

Работа выполнена в Институте прикладной физики РАН
(г. Нижний Новгород)

На правах рукописи

ГЕЛЬМАН Александр Иосифович

**ДИССИПАТИВНАЯ ДИНАМИКА
И КОНТРОЛИРУЕМАЯ РЕЛАКСАЦИЯ
В ОДИНОЧНЫХ КВАНТОВЫХ СИСТЕМАХ**

01.04.21 – лазерная физика

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук
В. А. Миронов

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор
А. С. Трошин
доктор физико-математических наук
А. С. Мельников

Ведущая организация: НИИ ядерной физики имени Д. В. Скобельцына,
МГУ имени М.В. Ломоносова (НИИЯФ МГУ)

Защита состоится « » декабря 2010 г. в 15-00 часов на заседании диссертационного совета Д 002.069.02 в Институте прикладной физики РАН (603950, г. Н. Новгород, ул. Ульянова, 46).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института прикладной физики РАН.

Автореферат разослан « » ноября 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
профессор



Ю. В. Чугунов

Общая характеристика работы

Актуальность темы диссертации. Релаксационные процессы играют ключевую роль во многих устройствах квантовой оптики [1, 2]. В общем случае релаксация обусловлена взаимодействием рассматриваемой малой системы с окружением – системой с большим числом степеней свободы, например, вакуумным или тепловым резервуаром. Процессы диссипации вызывают флуктуации параметров системы и квантовый шум [1], что может существенно повлиять на динамику системы.

Проблема релаксации особенно существенна при реализации квантовых компьютеров, систем обработки и хранения квантовой информации, квантовой криптографии [3, 4]. Это направление исследований стало актуальным в последнее время, что подтверждается «дорожными картами» (roadmap), недавно опубликованными и действующими в Европе [5] и США, причем последнее обновление планов в Европе опубликовано в апреле 2010 года. В настоящее время созданы коммерческие образцы приборов, реализующих алгоритм квантовой криптографии, активно ведутся эксперименты с технической реализацией квантовых битов (кубитов) – логических элементов квантового компьютера [3, 4].

Квантовые релаксационные эффекты также становятся определяющими в работе современных наноэлектронных устройств, таких как полупроводниковые нанотранзисторы и процессоры на их основе, сверхпроводящие СКВИДы, устройства молекулярной электроники и т.п. Например, в транзисторах Intel, где размеры рабочего канала составляют всего несколько нанометров, а также в атомных чипах, оптоэлектронных устройствах минимальных размеров, позволяющих эффективно управлять несколькими атомами и организовывать хранение и передачу информации уже на временах порядка миллисекунд [6].

Таким образом, в настоящее время расчет скоростей релаксации, анализ диссипативной динамики и поиск способов управления релаксацией в квантовых системах являются актуальными задачами. Кроме того, в последние десятилетия появились новые объекты исследования – одиночные квантовые системы, такие как ион в ловушке, мода в резонаторе, кубит. Для описания таких систем в начале 90-х годов прошлого века были предложены методы квантовых траекторий, квантовых скачков или Монте-Карло (МК) расчета волновой функции системы [7]. В настоящее время метод МК стал мощным средством численного расчета квантового кинетического уравнения, в том числе – для немарковских систем [8].

Одним из способов реализации квантовой памяти в атомной системе является эффект электромагнитно-индуцированной прозрачности (ЭИП). Эффект может быть реализован при сколь угодно малой, вплоть до нескольких фотонов, интенсивности пробной волны [9]. Обзор апреля 2010 года по Европейской программе «Приложения кубитов» (“Qubit applications QAP”) [10] подробно анализирует текущее состояние дел в этой области. При этом возникает новая задача детального описания взаимодействия поля с веществом, когда необходимо перейти к квантовому описанию поля, рассматривать неклассиче-

ские состояния поля, учитывать статистику фотонов и ее влияние на свойства среды (см. [11]). Первый эксперимент со светом в сжатом вакуумном состоянии, проходящем через среду Λ -атомов в режиме ЭИП, послуживший толчком для нашей работы, был проведен в 2004 году [12]. Недавние экспериментальные работы подтверждают возрастающий интерес в этом направлении [13–15].

Фотонные кристаллы (ФК) – оптически прозрачные структуры с пространственно-периодической модуляцией показателя преломления, появившиеся в последние 20 лет [16, 17]. По аналогии с электронной зонной структурой, эта периодичность обуславливает фотонную зонную структуру, появление интервалов частот, в которых электромагнитные волны – фотоны – не могут распространяться, так называемых фотонных запрещенных зон (ФЗЗ). Одним из первых приложений структур с ФЗЗ стало подавление спонтанной релаксации атомов (ионов, квантовых точек), помещенных в ФК, в условиях, когда частота атомного перехода попадает в ФЗЗ [18]. В настоящее время актуальна задача разработки методов динамического управления дисперсионными свойствами и поглощением в структурах с ФЗЗ. Это может быть сделано путем лазерного воздействия света на квантовые системы (атомы, ионы, квантовые точки), помещенные в ФК [18–21].

Кубит, являющийся основным рабочим элементом квантового компьютера, физически реализуется в виде квантовой системы, обладающей двумя собственными состояниями, например фотона, атома, донора в полупроводнике, ядерного спина, сверхпроводящего контура и т.д. [3–5]. Важнейшей характеристикой кубита является время декогерентности [3–5], которое ограничивает интервал проведения квантовых вычислений и определяется релаксационными процессами в системе. В этой связи в настоящее время одним из наиболее перспективных устройств для реализации квантового компьютера рассматриваются кубиты на основе джозефсоновских переходов [4, 22]. Связь с внешней средой и экспериментальной установкой приводит к обратному шумовому воздействию на кубит, что нарушает когерентность и затрудняет реализацию квантовых вычислений. В недавних экспериментах была продемонстрирована возможность приготовления и проведения неразрушающих измерений состояний кубита, развита методика манипулирования состояниями кубита, были выполнены измерения параметров и времени декогерентности одиночного кубита. Большой интерес вызвала разработка амплитудной спектроскопии (АС) [23–25], дающей информацию о воздействии шума на кубит.

Однако, несмотря на имеющийся прогресс, многие вопросы квантовой динамики кубитов в настоящее время все еще являются открытыми. Например, это проблемы измерения влияния шума, управления динамикой кубитов в сильном переменном поле, измерения состояния кубита в условиях шума [26–30].

Целью диссертационной работы является исследование диссипативной динамики и управляемой релаксации в многоуровневых квантовых системах, являющихся элементами современных оптоэлектронных и наноэлектронных устройств, а именно:

1. Аналитическое методом Гейзенберга-Ланжевена и численное методом МК исследование особенностей воздействия на трехуровневую атомную систему в режиме ЭИП квантованного электромагнитного поля в неклассических состояниях (состоянии сжатого вакуума, сжатом когерентном состоянии) и релаксационной динамики системы в таких условиях. Исследование возможности переноса квантово-статистических свойств поля на среду для контроля (подавления) квантовых флуктуаций физически важных параметров системы, вызванных диссипационными процессами в системе. Для сравнения с экспериментальными результатами [12–15] необходимо также выполнить исследование изменения квантовых характеристик поля при распространении с учетом релаксационных процессов в системе.

2. Аналитическое исследование возможностей контролируемого подавления спонтанной релаксации в многоуровневой квантовой системе, помещенной в ФК, и подбора параметров для эффективного лазерного управления оптическими свойствами (коэффициентом поглощения и показателем преломления) допированного двухуровневыми атомами ФК с целью создания и совершенствования современных оптоэлектронных приборов. Анализ влияния дефазировочного механизма релаксации на полученные эффекты.

3. Численное и аналитическое исследование диссипативной динамики одиночного кубита на примере кубита на основе джозефсоновских переходов, применение развитой методики для интерпретации новейших экспериментов по изучению кубитов методами амплитудной спектроскопии и определению параметров кубита, в том числе шумовых. Наглядная демонстрация процесса измерения состояния кубита (томографии состояния) путем усреднения по единичным реализациям динамики одиночного кубита с помощью разработанного программного комплекса. Рассмотрение возможностей для динамического контроля состоянием кубита под действием бихроматического излучения путем изменения фазы поля.

4. Реализация метода МК описания релаксационных процессов в многоуровневых квантовых системах, допускающего эффективное распараллеливание вычислений с использованием суперкомпьютерных технологий, и применимого к широкому классу задач численного моделирования современных экспериментов по квантовой оптике; разработка программного комплекса и его апробирование на известных задачах.

