

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА



На правах рукописи

Балыбин Степан Николаевич

**ДИНАМИКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ И
ПЕРЕПУТЫВАНИЕ АТОМНЫХ СИСТЕМ С
КВАНТОВЫМИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ
ПОЛЯМИ**

Специальность:
1.3.6. Оптика

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2024

Работа выполнена на кафедре атомной физики, физики плазмы и микроэлектроники физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Научный
руководитель: **Тихонова Ольга Владимировна**,
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные
оппоненты: **Вятчанин Сергей Петрович**,
доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий кафедрой физики колебаний физического
факультета Московского государственного университета
имени М.В. Ломоносова

Погосов Вальтер Валентинович,
доктор физико-математических наук,
начальник лаборатории физики микро- и наноструктур
Всероссийского Научно-исследовательского института ав-
томатики имени Н.Л. Духова (ВНИИА)

Страупе Станислав Сергеевич,
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник центра квантовых техноло-
гий физического факультета Московского государственно-
го университета имени М.В. Ломоносова

Защита диссертации состоится « 20 » июня 2024 г. в 16:30 на заседании диссертационного совета МГУ.013.6 на физическом факультете Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 2, физическая аудитория имени Р.В. Хохлова.

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций Научной библиотеки Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (119192, г. Москва, Ломоносовский проспект, д. 27) и в сети Интернет: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/3008>.

Автореферат разослан « » мая 2024 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета МГУ.013.6,
д-р физ.-мат. наук, доцент
kosareva@physics.msu.ru



О.Г. Косарева

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Одним из направлений современной физики взаимодействия излучения с веществом является исследование систем, «одетых» различными классическими или квантовыми полями. Для таких систем был обнаружен целый ряд интересных эффектов: ионизация и стабилизация атомов сильным лазерным полем [1; 2], вынужденное тормозное рассеяние и спонтанное тормозное излучение электронов в лазерном поле [3], «вакуумные» осцилляции Раби [4], коллапс и возрождение атомной инверсной населенности в модели Джейнса-Каммингса, нелинейные процессы на базе электромагнитно-индуцированной прозрачности [5] и т.д. Тем не менее, проблема динамики «одетой» неклассическим полем атомной системы на сегодняшний день достаточно мало исследована, хотя и является важной как для развития фундаментальной науки, так и для разработки перспективных практических приложений. Наличие полевой степени свободы и возникающее перепутывание между атомом и полем существенно затрудняет рассмотрение динамики такой «двухкомпонентной» системы и одновременно с этим приводит к возникновению новых физических эффектов, не имеющих места при воздействии на атом классических полей. В последние годы интерес к изучению таких систем сильно возрастает, поскольку стало возможным экспериментальное создание большого числа различных состояний квантового света. Это и однофотонные состояния, и фоковские состояния с малым числом фотонов, неклассические когерентные состояния малой интенсивности, состояния сжатого вакуума и др. [6–13]. Кроме того, стало доступным изготовление и использование высококачественных резонаторов, а также сильной фокусировки неклассического света в очень маленьком фокальном объеме, что позволяет обеспечить сильную связь между атомом и квантовым полем [14; 15].

Эффективное взаимодействие между атомной и полевой подсистемами открывает новые перспективы при работе с квантовой информацией и стимулирует развитие методов хранения, обработки и передачи квантовой информации, а также разработку квантовой памяти и квантовых логических элементов. Уже достигнута возможность «записи» и «считывания» фотонных состояний «по требованию» с использованием эффекта индуцированной прозрачности [16; 17]. Передавать информацию оказывается очень удобно, используя состояния неклассического света, а манипулировать ею при помощи логических элементов на атомных кубитах. Поэтому очень важной и крайне востребованной задачей является разработка интерфейса между атомной и квантово-полевой подсистемами, осуществляющего передачу информации от одного к другому. Примерами уже частично изученных эффектов являются перепутывание между атомом и полем и обмен фазой между полевой и атомной подсистемами. Но польза

атомных систем может проявляться не только в задачах хранения и обработки квантовой информации, но и в задачах генерации и томографии полевых состояний.

Таким образом, анализ и теоретическое описание взаимодействия между атомными системами и неклассическими полями представляет собой крайне актуальную задачу. В настоящей работе исследуется взаимодействие атомных систем с неклассическими электромагнитными полями, при этом в ряде случаев учитываются процессы ионизации, а также влияние нелинейной среды. В обоих случаях находятся режимы взаимодействия, которые возникают за счет квантовой природы излучения. На основании этих режимов предлагается создание как измерительных устройств, так и платформы для проведения квантовых операций над состояниями атомных и полевых систем.

Цели и задачи. Целью данной работы является теоретическое исследование взаимодействия неклассических состояний электромагнитного поля с атомами и полупроводниковыми системами в условиях сильной перестройки атомной и полевой подсистем (за рамками пертурбативных режимов), анализ перепутанности между ними, а также изучение влияния обнаруженных корреляций на динамику системы. Данные исследования открывают новые возможности для построения атомно-полевого контролируемого интерфейса, позволяющего управлять свойствами как атомной, так и полевой подсистем на основе возникающих новых физических эффектов. Проводимый анализ также нацелен на разработку новых измерительных квантовых схем со сверхвысоким разрешением, основанном на использовании рассматриваемых гибридных перепутанных систем.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Исследовать взаимодействие полевого и атомного кубита с учетом связи с ионизационным континуумом и проанализировать существование стабильных собственных состояний перепутанной атомно-полевой системы.
2. Разработать теоретический подход для анализа ионизации атома неклассическим светом в однофотонном и многофотонном режимах и исследовать ее особенности и наиболее значимые отличия от случая ионизации классическим полем.
3. Исследовать возможность формирования состояний неклассического света с новыми свойствами в процессе взаимодействия с атомными или полупроводниковыми системами.
4. Проанализировать возможность генерации сжатых состояний света, и особенно негауссовых серповидных состояний, с использованием керровской нелинейности в современном резонаторе с модой шепчущей галереи с высоким значением добротности.

5. Теоретически проанализировать возможность томографии, то есть разработать методы получения информации о неизвестном атомном или полевом состоянии по измерению другой подсистемы с повышенной точностью по сравнению с известными методами.
6. Разработать схему квантового невозмущающего измерения, использующую неклассическую природу света.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования являются атомы, полупроводниковые квантовые точки, атомные и сверхпроводящие кубиты, а также взаимодействующие с ними неклассические электромагнитные поля. Предметом исследования являются новые физические эффекты, возникающие при взаимодействии рассматриваемых атомных систем с неклассическими электромагнитными полями, обусловленные квантовыми свойствами полей, возникающими корреляциями и перепутанностью в системе, а также наличием нелинейности для поля.

Методология и методы исследования. Основные результаты, представленные в настоящей работе получены при помощи аналитического решения нестационарного уравнения Шредингера, а также уравнений Гейзенберга для операторов рождения и уничтожения поля. Используется метод квазиэнергий и квазиэнергетических состояний, а также метод перехода к базису «одетых» состояний за счет преобразования оператора Гамильтона системы. Для анализа перепутанности между атомом и полем используется формализм матрицы плотности, а также параметр Шмидта. Для анализа возникающих состояний поля используется функция Вигнера, а также подход квантовых ковров. Для исследования роли потерь в оптической системе используется метод виртуального светоделиителя. Все необходимые численные расчеты, взятие интегралов и вычисление сумм, а также построение графиков производилось в вычислительной системе Wolfram Mathematica.

Научная новизна:

1. Впервые представлен теоретический подход к описанию ионизации атомных систем неклассическим полем, в том числе в состоянии сжатого вакуума, за рамками теории возмущений.
2. Разработан атомно-полевой интерфейс, реализующий эффективную передачу фазовой информации от полевого кубита к атомному.
3. Предложен метод, позволяющий за счет канала ионизации измерять фазу когерентного состояния поля с рекордной точностью.
4. Разработан теоретический подход для анализа динамики полевых мод в нелинейной среде с керровской нелинейностью, предсказано формирование негауссовских состояний поля и выполнены оценки для реальных оптических систем.
5. Впервые аналитически исследована динамика квантовой точки под действием неклассического когерентного и сжатого состояний

поля в условиях нелинейности и исследована структура «коллапсов» и «возрождений» возбуждений и перепутанности в системе.

6. Обнаружен новый режим строго периодических атомных возбуждений, позволяющий контролируемо управлять состояниями атомно-полевой системы и перепутанностью в ней, что имеет принципиальное значение для реализации квантовых логических операций и квантовых вычислений.
7. Впервые представлена схема квантового невозмущающего измерения числа фотонов с использованием сжатых состояний.

