальной в силу большой важности использования многомодовых состояний света для решения большого числа практически задач квантовой оптики, например, в описании свойств устройств многокубитовой квантовой памяти и репитера, а также различных квантовых вычислителей.

В разделе 3.1. автором представлена теоретическая схема предложенного метода, основанная на построении обобщенного функционала и нахождении его максимума, который описывает наиболее правдоподобное значение оператора, введенного автором диссертации для описания изучаемого квантового процесса. На основе данного подхода Федоров И.А. строит алгоритм нахождения максимума функционала, позволяющий минимизировать время поиска введенного оператора. Показано, что развиваемый подход на основе многомодовых когерентных состояний света, обладает свойством масштабируемости и, соответственно, может применяться к сложным процессам, включать большое число квантовых состояний и независимых световых мод.

На основе использования разработанного теоретического подхода Федоровым И.А. в качестве примера проведены успешные эксперименты по квантовой томографии двухмодовых световых полей. Получены многочисленные экспериментальные данные и проведено их детальное теоретическое описание. Часть характерных результатов представлены на рис.8, 9. Точность совпадения теории и эксперимента достигает 95 %, что убедительно показывает высокую надежность представленного подхода к квантовой томографии и перспективность для дальнейшего использования. Вновь обращает на себя внимание очень большой объем проделанной работы, включающей глубокие теоретические построения, создание соответствующей экспериментальной установки, множество полученных экспериментальных данных, их тщательную обработку и теоретическое описание. Детальность и основательность проведенного исследования не даёт оснований

усомниться в достоверности полученных результатов и ценности предложенного подхода. Примечательно также то, что развиваемый подход может применяться и к другим квантовым системам бозевского типа.

В четвертой главе автор описывает ряд экспериментальных и теоретических методов, которые использовались в настоящей диссертации. Приведенный материал позволяет понять важные детали проделанной автором работы и демонстрирует основательную теоретическую подготовку Федорова И.А., его широкую осведомленность в экспериментальных методах и способах их теоретического описания.

В заключении формулируются основные результаты работы. Отмечу несомненную высокую научную значимость полученных результатов, которая заключается в разработке оригинальных методов управления квантовыми состояниями света и их характеризации, что открывает новые экспериментальные возможности для современной квантовой оптики. Стоит отметить, что предложенные и продемонстрированные методы найдут практическое применение, в том числе и при решении задач оптической квантовой информатики.

Диссертация хорошо оформлена, проиллюстрирована цветными рисунками и графиками, позволяющими хорошо ориентироваться в представленном материале. Содержание автореферата соответствует диссертации. Вместе с тем местами в тексте встречаются опечатки и неточные утверждения, некоторые из которых позднее в тексте формулируются уже правильно. Ниже приводятся упомянутые неточности.

1) Стр. 5. Неточно сформулированное утверждение (второй абзац снизу):

«Непосредственная реализация однофотонных логических элементов также невозможно (выделено мной) без вовлечения квантовой нелинейной оптики [29]. Низкая эффективность этих методов есть следствие переноса квантовой информации в атомную систему и обратно; в результате, наследуется чувствительность последней к шумам окружения.»

Однако отмечу, что однофотонные логические элементы (однофотонные кубиты) можно реализовывать и без использования сильных оптических нелинейностей, также как и можно бороться с квантовыми шумами в эти условиях, не используя нелинейные взаимодействия с отдельными фотонами. Примером тому может служить проект линейного оптического квантового компьютера (о чем, кстати, автор говорит немного позднее, ссылаясь на работы [33,34,35]). Другое дело, что реализация эффективных двухкубитных (двухфотонных) логических элементов действительно требует использования нелинейных взаимодействия для однофотонных полей, где утверждение автора становится справедливым.

2) Стр. 5. Неудачная фраза (5 строка снизу)

«В основе этого “действия на расстоянии” лежит феномен квантовой нелокальности — возможности мгновенного взаимодействия удалённых физических систем [9,32].»

Видимо, автор хотел сказать, «*так часто называемого* мгновенного взаимодействия удалённых физических систем.» Все-таки, современная наука не может утверждать, что такие взаимодействия существуют, если не принимать во внимание квантовый потенциал, возникающий в известной формулировке квантовой механики, предложенной Д.Бомом. То, что разлетевшиеся частицы могут описываться общей волновой функцией и воздействие на каждую из частиц изменяет их общую волновую функцию, не противоречит основным положениями квантовой теории. Следует отметить, что ниже на стр.8 автор более точно описывает данное свойство квантовой системы: «Корреляции в наборе таких измерений не могут быть объяснены локальным образом [25,74,75]; ситуация выглядит так, как будто измерение, проводимое над одним из фотонов, оказывает мгновенное воздействие на второй из пары. За явлениями такого рода закрепилось название: нелокальный эффект действия на расстоянии.»