Решению каждой из поставленных задач посвящена отдельная глава в диссертации.

Научная новизна.

1. Развита теория взаимодействия квантованного электромагнитного поля в сжатом когерентном состоянии со средой трехуровневых Λ -атомов в режиме электромагнитно-индуцированной прозрачности с учетом квантовой релаксации методом Гейзенберга-Ланжевена. Квантовым методом Монте-Карло исследована временная динамика системы "атом + поле" и влияние процессов релаксации на динамику системы. Аналитические результаты позволяют интерпретировать данные эксперимента [12].

2. Предложена новая модель, когда фотонный кристалл допирован двухуровневыми атомами (ионами, квантовыми точками) и облучается лазерным (управляющим) полем, распространяющимся по волноводному дефекту фотонного кристалла. Частота оптического перехода атомов попадает на границу фотонной запрещенной зоны. Изучается оптический отклик среды (поглощение и дисперсия) на воздействие слабого (пробного) поля, распространяющегося по другому дефекту фотонного кристалла.

3. Впервые дана интерпретация переходам Ландау-Зинера в условиях шума и методу амплитудной спектроскопии на примере кубитов на основе джозефсоновских переходов с точки зрения единичных реализаций, а также установлена связь с усредненной динамикой системы, наблюдающейся в экспериментах [13–25].

Научное и практическое значение.

1. Разработанный программный комплекс может быть использован для численного моделирования из первых принципов существующих и проектирования новых экспериментов и приборов квантовой оптики вместо их практической реализации на начальной стадии, требующей сложного оборудования и больших затрат.

2. Предложена модель, допускающая как аналитическое решение методом Гейзенберга-Ланжевена, так и численное решение квантовым методом Монте-Карло, объясняющая эксперимент по прохождению квантованного поля в среде трехуровневых Λ -атомов в режиме электромагнитно-индуцированной прозрачности [12]. Для предложенной модели получены аналитические зависимости, позволяющие с уверенностью рассчитывать модификацию квантовых параметров поля и среды в задаче распространения квантованного поля в режиме ЭИП. Разработанная методика может быть использована для решения аналогичных задач квантовой оптики.

3. Разработан метод лазерного управления оптическими свойствами фотонного кристалла, допированного двухуровневыми атомами и квантовой релаксацией атомов, путем изменения интенсивности и отстройки от резонанса управляющего поля.

4. Показана применимость метода Монте-Карло и разработанного программного комплекса как к моделированию поведения одиночных кубитов, так и к объяснению данных по измерению параметров кубита в условиях шума методом амплитудной спектроскопии. Численно из первых принципов смоделированы недавние эксперименты по изучению динамики и параметров кубитов [24].

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Дисперсия квадратур (шум) атомных операторов в Λ -атоме под действием квантованного поля в режиме электромагнитно-индуцированной прозрачности может быть уменьшена в зависимости от параметра сжатия поля. Изменение уровня сжатия поля при распространении в такой среде определяется полученным аналитическим выражением. Учет операторов шума в методе

Гейзенберга-Ланжевена при аналитическом исследовании задачи оказывается принципиально важным для правильного описания воздействия поля на атомную систему, обратного воздействия в условиях шума.

2. В фотонном кристалле, допированном двухуровневыми атомами (ионами, квантовыми точками), когда частота оптического перехода атомов попадает на границу фотонной запрещенной зоны, возможно эффективное управление релаксационными свойствами атомов путем изменения интенсивности и частоты лазерного излучения, резонансного их оптическому переходу. На этом основан предлагаемый метод лазерного управления оптическими свойствами допированного фотонного кристалла – поглощением и показателем преломления – при значениях параметров, доступных для практической реализации.

3. Квантовые траектории, описывающие скачки в процессе эволюции одиночного кубита на основе джозефсоновских переходов во внешнем переменном поле, демонстрируют модифицированные шумом эффекты когерентного подавления туннелирования и переходы Ландау-Зинера. Полученные зависимости характерного поведения траекторий единичной квантовой системы как в одной реализации эксперимента, так и для усредненной по реализациям динамики адекватно описывают результаты недавних экспериментов

4. Интерференционные картины, формируемые при экспериментальном изучении населенностей кубита методом амплитудной спектроскопии, зависят от соотношения между характеристиками шума и управляющего поля, а также от числа измерений. Высокая контрастность интерференционной картины достигается уже при 100 реализациях; она устойчива к дефазировке при сравнительно сильных полях, что свидетельствует о перспективности метода амплитудной спектроскопии для измерения параметров кубита даже в условиях сильного шума. Из первых принципов промоделирован реальный процесс измерения кубита в эксперименте, включая в рассмотрение флуктуацию фазы управляющего сигнала.

5. Разработанный программный комплекс на основе квантового метода Монте-Карло протестирован и позволяет численно моделировать диссипативную динамику одиночных квантовых систем и их ансамблей, при любом числе уровней и источников шума в системе, в марковском приближении.

Апробация работы.

Изложенные в диссертации результаты обсуждались на семинарах ИПФ РАН, ИОФ РАН, ИФМ РАН, НИИЭЯ МГУ и докладывались на 16 международных и общероссийских конференциях: Научная Студенческая Конференция Высшей Школы Общей и Прикладной Физики ННГУ «ВШОПФ-2006» (Нижний Новгород, 2006), 12–15-я Нижегородская сессия молодых ученых (Нижний Новгород, 2007, 2008, 2009, 2010), Third International Conference "Frontiers of Nonlinear Physics" (Nizhny Novgorod, 2007), XIV Научная школа «Нелинейные волны-2008» (Нижний Новгород, 2008), 6-я Курчатовская молодежная научная школа (Москва, 2008), IX Международный симпозиум по фотонному эхо и когерентной спектроскопии (Казань, 2009), The International

Conference "Micro- and nanoelectronics – 2009" (ICMNE-2009) with extended Session "Quantum Informatics" (Zvenigorod, Moscow region, Russia, 2009), 9-th Asian Conference on Quantum Information Science (Nanjing, China, 2009), XV Научная школы «Нелинейные волны-2010» (Нижний Новгород, 2010), XIV Симпозиум «Нанопизика и наноэлектроника» (Нижний Новгород, 2010), V workshop ad memoriam of Carlo Novero "Advances in Foundations of Quantum Mechanics and Quantum Information with atoms and photons" (Quantum'10) and the third Italian Quantum Information Science Conference (IQIS'10) (Turin, Italy, 2010), The International conference "Dubna-Nano 2010" (Dubna, Moscow Region, Russia, 2010), Fourth International Conference "Frontiers of Nonlinear Physics" (Nizhny Novgorod, 2010).

Всего по теме работы опубликовано 26 научных работ, в том числе 9 статей в международных и Российских журналах из списка ВАК, 1 препринт ИПФ РАН, 16 трудов конференций и абстрактов. Основные результаты отражены в работах [A2–A4, A10] (гл. 1 и 2), [A1, A9] (гл. 3) и [A5–A8] (гл. 4).

Результаты, изложенные в диссертации, отмечены следующими наградами:

1. Диплом 15-й Нижегородской сессии молодых ученых (естественные науки), 2010 год.

2. Победа в конкурсе «У.М.Н.И.К.-весна 2010» (Нижний Новгород, 2010), с проектом «программный комплекс «КУБИТ» для расчета квантовых приборов» по итогам главы 1 диссертации.

3. Travel Grant РФФИ на конференцию V workshop ad memoriam of Carlo Novero "Advances in Foundations of Quantum Mechanics and Quantum Information with atoms and photons" в г. Турин, Италия, 2010 год.

Результаты диссертации, изложенные в главах 1, 2 и 4 использовались при подготовке спецкурса «Квантовая оптика», прочитанном автором для студентов 4–5 курса физического факультета ННГУ им. Н. И. Лобачевского, весенний семестр 2010 года. Программный комплекс прошел дополнительную апробацию при численном моделировании студентами тестовых задач.

Результаты работы использовались при выполнении проектов РФФИ №06-02-16632-а, 06-02-16739-а, 09-02-97059-р_поволжье_а, 09-02-01158 и гранта совета при Президенте РФ по поддержке ведущих научных школ НШ-1246.2008.2, программы отделения физических наук «Современные проблемы радиофизики».

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из Введения, четырех глав, Заключение. Общий объем работы составляет 187 страниц, включая 50 рисунков и список цитированной литературы из 185 наименований.

