

ОТЗЫВ

официального оппонента д.ф.-м.н., профессора Вятчанина Сергея Петровича
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 исследованию новых эффектов, возникающих при взаимодействии квантовых полей с атомными и наноструктурными системами. Неклассические состояния электромагнитного поля, генерация которых только недавно стала возможна экспериментально, обладают уникальными свойствами, востребованными для целого ряда практических приложений в области квантовых коммуникаций и квантовой метрологии с пониженным уровнем шумов. Наибольший интерес вызывают когерентные состояния с малым числом фотонов, а также сжатые состояния, характеризующиеся пониженной дисперсией одной из полевых квадратур, а также сильными корреляциями фотонов друг с другом. Воздействие квантовых полей на атомы и наносистемы еще очень мало изучено, но уже является перспективным научным направлением, которое открывает новые возможности для управления квантовыми свойствами нанообъектов, а также создания атомно-полевого интерфейса, необходимого для развития квантово-информационных технологий. Таким образом, тема диссертационной работы Балыбина С.Н. крайне актуальна, а проведенные теоретические исследования, несомненно, обладают теоретической и практической значимостью.

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.

Первая глава содержит подробный обзор современного состояния исследований по теме диссертации.

Во второй главе работы исследуется взаимодействие атомной системы с квантовым полем в условиях ионизации. Учитываются как атомные, так и полевые степени свободы системы. Первоначально рассмотрено взаимодействие малофотонного квантового поля с модельным ридберговским атомом в условиях перезаселения атомных состояний рамановскими переходами как через континуум, так и через нижнее резонансное состояние. Обнаружено заселение перепутанного атомно-полевого состояния, устойчивого к ионизации. На его основе разработаны алгоритмы передачи квантовой информации, включая фазовую, от полевого кубита к атомному. Исследуется запутанность между атомной и полевой подсистемами и характеристики атомного состояния в зависимости от фазы полевого кубита. Обнаружено существенное влияние фазы полевого кубита на ионизацию атомной системы и продемонстрирована возможность измерения фазы входного полевого состояния при помощи ионизационного

канала. Вторая часть данной главы посвящена исследованиям взаимодействия невозбужденного атома с квантовым электромагнитным полем и анализу особенностей ионизации атомной системы при воздействии многофотонных (ярких) сжатых состояний поля. Разработан теоретический подход, основанный на использовании собственных состояний свободного электрона в квантованном электромагнитном поле, найденных Берсоном в релятивистском случае и Бергу в нерелятивистском режиме, который позволил обобщить подход Келдыша для ионизации атомов классическим полем на полностью квантовое рассмотрение. На основе данного подхода исследована надпороговая ионизация атома и получены аналитические выражения для скорости ионизации в квантовом поле для процессов различного порядка многофотонности. Продемонстрированы ранее неизвестные особенности ионизации атомных систем неклассическим ярким сжатым вакуумом. Впервые выявлены особенности спектров фотоэлектронов в континууме в случае ионизации сжатым светом и физические механизмы их возникновения.

В третьей главе исследуется взаимодействие атомных систем с неклассическими электромагнитными полями в условиях нелинейной фазовой самомодуляции. Сначала обсуждается сосредоточенная модель микрорезонатора выполненного из материала с керровской нелинейностью и находятся характерные значения квантового сжатия, которые могут быть получены в системе. Проведены оценки возможности экспериментальной генерации квантовых состояний на эффекте фазовой самомодуляции в нелинейной среде. Исследована динамика оптического поля при прохождении когерентного состояния и состояния сжатого вакуума через среду с более сильными значениями кубичной нелинейности и обнаружено формирование негауссовских состояний поля, аналогичных состояниям кота Шредингера. Далее анализируется воздействие таких состояний на полупроводниковые квантовые точки. Рассматривается взаимодействие однофотонной моды с полупроводниковой квантовой точкой в твердотельном нелинейном резонаторе с использованием модели Джейнса-Каммингса. Важно, что аналитическое решение данной задачи было найдено впервые. Наиболее ярким результатом данного раздела является обнаруженный новый физический эффект, заключающийся в компенсации влияния нелинейности за счет выбора оптимальной отстройки. Это приводит к строго периодическому повторению «коллапсов» и «возрождений» электронных возбуждений, наблюдающихся даже для поля в состоянии сжатого вакуума, что получено впервые. Проанализирована перепутанность между квантовой точкой и полем и продемонстрировано периодическое ее изменение во времени, что позволяет периодически воздействовать на каждую из подсистем в отдельности, не меняя состояния второй подсистемы. Также продемонстрировано формирование новых негауссовских состояний поля, возникающих за счет взаимовлияния нелинейных эффектов и взаимодействия с квантовой точкой, динамика которых проанализирована как в рамках формализма функций Вигнера, так и при помощи «квантовых

ковров».