Теоретическая и практическая значимость данной работы состоит в разработанных новых теоретических подходах, обнаруженных новых физических эффектах, выявленных особенностях взаимодействия атомных и полупроводниковых наностисем с квантовыми полями, а также предложенных схемах высокоточных квантовых измерений, разработанных на основе квантовых свойств гибридных перепутанных систем. В результате работы была построена фундаментальная теория ионизации атомных систем неклассическими электромагнитными полями, на основе которой были выявлены особенности режимов ионизации и стабилизации атомных систем, обусловленные квантовыми свойствами воздействующих полей и возникающей перепутанностью между атомной и полевой подсистемами. На основе разработанного теоретического подхода к исследованию динамики квантовой точки при взаимодействии с произвольными неклассическими полями в условиях нелинейной фазовой самомодуляции были предложены схемы по управлению возбуждением квантовой точки, а также ее перепутанностью с полевой подсистемой, что имеет практическую значимость для построения квантовых логических алгоритмов и развития квантово-информационных технологий. Полученные результаты вносят важный вклад в разработку сверхчувствительных квантовых измерений. Предложен принципиальный метод сверхточных измерений на основе эффекта фазовой чувствительности скорости ионизации. Кроме того предложена схема квантовых невозмущающих измерений, а также проведено её усовершенствование за счет использования сжатых состояний поля. Данное улучшение позволяет приблизиться к однофотонным пределам чувствительности, что является ключевым для реализации множества квантовых оптических устройств.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Интерференция переходов в континуум из двух близких атомных уровней, индуцированных неклассическим электромагнитным полем, приводит к формированию перепутанного атомно-полевого состояния, устойчивого к ионизации, свойства которого существенно зависят от фазы поля.
2. Наблюдаемый в процессе ионизации эффект захвата населенности в стабильное собственное состояние перепутанной атомно-полевой

- системы, позволяет осуществлять обмен фазовой информацией между квантовым полем и атомом.
3. Разработанный в диссертации аналитический метод описания ионизации атома квантованным электромагнитным полем позволяет получить значение скорости ионизации за рамками теории возмущений как в однофотонном, так и в многофотонном режиме для любых начальных состояний поля, включая состояние сжатого вакуума.
 4. Исчезновение эффекта «закрытия каналов» в случае ионизации атома квантовым полем в состоянии сжатого вакуума обусловлено широким распределением и большой квантовой неопределенностью по числу фотонов рассматриваемого полевого квантового состояния.
 5. Существенное уширение и перекрытие пиков в спектре фотоэлектронов, наблюдаемое при ионизации атома квантовым полем в состоянии сжатого вакуума, обусловлено возникающей интерференцией переходов различного порядка многофотонности.
 6. Взаимодействие и перепутывания квантовой точки с квантовым электромагнитным полем в условиях керровской фазовой самомодуляции приводит к формированию новых типов негауссовских полевых состояний.
 7. Оптимальная отстройка квантового поля от резонанса при взаимодействии с атомным кубитом в условиях керровской фазовой самомодуляции приводит к новому режиму строго периодических коллапсов и возрождений атомных возбуждений и перепутанности в системе, который наблюдается даже в случае воздействия сжатого вакуума и позволяет контролируемо управлять атомно-полевыми состояниями.
 8. Найденная аналитическая формула для оптимальной отстройки является универсальной и не зависит от начального состояния поля и среднего числа фотонов в нем.
 9. Использование квантового поля в состоянии сжатого вакуума в схеме с кроссфазовым взаимодействием, разработанной для квантового невозмущающего измерения числа фотонов, позволяет улучшить точность измерения более чем в 7 раз по абсолютной величине при использовании сжатия 10 дБ.

Достоверность полученных результатов определяется использованием обоснованных теоретических подходов, совпадением решений с известными предельными или частными случаями, использованием различных методов решения и сходством результатов, полученных разными

способами, а также согласием полученных результатов с имеющимися расчетами других исследователей и с экспериментальными данными.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на научных семинарах в МГУ и Российском Квантовом Центре, а также были представлены на 20 международных конференциях и симпозиумах:

1. International Conference on Many Particle Spectroscopy of Atoms, Molecules, Clusters and Surfaces (MPS2016), Москва, Россия, 23-26 августа 2016.
2. The International Conference on Coherent and Nonlinear Optics (ICONO 2016) / The Lasers, Applications, and Technologies Conference (LAT 2016) ICONO/LAT 2016, Минск, Беларусь, 26-30 сентября 2016.
3. XXIV Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов – 2017», МГУ имени М.В.Ломоносова, Россия, 20 апреля 2017.
4. Quantum 2017 Advances in Foundations of Quantum Mechanics and Quantum Technologies with atoms and photons, Турин Италия, Италия, 7 мая - 11 июня 2017.
5. 26th International Laser Physics Workshop (LPHYS'17), Казань, РФ, Россия, 17-21 июля 2017.
6. Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2018», МГУ имени М.В. Ломоносова, Россия, 10-11 апреля 2018.
7. Студенческая конференция «От ядер галактик до атомных масштабов» факультета физики Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики», учебный центр Вороново, Московская область, Россия, Россия, 20-22 апреля 2018.
8. XVI Всероссийская школа-семинар "Волновые явления в неоднородных средах" имени профессора А.П. Сухорукова («Волны-2018»), Красновигово, Моск. обл., Россия, 27 мая - 1 июня 2018.
9. 27th International Laser Physic Workshop, Ноттингем, Великобритания, Великобритания, 16-20 июля 2018.
10. The International Conference on Many Particle Spectroscopy of Atoms, Molecules, Clusters and Surfaces, Будапешт, Венгрия, 21-24 августа 2018.
11. XVII Всероссийская школа-семинар «Физика и применение микроволн» имени профессора А.П. Сухорукова (Волны 2019), Красновигово, Московская область, Россия, 26-31 мая 2019.
12. 26th Central European Workshop on Quantum Optics (CEWQO-2019), Падерборн, Германия, 3-7 июня 2019.

13. 28th Annual International Laser Physics Workshop (LPHYS'19), Gyeongju, Корея, Республика, 8-12 июля 2019.
14. 5th International Conference on Quantum Technologies (ICQT2019), Москва, Россия, 15-19 июля 2019.
15. XIX Научная школа «Нелинейные Волны – 2020», Нижний Новгород, Институт прикладной физики РАН, Россия, 28 февраля - 6 марта 2020.
16. 19th International Conference on Laser Optics «ICLO 2020», Санкт-Петербург, Россия, 2-6 ноября 2020.
17. Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2020», Москва, Россия, 10-27 ноября 2020.
18. 6th International Conference on Quantum Technologies (ICQT2021), Москва, Россия, 12-16 июля 2021.
19. 5th International School of Quantum Technologies (QTS'22), Хоста, Сочи, Россия, 3-8 октября 2022.
20. «Нелинейные волны - 2022», Нижний Новгород, Россия, 7-13 ноября 2022.

Публикации. Основные результаты диссертации изложены в 25 печатных работах, в том числе в 8 статьях в рецензируемых научных журналах, удовлетворяющих Положению о присуждении учёных степеней в МГУ имени М.В. Ломоносова, и 17 публикациях в других научных изданиях и сборниках тезисов конференций. Список работ автора приведен в конце автореферата перед списком литературы.

Личный вклад. Все представленные в диссертационной работе результаты получены автором лично, либо при его определяющем участии.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Полный объем диссертации составляет **177** страниц текста с **52** рисунками и **1** таблицей. Список литературы содержит **201** наименование.

Содержание работы

Первая глава представляет собой подробный обзор литературы по теме исследования, в котором обсуждаются работы по неклассическим полям разного типа, исследованию ионизации атомных систем, влиянию нелинейности и квантовым невозмущающим измерениям. Подробно рассмотрены уже известные методы генерации различных неклассических состояний поля, а также свойства волновых функции таких полей. Перечислены уже изученные эффекты в области взаимодействия квантового поля с атомными системами. Отдельно проанализирована литература по теме ионизации атомов под действием классических и неклассических полей,

обсуждаются условия эффективного взаимодействия атома с неклассическим полем. Подробно анализируются методы кодирования и передачи квантовой информации, а также обсуждается использование негауссовских полевых состояний для этих целей. Также представлен обзор литературы по генерации негауссовских состояний в нелинейных средах. В заключении главы рассмотрен принцип работы схемы по квантовым невозмущающим измерениям и обсуждаются возникающие пределы точности детектирования числа фотонов.

