

На правах рукописи  
УДК 621.373

ПРОХОРОВ АЛЕКСЕЙ ВАЛЕРЬЕВИЧ

**КОГЕРЕНТНЫЕ ЭФФЕКТЫ РЕЗОНАНСНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ  
МНОГОЧАСТИЧНЫХ АТОМНЫХ СИСТЕМ И  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ**

Специальность 01.04.21 – лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва 2005

Работа выполнена на кафедре физики и прикладной математики  
Владимирского государственного университета.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,  
профессор Аракелян Сергей Мартиросович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор Кулик Сергей Павлович  
кандидат физико-математических наук,  
доцент Чижов Алексей Владимирович

Ведущая организация: Санкт-Петербургский государственный  
университет

Защита состоится " 23 " июня 2005г. в 15 часов на заседании  
диссертационного совета Д 501.001.31 в Московском государственном  
университете имени М.В.Ломоносова по адресу: 119992, ГСП-2, Москва,  
Ленинские горы, МГУ, ул.Академика Хохлова, дом 1, корпус нелинейной  
оптики, аудитория имени С.А.Ахманова.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического фа-  
культета МГУ имени М.В.Ломоносова.

Автореферат разослан " 23 " мая 2005г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 501.001.31  
кандидат физико-математических наук,  
доцент

Т.М.Ильинова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Изучение процессов когерентного взаимодействия электромагнитного поля с резонансной средой представляет собой фундаментальное направление в современной атомной физике и квантовой оптике. Выяснение основных закономерностей и разработка соответствующих математических методов их описания достигли значительного прогресса в последние годы благодаря существенным достижениям в эксперименте для атомно-оптических взаимодействий. Действительно, успехи лазерного охлаждения атомов позволили осуществить прорыв атомной оптики в область сверхнизких температур на примере реализации уникального физического состояния вещества – бозе-эйнштейновского конденсата (БЭК). Оно характеризуется высокой степенью когерентности атомной системы, что позволяет проводить целый ряд принципиальных экспериментов при условиях, которые допускают детальное теоретическое описание. Для таких квантовых состояний вещества происходит, например, коллапс и возрождение (т.е. сжатие и расплывание во времени) волновой функции БЭК, наблюдается замедление групповой скорости при распространении пробного оптического импульса, а также эффекты пленения и квантовой памяти в связанной системе поле-среда. Эти и другие фундаментальные по своей сути явления, наблюдаемые в эксперименте, определяются высокой степенью когерентности атомно-оптических взаимодействий в БЭК и представляют новое направление современной лазерной физики. Рассмотрение динамики таких когерентных взаимодействий в условиях реализации резонанса электромагнитного (светового) поля с многоуровневой атомной системой и является одним из основных предметов исследования в диссертации.

Другой тип задач, представленных в диссертации, определяется таким актуальным направлением современной нелинейной и когерентной оптики, каким является разработка методов управления нелинейно-оптическими процессами при распространении лазерных импульсов и пучков в пространственно-неоднородных средах с высокой эффективностью нелинейных преобразований (гигантские нелинейности) в условиях реализации многопараметрических дисперсионных соотношений. Речь идет, в частности, о неоднородных резонансных средах с кристаллической и/или аморфной структурой – фотонных кристаллах, специального типа сложноструктурированных полых газонаполненных и допированных оптических волокнах и др. Интерес к этой области исследований связан с возможностями реализации конкретных схем управления светом с помощью света на новой элементной базе, когда удастся заданным образом управлять ам-

плитудно-фазовыми характеристиками проходящего через такие среды излучения в относительно слабых с высокими когерентными свойствами оптических полях. Это определяет широкие перспективы использования таких систем для практических целей и в приложениях. Например, наблюдаемые в них эффекты пленения для световых импульсов позволяют надеяться на создание в ближайшем будущем нового класса оптических устройств, реализующих оптическую память. Возможность внешнего управления параметрами плененного внутри таких структур света позволяет предложить сверхбыстрые (фемтосекундные) переключающие устройства для целей оптической связи и оптической обработки информации. Такого класса задачи рассмотрены в диссертации для случая нелинейного управления параметрами световых импульсов в неоднородных, допированных резонансными атомами, оптических волокнах.