Краткое содержание диссертации

Во **Введении** обосновывается актуальность работы, формулируются её цели, кратко излагается содержание диссертации.

В главе 1 рассматривается квантовый метод МК с точки зрения применения к численному исследованию диссипативной динамики многоуровневых,

том числе одиночных, квантовых систем. Метод является фактически единственным, допускающим распараллеливание и эффективное использование суперкомпьютеров для расчета задач квантовой оптики.

В п. 1.1 приведены история развития метода, краткий обзор идей, на основе которых он был одновременно и независимо разработан несколькими группами в начале 90-х годов XX века.

В п. 1.2 изложен теоретический вывод метода МК на основе [1]. Рассмотрена стандартная модель в квантовой оптике, система в бозонном резервуаре, описывающая диссипацию. Используя аппарат квантовых стохастических дифференциальных уравнений и марковское приближение, для оператора плотности рассматриваемой системы ρ получено уравнение

$$\dot{\rho} = -\frac{i}{\hbar}[\hat{H}, \rho] + \sum_{j=1}^{N_c} \frac{1}{2} \gamma_j (2\hat{c}_j \rho \hat{c}_j^+ - \rho \hat{c}_j^+ \hat{c}_j - \hat{c}_j^+ \hat{c}_j \rho), \quad (1)$$

где H – гамильтониан системы в представлении взаимодействия, \hat{c}_j – оператор системы, непосредственно взаимодействующей с соответствующим резервуаром, N_c – число резервуаров (каналов релаксации), γ_j – скорость релаксации. Уравнение (1) является наиболее общей формой (форма Линдблада) для оператора плотности системы в марковском приближении. Показывается, что для любого уравнения в форме (1) может быть составлено соответствующее стохастическое дифференциальное уравнение для волновой функции системы, один из способов решения которого изложен в п. 1.3.

В п. 1.3 вводятся понятия условной динамики системы и квантовых скачков, основанные на теории измерений, что позволяет переписать (1) в виде

$$\dot{\rho} = -\frac{i}{\hbar}(\hat{H}_{eff} \rho - \rho \hat{H}_{eff}^+) + \sum_{j=1}^{N_c} \hat{J}_j \rho, \quad (2)$$

где $\hat{H}_{eff} = \hat{H} - \frac{i}{2} \hbar \sum_{j=1}^{N_c} \gamma_j \hat{c}_j^+ \hat{c}_j$ – эффективный неэрмитов гамильтониан,

$\hat{J}_j \rho = \gamma_j \hat{c}_j \rho \hat{c}_j^+$ – оператор скачка. Предполагается, что для рассматриваемой квантовой системы в резервуаре осуществляется регистрация всех событий спонтанного излучения фотонов. Поведение системы непосредственно связывается с результатами детектирования фотонов. Если в момент времени t_1 детектор зарегистрировал фотоотсчет, то система испытывает скачок и переходит в определенное состояние, $|\varphi(t_1 + dt)\rangle = \lambda \hat{c} |\varphi(t_1)\rangle$, где $|\varphi(t)\rangle$ – волновая функция системы, λ – нормировочная константа, dt – интервал времени, через который проводятся измерения. При этом временная эволюция волновой функции системы между отсчетами подчиняется уравнению Шредингера с неэрмитовым эффективным гамильтонианом \hat{H}_{eff} , $\frac{d}{dt} |\varphi(t)\rangle = -\frac{i}{\hbar} \hat{H}_{eff} |\varphi(t)\rangle$.

Полученная таким образом волновая функция $|\varphi(t)\rangle$ называется квантовой траекторией. Для получения средних значений, корреляционных функций и других параметров операторов системы, необходимо усреднение по ансамблю квантовых траекторий, что подробно описано в п. 1.4, где также приведен алгоритм численного моделирования как для получения одной квантовой траектории, так и для получения решения уравнения для оператора плотности (1).

В п. 1.5 обсуждаются основные возможности и преимущества метода МК. Отмечается, что с точки зрения физики появляется возможность исследовать диссипативную динамику одиночных квантовых систем, из первых принципов моделировать процесс измерения состояния кубита и более сложные эксперименты квантовой оптики, учитывать немарковские эффекты [8]. Вычислительные преимущества – возможность эффективно распараллелить алгоритм МК, а также решать уравнения для волновой функции системы, число которых меньше, чем для матрицы плотности.

В п. 1.6 проанализирована точность метода. При расчетах конкретных систем показано [8], что уже для числа уровней в системе $N = 35$, для получения статистической ошибки $(\delta \hat{A})_{(n)} = 4 \cdot 10^{-3}$ среднего значения требуемой величины время расчета методом МК меньше, чем методом оператора плотности (с учетом необходимого числа реализаций метода n).

В п. 1.7 приведены результаты тестирования программы при исследовании известных задач квантовой оптики, таких как резонансная флуоресценция двухуровневого атома (п. 1.7.1), динамика трехуровневых систем под действием оптических полей (п. 1.7.2). Применение метода к исследованию динамики трехуровневой атомной системы в режиме ЭИП выполнено впервые [A2].

По результатам главы 1 разработан программный комплекс, позволяющий рассчитывать диссипативную динамику многоуровневых квантовых систем методом МК на основе решения квантового кинетического уравнения в форме Линдблада для произвольного числа энергетических уровней и источников шума в системе. Для тестирования использовались вычислительные кластеры ИПФ РАН и ННГУ, проект получил финансовую поддержку на конкурсе «У.М.Н.И.К. – весна 2010».

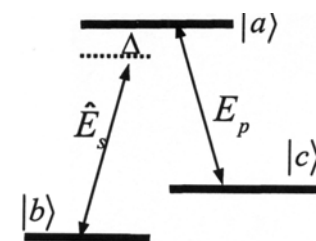


Рис. 1. Λ – схема энергетических уровней.

В главе 2 аналитически методом Гейзенберга – Ланжевена (п. 2.1) и численно методом МК (п. 2.2) рассмотрена задача подавления шума в атомной системе при воздействии квантованным электромагнитным полем в сжатом состоянии. На переход $|a\rangle \rightarrow |c\rangle$ Λ-атома действует классическое сильное лазерное поле накачки E_p с частотой ω_p (рис. 1). На переход $|a\rangle \rightarrow |b\rangle$ действует слабое квантованное поле \hat{E}_s (сигнальное),

$\hat{E}_s = \varepsilon \hat{a}(t) e^{-i\omega_s t} + H.c.$, где \hat{a} – оператор уничтожения, ε – константа, $\Delta = \omega_{ab} - \omega_s$ – отстройка от резонанса. В данных условиях для сигнальной волны имеет место эффект ЭИП.

В п. 2.1 временная эволюция атомных операторов $\hat{\sigma}_{ij}$ описывается уравнением Гейзенберга-Ланжевена [1, 2] $\frac{\partial \hat{\sigma}_{ij}}{\partial t} = -\gamma_{ij} \hat{\sigma}_{ij} + \frac{i}{\hbar} [\hat{H}, \hat{\sigma}_{ij}] + \hat{F}_{ij}$, где γ_{ij} – скорости релаксации, \hat{F}_{ij} – дельта-коррелированные операторы шума Ланжевена.

Для аналитического решения полученной системы уравнений использован метод теории возмущений по малому параметру $\hat{\varepsilon} = g\hat{a}/\Omega$, также предполагается, что в начальный момент атом находится в состоянии $|b\rangle$. В данных приближениях динамика атомной системы описывается отделившейся системой уравнений

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\sigma}}_{ba} &= -(\gamma + i\Delta)\hat{\sigma}_{ba} + ig\hat{a} + i\Omega\hat{\sigma}_{bc} + \hat{F}_{ba}, \\ \dot{\hat{\sigma}}_{bc} &= -(\Gamma + i\Delta)\hat{\sigma}_{bc} + i\Omega^* \hat{\sigma}_{ba} + \hat{F}_{bc}, \end{aligned} \quad (4)$$

где $\gamma_{ab} = \gamma$, $\gamma_{bc} = \Gamma$, $\Gamma \ll \gamma$ и явно виден вклад квантованного поля \hat{a} . Исследуется отклик атома на заданное квантованное поле. При рассмотрении сигнального поля в когерентном состоянии, $\langle \hat{a} \rangle = \alpha$, где α пропорциональна амплитуде поля, получено стационарное решение для среднего значения поляризации на переходе $|a\rangle \rightarrow |b\rangle$, $\langle \hat{\sigma}_{ba} \rangle = \frac{ig\alpha(\Gamma + i\Delta)}{(\gamma + i\Delta)(\Gamma + i\Delta) + |\Omega_p|^2}$, соответствующее классическому анализу эффекта ЭИП (см. [2]). При рассмотрении сигнального поля в сжатом вакуумном состоянии, когда $\langle \hat{a} \rangle = 0$, стационарное решение для средних значений операторов получено нулевым, $\langle \hat{\sigma}_{ba} \rangle = 0$, $\langle \hat{\sigma}_{bc} \rangle = 0$ и не дает никакой информации о системе. При этом для описания поведения системы необходимо исследовать флуктуации – отклонения рассматриваемых параметров от среднего, то есть величины $\delta\hat{\sigma}_{ba} = \hat{\sigma}_{ba} - \langle \hat{\sigma}_{ba} \rangle$, $\delta\hat{\sigma}_{bc} = \hat{\sigma}_{bc} - \langle \hat{\sigma}_{bc} \rangle$, $\delta\hat{a} = \hat{a} - \langle \hat{a} \rangle$.

