

ОТЗЫВ

официального оппонента к.ф.-м.н. Страупе Станислава Сергеевича
о диссертационной работе Балыбина Степана Николаевича
«Динамика взаимодействия и перепутывание атомных систем с квантовыми
электромагнитными полями», представленной на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6. Оптика

Диссертационная работа С.Н. Балыбина посвящена теоретическому анализу взаимодействия электромагнитного поля в существенно неклассических состояниях с веществом. Рассматриваются как атомные системы, так и полупроводниковые квантовые точки в микрорезонаторах с сильной связью между материальной и полевой системой. Ключевой особенностью, определяющей новизну работы, является рассмотрение эффектов, обусловленных квантовой природой излучения, а также использование нелинейного взаимодействия для создания экзотических квантовых состояний поля. Эти состояния могут использоваться как ресурс в различных протоколах квантовой информатики, а также для сверхточных измерений. Поэтому настоящая диссертационная работа является крайне актуальной и может быть востребована ведущими мировыми научными группами.

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка цитируемой литературы. Полный объём диссертации составляет 177 страниц с 52 рисунками и 1 таблицей. Список литературы содержит 201 наименование.

Во **введении** приведены общие сведения о диссертационной работе, такие как актуальность выбранной темы исследования, цели и задачи, научная новизна и практическая значимость, выносимые на защиту положения, а также информация о публикациях соискателя и данные об апробации результатов работы.

Первая глава содержит литературный обзор, содержащий необходимые сведения об описании используемых в работе типов неклассических состояний света, а также краткий обзор работ в области взаимодействия квантового света с веществом. Рассмотрены работы по ионизации атомов неклассическими полями, распространению неклассических полей в средах с кубической нелинейностью и методы невозмущающего измерения числа квантов в оптическом излучении.

Вторая глава посвящена ионизации ридберговских атомов неклассическими полями. Рассматриваются две задачи – ионизация в условиях рамановских переходов через континуум и резонансный уровень, и надпороговая и многофотонная ионизация в неклассических полях. В первой задаче обнаружена чувствительность перепутанности атомной и полевой систем к фазе поля и предложены методы передачи относительной фазы полевого кубита атомному. Также предложен метод измерения фазы когерентного состояния поля по вероятности ионизации, использующий большую чувствительность этой величины к фазе поля. Во второй части теоретически рассмотрена задача о многофотонной ионизации в полях с произвольным квантовым состоя-

нием. Детально исследована ионизация сжатым светом и показаны существенные различия в спектре фотоэлектронов по сравнению с ионизацией в когерентном поле.

В **третьей главе** рассмотрена эволюция квантовых состояний поля в резонаторах с кубической нелинейностью и взаимодействие поля с квантовыми точками в резонаторе с учётом нелинейной фазовой модуляции. В первой части проанализирована генерация состояний с негауссовской функцией Вигнера за счёт фазовой самомодуляции в нелинейном резонаторе и показана возможность получения состояний со значительно меньшей неопределённостью числа фотонов, чем у гауссовских сжатых состояний. Важным элементом новизны здесь является получение точного решения с учётом оптических потерь, а также проведённые количественные оценки для реальных резонаторов с модами шепчущей галереи из различных материалов. Во второй части в систему добавляется двухуровневая система – квантовая точка и исследуется динамика взаимодействия с различными состояниями поля с учётом фазовой самомодуляции. Показано, что нелинейность при определённых условиях приводит к росту запутанности между полем и квантовой точкой, а также приводит к формированию новых типов негауссовских состояний полевой подсистемы.

Четвёртая глава посвящена исследованию одно- и двухмодового сжатия в резонаторах типа шепчущей галереи с кубической нелинейностью. Основное внимание здесь уделено нелинейным эффектам, а также прикладному аспекту – исследованию потенциала применения таких систем для реализации квантовых невозмущающих измерений числа фотонов. В первой части рассмотрен вопрос об использовании резонаторов с модами шепчущей галереи для генерации сжатых состояний и показано, что в этой задаче необходимы резонаторы с очень большой собственной добротностью и работа в режиме перегруженного резонатора. Рассмотрены несколько схем реализации невозмущающих измерений числа квантов в пробном поле, показано, что для резонаторов с реалистично большой добротностью можно преодолеть стандартный квантовый предел точности измерения этой величины. Также показано, что использование дополнительной сжатой моды в пробном канале позволяет существенно увеличить чувствительность измерения.