Вторая глава посвящена исследованию взаимодействия атомных систем с квантовым электромагнитным полем в режиме возможной ионизации атома. Первоначально рассматривается взаимодействие между модельным ридберговским атомом и малофотонным квантовым электромагнитным полем в условии перезаселения состояний атома рамановскими переходами как через континуум, так и через нижнее резонансное состояние. Для анализа ионизации в этом случае, когда существенное влияние оказывает относительная фаза в полевого состоянии, разработан теоретический подход, основанный на решении нестационарного уравнения Шредингера следующего вида, учитывающего как атомную, так и полевою подсистему, а также взаимодействие между ними:

$$\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = \left(\hat{H}_{at} + \hat{H}_{field} + \hat{H}_{int} \right) \psi.$$

В подходе рассматриваются однофотонные переходы электрона в ионизационный континуум, и обратно, и демонстрируется возможность атомных состояний «выживать» в процессе ионизации. Задача решается с помощью нахождения энергий и волновых функций квазиэнергетических состояний, характеризующих атомную систему, «одетую» полем. Обнаружено формирование состояния, стабильного относительно процесса ионизации. Отдельно рассмотрен случай, когда квантовое поле изначально представляет собой фотонный кубит с некоторой относительной фазой между состояниями. Разработаны методы когерентного контроля атомного квантового состояния в результате взаимодействия с неклассическим полем. Реализована схема передачи относительной фазы от полевого кубита к атомному в процессе их взаимодействия. Также разработан метод измерения неизвестной фазы полевого кубита в процессе взаимодействия с атомом.

В условиях, когда фаза полевого состояния изначально неизвестна, атомная подсистема может выступать в качестве прибора для ее измерения. Для такого режима была исследована запутанность между атомной и полевыми подсистемами в процессе взаимодействия и выявлено влияние фазы полевого кубита на характеристики атомного состояния, формирующегося в процессе динамики. Обнаружено существенное влияние фазы полевого состояния на процесс ионизации атомной подсистемы и на вероятность ионизации. Также рассмотрены случаи других неклассических

начальных состояний поля, характеризующихся определенной фазой: когерентного состояния с малым средним числом фотонов и состояния сжатого вакуума. Продемонстрирована возможность получения информации о полевом состоянии при помощи измерений вероятности ионизации атома.

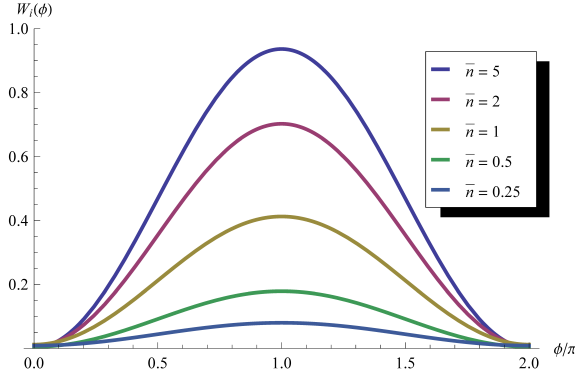


Рис. 1 — Зависимость вероятности ионизации W_i от фазы когерентного состояния ϕ при различных значениях среднего числа фотонов когерентного состояния \bar{n} в диапазоне от 0.25 до 5.

Зависимость вероятности ионизации W_i от фазы когерентного состояния ϕ при различных фиксированных средних числах фотонов \bar{n} изображена на Рис. 1. Видно, что для среднего числа фотонов, меньшего единицы, возможность определения фазы ухудшается. И при стремлении среднего числа фотонов к нулю будет невозможно определить фазу когерентного состояния. При $\bar{n} = 5$ достигается наиболее ярко выраженный характер зависимости от ϕ , а с дальнейшим ростом \bar{n} вид зависимости существенно не изменяется. Это означает, что при больших средних числах фотонов в когерентном состоянии точность при определении фазы по каналу ионизации не будет изменяться, в то время как методы квантовой оптики будут давать все лучший результат. Однако, практически во всем диапазоне от $\bar{n} = 1$ до $\bar{n} = 5$ ионизационный канал позволяет измерить фазу когерентного состояния с повышенной точностью. Точность оказывается выше любых оптических методов, что делает данную систему перспективным кандидатом на устройство для сверхточных фазовых измерений.

Далее в данной главе в качестве отдельной задачи исследуется взаимодействие невозбужденного атома с квантовым электромагнитным полем и анализируются особенности ионизации атомной системы при воздействии многофотонных (ярких) сжатых состояний поля. Разработан теоретический подход, основанный на использовании собственных состояний свободного электрона, «одетого» квантованным электромагнитным

полем, найденных Берсоном в релятивистском случае и Бергу в нерелятивистском режиме [18; 19]. Этот подход позволяет исследовать зависимость процесса ионизации от среднего числа фотонов в поле и от вида фотонной статистики. В данной главе рассматривается надпороговая ионизация с учетом каналов различного порядка многофотонности и выводятся аналитические выражения для скорости ионизации в квантовом поле различного типа: когерентного и сжатого. Наиболее важным является то, что все решения найдены за рамками стандартной теории возмущени, поскольку влияние квантового поля на электрон в континууме учтено точно. На основе удачно найденного аналитического приближения для полевого матричного элемента перехода впервые получены замкнутые аналитические выражения для скорости ионизации атома в квантовом поле.

В качестве одного из результатов были обнаружены существенные различия энергетических спектров фотоэлектронов, которые представлены на Рис. 2 в случае ионизации когерентным полем (сплошная линия) и сжатым вакуумом (пунктирная линия). Спектр в случае ионизации

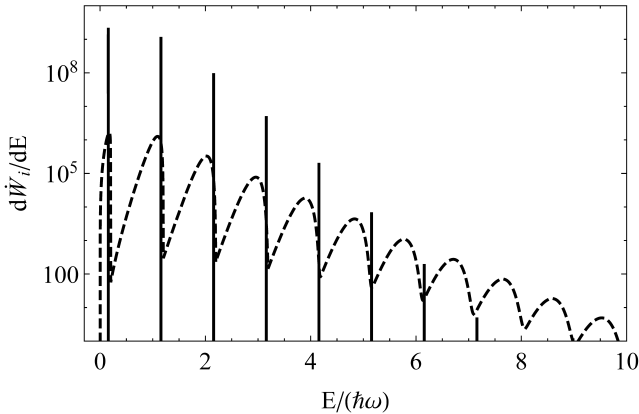


Рис. 2 — Спектры фотоэлектронов, вылетающих в направлении $\theta = 0$, при ионизации атома в режиме $\hbar\omega > I$ для среднего числа фотонов в поле равного 5×10^6 : δ -образные пики при ионизации когерентным полем, пунктирная линия в случае сжатого света

когерентным полем состоит из δ -образных эквидистантных пиков с расстоянием $\hbar\omega$ между ними, что связано с законом сохранения энергии. Кроме того, для когерентного поля при больших \bar{n} относительная ширина распределения изначального состояния по числу фотонов существенно уменьшается. Таким образом, распределение электрона по энергии в конкретном канале оказывается очень узким, и различные каналы не пересекаются друг с другом. Следовательно, каждый пик соответствует строго определенному каналу ионизации. При ионизации сжатым светом

спектр претерпевает значительные изменения: благодаря широкому распределению сжатого состояния по числу фотонов энергия электрона в фиксированном канале сильно размывается. Это происходит из-за влияния пондеромоторного потенциала на закон сохранения энергии:

$$E_{n,k} = \hbar\omega k - I - U_{pond}(n),$$

где последнее слагаемое оказывается пропорциональным числу фотонов и соответственно обладает средним значением и дисперсией. Благодаря широкому распределению по числу фотонов сжатого света неопределенность этого слагаемого оказывается порядка его среднего значения. Поэтому спектры различных каналов перекрываются, и в одну и ту же энергию электрона вносят вклад разные k . В итоге мы получаем непрерывный спектр без возможности разделения на отдельные каналы ионизации.

Также в данной главе рассчитываются и демонстрируются и другие важные особенности ионизации неклассическими полями. Показывается распределение скорости ионизации по ионизационным каналам. Оказывается, что в случае сжатого света по сравнению с когерентным излучением скорость ионизации спадает с ростом номера канала существенно более плавно, а суммарная скорость ионизации оказывается из-за этого на несколько порядков выше для одинакового среднего числа фотонов. Важно отметить, что разработанный метод решения задачи может быть применен как в случае «одnofотонного» режима ионизации, так и в случае, когда для выхода электрона в континуум требуется поглотить несколько полевых квантов сразу. В обоих случаях были произведены расчеты и обнаружены особенности ионизации сжатым вакуумом по сравнению с когерентным полем. Разработанный подход и результаты проведенного исследования являются новыми и получены впервые.