В п. 2.1 получены значения дисперсии операторов, определяющие шум в системе, как в общем виде, так и для особо интересного случая воздействия на систему поля в сжатом когерентном состоянии

$$\langle (\delta\hat{\sigma}_3)^2 \rangle = \frac{Lg^2\Omega^2}{4c|\det|^4} \left[e^{-2r} (|\Omega|^2 - \Delta^2 + \gamma)^2 + e^{2r}\Delta^2 (\Gamma + \gamma)^2 \right] + \frac{(\Delta^2 + \gamma^2)\Gamma + \gamma|\Omega|^2}{2|\det|^2}, \quad (5)$$

где $|\det|^2 = (\gamma\Gamma - \Delta^2 + |\Omega|^2)^2 + \Delta^2(\Gamma + \gamma)^2$, $\hat{\sigma}_3 = (\hat{\sigma}_{bc} + \hat{\sigma}_{bc}^+)/2$, r – параметр сжатия поля (рис. 2). Переход $|b\rangle \rightarrow |c\rangle$ рассматривается наиболее подробно. Он представляет особый интерес, так как время жизни $1/\Gamma$ у низкочастотной когерентности, описываемой оператором $\hat{\sigma}_{bc}$, может быть достаточно большим, и информация на этом переходе может быть сохранена долго, что важно в связи с исследованием методов переноса квантовой информации на среду, квантовой памяти [5, 10]. Из (5) и (рис. 2) видно, что в окне прозрачности эффекта ЭИП флуктуация $\langle (\delta\hat{\sigma}_3)^2 \rangle$ уменьшается при увеличении параметра сжатия r по сравнению с ситуацией, когда поле находится в когерентном состоянии. Этот факт рассматривается как передача квантовых характеристик поля атому. Уменьшение шума оператора $\hat{\sigma}_3$ в атомной системе имеет достаточно резкую зависимость от параметра сжатия поля r и может быть существенным (рис. 3).

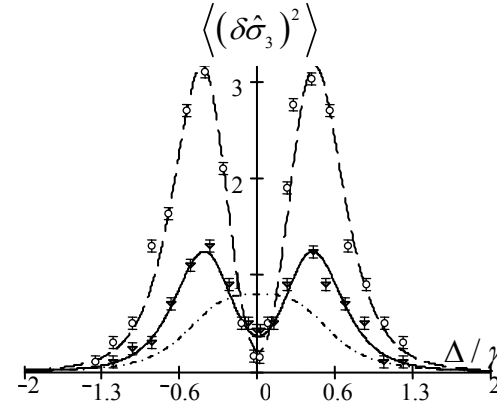


Рис. 2. Дисперсия оператора $\hat{\sigma}_3$ в зависимости от нормированной отстройки Δ/γ . Аналитические данные методом Гейзенберга-Ланжевена в сопоставлении с результатами численного моделирования. Пробное поле в когерентном состоянии $r=0$ (штрихпунктирная линия), сжатом состоянии $r=0.5$ (Δ) (сплошная линия) и $r=1.5$ (\circ) (штриховая линия). Параметры $\Gamma = 10^{-3}\gamma$, $\Omega = 2/3\gamma$, $C = 50$.

В п. 2.2. аналогичная задача, что и в п. 2.1, решается численно методом МК. Одномодовое сжатое когерентное состояние $|\beta, \xi\rangle$ раскладывается по фоковским состояниям. Для проверки теоретических результатов рассмотрено поле в сжатом состоянии со средним числом фотонов $\langle n \rangle = 16$ и степенью сжатия $r = 1.5$. Такие степени сжатия легко получают в эксперименте. Как показали наши численные расчеты, в данном случае достаточно ограничиться числом фотонов $n = 100$ в разложении. В результате размерность системы составила $N = 100 \times 3 = 300$, когда численный расчет методом МК становится эффективнее решения уравнения для матрицы плотности.

Для соблюдения точности расчетов, дающей статистическую ошибку расчета среднего и среднеквадратического отклонения $\langle \delta\hat{\sigma}_{(n)} \rangle \leq 0.01$, число реализаций метода выбрано $n = 100$. Время $t = 10\gamma^{-1}$ – время, при котором система переходит в стационарное состояние, шаг по времени – $dt = 0.05\gamma^{-1}$. Из рис. 2 видно, что результаты прямого численного рас-

чета и аналитического решения находятся в очень хорошем соответствии.

Использование метода МК позволило учесть квантовый шум, возникающий при диссипативном взаимодействии системы с резервуаром, что принципиально для правильного решения задачи. Дополнительным результатом работы является реализация метода МК в приложении к исследованию диссипативной динамики многоуровневых систем в квантованном поле – актуальной задаче в настоящее время. Подобных исследований данным методом до настоящего времени не проводилось. По-

скольку изменение состояния света на выходе связано именно с взаимодействием со средой и обратным воздействием среды на поле, знания о поведении среды при прохождении квантованного поля, полученные в нашей работе, являются принципиальными и могут быть использованы для таких приложений, как квантовая память, квантовые вычисления.

Подробное аналитическое исследование прохождения поля в среде на основе полученных в п. 2.1 зависимостей приведено в п. 2.3, использован метод Гейзенберга – Ланжевена. Найдена зависимость уровня сжатия квантованного поля (в состоянии сжатого вакуума) на выходе из среды от параметров света на входе, скоростей релаксации и дефазировки в среде и частоты Раби управляющего поля: $S(L, \omega) = S(0, \omega)T - \frac{1}{4}(T-1)$, где коэффициент прохождения

$$T = e^{2L \text{Re}k(\omega)}, \quad \text{Re}k(\omega) = -\frac{g^2 N (\omega^2 \gamma + \Gamma |\Omega|^2 + \gamma \Gamma^2)}{c (\gamma \Gamma - \omega^2 + |\Omega|^2)^2 + \omega^2 (\Gamma + \gamma)^2}, \quad L - \text{длина среды.}$$

Принципиально важным оказался учет флуктуаций параметров системы, связанных с операторами шума Ланжевена. Результат согласуется с полученным в эксперименте [12] по исследованию свойств эффекта ЭИП в сжатом вакууме. Предложенные нами методы позволяют с уверенностью рассчитывать модификацию параметров поля и среды в задаче распространения в режиме ЭИП. То, что аналитические результаты п. 2.3 согласуются с экспериментом, дополнительно подтверждает применимость полученных в п. 2.1 и п. 2.2 данных о модификации релаксационных параметров и возможности подавления шума в атомной системе.

Основные результаты, полученные в главе 2, суммированы в п. 2.4.

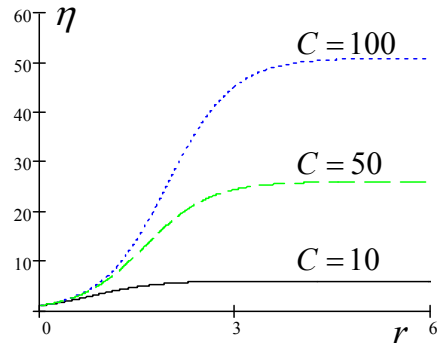


Рис. 3. Зависимость коэффициента сжатия η от параметра сжатия r в условиях точного резонанса $\Delta = 0$. Параметры $C = 10$ (сплошная линия), $C = 50$ (штриховая линия), $C = 100$ (пунктирная линия). $C = Lg^2 / c\gamma$.