Заключение содержит сведения об основных результатах работы, библиографический список опубликованных работ автора по теме диссертации и общий список цитируемой литературы.

Диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне, что подтверждается публикациями в соответствующих исследовательской области научных журналах (в том числе высокорейтинговых) и в достаточной степени апробирована докладами на конференциях различного уровня. В качестве основных **достоинств работы** можно выделить следующие:

- Оценки возможности экспериментального наблюдения теоретически рассматриваемых эффектов. Это особенно четко проявляется в главах, посвящённых нелинейным микрорезонаторам – они всегда оканчиваются оценками для конкретных числовых значений пара-

метров, значения которых взяты из современных литературных источников. Показанная возможность наблюдения описываемых эффектов в реальных экспериментальных условиях сильно увеличивает ценность работы.

- Интересна детальная проработка идеи использования резонаторов с модами шепчущей галереи и кубической нелинейностью для невозможного измерения числа квантов. Здесь предложена новая схема с использованием сжатых состояний, которая позволяет существенно повысить точность, причём для сравнительно небольшой яркости пробного состояния и реалистичного сжатия, что делает её интересной для приложений. Также отметим детальный учёт оптических потерь – очень важный аспект для реальных экспериментов.

Автореферат соответствует тексту диссертационной работы.

В то же время к работе имеется ряд замечаний:

- Во второй главе представлен метод приготовления атомной системы в чистом суперпозиционном состоянии с относительной фазой в суперпозиции, определяемой фазой поля. Однако практическое значение этого метода вызывает сомнения, учитывая, что он существенно вероятностный и вероятность успеха привязана к наблюдению определённого числа фотонов в полевой подсистеме. Заметим, что численная оценка этой вероятности, т.е. полной эффективности протокола в работе не приводится. Кроме того, амплитуды коэффициентов в суперпозиции (формула 2.23) тоже привязаны к значению фазы, что ограничивает общность доступных состояний.
- В третьей части главы 3 неоднократно упоминаются квантовые вычисления и реализация квантовых логических операций как мотивация и возможное приложение полученных результатов. Однако из работы остаётся совершенно непонятно, какие именно операции имеются в виду, предполагает ли автор кодирование информации в состояниях поля или квантовой точки, и как именно полученные результаты можно использовать для построения логических вентилях. На наш взгляд, следовало бы более детально раскрыть эти вопросы.
- Замечание более терминологического характера – состояние (2.5) предлагается трактовать как состояние атомного кубита, при этом в суперпозиции (2.5) явно фигурирует три атомных состояния, т.е. это не кубит, а трёхуровневая система. Также нет никаких комментариев о том, как можно приготовить такое начальное состояние.

При этом указанные замечания не являются критическими по отношению к проведённым исследованиям и не умаляют значения результатов работы. Соискатель получил большое количество важных и принципиально новых научных результатов, актуальность которых для квантовой

оптики не вызывает сомнений, поэтому диссертация заслуживает высокой оценки.

Работа С.Н. Балыбина производит хорошее общее впечатление и представляет собой научную работу высокого уровня. Считаю, что диссертация «Динамика взаимодействия и перепутывание атомных систем с квантовыми электромагнитными полями» соответствует специальности 1.3.6. «Оптика» (по физико-математическим наукам), а также критериям, определённым пп. 2.1–2.5 «Положения о присуждении учёных степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова», предъявляемым к кандидатским диссертациям, и оформлена согласно приложениям № 8 и 9 «Положения о совете по защите диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова», а её автор — Балыбин Степан Николаевич — заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6. «Оптика».

Официальный оппонент:

кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник центра квантовых технологий
физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

Страупе Станислав Сергеевич

«7» июня 2024 г.

Контактные данные:

тел.: +7 (495) 939-11-04

E-mail: straups@quantum.msu.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена кандидатская диссертация:

01.04.21 — «Лазерная физика»

Адрес места работы:

119991, г. Москва, ул. Ленинские горы, д 1, стр. 2

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (МГУ имени М.В. Ломоносова)

Телефон: +7 (495) 939-31-60; e-mail: info@physics.msu.ru

«Подпись Страупе Станислава Сергеевича ЗАВЕРЯЮ»:

Учёный секретарь учёного совета

физического факультета

МГУ имени М.В. Ломоносова

доктор физико-математических наук, доцент

С.Ю. Стремюхов