Третья глава посвящена изучению эффекта нелинейной фазовой самомодуляции и его влиянию на взаимодействие неклассических полей с атомными системами. В первой части главы рассматривается одномодовый свет и его эволюция в Керровской среде. Гамильтониан, описывающий ФСМ в оптической моде:

$$\hat{H} = -\frac{\hbar g}{2}(\hat{a}^\dagger \hat{a})^2,$$

здесь операторы \hat{a} и \hat{a}^\dagger являются операторами уничтожения и рождения в данной моде, а константа g пропорциональна величине нелинейности. Для данного гамильтониана первоначально находится решение уравнений Гейзенберга и анализируется динамика полевого состояния на фазовой плоскости. При этом отдельно анализируется два важных с практической точки зрения режима: оптический режим малых нелинейностей и режим сильных нелинейностей, который может проявляться в полупроводниковых системах.

Для случая малых нелинейностей оказывается, что для эффективного использования нелинейности требуются достаточно интенсивные оптические поля, а существующие методы расчета функций Вигнера и Хусими в данном режиме не позволяют добиться высокой точности результата. Поэтому разрабатывается критерий генерации негауссовских состояний внутри оптического резонатора, основанный на анализе неопределенности числа квантов без необходимости расчета функции Вигнера. Этот критерий базируется на формировании «банановых» состояний, которые можно трансформировать классическим сдвигом в состояния с уменьшенной определенностью по числу квантов. И при измерении или расчете данной неопределенности можно достоверно сказать о том, какое состояние сформировано в системе. Для дальнейших оценок рассматривается один из рекордных по добротности резонаторов из фторида кальция с собственной добротностью $Q = 10^{10}$ и показывается, что современные точности измерения позволяют измерить в нем формирование яркого негауссовского состояния.

В случае сильной нелинейности эволюция состояния поля определяется фазовой самомодуляцией, и можно рассматривать большие времена эволюции при относительно малых интенсивностях поля. В этом случае дисперсия квадратуры поля, полученная для начального состояния в виде когерентного поля $|\alpha\rangle$, может быть вычислена аналитически:

$$\begin{aligned} \text{Var}[x(t)] = & 1/2 + |\alpha|^2 \left[1 - e^{-2|\alpha|^2(1-\cos gt)} \right. \\ & - \cos(2|\alpha|^2 \sin gt - 2\omega t) e^{-2|\alpha|^2(1-\cos gt)} + \\ & \left. + \cos(gt + |\alpha|^2 \sin 2gt - 2\omega t) e^{-|\alpha|^2(1-\cos 2gt)} \right]. \end{aligned}$$

В работе анализируется поведение этой дисперсии и показывает периодичность эволюции полевого состояния, при этом периодически возникает существенное сжатие, как это наблюдалось и в случае малых нелинейностей. Следует отметить, что дисперсия дает только усредненную информацию об эволюции во времени, которая была бы полной для гауссовых состояний. Но для произвольного состояния эта информация не может описать все особенности нелинейной эволюции. По этой причине необходимо анализировать так называемый квантовый ковер. Он определяется как распределение вероятностей квантового поля по его квадратуре $|\langle x|\psi(t)\rangle|^2$ в зависимости от времени. Используя волновую функцию полевого состояния, полученную в представлении Шредингера, можно легко рассчитать ковры для различных начальных полей. Результаты приведены на рис. 3 для начального состояния когерентного поля с $\alpha = 2$ и на рис. 4 для сжатого вакуумного света с $R = 4$.

В левой части каждого из рисунков представлены ковры только для свободной эволюции без фазовой самомодуляции. Для большей наглядности стандартное отклонение x -квадратуры от ее среднего значения

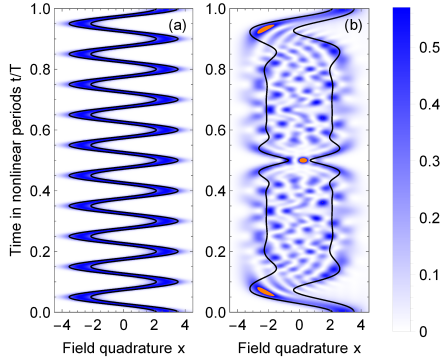


Рис. 3 — Квантовый ковер для поля в начальном когерентном состоянии с $\alpha = 2$ при $g/\omega = 0$ (а) и 0,1 (б).

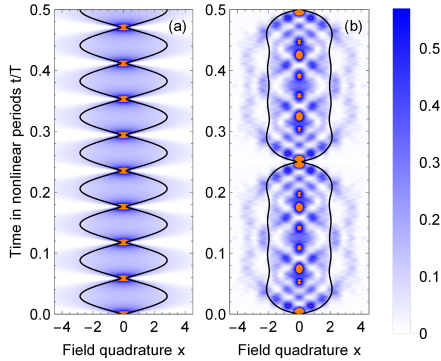


Рис. 4 — Квантовый ковер для поля в начальном состоянии сжатого вакуума $R = 4$ при $g/\omega = 0$ (а) и 0,125 (б).

$\sigma[x] = \sqrt{Var[x]}$ представлено одновременно жирной черной линией и оранжевым цветом выделены зоны локального сжатия поля. При исследовании динамики когерентного состояния обнаруживается формирование негауссовских состояний, аналогичных состояниям кота Шредингера. А в случае сжатого вакуума впервые демонстрируются новые негауссовские состояния света, динамика которых проанализирована как при помощи квантовых ковров, так и в рамках формализма функции Вигнера. Обнаруженная полевая динамика и формирующиеся в определенные моменты времени новые

состояния могут быть полезными для квантовых алгоритмов. Особенно интересным является вопрос о взаимодействии таких полей с атомными или полупроводниковыми системами и выявление новых эффектов.

Также в данной главе исследовано взаимодействие таких состояний с полупроводниковыми квантовыми точками. Рассматривается взаимодействие однофотонной моды с полупроводниковой квантовой точкой в твердотельном нелинейном резонаторе с использованием модели Джейнса-Каммингса [20; 21]. Предполагается, что сплошной нелинейный микрорезонатор аналогичен использовавшемуся в эксперименте [20], основанному на вытравленных сухим способом микростолбчатых структурах и распределенных брэгговских отражателях, изготовленных из слоистых полупроводников. Такая конструкция обеспечивает качественный резонатор с хорошим удержанием фотонов и относительно долгим временем жизни, а также режим сильной связи с квантовыми точками, вставленными в резонатор в пучности моды пространственного фотонного поля. Гамильтониан системы в приближении вращающейся волны имеет вид:

$$H = \hbar\omega_0 \frac{\sigma_z}{2} + \hbar\omega a^\dagger a - \hbar \frac{g}{2} (a^\dagger)^2 a^2 + \hbar\Omega (a^\dagger \sigma_- + a \sigma_+).$$

Здесь операторы a^\dagger, a обозначают операторы рождения/уничтожения фотонов, а матрицы Паули σ описывают полупроводниковую квантовую точку. Ω — вакуумная частота Раби, характеризующая силу взаимодействия полупроводника с квантовым полем $\Omega = \mu_{ge}\varepsilon_0/\sqrt{2}\hbar$, которая пропорциональна матричному элементу дипольного перехода μ_{ge} двухуровневой системы и вакуумному полю $\varepsilon_0 = \sqrt{4\pi\hbar\omega/L^3}$, сила которого зависит от объема резонатора L^3 .

Динамика взаимодействия квантовой точки с неклассическим полем в условиях нелинейности анализировалась в рамках нестационарного уравнения Шредингера с данным гамильтонианом, и было найдено аналитическое решение данной задачи. Продемонстрировано, что динамика системы характеризуется различными режимами, которые были проанализированы: режим слабого взаимодействия поля с квантовой точкой, режим их сильного взаимодействия, а также режим оптимального взаимодействия с учетом отстройки от резонанса. Во всех этих режимах были найдены интересные практические приложения, которые можно использовать для квантовых вычислений и проблем передачи и хранения квантовой информации. В частности, было продемонстрировано, что при наличии нелинейности повторяющиеся коллапсы и возрождения возбуждения квантовой точки оказываются более проявленными. Также был найден новый физический эффект, заключающийся в компенсации влияния нелинейности за счет выбора оптимальной отстройки, что приводит к строго периодическому повторению «коллапсов» и «возрождений» электронных

возбуждений. Было получено выражение для оптимальной отстройки:

$$\Delta_{opt} = \frac{\Omega^2 - 2g^2}{2g}.$$

Важным свойством обнаруженного режима является его универсальность. Поскольку в формуле оптимальной отстройки нет зависимости от среднего числа фотонов и от типа квантового поля такой режим достигим для любого начального состояния поля и любых параметров g и Ω . Таким образом, полное и чистое возрождение населенностей квантовой точки имеет место даже для начального состояния поля в виде яркого сжатого вакуума, что не было получено ранее.