В прил. 1 приводится расчет корреляционных параметров шумовых членов в уравнении Гейзенберга-Ланжевена с помощью флуктуационно-диссипационной теоремы.

В главе 3 (п. 3.1) исследован метод динамического лазерного управления релаксационными свойствами атомов, помещенных в ФК, и, как следствие, оптическими свойствами ФК. Частота атомного перехода при этом должна попадать в ФЗЗ, причем либо рядом с границей, либо на границе ФЗЗ, что детально исследовано. На атомы действуют две плоские оптические электромагнитные волны, являющиеся собственными модами пересекающихся волноводных дефектов в ФК. Более сильное (управляющее) поле амплитуды E_p и частоты ω_p «одевает» атомные уровни, что приводит к изменению оптического атомного отклика, тогда как слабое (сигнальное) поле амплитуды E_μ частоты ω_μ , рассматривается как пробное для сканирования отклика системы. Появление квантовых одетых состояний может быть интерпретировано как динамическое Штарковское расщепление уровней (рис. 4). Релаксация населенности на переходах между одетыми состояниями (со скоростями \bar{A}_{23} и \bar{A}_{32}) приводит к возникновению хорошо известного дублета Ауслера-Таунса [2] или спектра Моллоу флуоресценции двухуровневого атома под действием сильного поля в вакууме. Внутри ФК скорость спонтанной релаксации атома уменьшена, что позволяет использовать более слабое управляющее поле для насыщения резонансного атомного перехода, чем в случае свободного пространства. При этом, меняя интенсивность и частоту управляющего поля можно эффективно изме-

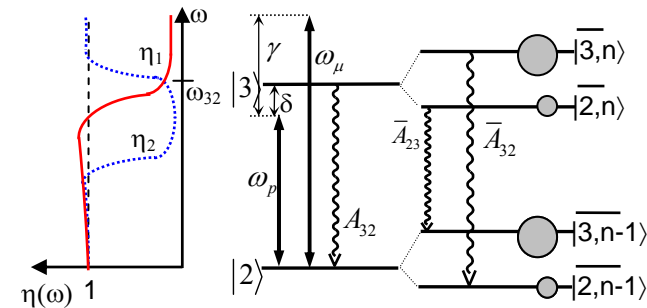


Рис. 4. Фотонный кристалл со спектральной функцией плотности мод $\eta(\omega)$ (слева) и двухуровневый атом, «одетый» управляющим полем частоты ω_p , взаимодействующий со слабым сигнальным полем частоты ω_μ . Скорость спонтанной релаксации населенности $A_{32}(\omega_{32})$ в базисе энергетических состояний, и скорости релаксации «одетых» уровней $\bar{A}_{23} \sim A_{32}(\omega_p - \Omega)\eta(\omega_p - \Omega)$ и $\bar{A}_{32} \sim A_{32}(\omega_p + \Omega)\eta(\omega_p + \Omega)$ определяют изменение атомного отклика.

нять частоту динамического штарковского расщепления уровней, а значит скорости атомной релаксации и оптические свойства атомов, что подробно рассмотрено в п. 3.2. на основе анализа уравнения для матрицы плотности атомной системы. Показано, что происходит значительное уменьшение поглощения излучения для частот внутри ФЗЗ. Кроме этого, при соответствующей отстройке управляюще-

го поля от резонанса возможна инверсия населенностей в двухуровневой системе под действием управляющего поля, что в вакууме достичь невозможно.

В п. 3.3 показано, что в рамках предложенной конфигурации появляется возможность управлять прохождением сигнального лазерного излучения внутри ФК посредством изменения частоты и амплитуды управляющего поля. Показано, что существуют наиболее эффективные комбинации интенсивности и отстройки от резонанса управляющего поля. Метод позволяет добиться значительного увеличения показателя преломления частиц, помещенных в ФК одновременно с усилением сигнального поля, что позволяет скомпенсировать нежелательные предыдущие или последующие потери. С другой стороны, показана возможность управляемого уменьшения показателя преломления вплоть до нуля, что может быть использовано при разработке различных оптических переключателей.

Дополнительной возможностью для приготовления требуемого атомного отклика является соответствующий подбор спектральной формы, ширины и положения границы ФЗЗ относительно частоты атомного перехода, технически это доступно в настоящее время. Наиболее простой случай гладкой зависимости (см. рис. 4) рассмотрен в данной главе с целью демонстрации эффекта.

Необходимо отметить, что метод не требует ни очень резкой, ни очень глубокой (полностью запрещенной) ФЗЗ. При этом интенсивность управляющего поля для эффективного управления может быть много меньше, чем в случае свободного пространства, что обеспечивается подавлением спонтанной релаксации внутри ФК. Отсутствие данных ограничений позволяет считать метод доступным для практической реализации. Совместное распространение управляющего и сигнального полей в ФК может быть организовано под различными углами. В частности, может быть реализован случай ортогонального распространения.

Рассмотренные эффекты изучены в условиях пренебрежимо малого однородного и неоднородного уширения. Показано, что однородное уширение, вводимое через параметр P в уравнения для матрицы плотности, приводит к исчезновению эффекта, поэтому более низкие температуры среды предпочтительны.

Основные результаты, полученные в главе 3, суммированы в п. 3.4.

В главе 4 диссертации изложены оригинальные результаты исследования диссипативной динамики одиночного кубита в сильном управляющем переменном электромагнитном поле. Основным инструментом для исследования являются квантовый метод МК, резонансная теория возмущений и метод квазиэнергий.

В п. 4.1 дано краткое описание кубитов на основе джозефсоновских переходов (сверхпроводящие кубиты) и схемы управления кубитами. В п. 4.2 выполнен анализ динамики кубитов в сильном поле в рамках резонансной теории возмущений. П. 4.3 посвящен анализу переходов Ландау-Зинера (ЛЗ). В п. 4.4

введена модель, позволяющая описать основные механизмы шумового воздействия резервуара на кубит. П. 4.5 отводится изложению разработанной автором методики моделирования динамики кубитов в присутствии шума на основе квантового метода МК.

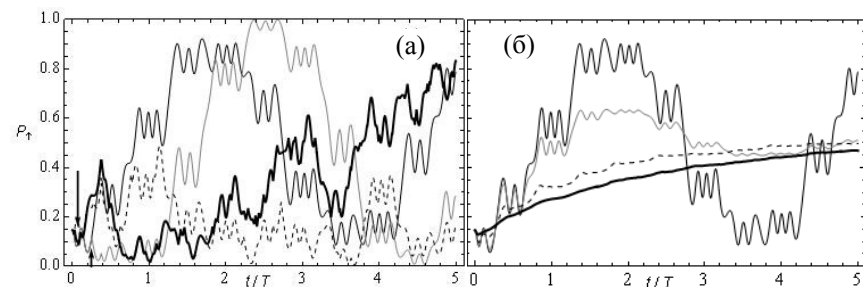


Рис. 5. Зависимость населенности верхнего уровня кубита от времени, квантовая траектория (а) и усреднение по 3000 реализаций (б), при скоростях дефазировки $\Gamma = 0$ (черная сплошная), $\Gamma = 0.09\omega$ (серая), $\Gamma = 0.81\omega$ (черная пунктир), $\Gamma = 4\omega$ (жирная сплошная). Стрелками обозначен момент первой дефазировки, когда траектории расходятся. Параметры $\varepsilon_0 = \omega$ и $A = 8.5\omega$ – амплитуда постоянной и переменной составляющей внешнего управляющего поля, $\Delta = \omega$ – туннельное расщепление уровней, $\omega = 2\pi / T$ – частота переменного ВЧ поля. В отличие от стохастической динамики (а), при усреднении (б) наблюдаются затухающие осцилляции Раби и выход населенности на стационарное значение.

В п. 4.6. представлены основные результаты моделирования динамики кубита методом МК (рис. 5). Здесь излагаются исследования диссипативной динамики одиночного кубита в сильном переменном поле методом квантовых траекторий. Полученные результаты позволяют дать интерпретацию переходам ЛЗ в условиях шума с точки зрения единичных реализаций, а также установить связь с усредненной динамикой системы, так как динамика переходов ЛЗ с учетом релаксации представляет особый интерес, особенно в оптике [26–28]. Рассмотрен эффект когерентного подавления туннелирования (КПТ) при периодически повторяющихся переходах ЛЗ, продемонстрировано разрушение эффекта в единичной реализации в условиях шума, что также приводит к насыщению кубита и выхода населенности на стационарное значение при усредненной динамике. Показано, что даже слабый шум существенно влияет на динамику кубита в единичной реализации и зависит от фазы поля в момент релаксации. Прослежен переход от результатов единичного эксперимента к усредненной зависимости населенностей кубита от времени, которая может быть получена в экспериментах [23–25] путем многократного повторения опыта, в зависимости от уровня шума в системе.