3) *Автор на стр.6 пишет:* «Продемонстрирована нелокальная природа операции уничтожения фотона в части световой моды. Эффект представляет собой не исследовавшийся ранее тип квантового действия на расстоянии, не приводящий (выделено мной) к коллапсу волновой функции оптического состояния. Это свойство оператора уничтожения фотонов является общим для всех бозонных систем». *Ниже автор также пишет:*

«В соответствие с предсказанием, локальное выполнение такого действия не должно приводить к изменению формы коллективного квантового состояния.»

Считаю, что выше приведенные тексты написаны нечетко, из этих предложений остается непонятным, о каких изменениях идет речь. Лишь затем по мере чтения диссертации становится предмет обсуждения становится более ясным. А именно, лишь на стр.8 находим более точное описание изучаемого явления:

«В отличие от измерения типа фон–Неймана, оператор уничтожения не приводит к коллапсу квантового состояния, но лишь изменяет его. Далее показано, что это изменение является глобальным; результат соответствует удалению фотона из всего распределённого состояния без возмущения его структуры.»

4) *Автор также пишет:*

«Эффект (Квантового вампира) имеет практическую значимость о области инженерии квантовых состояний света. Например, с его помощью, широко применяемая операция вычитания фотона [69] может выполняться удалённо, либо без обладания полной

информацией о структуре моды целевого состояния.»

Здесь возникает вопрос, требующий пояснений. Из ссылки на эту работу не следует ли, что о квантовом эффекте «вампира» авторам статьи [69] уже было известно в 2011 г. ? Или авторы статьи применяли этот эффект, не задумываясь о его общих свойствах?

Также в предложении имеется опечатка- вместо «о» следовало писать «в»

5) *Автор пишет:*

«Примером является пара фотонов, рождённых в разных модах света в процессе спонтанного параметрического рассеяния; при измерении такие фотоны обязаны обнаружить ортогональные поляризации, однако поляризация каждого из фотонов перед измерением не определена.»

Следует отметить, что автору здесь, и может быть в других аналогичных обсуждениях, следовало бы сослаться на основополагающие работы Д.Н Клышко, который и предложил данный способ приготовления двухфотонных состояний.

В диссертации встречаются и орфографические опечатки.

6) *На стр. 5:*

«Непосредственная реализация однофотонных логических элементов также невозможно без вовлечения квантовой нелинейной оптики [29]»

Правильно: «невозможна»

7) *На стр. 6 написано:*

«Эффективной техникой дистилляции является операция вычитания одиночного фотона; применённая двумодовому состоянию света, она позволяет получить состояние с более сильной запутанностью [52,53]»

пропущено к, следует писать: «применённая к двумодовому состоянию света»

8) *На стр. 6 Последний абзац параграфа части 0.2., написано:*

«Многие важнейшие оптические процессы — интерферометры, логические элементы, нелокальные операции — являются существенно многомодовыми,»

Это стилистическая неточность: интерферометр и логические элементы – не процессы.

9) *Стр. 7. Стилистическая неточность:*

«Разработанный метод позволил получить после двадцатикратного оптического ослабления ансамбль состояния более запутанных, чем результат аналогичного ослабления бесконечно-запутанного состояния света»

необходимо писать: «чем в результате аналогичного...»

10) *Стр. 9.*

Построение предложения грамматически некорректно:

«Когда акт поглощение происходит, следующее в случайном направлении переизлучение фотона регистрируемое детектором.»

11) Раздел 2.3.1. стр. 32, есть опечатки при описании работы схемы, изображенной на Рис.2.8. Так пишется, что моды ЭПР состояния разделяются на светоделителе ПСД3 (но на рис. 2.8 – этот светоделитель - ПСД1). Далее говорится о светоделителях ПСД10, ПСД 11, которых на рисунке нет, где судя по всему речь идет о светоделителях ПСД2, ПСД3.

Переходя к общей оценке работы, отмечу, что приведенные неточности и опечатки никоим образом не влияют на мою общую высокую оценку диссертационной работы, при выполнении которой Федоров Илья Алексеевич продемонстрировал очень высокий научный уровень, как в своих теоретических, так и в экспериментальных исследованиях.

Научная новизна представленной диссертационной работы не вызывает сомнений. А именно, автором впервые продемонстрирована нелокальная природа операции уничтожения фотона в части световой моды и, таким образом, впервые исследовано квантовое действие на расстоянии, не приводящее к коллапсу волновой функции оптического состояния. Впервые осуществлено восстановление исходного уровня запутанности квантового состояния поля, испытывавшего сильные (двадцатикратные) оптические потери. Это восстановление было впервые реализовано за счет использования бесшумового усиления света, которое не имеет принципиальных ограничений на величину усиления квантовой запутанности. В диссертации также разработана оригинальная техника, которая, впервые позволила охарактеризовать двумодовый квантовый процесс на произвольной области оптического гильбертова пространства и получить томографически полный объем информации, достаточный для достоверной реконструкции тензора многомодового квантового процесса.