Обнаруженный эффект анализируется для различных начальных состояний квантового поля. Сначала рассматривается случай лазерного поля, которое можно смоделировать когерентным состоянием поля. В работе анализируется зависимость населенности возбужденного состояния квантовой точки от времени, которая показана на рис. 5 для разных отстроек. На нижнем графике показаны коллапсы и возрождения в резонансном

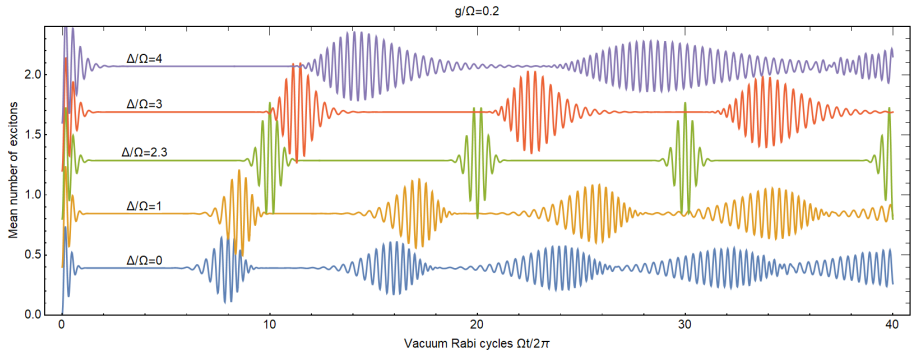


Рис. 5 — Зависимость вероятности возбуждения квантовой точки P_g в исходно когерентном состоянии с $\alpha = 4$ от времени в вакуумных циклах Раби при различных отстройках Δ и $g/\Omega = 0.2$. Участки разделены друг от друга по вертикали на 0.4, чтобы не было пересечений.

случае $\Delta = 0$, но с ненулевой нелинейностью $g \neq 0$. Этот график очень похож на известную модель Джейнса-Камминга [22; 23] без нелинейности, но с большим количеством отдельных возрождений. Отметим, что подобная динамика возрождений не является чисто теоретическим предсказанием, современные экспериментальные возможности позволяют наблюдать её в лабораторных условиях с высокой точностью [24]. Большие отстройки меняют период возрождений, он становится больше, а также форму паттернов возрождений. Третий график сверху (зеленый) на рис. 5 показывает

случай оптимального режима. Видно, что появляется стробоскопический эффект, и квантовая точка периодически полностью возбуждается.

Для более глубокого понимания динамики в диссертации также рассматривается перепутывание между полевой подсистемой и квантовой точкой. Доказывается, что в данном режиме взаимодействия периодически возникают моменты времени, когда подсистемы оказываются распутанными, чего ранее не удавалось обнаружить в подобных системах. Данный факт можно использовать для периодического воздействия на каждую из подсистем в моменты распутывания для измерений или внешнего воздействия.

Далее в работе рассматривается аналогичная динамика для случая сжатого вакуума. Как и в случае когерентного поля динамика оказывается разной для разных параметров силы взаимодействия g/Ω и разных отстроек Δ/Ω . В случае фиксированной величины нелинейности на рис. 6 представлена динамика возбуждения квантовой точки сжатым вакуумом.

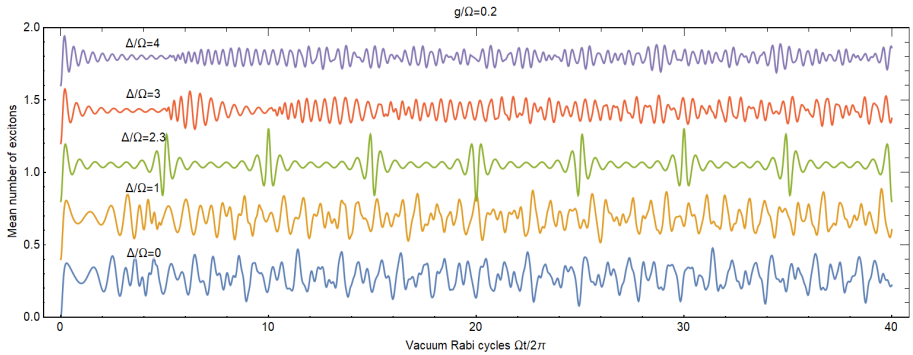


Рис. 6 — Зависимость вероятности возбуждения квантовой точки P_g в сжатом вакууме с параметром сжатия равным $R = 2e$ от времени в вакуумных циклах Раби при различных отстройках Δ и $g/\Omega = 0,2$. Участки разделены друг от друга по вертикали на 0,4, чтобы не было пересечений.

Хорошо видно, что в случае нулевой отстройки сжатый вакуум стимулирует преимущественно хаотическую динамику заселенности квантовых точек. Этот случай отражает особенности модели Джейнса-Каммингса в случае сжатого вакуума без нелинейности [25; 26]. При относительно малом или очень большом отношении Δ/Ω ситуация остается прежней. Однако при условии оптимальной отстройки имеет место необычная для такого поля очень регулярная динамика с периодом 20 вакуумных циклов Раби (см. третий график сверху, зеленая линия). Видность коллапсов и возрождений не такая сильная, как в когерентном поле, и они имеют другие характерные черты. Например, в случае когерентного поля у нас было только два разных типа возрождения, а здесь легко можно выделить четыре разных

фазы. В моменты 0 и 20 видно отсутствие возбуждения, в момент 10 наблюдается максимальное возбуждение до максимального значения 0,5, а в моменты 5 и 15 виден другой тип возрождений. В эти моменты времени обнаружено формирование нового интересного состояния света, которое может оказаться перспективным для квантовых протоколов с применением сжатого вакуума.

Четвертая глава настоящей диссертации посвящена проблеме генерации двумодовых сжатых состояний за счет эффекта фазовой кросс-модуляции в открытой квантовой системе и квантовым невозмущающим измерениям на их основе. В первой части главы детально анализируется процесс генерации таких состояний. В работе обобщаются предыдущие теоретические работы в этой области [27; 28] с учетом недавних экспериментальных достижений в создании высокодобротных микрорезонаторов с модами шепчущей галереи [29; 30] и внимание концентрируется на оптимальных режимах и параметрах для достижения максимально возможного сжатия. Для этого первоначально рассматривается уравнение Ланжевена для одной моды поля внутри резонатора с учетом накачки и потерь:

$$\dot{\hat{a}} + (\kappa + i(\omega - \omega_p - g\hat{a}^\dagger\hat{a}))\hat{a} = \sqrt{2\kappa_1}(A_p + \hat{V}_1) + \sqrt{2\kappa_2}\hat{V}_2,$$

где $\kappa = \kappa_1 + \kappa_2$, а $\kappa_{1,2}$ связано с коэффициентом пропускания и отражения $T_{1,2} \approx 2\kappa_{1,2}$, $R_{1,2} \approx 1$. Для его решения используется преобразование Фурье и стандартная процедура линеаризации, после которой уравнение на \hat{a} связывается с уравнением на \hat{a}^\dagger . Эта связь означает формирование одномодового сжатия, а для анализа величины сжатия в выходном поле используется формализм спектральной плотности. Аналогично в работе рассматриваются уравнения и для двух спутниковых мод резонатора \hat{b}_- и \hat{b}_+ . Их решение производится аналогично одномодовому случаю, однако вместо спектральной плотности мод по отдельности также анализируется корреляция между ними. Аналитически рассчитываются степень сжатия и чистота сжатого состояния, генерируемого в процессе спонтанного четырехволнового смешения в резонаторе с нелинейностью третьего порядка $\chi^{(3)}$, и анализируется ее зависимость от наиболее важных параметров, а именно потерь на связь с линией передачи, внутренних потерь в резонаторе и мощности оптической накачки. Зависимость чистоты состояния P от величины генерируемого сжатия Sq показана на рис. 7 для разных величин потерь κ_2/κ в системе.

Примечательно, что эта зависимость оказывается практически линейной, и при желании увеличить величину двухмодового сжатия с неизбежностью придется пропорционально жертвовать чистотой состояния.

В результате исследований продемонстрировано, что существующие сверхвысокодобротные кристаллические микрорезонаторы могут генерировать сжатый свет в реалистичных экспериментальных условиях при

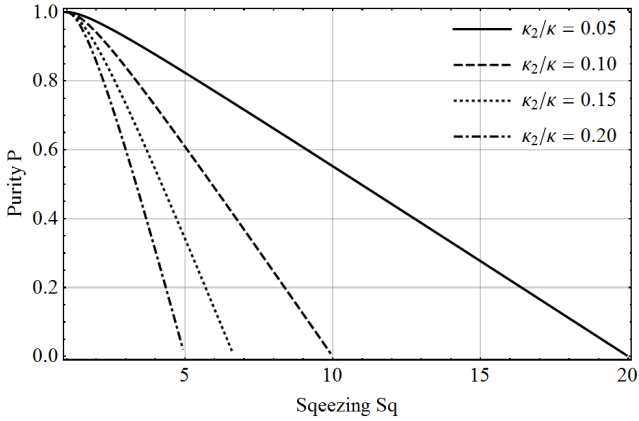


Рис. 7 — Параметрическая зависимость чистоты P получаемого одно-модового или двухмодового света от его сжатия Sq .