В четвертой главе диссертации исследуется генерация двумодовых сжатых состояний за счет эффекта фазовой кроссмодуляции в открытой квантовой системе и на основе этого разрабатываются схемы квантовых невозмущающих измерений. В диссертации продемонстрирована возможность квантовых невозмущающих измерений количества квантов в поле слабого сигнала с использованием классического пробного поля в высокодобротном кристаллическом микрорезонаторе. На основе точного решения уравнений Гейзенберга предсказаны погрешности измерения в несколько раз меньше лучше стандартного квантового предела. На основе использования поля в состоянии сжатого вакуума разработана схема дальнейшего увеличения чувствительности квантового невозмущающего измерения количества квантов еще в несколько раз.

Диссертационная работа Балыбина С.Н. выполнена на высоком научном уровне. В ней получены важные и приоритетные результаты. Разработана фундаментальная теория ионизации атомных систем неклассическими электромагнитными полями, на основе которой выявлены особенности режимов ионизации и стабилизации атомных систем, обусловленные квантовыми свойствами воздействующих полей. Предложена схема обмена фазовой информацией между квантовым полем и атомом, основанная на формировании стабильного собственного состояния перепутанной атомно-полевой системы, устойчивого к ионизации. Предложено несколько новых измерительных квантовых схем со сверхвысоким разрешением.

Одним из наиболее ярких результатов диссертационной работы является обнаруженный новый режим взаимодействия квантового поля с атомным кубитом, возникающий в условиях керровской фазовой самомодуляции, и заключающийся в строго периодических коллапсах и возрождениях атомных возбуждений и перепутанности в системе, что позволяет контролируемо управлять атомно-полевыми состояниями. Полученные результаты открывают новые возможности для управления свойствами гибридных перепутанных систем и построения атомно-полевого контролируемого интерфейса, что имеет принципиальное значение для разработки квантовых логических алгоритмов.

В качестве основных достоинств работы можно выделить следующие:

- Анализ динамики взаимодействия атома с полем в условиях сильной перестройки собственных состояний отдельных подсистем, то есть за рамками пертурбативных режимов;
- Детальный анализ перепутанности атомной и полевой систем друг с другом, а также изучение влияния обнаруженных корреляций на динамику взаимодействия;
- Теоретическое предсказание новых физических эффектов, имеющих высокую фундаментальную и прикладную значимость;
- Получение аналитических решений для большинства поставленных задач, что позволяет выявить физические механизмы возникающих физических эффектов

Полученные в работе результаты апробированы публикациями в 8 статьях в рецензируемых международных научных журналах (в том числе высокорейтинговых) и докладами на множестве приоритетных международных научных конференций.

Автореферат соответствует тексту диссертационной работы.

В то же время к работе имеется ряд замечаний:

1. К главе 2 получены безусловно интересные результаты о взаимодействии кубита с когерентным или неклассическим полем в резонаторе. Однако в эксперименте поле в резонаторе недоступно для измерения, обычно анализируется поле, входящее в резонатор и *выходящее*, а не состояние кубита и состояние поля *внутри* резонатора. Поэтому исследования этой задачи, надеюсь, будет продолжено с тем, чтобы сформулировать прямые указания экспериментаторам, что и как измерять.

2. В главе 3 оригинальные результаты для генерации негауссовых состояний в нелинейном оптическом резонаторе и их взаимодействие с атомами в резонаторе. Дополнительно исследуется влияние оптического затухания. Однако поле *внутри* резонаторе, как и параметры атомного состояния в эксперименте не могут быть измерены, а может быть измерено *выходящее* из резонатора поле. При этом диссипация в резонаторе из-за связи принципиально необходима и должна быть больше диссипации из-за потерь. Это в диссертации не рассмотрено. Надеюсь, что исследования по этому вопросу будут продолжены.

3. В главе 3 получены интересный результат: периодическое повторению «коллапсов» и «возрождений» электронных возбуждений, наблюдающихся даже для поля в состоянии сжатого вакуума. Жаль, что не получены простые формулы для параметров, при которых реализуется этот результат, он получен подбором параметров в численном моделировании громоздких аналитических формул.

Данные замечания не снижают общей высокой оценки работы и не являются критическими по отношению к проведённым исследованиям. В своей работе Балыбин С.Н. получил большое количество важных и принципиально новых результатов, обнаружил новые физические эффекты. Диссертация С.Н. Балыбина является целостным научным исследованием, выполненным на высоком теоретическом уровне, имеющим высокую теоретическую и практическую значимость и содержащим новые решения актуальных задач. 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:

доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий кафедрой физики колебаний физического факультета
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Московский государственный университет имени
М.В. Ломоносова»

Вятчанин Сергей Петрович

« 5 » _июня_ 2024 г.

Контактные данные:

Телефон: +7 (495) 939-11-52

E-mail: svyatchanin@phys.msu.ru.

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена докторская диссертация:

01.04.01 — «Приборы и методы экспериментальной физики»

Адрес места работы:

119991, г. Москва ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

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

«Подпись Вятчанина Сергея Петровича ЗАВЕРЯЮ»:

Учёный секретарь ученого совета
физического факультета
МГУ имени М.В. Ломоносова
д.ф.-м.н., доцент

Стремоухов С.Ю.