Полученные И.А.Федоровым оригинальные научные результаты имеют большое значение для разрабатываемых в настоящее время экспериментальных методов управления квантовыми состояниями света, могут быть использованы на практике при создании экспериментальной техники, позволяющей производить высокоточные квантовомеханические измерения, при разработке высокоэффективных многомодовых квантовых репитеров. Результаты диссертации опубликованы в ведущих физических журналах, рекомендованных ВАК, докладывались на ряде российских и Международных конференций. Считаю, что диссертация Федорова Ильи Алексеевича соответствует критериям, установленным “Положением о присуждении ученых степеней” для кандидатских диссертаций, а сам автор диссертации, безусловно, заслуживает присуждения

ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05–
оптика.

Официальный оппонент:

Доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией Квантовой оптики и коммуникаций, директор Квантового центра Казанского Национального Исследовательского Технического Университета им. А.Н.Туполева.



Моисеев Сергей Андреевич,

12 Сентября 2016 г.

Подпись С.А. Моисеева заверяю.

Проректор по науке

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ"

Профессор



Сергей Анатольевич Михайлов

Контактная информация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ".

420111, Россия, Республика Татарстан, г. Казань, ул. К.Маркса, 10.

Телефон: +7-843-238-4110.

e-mails: samoi@yandex.ru, s.a.moiseev@kazanqc.ru

Список

основных публикаций за последние годы официального оппонента 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. Официальный оппонент Моисеев Сергей Андреевич, доктор физико-математических наук, специальность 01.04.05. «Оптика»:

- [1] E. S. Moiseev & S. A. Moiseev. Time-bin quantum RAM, Journal of Modern Optics (2016), DOI: 10.1080/09500340.2016.1182222.
- [2] K.I. Gerasimov, M.M. Minnegaliev, B.Z. Malkin, E.I. Baibekov, and S.A. Moiseev. High-resolution Magneto-optical Spectroscopy of $7\text{LiYF}_4: 167\text{Er}^{3+}$, 166Er^{3+} and Analysis of Hyperfine Structure of Ultra Narrow Optical Transitions. Phys.Rev. B **94**, 054429 (2016).
- [3] С. Н. Андрианов, С. А. Моисеев, Нанофотонный квантовый компьютер на основе атомного квантового транзистора, Квантовая электроника Т 46, с 937-941 (2015).
- [4] A. M. Hatta, A.A. Kamli, O. A. Al-Hagan, and S. A. Moiseev. Slow light with electromagnetically induced transparency in cylindrical waveguide. J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 48, 155502 (2015).
- [5] S. A. Moiseev, A. I. Sidorova, and B. S. Ham, Stationary and quasistationary light pulse in three-level cold atomic system. Phys. Rev. A. **89**, 043802 (2014).
- [6] S. A. Moiseev. Off-resonant Raman-echo quantum memory for inhomogeneously broadened atoms in a cavity. Phys.Rev.A **88**, 012304 (2013).
- [7] С. А. Моисеев, С. Н. Андрианов, Е. С. Моисеев Квантовый компьютер в схеме атомного квантового транзистора с логическим кодированием кубитов. Оптика и спектроскопия 2013, том 115, № 3, с. 406–414.
- [8]. E. S. Moiseev, and S. A. Moiseev. Scalable time reversal of Raman echo quantum memory and quantum waveform conversion of light pulse. New Journal of Physics **15** 105005 (2013).
- [9] Michael Siomau, Ali A. Kamli, Sergey A. Moiseev, and Barry C. Sanders Entanglement creation with negative index metamaterials Phys. Rev. A **85**, 050303(R) (2012).
- [10] M. Bonarota, J.-L. Le Goult, S. A. Moiseev, T. Chanelière. Atomic Frequency Comb storage as a slow-light effect. Journal of Physics B: Atomic, Molecular & Optical Physics **45**, 124002 (2012).

Доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией Квантовой оптики и коммуникаций, директор Квантового центра Казанского Национального Исследовательского Технического Университета им. А.Н.Туполева.



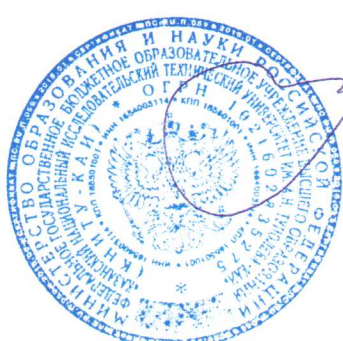
Моисеев Сергей Андреевич,
12 Сентября 2016 г.

Подпись С.А. Моисеева заверяю.

Проректор по науке

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
"Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ"

Профессор



Сергей Анатольевич Михайлов