достаточно высокой добротности и высокой связью накачки с микро-резонатором. Данные оценки позволяют вернуться к идее квантового неразрушающего измерения (КНИ) числа фотонов через керровскую нелинейность за счет взаимодействия сигнальной и пробной волны. Схема КНИ может также оказаться экспериментально реализуемой в современных оптических микрорезонаторах.

Во второй части главы теоретически показывается, что кристаллические микрорезонаторы позволяют производить КНИ числа фотонов в поле слабого сигнала с использованием классического пробного поля, пространственно перекрывающегося с сигналом. Фаза пробного поля сдвигается в зависимости от количества квантов сигнального, не изменяя ее за счет эффекта фазовой кросс-модуляции. Гамильтониан поля такой двухмодовой системы в представлении взаимодействия можно представить в следующем виде:

$$\hat{H} = -\frac{\hbar\gamma S}{2} \sum_{x=s,p} \hat{n}_x(\hat{n}_x - 1) - \hbar\gamma_X \hat{n}_p \hat{n}_s,$$

где $\hat{n}_{s,p} = \hat{a}_{s,p}^\dagger \hat{a}_{s,p}$ — число фотонов в сигнальной и пробной моде поля соответственно, а $\hat{a}_{s,p}$, $\hat{a}_{s,p}^\dagger$ — операторы уничтожения и рождения сигнальной и пробной мод. Из этого гамильтониана видно, что числа квантов в обеих модах (в картине Гейзенберга) являются интегралами движения системы. Это позволяет найти точное решение уравнений движения Гейзенберга этой системы и вычислить погрешность измерения с учетом оптических потерь на детекторах. Произведя оптимизацию по различным параметрам схемы детектирования можно получить минимизированную погрешность

измерения:

$$(\Delta n_s)^2 = \frac{1}{\Gamma_X^2} \left(\frac{1}{4\eta\bar{n}_p} + \Gamma_S^2 \bar{n}_p \right).$$

Чтобы проверить данную формулу, были также решены уравнения Ланжевена, то есть рассмотрена открытая система. Однако результат, полученный обоими методами, приводит к одинаковому результату: КНИ числа фотонов вполне осуществима, если совокупные потери в измерительной системе достаточно малы. В результате демонстрируется, что лучшие современные кристаллические микрорезонаторы позволяют достичь погрешности измерения в несколько раз лучше стандартного квантового предела.

Распространенным способом повышения чувствительности оптической схемы является реализация в ней сжатых состояний света. И в последней части данной главы предлагается способ кратного увеличения чувствительности КНИ за счет дополнительного использования сжатого вакуума на входе измерительной схемы. Для оценок рассматривается реалистичный случай сжатия 10 дБ, что приблизительно соответствует коэффициенту e^{2r} , равному 10. Отметим, что сейчас многими группами активно ведется работа по увеличению достигнутой экспериментально величины сжатия [31; 32], на данный момент можно найти работы, где используется квадратурное сжатие 7-12 дБ в свободном пространстве [33] или 5 дБ в литографических схемах [34]. Поэтому выбранная величина для оценок является вполне достижимой.

Для схемы с использованием сжатого света была получена оценка погрешности измерения числа квантов в сигнальной моде:

$$(\Delta n_s)_\eta^2 = \frac{e^{-2r}}{4\bar{n}_p\Gamma_X^2} + \frac{1 - \eta}{\eta} \frac{(1 + 4\bar{n}_p^2\Gamma_S^2)}{4\bar{n}_p\Gamma_X^2}.$$

Рассчитанная по этой формуле неопределенность представлена на рис. 8 в зависимости от числа фотонов в пробной моде накачки для различных значений коэффициента входного сжатия.

Случай $e^{-2r} = 1$ соответствует отсутствию входного сжатия. Для всех графиков видно, что существует оптимальное значение мощности накачки для достижения наилучшей чувствительности. Также можно заметить, что даже при консервативных значениях сжатия $e^{-2r} = 0,5$ (или 3 дБ) чувствительность становится лучше поскольку оранжевая линия лежит ниже синей. При более оптимистичном коэффициенте сжатия $e^{-2r} = 0,1$ (или 10 дБ) можно провести КНИ с почти вдвое лучшей чувствительностью при выборе оптимальной мощности пробного поля. При этом минимальное значение чувствительности смещается в область меньших мощностей накачки. Что позволяет избежать конкурирующих эффекты, возникающих при высокой интенсивности оптических полей. Значит, несмотря на потери в системе, наличие сжатия на входе существенно

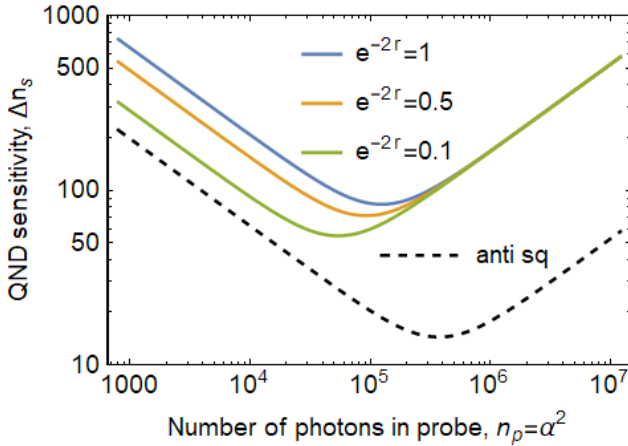


Рис. 8 — Зависимость чувствительности КНИ от числа фотонов в пробной моде при различных реалистичных значениях e^{-2r} . Для оценок взяты $\eta = 0,9$ и $\Gamma_X = 2\Gamma_S = 2,55 \times 10^{-5}$. Штриховой линией показан результат после добавления дополнительного антисжимателя в верхнем плече схемы детектирования при $e^{2r_2} = 10$.

улучшает схему оптических квантовых неразрушающих измерений. Отметим, что чувствительность можно улучшить ещё сильнее, если усилить пробное поле перед измерением при помощи обычного параметрического усилителя. Если взять коэффициент усиления $e^{2r_2} = 10$, то получится результат, изображенный на графике пунктирной линией. Таким образом продемонстрировано, что использование сжатия на входе и усилителя перед измерением позволяет существенно улучшить схему КНИ числа оптических квантов и повысить точность квантовых измерений на порядок.

В **заклЮчении** приведены основные результаты работы, которые состоят в следующем:

1. Обнаружена сильная перепутанность между атомной и полевой подсистемами в процессе взаимодействия и ионизации, продемонстрирована ее зависимость от фазы поля. Продемонстрирована возможность управления атомной динамикой при помощи фазы полевого состояния. Разработаны методы измерения фазы полевого состояния с высокой точностью на основе использования канала ионизации, что позволило превзойти гомодинный предел точности в случае малого числа фотонов.
2. Разработан теоретический подход для описания ионизации атома неклассическим электромагнитным полем, позволяющий получить результаты для произвольного начального состояния поля, включая сжатый вакуум с большим средним числом фотонов. Проанализирован режим однофотонного и многофотонного выхода

электрона в континуум и продемонстрировано существенное отличие динамики и механизмов надпороговой ионизации для случаев начального когерентного поля и поля в состоянии сжатого вакуума.

3. Впервые продемонстрированы особенности ионизации атомных систем неклассическим сжатым светом. В отличие от случая когерентного поля обнаружено существенно более плавное уменьшение вкладов различных надпороговых каналов в ионизацию, и отсутствие эффекта закрытия ионизационных каналов при больших интенсивностях поля. Также исследованы особенности спектров фотоэлектронов в континууме, заключающиеся в существенном перекрытии пиков от разных каналов ионизации.
4. Разработан теоретический подход для исследования динамики неклассического поля в резонаторе в условиях кубичной нелинейности для процесса вырожденного четырехволнового смешения. Детально исследован эффект фазовой самомодуляции, в результате которого статистика фотонов не меняется, однако происходит формирование совершенно новых негауссовых полей за счет набегга относительных фаз. В случае малой оптической нелинейности произведены оценки на параметры микрорезонаторов, необходимые для формирования существенной негауссовости. Для более сильных величин нелинейностей проанализировано вероятностное распределение состояния поля по обобщенной координате в зависимости от времени для различной начальной статистики фотонов, а также с использованием формализма функций Вигнера выявлены важные свойства формирующихся неклассических полевых состояний.
5. Получено аналитическое решение задачи о взаимодействии полупроводниковой квантовой точки с неклассическим светом в условиях Керровской нелинейности. Продemonстрировано, что при наличии нелинейности повторяющиеся коллапсы и возрождения возбуждения квантовой точки оказываются более проявленными. Более того, было обнаружено, что именно взаимовлияние сильной связи квантового поля с квантовой точкой и фазовой нелинейности приводит к формированию новых еще не исследованных негауссовских состояний поля. Также найден новый эффект, заключающийся в компенсации влияния нелинейности за счет выбора оптимальной отстройки, что режиму повторяющихся строго периодических коллапсов и полных возрождений атомных возбуждений и перепутанности в системе, который позволяет контролируемо управлять динамикой атомно-полевых состояний и впервые выявлен в случае воздействия поля в состоянии сжатого вакуума. Обнаруженный режим и периодическое подавление

перепутанности между квантовой точкой и полем позволяет независимым образом воздействовать на каждую из подсистем, что открывает новые возможности для создания квантового атомно-фотонного интерфейса на базе твердотельных наноструктур.