Развитая методика используется в п. 4.7 для интерпретации новейших экспериментов по изучению джозефсоновских кубитов методами амплитудной спектроскопии (АС) [23–25]. В применении к методу АС найдено, что хотя отдельные зависимости населенности кубита от амплитуды внешнего поля требуют большого числа измерений и повторений эксперимента, итоговая интерференционная картина хорошо проявляется уже при сотнях реализаций, тогда как в недавних экспериментах проводятся десятки тысяч испытаний (рис. 6). Исследовано также влияние уровня шума на метод АС и обнаружена устойчивость к скорости дефазировки в кубите при больших амплитудах внешнего поля и резонансах высоких порядков. Кроме того, исследуется также порог шума, при котором интерференционная картина различима, результат численного моделирования сравнивается с аналитическим исследованием.

Моделирование эксперимента из первых принципов позволило также учесть флуктуацию начальной фазы возбуждающего кубит импульса, причем показано, что итоговая интерференционная картина от данного классического шума не зависит при достаточном числе реализаций. Однако существенным оказалось влияние шума на динамику переходов ЛЗ, что приводит к исчезновению при усреднении скачков населенности уровней кубита при переходах ЛЗ и сглаживанию усредненной динамики по времени, что наблюдается в эксперименте [25].

П. 4.8 посвящен изложению теории динамического контроля квантовых состояний кубита путем воздействия на него бихроматического сигнала, состоящего из двух гармоник, которые характеризуются фиксированным сдви-

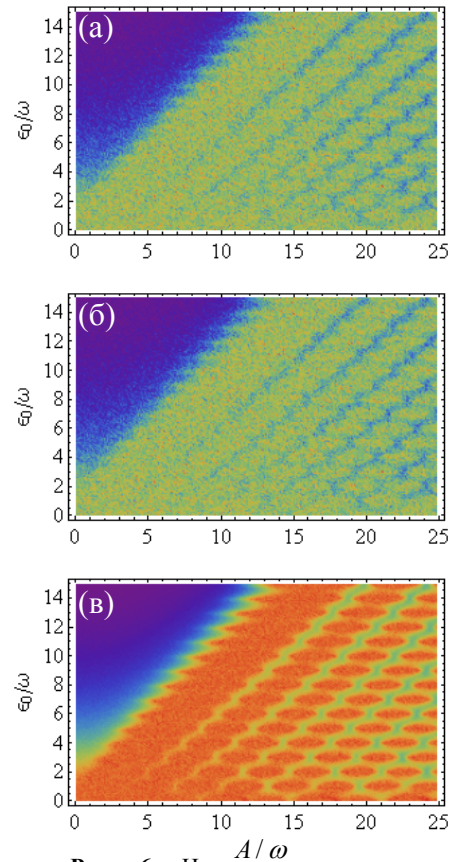


Рис. 6. Населенность верхнего уровня по окончании действия возбуждающего поля в зависимости от параметров ϵ_0 и A управляющего поля для $\Delta = \omega$, $\Gamma = 0.09\omega$. Число реализаций $N = 10$ (а), $N = 100$ (б), $N = 500$ (в). В случае (в) хорошо соответствует случаю для 3000 реализаций

гом по фазе. Проблема управления атомами и молекулами такого рода импульсами ранее обсуждалась в лазерной физике. Недавний эксперимент [29] по воздействию бихроматических импульсов ВЧ-поля на кубит заставляет взглянуть на эту проблему с точки зрения спектроскопии кубитов. В п. 4.8.1 получена обобщенная формула Раби с резонансной частотой, зависящей от фазы бихроматического сигнала. В п. 4.8.2 проблема анализируется в рамках Флокесостояний, а в п. 4.8.3. обсуждается управление интерференционной картиной населенностей кубита. Показано, что суперпозиции двухчастотных сигналов может существенно влиять на темп переходов ЛЗ, а следовательно на населенности уровней. Поскольку пересечение квазиуровней зависит от параметров сигнала (относительной амплитуды и фазы), то это существенно влияет на многофотонные переходы. При этом контуры резонансных траекторий, определяющие пленение населенностей, оказываются чувствительными к параметрам управляющего сигнала (п. 4.8.4). Отмечено, что данные эффекты могут быть использованы для калибровки СВЧ-импульсов.

Основные результаты, полученные в главе 4, суммированы в п. 4.9.

В **Заключении** сформулированы основные результаты, полученные в диссертации.

Основные результаты диссертации

1. Развита теория взаимодействия квантованного электромагнитного поля в сжатом когерентном состоянии со средой трехуровневых Λ -атомов в режиме электромагнитно-индуцированной прозрачности (ЭИП) с учетом квантовой релаксации методом Гейзенберга-Ланжевена. Получены значения среднеквадратических отклонений (флуктуации) операторов атомных переходов в стационарном состоянии, характеризующих параметры атома. Исследовано влияние процессов релаксации на динамику системы. Показано, что квантостатистические свойства света могут передаваться атомным операторам в таком режиме. Результаты численного моделирования квантовым методом Монте-Карло находятся в хорошем соответствии с полученным нами аналитическим решением.

2. Исследована задача распространения квантованного поля (в состоянии сжатого вакуума) в среде трехуровневых Λ -атомов в режиме ЭИП и найдена зависимость уровня сжатия поля на выходе из среды от параметров на входе и свойств среды. Принципиально важным оказался учет флуктуаций параметров системы, связанных с операторами шума. Аналитические результаты позволяют интерпретировать данные эксперимента по наблюдению эффекта ЭИП в случае сигнального поля в сжатом вакуумном состоянии [12] и с уверенностью позволяют рассчитывать модификацию параметров поля и среды в задаче распространения в режиме ЭИП.

3. Показано, что в случае, когда фотонный кристалл допирован двухуровневыми атомами (ионами, квантовыми точками) и частота оптического перехода атомов попадает на границу запрещенной фотонной зоны, возможно эф-

фективное управление релаксационными свойствами атомов путем изменения интенсивности и частоты лазерного излучения, резонансного их оптическому переходу. На этом основан предлагаемый метод лазерного управления оптическими свойствами допированного фотонного кристалла – коэффициентом поглощения и показателем преломления – при значениях параметров, доступных для практической реализации.

4. Проанализированы переходы Ландау – Зинера и эффект когерентного подавления туннелирования на примере диссипативной динамики одиночного кубита на основе джозефсоновских переходов с точки зрения единичных реализаций эксперимента, в зависимости от уровня шума в системе. Показано, что даже слабый шум может существенно нарушить динамику системы в единичной реализации, что зависит от фазы управляющего поля в момент релаксации. Прослежен переход от результатов единичного эксперимента к усредненной зависимости населенностей кубита от времени, которая может быть получена в экспериментах путем многократного повторения опыта.

5. Рассмотрено влияние различного уровня шума на населенности кубитов и зависимость резкости интерференционной картины метода амплитудной спектроскопии от числа измерений состояния кубитов. Показана возможность контрастного формирования интерференционной картины уже при 500 реализациях, что может быть существенным при проведении реального эксперимента.

6. Из первых принципов промоделирован реальный процесс томографии состояния кубита, с учетом классического шума, вызываемого флуктуациями начальной фазы возбуждающего импульса в методе амплитудной спектроскопии. Показано что такой шум не влияет на усредненную по реализациям интерференционную картину.

7. Разработан программный комплекс, поддерживающий параллельные вычисления с использованием суперкомпьютерных технологий, позволяющий рассчитывать диссипативную динамику многоуровневых квантовых систем методом Монте-Карло на основе решения квантового кинетического уравнения в марковском приближении для произвольного числа энергетических уровней и источников шума в системе.