6. Решена задача о динамике двумодового квантового поля в нелинейной среде с учетом фазовой кросс-модуляции. Обнаружен и проанализирован эффект появления сильной перепутанности между модами. На его основе была разработана схема для квантового неразрушающего измерения количества фотонов без их поглощения. Произведены оценки, демонстрирующие её реализуемость в современных оптических микрорезонаторах с рекордными добротностями. Кроме того предложен способ повышения чувствительности данной схемы при помощи сжатых состояний поля.

Публикации автора по теме диссертации

Публикации в рецензируемых научных журналах, удовлетворяющих Положению о присуждении учёных степеней в МГУ имени М.В. Ломоносова:

- A1. **S.N. Balybin**, P.R. Sharapova, O.V. Tikhonova. *Coherent control of atomic qubits by non-classical light* // The European Physical Journal D. — 2017. — Vol. 71, no. 5. — P. 109. — **JIF = 1.8 (WoS)**. Общий объём статьи = 0,75 п.л.; личный вклад = 0,40 п.л.
- A2. **S.N. Balybin**, R.V. Zakharov, O.V. Tikhonova. *Phase-sensitive atomic dynamics in quantum light* // Laser Physics Letters. — 2018. — Vol. 15, no. 5. — P. 055301. — **JIF = 1.7 (WoS)**. Общий объём статьи = 0,9 п.л.; личный вклад = 0,50 п.л.
- A3. **С.Н. Балыбин**, О.В. Тихонова. *Фотоионизация атомных систем в сжатых неклассических полях* // Письма в ЖЭТФ. — 2019. — Т. 109, № 11/12. — С. 729–733. — Переводная версия: S.N. Balybin, O.V. Tikhonova. Photoionization of Atomic Systems in Squeezed States of Light // Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters. — 2019. — Vol. 109, No. 11. — P. 695–699. — **JIF = 1.3 (WoS)**. Общий объём статьи = 0,89 п.л.; личный вклад = 0,50 п.л.
- A4. **S.N. Balybin**, F. Ya. Khalili, D.V. Strekalov, A.B. Matsko, I.A. Bilenko. *On perspectives of generating quasi-Fock state via resonant self-phase-modulation* // Proceedings of SPIE. — 2020. — Vol. 11558. — 115580A. — **SJR = 0.15 (Scopus)**. Общий объём статьи = 2,0 п.л.; личный вклад = 1,0 п.л.

- A5. **S.N. Balybin**, R.V. Zakharov, O.V. Tikhonova. *Peculiarities of interaction of a quantum dot with non-classical light in the self-phase modulation regime* // Laser Physics Letters. — 2021. — Vol. 19, no. 2. — P. 025301. — **JIF = 1.7 (WoS)**. Общий объём статьи = 1,0 п.л.; личный вклад = 0,6 п.л.
- A6. **S.N. Balybin**, A.B. Matsko, F.Ya. Khalili, D.V. Strekalov, V.S. Pichenko, A.A. Savchenkov, N.M. Lebedev, I.A. Bilenko. *Quantum nondemolition measurements of photon number in monolithic microcavities* // Physical Review A. — 2022. — Vol. 106, no. 1. — P. 013720. — **JIF = 2.9 (WoS)**. Общий объём статьи = 1,6 п.л.; личный вклад = 0,8 п.л.
- A7. **S.N. Balybin**, O.V. Tikhonova. *Quantum dots interacting with a non-classical field under Kerr-phase modulation as a resource for repeatable quantum algorithms* // Laser Physics Letters. — 2023. — Vol. 20, no. 12. — P. 125301. — **JIF = 1.7 (WoS)**. Общий объём статьи = 1,6 п.л.; личный вклад = 1,0 п.л.
- A8. **S.N. Balybin**, D.I. Salykina, F.Ya. Khalili *Improving the sensitivity of Kerr quantum nondemolition measurement via squeezed light* // Physical Review A. — 2023. — Vol. 108, no. 5. — P. 053708. — **JIF = 2.9 (WoS)**. Общий объём статьи = 1,0 п.л.; личный вклад = 0,5 п.л.

Публикации в других научных изданиях и сборниках тезисов конференций:

- A9. O.V. Tikhonova, **S.N. Balybin**. *Coherent Control of Atomic Dynamics by Non-classical Light* // International Conference on Coherent and Nonlinear Optics (ICONO 2016), Technical Digest. — 2016.
- A10. O.V. Tikhonova, **S.N. Balybin**. *Coherent Control of Atomic Dynamics by Non-classical Light* // International Conference on Many Particle Spectroscopy of Atoms, Molecules, Clusters and Surfaces (MPS2016), Book of Abstracts. — 2016.
- A11. **С.Н. Балыбин**. *Взаимодействие атомов с неклассическим светом и управление атомными состояниями* // Материалы Международного молодежного научного форума «Ломоносов-2017». — 2017. — С. 87–89.
- A12. **S.N. Balybin**, O.V. Tikhonova. *Coherent Control of Atomic q-bits by Non-classical Light and Phase Measurements* // Book of Abstract (Quantum 2017). — 2017. — P. 11.
- A13. O.V. Tikhonova, **S.N. Balybin**. *Atomic Ionization in Bright Non-Classical Light* // 26th International Laser Physics Workshop LPhys'17. — 2017.

- A14. А.Е. Шитиков, Р.В. Терентьев, **С.Н. Балыбин**, И.А. Биленко, В.Е. Лобанов, М.Л. Городецкий. *Стабилизация керровской оптической частотной гребенки с помощью привязки к атомному переходу // Сборник трудов X Международной конференции «Фундаментальные проблемы оптики - 2018»*. — 2018. — С. 142–143.
- A15. **С.Н. Балыбин**, О.В. Тихонова. *Спектральные свойства атомных систем, «одетых» квантовым полем в режиме фотоионизации // Труды школы-семинара «Волны-2018»*. — 2018. — С. 15–16.
- A16. **С.Н. Балыбин**. *Ионизация атомов в ярких сжатых неклассических полях // Материалы Международного молодежного научного форума «Ломоносов-2018»*. — 2018.
- A17. **S.N. Balybin**, O.V. Tikhonova. *Peculiarities of Atomic Ionization in Multiphoton Squeezed Light // 27th International Laser Physics Workshop. Book of abstracts on CD*. — 2018.
- A18. **S.N. Balybin**, O.V. Tikhonova. *Enhancement of ionization of atoms in bright squeezed vacuum light // Programme and Book of abstracts of International Conference on Many Particle Spectroscopy of atoms, molecules, clusters and surfaces*. — 2018. — P. 38–38.
- A19. **С.Н. Балыбин**, О.В. Тихонова, А.С. Волошин, В.Е. Лобанов. *Особенности сжатого света в оптических микрорезонаторах // Сборник трудов XVII Всероссийской школы-семинара «Физика и применение микроволн» имени А.П. Сухорукова («Волны-2019»)*. — 2019. — С. 15–16.
- A20. **S. Balybin**, O.V. Tikhonova, A.S. Voloshin, V.E. Lobanov. *Properties of squeezed light generated in ring microresonators // 26th Central European Workshop on Quantum Optics CEWQO 2019, book of abstracts*. — 2019. — P. 45.
- A21. **S. Balybin**, O.V. Tikhonova. *Properties of Non-Classical Light and Semiconductor Quantum Well Interacting in a Cavity // 28th International Laser Physics Workshop. Book of abstracts*. — 2019.
- A22. **S. Balybin**, A. Voloshin, O. Tikhonova. *The single-mode and two-mode squeezed light generated in ring microresonators: Theoretical limitations and experimental possibilities // AIP Conference Proceedings*. — 2020. — Vol. 2241, no. 1. — P. 020003.
- A23. **С.Н. Балыбин**, Ф.Я. Халили. *Формирование негауссовских состояний в системах с кубической нелинейностью // Нелинейные волны - 2020*. — 2020. — С. 45–46.
- A24. **С.Н. Балыбин**. *Динамика неклассических полей при взаимодействии с полупроводниковой квантовой ямой в нелинейной среде // Материалы Международного молодежного научного форума «Ломоносов-2020»*. — 2020.

- A25. Д.И. Салыкина, **С.Н.Балыбин**. *Улучшение чувствительности квантовых невозмущающих измерений с применением сжатых состояний света* // Тезисы докладов XX научной школы «Нелинейные волны – 2022». – 2022. – С. 226–227.

Список литературы

1. *Fedorov, M. V.* Atomic and free electrons in a strong light field / M. V. Fedorov. — World Scientific, 1997.
2. *Делоне, Н. Б.* Туннельная и надбарьерная ионизация атомов и ионов в поле лазерного излучения / Н. Б. Делоне, В. Крайнов // УФН. — 1998. — Т. 5. — С. 531.
3. *Карапетян, Р.* Спонтанное тормозное излучение электрона в поле интенсивной электромагнитной волны / Р. Карапетян, М. Федоров // ЖЭТФ. — 1978. — Т. 3, № 9. — С. 816.
4. *Raimond, J.* Manipulating quantum entanglement with atoms and photons in a cavity / J. Raimond, M. Brune, S. Haroche // Rev Mod. Phys. — 2001. — Vol. 73. — P. 565.
5. *Scully, M. O.* Quantum Optics / M. O. Scully, M. S. Zubairy. — Cambridge : Cambridge University Press, 1997.
6. *McKeever, J.* Deterministic Generation of Single Photons from One Atom Trapped in a Cavity / J. McKeever, A. Boca, A.D. Boozer et. al. // Science. — 2004. — Vol. 303, no. 5666. — P. 1992—1994.
7. *Darquie, B.* Controlled Single-Photon Emission from a Single Trapped Two-Level Atom / B. Darquie, M. P. A. Jones, J. Dingjan et. al. // Science. — 2005. — Vol. 309. — P. 454.
8. *Maunz, P.* Quantum interference of photon pairs from two remote trapped atomic ions / P. Maunz, D. L. Moehring, S. Olmschenk et. al. // Nature Phys. — 2007. — Vol. 3. — P. 538.
9. *Michler, P.* A Quantum Dot Single-Photon Turnstile Device / P. Michler, A. Kiraz, C. Becher et. al. // Science. — 2000. — Vol. 290. — P. 2282.
10. *Santori, C.* Triggered Single Photons from a Quantum Dot / C. Santori, M. Pelton, G. Solomon et. al. // Phys. Rev. Lett. — 2001. — Vol. 86. — P. 1502.
11. *Kasivishwanathan, S.* Highly Amplitude-Squeezed States of the Radiation Field / S. Kasivishwanathan // Phys. Rev. Lett. — 1995. — Vol. 75. — P. 2116.
12. *Iskhakov, T.* Generation and Direct Detection of Broadband Mesoscopic Polarization-Squeezed Vacuum / T. Iskhakov, M. V. Chekhova, G. Leuchs // Phys. Rev. Lett. — 2009. — Vol. 102. — P. 183602.
13. *Spasibko, K.* Spectral properties of high-gain parametric down-conversion / K. Spasibko, T. Iskhakov, M. Chekhova // Optics Express. — 2012. — Vol. 20. — P. 7507.

14. *Tey, M.* Strong interaction between light and a single trapped atom without the need for a cavity / M. Tey, Z. Chen, S.A. Aljunid et. al. // *Nature Physics*. — 2008. — Vol. 4, no. 12. — P. 924—927.
15. *Sondermann, M.* Design of a mode converter for efficient light-atom coupling in free space / M. Sondermann, R. Maiwald, H. Konermann et. al. // *Applied Physics B*. — 2007. — Vol. 89, no. 4. — P. 489—492.
16. *Fleischauer, M.* Electromagnetically induced transparency: Optics in coherent media / M. Fleischauer, A. Imamoglu, J. P. Marangos // *Rev. Mod. Phys.* — 2005. — Vol. 77. — P. 633.
17. *Specht, H. P.* A Single-Atom Quantum Memory / H. P. Specht, C. Noelleke, A. Reiserer // *Nature*. — 2011. — Vol. 473. — P. 190.
18. *Berson, I.* Electron in the quantized field of a monochromatic electromagnetic wave / I. Berson // *Sov. Phys. JETP*. — 1969. — Vol. 29. — P. 871.
19. *Bergou, J.* Nonlinear scattering processes in the presence of a quantised radiation field. I. Non-relativistic treatment / J. Bergou, S. Varro // *J. Phys. A: Math. Gen.* — 1981. — Vol. 14. — P. 1469.
20. *Kasprzak, J.* Up on the Jaynes–Cummings ladder of a quantum-dot/microcavity system / J. Kasprzak, S. Reitzenstein, E.A. Muljarov et. al. // *Nature Materials*. — 2010. — Vol. 9, no. 4. — P. 304—308.
21. *Shore, B. W.* The Jaynes-Cummings Model / B. W. Shore, P. L. Knight // *Journal of Modern Optics*. — 1993. — Vol. 40, no. 7. — P. 1195—1238.
22. *Cummings, F. W.* Stimulated Emission of Radiation in a Single Mode / F. W. Cummings // *Phys. Rev.* — 1965. — Vol. 140, 4A. — A1051—A1056.
23. *Eberly, J.* Periodic Spontaneous Collapse and Revival in a Simple Quantum Model / J. Eberly, N. Narozhny, J. Sanchez-Mondragon // *Physical Review Letters*. — 1980. — Vol. 44, no. 20. — P. 1323—1326.
24. *Assemat, F.* Quantum Rabi Oscillations in Coherent and in Mesoscopic Cat Field States / F. Assemat, D. Grosso, A. Signoles et. al. // *Physical Review Letters*. — 2019. — Vol. 123, no. 14.
25. *Popolitova, D.* Phase-sensitive excitation of atomic systems and semiconductor quantum wells by non-classical light / D. Popolitova, O. Tikhonova // *Laser Physics Letters*. — 2019. — Vol. 16, no. 12. — P. 125301.
26. *Popolitova, D.* Features of non-classical light during its interaction with atoms and semiconductor nano-systems / D. Popolitova, O. Tikhonova // *Laser Physics Letters*. — 2020. — Vol. 17, no. 11. — P. 115302.

27. *Strekalov, D. V.* Nonlinear and quantum optics with whispering gallery resonators / D. V. Strekalov, C. Marquardt, A.B. Matsko et. al. // Journal of Optics. — 2016. — Vol. 18, no. 12. — P. 123002.
28. *Chembo, Y. K.* Quantum dynamics of Kerr optical frequency combs below and above threshold: Spontaneous four-wave mixing, entanglement, and squeezed states of light / Y. K. Chembo // Phys. Rev. A. — 2016. — Vol. 93, issue 3. — P. 033820.
29. *Savchenkov, A. A.* Tunable Optical Frequency Comb with a Crystalline Whispering Gallery Mode Resonator / A. A. Savchenkov, A. B. Matsko, V. S. Ilchenko et. al. // Phys. Rev. Lett. — 2008. — Vol. 101, issue 9. — P. 093902.
30. *Desiatov, B.* Ultra-low-loss integrated visible photonics using thin-film lithium niobate / B. Desiatov, A. Shams-Ansari, M. Zhang et. al. // Optica. — 2019. — Vol. 6, no. 3. — P. 380—384.
31. *Vahlbruch, H.* Detection of 15 dB Squeezed States of Light and their Application for the Absolute Calibration of Photoelectric Quantum Efficiency / H. Vahlbruch, M. Mehmet, K. Danzmann et. al. // Phys. Rev. Lett. — 2016. — Vol. 117, issue 11. — P. 110801.
32. *Mehmet, M.* High-efficiency squeezed light generation for gravitational wave detectors / M. Mehmet, H. Vahlbruch // Classical and Quantum Gravity. — 2019. — Vol. 36, no. 1. — P. 015014.
33. *Darsow-Fromm, C.* Squeezed light at 2128 nm for future gravitational-wave observatories / C. Darsow-Fromm, J. Gurs, R. Schnabel et. al. // Optics Letters. — 2021.
34. *Dutt, A.* On-Chip Optical Squeezing / A. Dutt, K. Luke, S. Manipatruni et. al. // Phys. Rev. Applied. — 2015. — Vol. 3, issue 4. — P. 044005.

Балыбин Степан Николаевич

ДИНАМИКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ И ПЕРЕПУТЫВАНИЕ АТОМНЫХ
СИСТЕМ С КВАНТОВЫМИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ПОЛЯМИ

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук

Подписано в печать _____._____._____. Заказ № _____

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Типография _____