Литература

1. *Gardiner, C.W.* Quantum noise / C. W. Gardiner, P. Zoller. – Berlin: Springer, 2000. – 438 p.
2. *Скалли, М. О.* Квантовая оптика / М. О. Скалли, М. С. Зубайри. – М.: Физматлит, 2003. – 512 с.
3. *Нильсен, М.* Квантовые вычисления и квантовая информация / М. Нильсен, И. Чанг. – М.: Мир, 2006. – 824 с.
4. *Nakahara, M.* Quantum computing: from linear algebra to physical realizations / M. Nakahara and T. Ohmi. – London: Taylor&Francis, 2008. – 421 p.
5. Quantum Information Processing and Communication: Strategic report on current status, visions and goals for research in Europe, V. 1.7, <http://qurope.eu> (2010).
6. *Zhao, B.* A millisecond quantum memory for scalable quantum networks / B. Zhao, Y.-A. Chen, X.-H. Bao, et. al. // Nature Physics. 2009. V. 5. P. 95 – 99.

7. *Plenio, M. B.* The quantum-jump approach to dissipative dynamics in quantum optics / M. B. Plenio, P. L. Knight // Rev. Mod. Phys. 1998. V. 70, №1. P. 101–143.
8. *Breuer, H.-P.* The theory of open quantum systems / H.-P. Breuer, F. Petruccione. – Cambridge: Oxford University Press, 2002. – 625 p.
9. *Lukin, M.D.* Colloquium: Trapping and manipulating photon states in atomic ansambles // Rev. Mod. Phys. 2003. V75. P. 457.
10. *Simon, C.* Quantum memories. A review based on the European integrated project “Qubit Applications (QAP)” / C. Simon et. al. // Eur. Phys. J. D. 2010. V. 58 P. 1–22.
11. *Dantan, A.* Quantum-state transfer between fields and atoms in electromagnetically induced transparency / A. Dantan, M. Pinarid // Phys. Rev. A. 2004. V. 69, P. 043810.
12. *Akamatsu, D.* Electromagnetically Induced Transparency with Squeezed Vacuum / D. Akamatsu, K. Akiba, M. Kozuma // Phys. Rev. Lett. 2004. V. 92. P. 203602.
13. *Appel, J.* Quantum Memory for Squeezed Light / J. Appel, E. Figueroa, D. Korystov, et. al. // Phys. Rev. Lett. 2008. V. 100. P. 093602.
14. *Figueroa, E.* Propagation of squeezed vacuum under electromagnetically induced transparency / E. Figueroa, M. Lobino, D. Korystov, et. al. // New Journal of Physics. 2009. V. 11. P. 013044.
15. *Arikawa, M.* Quantum memory of a squeezed vacuum for arbitrary frequency sidebands / M. Arikawa, K. Honda, D. Akamatsu, et. al. // Phys. Rev. A. 2010. V. 81. P. 021605.
16. *Joannopoulos, J.* Photonic Crystals: Molding the Flow of Light (2nd edition) / J. Joannopoulos, S. Johnson, J. Winn, R. Meade. – Princeton: Princeton University Press, 2008. – 333 p.
17. *Busch, K.* Photonic Crystals: Advances in Design, Fabrication, and Characterization / K. Busch, S. Lulkes, R. B. Wehrspohn, and H. Full. – Wiley, 2004. – 377 p.
18. *Voldeyohannes, M.* Coherent control of spontaneous emission near a photonic band edge / M. Voldeyohannes and S. John // J. Opt. B: Quantum semiclass. Opt. 2003. V. 5. R43-R82.
19. *Viasnoff-Schwoob, E.* Spontaneous emission enhancement of quantum dots in a photonic crystal wire / E. Viasnoff-Schwoob, C. Weisbuch, H. Benisty, et. al. // Phys. Rev. Lett. 2005. V. 95. P. 183901.
20. *Radeonychev, Y. V.* Electromagnetically induced transparency and LWI in three level atoms imbedded in a frequency dependent environment / Y. V. Radeonychev, M. A. Erukhimova, O. A. Kocharovskaya, and R. Vilaseca // Radiophysics and Quantum Electronics. 2004. V. 47. P. 795–805.
21. *Kress, A.* Manipulation of the spontaneous emission dynamics of quantum dots in two-dimensional photonic crystals / A. Kress, F. Hofbauer, N. Reinelt, et. al. // Phys. Rev. B. 2005. V. 71. P. 241304.
22. *Makhlin, Yu.* Quantum-state engineering with Josephson-junction devices / Yu. Makhlin, G. Schon, and A. Shnirman // Rev. Mod. Phys. 2001. V. 73. P. 357.
23. *Oliver, W. D.* Large-amplitude driving of a superconducting artificial atom / W.D. Oliver, S.O. Valenzuela // Quant. Inf. Process. 2009. V. 8. P. 261 (2009).
24. *Sillanpää, M.* Continuous-Time Monitoring of Landau-Zener Interference in a Cooper-Pair Box / M. Sillanpää, T. Lehtinen, A. Paila, Y. Makhlin, and P. Hakonen // Phys. Rev. Lett. 2006. V. 96. P. 187002.
25. *Oliver, W. D.* Mach-Zehnder Interferometry in a Strongly Driven Superconducting Qubit / W. D. Oliver, Y. Yu, J. C. Lee, K. K. Berggren, L. S. Levitov, and T. P. Orlando // Science. 2005. V. 310. P. 1653.
26. *Saito, K.* Dissipative Landau-Zener transitions of a qubit: Bath-specific and universal behavior / K. Saito, M. Wubs, S. Kohler, Y. Kayanuma, and P. Hänggi // Phys. Rev. B. 2007. V. 75. P. 214308.

27. *Pokrovsky, V. L.* Fast quantum noise in the Landau-Zener transition / V. L. Pokrovsky and D. Sun // *Phys. Rev. B.* 2007. V. 76. P. 024310.
28. *Nalbach, P.* Landau-Zener Transitions in a Dissipative Environment: Numerically Exact Results / P. Nalbach and M. Thorwart // *Phys. Rev. Lett.* 2009. V. 103. P. 220401.
29. *Bylander, J.* Pulse imaging and nonadiabatic control of solid-state artificial atoms / J. Bylander et al. // *Phys. Rev. B.* 2009. V. 80. P. 220506 (R).

Публикации автора по теме диссертации

- A1. *Gelman, A.* Laser Control of Optical Properties of a Doped Photonic Crystal / A. Gelman, Y. V. Radeonychev // *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* 2010. V. 43. P. 155402 (8pp).
- A2. *Гельман, А. И.* Подавление шума в атомной системе под действием поля в сжатом когерентном состоянии / А. И. Гельман, В. А. Миронов // *ЖЭТФ.* 2010. Т. 137. С. 627-636.
- A3. *Gelman, A.* Noise suppression in three-level atomic system driven by quantized field / A. Gelman, V. Mironov // *Proc. SPIE.* 2009. V. 7521. P. 75210F.
- A4. *Гельман, А.И.* Особенности диссипативной динамики Λ -атома под действием квантованного поля в сжатом состоянии / А.И. Гельман, В.А. Миронов // *Учен. зап. Казан. Ун-та. Сер. Физ.-матем. Науки.* 2010 (принято к печати).
- A5. *Гельман, А. И.* Релаксационная динамика сверхпроводящих джозефсоновских кубитов в сильном переменном поле / А. И. Гельман, А. М. Сатанин // *ФТТ.* 2010. Т. 52. С. 2094-2099.
- A6. *Гельман, А. И.* Квантовые скачки при переходах Ландау-Зинера в диссипативной динамике сверхпроводящего кубита / А. И. Гельман, А. М. Сатанин // *Письма в ЖЭТФ.* 2010. Т. 91. С. 584-589.
- A7. *Гельман, А. И.* Квантовые скачки при спонтанной релаксации сверхпроводящего кубита под действием сильного ВЧ поля / А. И. Гельман, А. М. Сатанин // *Вестник ННГУ.* 2010. (принято к печати).
- A8. *Гельман, А. И.* Динамический контроль квантовых состояний джозефсоновских кубитов / А. И. Гельман, М. В. Денисенко, А. М. Сатанин // *Вестник ННГУ.* 2010. (принято к печати).
- A9. *Radeonychev, Y. V.* Laser control of optical properties of two-level atoms embedded in a photonic crystal / Y. V. Radeonychev and A. Gelman // *Int. Journal of. Quantum Information.* 2010. (accepted).
- A10. *Гельман, А. И.* Численное моделирование квантовой релаксации в многоуровневых атомных системах методом Монте-Карло : препринт №773 / А.И. Гельман, В.А. Миронов ; ИПФ РАН. – Н. Новгород, 2008. – 42 с.
- A11. *Гельман, А. И.* Лазерное управление оптическими свойствами атома в фотонном кристалле / А.И. Гельман, Е. В. Радеонычев // *ВШОПФ 2006 : научная студенческая конференция Высшей Школы Общей и Прикладной Физики ННГУ, 30-31 май 2006. Н. Новгород, 2006. С. 6.*
- A12. *Гельман, А. И.* Численное моделирование квантовой релаксации в атомных системах методом Монте-Карло / А. И. Гельман, В. А. Миронов // 12-ая Нижегородская сессия молодых ученых (естественнонаучные дисциплины), 16-21 апреля 2007. Нижний Новгород, 2007. С. 85.
- A13. *Gelman, A. J.* Numerical simulation of quantum relaxation in atomic systems by Monte Carlo wave-function method / A. J. Gelman, V. A. Mironov // *Frontiers of Nonlinear Physics : III International conference, 3-9 July 2007. Nizhny Novgorod, Russia, 2007. P. 198.*

- A14. *Гельман, А. И.* Численное моделирование взаимодействия квантованного электромагнитного поля со средой трехуровневых лямбда-атомов методом Монте-Карло / А. И. Гельман, В. А. Миронов // 13-ая Нижегородская сессия молодых ученых (естественнонаучные дисциплины), 20-25 апреля 2008. Нижний Новгород, 2008. С. 95-96.
- A15. *Гельман, А. И.* Численное моделирование квантовой релаксации в атомных системах методом Монте-Карло / А. И. Гельман, В. А. Миронов // *Нелинейные волны-2008 : XIV Научная школа, Фундаментальные и прикладные проблемы нелинейной физики : конференция молодых ученых 1-7 марта 2008. Н. Новгород, 2008. С. 25-26.*
- A16. *Гельман, А. И.* Исследование процессов передачи и хранения информации при взаимодействии квантованного поля со средой Λ -атомов методом Монте-Карло / А. И. Гельман, В. А. Миронов // 6-ая курчатовская молодежная научная школа, 17-19 ноября 2008. Москва, 2008. С. 107.
- A17. *Гельман, А. И.* Исследование подавления квантовых шумов в среде трехуровневых Λ -атомов под действием квантованного электромагнитного поля методом Монте-Карло / А. И. Гельман, В. А. Миронов // 14-я Нижегородская сессия молодых ученых (естественнонаучные дисциплины), 19-23 апреля 2009. Нижний Новгород, 2009. С. 26-27.
- A18. *Gelman, A. J.* Suppression of noise in atomic system driven by squeezed coherent field / A. J. Gelman, V. A. Mironov // *Proceedings of the 9-th Asian Conference on Quantum Information Science, 26-29 August 2009. Nanjing, China, 2009. P. 83-84.*
- A19. *Gelman, A. J.* Reduction of noise in atomic system driven by squeezed coherent field / A. J. Gelman, V. A. Mironov // *International Conference "Micro- and nanoelectronics - 2009" (ICMNE-2009) with extended Session "Quantum Informatics", 5-9 October 2009. Zvenigorod, 2009. P. 01-09.*
- A20. *Гельман, А. И.* Бифуркации в нелинейном диссипативном джозефсоновском осцилляторе и квантовые измерения кубита / А. И. Гельман, А. М. Сатанин, S. Ashhab and F. Nogi // *XV Научная школы «Нелинейные волны-2010», 6-12 марта 2010. Нижний Новгород, 2010. С. 21.*
- A21. *Гельман, А. И.* Локализованные квантовые состояния в системе связанных джозефсоновских переходов / А. И. Гельман, А. М. Сатанин, А. Швецов, А. Zagoskin, S. Savel'ev и F. Nogi // *XV Научная школы «Нелинейные волны-2010», 6-12 марта 2010. Нижний Новгород, 2010. С. 22.*
- A22. *Гельман, А. И.* Релаксационная динамика сверхпроводящих джозефсоновских кубитов в сильном переменном поле / А.И. Гельман, А.М. Сатанин // *XIV Симпозиум «Нанозифика и наноэлектроника», 15-19 марта 2010. Нижний Новгород, 2010. Т. 2. С. 352-353.*
- A23. *Гельман, А. И.* Релаксационная динамика сверхпроводящих джозефсоновских кубитов в сильном поле / А.И. Гельман, А.М. Сатанин // 15-ая Нижегородская сессия молодых ученых, 2010. Нижний Новгород, 2010.
- A24. *Gelman, A. J.* Dissipative dynamics of a superconducting flux qubit driven by a strong microwave field / A.J. Gelman and A.M. Satanin // *The International conference on Theoretical "Dubna-Nano2010", 5-10 July 2010. Dubna, JINR, 2010. P. 54.*
- A25. *Gelman, A. J.* Dissipative Landau-Zener transitions in a superconducting qubit driven by a strong microwave field / A.J. Gelman and A.M. Satanin // *Frontiers of Nonlinear Physics: IV International conference, 13-20 July 2010. Nizhny Novgorod, Russia, 2010. P. 272-273.*
- A26. *Gelman, A.* Laser control of optical properties of two-level atoms embedded in a photonic crystal / A. Gelman, E. V. Radeonychev // *V workshop ad memoriam of Carlo Novero "Advances in Foundations of Quantum Mechanics and Quantum Information with atoms and photons" (Quantum'10) and the third Italian Quantum Information Science Conference (IQIS'10), 23-29 May 2010. Turin, Italy, 2010.*

Содержание

Введение	4	Основные результаты диссертации	163
Глава 1. Квантовый метод Монте-Карло (метод квантовых траекторий)	21	Список литература	165
1.1. История развития метода		Публикации автора по теме диссертации	178
1.2. Обоснование метода		Приложение 1. Расчет параметров шума с помощью флуктуационно-диссипативной теоремы	181
1.3. Условная динамика системы. Метод квантовых скачков		Приложение 2. Джозефсоновский переход, гамильтониан и способ измерения состояния кубита	183
1.4. Алгоритм численного моделирования			
1.5. Преимущества метода			
1.6. Точность метода			
1.7. Тестирование программного комплекса			
1.7.1. Двухуровневая система			
1.7.2. Трехуровневая система			
Глава 2. Подавление шума в атомной системе под действием поля в сжатом когерентном состоянии	48		
2.1. Рассмотрение методом Гейзенберга-Ланжевена			
2.2. Рассмотрение методом Монте-Карло			
2.3. Распространение пробной волны в режиме ЭИП. Изменение статистики сжатого вакуума при распространении			
2.4. Заключение			
Глава 3. Лазерное управление релаксацией и оптическими свойствами атомов в фотонном кристалле	71		
3.1. Описание модели.			
3.2. Атом под действием управляющего поля.			
3.3. Атом в пробном поле			
3.4. Заключение			
Глава 4. Квантовые скачки в диссипативной динамике кубита	101		
4.1. Джозефсоновские кубиты			
4.2. Динамика кубита во внешнем переменном поле. Резонансное приближение			
4.3. Переходы Ландау-Зинера			
4.4. Механизмы воздействия среды на кубит. Модель шума			
4.5. Динамика кубита: квантовый метод Монте-Карло			
4.6. Результаты моделирования динамики кубита методом Монте-Карло			
4.6.1. Квантовые траектории			
4.6.2. Усредненная динамика кубита. Эффекты дефазировки			
4.6.3. Усредненная динамика кубита. Энергетическая релаксация			
4.7. Приложение к амплитудной спектроскопии			
4.7.1. Влияние амплитуды ВЧ поля на населенности			
4.7.2. Влияние постоянного поля на многофотонный резонанс			
4.7.3. Интерференционная картина населенностей			
4.7.4. Зависимость от флуктуации начальной фазы импульса			
4.8. Динамический контроль квантовых состояний кубита			
4.8.1. Резонансное приближение			
4.8.2. Квазиэнергетические состояния кубита			
4.8.3. Управление интерференционной картиной населенностей			
4.8.4. Влияние диссипации на интерференционную картину населенностей			
4.9. Заключение			

Гельман Александр Иосифович

ДИССИПАТИВНАЯ ДИНАМИКА И КОНТРОЛИРУЕМАЯ РЕЛАКСАЦИЯ В ОДИНОЧНЫХ КВАНТОВЫХ СИСТЕМАХ

Автореферат

Подписано к печати 10.11.2010 г.
Формат 60 × 90 ¹/₁₆. Бумага офсетная № 1.
Усл. печ. л. 1,5. Тираж 100 экз. Заказ № 96(2010).

Отпечатано в типографии Института прикладной физики РАН,
603950 Н. Новгород, ул. Ульянова, 46