**Целью диссертационной работы** является исследование коллективных когерентных эффектов взаимодействия электромагнитных/оптических полей с многоатомными системами в условиях резонанса и рассмотрение новых физических принципов управления такими процессами. Основной акцент сделан на выяснении особенностей формирования и эволюции индуцированных воздействием внешних электромагнитных полей неустойчивостей в БЭК и возможности управления развитием когерентных нелинейных атомно-оптических взаимодействий в многоатомных системах. В практическом плане предложены эффективные схемы генерации неклассических состояний световых полей в бозе-газе и заложены основы для разработки новых устройств оптической обработки информации на базе допированных оптических волокон с примесными резонансными атомами.

**Основные задачи**, решаемые в работе:

1. Проведен анализ стационарных квантовых состояний и развития квантовых динамических процессов в БЭК двухуровневых атомов в одномодовом электромагнитном/радиочастотном поле.
2. Исследовано формирование нелинейного отклика многочастичной атомной среды при реализации  $\Lambda$ -схемы резонансного взаимодействия трехуровневых атомов со световыми полями.
3. Рассмотрены различные режимы распространения оптических импульсов в средах с гигантским нелинейным откликом – допированных оптических волокнах.
4. Предложены новые способы генерации неклассических атомных и сжатых оптических состояний в процессе взаимодействия БЭК с электромагнитными полями.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

1. Выполнен детальный анализ формирования стационарных квантовых состояний и развития динамических процессов в многоатомном БЭК, взаимодействующем с модой электромагнитного/радиочастотного поля. Обоснована возможность генерации нового типа связанных фазово-коррелированных состояний атомов БЭК и электромагнитного поля.

2. Развита теория нелинейного атомно-оптического когерентного взаимодействия в условиях резонанса в схеме, когда слабый пробный оптический импульс распространяется в резонансной среде в присутствии сильного лазерного излучения накачки. Предложен новый способ управления оптическими свойствами таких сред посредством изменения интенсивности пробного поля, позволяющий изменять коэффициенты поглощения и дисперсии среды и получать режимы частичной либо полной компенсации их влияния. Найдены условия, при которых коэффициенты керровской нелинейности и нелинейного поглощения среды принимают гигантские значения и могут быть отрицательными.

3. Впервые рассмотрен эффект электромагнитной индуцированной прозрачности в допированном примесными атомами оптическом волокне/волноводе и предложена новая схема эффективной компрессии огибающей пробного импульса при его распространении в такой системе.

4. Предложен новый метод эффективной генерации неклассических состояний световых полей в БЭК на основе  $\Lambda$ -схемы атомно-оптического взаимодействия.

**Практическая значимость работы.** Разработанная в диссертации методика расчета нелинейного квантового отклика многочастичной атомной среды во внешнем электромагнитном поле на примере  $\Lambda$ -схемы резонансного взаимодействия дает возможность внешнего управления оптическими параметрами таких сред и позволяет заложить основы нового класса оптических устройств с контролируемыми значениями параметров нелинейности, дисперсии, оптических потерь. Перспективным в этом аспекте является допированное редкоземельными атомами оптическое волокно, которое может быть также использовано для эффективной компрессии оптических импульсов. На основе рассмотренной  $\Lambda$ -схемы взаимодействия в БЭК предложен новый метод генерации неклассических состояний световых полей, который может быть использован при создании высококогерентных лазерных источников излучения. Результаты, полученные в диссертации, могут найти также применение при разработке новых физических принципов оптической обработки информации и кодирования квантовой информации.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Процесс квантового взаимодействия БЭК двухуровневых атомов с одномодовым электромагнитным/радиочастотным полем приводит к формированию в среде стационарных атомно-полевых состояний и генерации распространяющихся коллективных (спиновых) возмущений среды, обладающих высокой степенью когерентности.

2. При реализации  $\Lambda$ -схемы когерентного резонансного взаимодействия оптических полей со средой в допированном редкоземельными атомами оптическом волокне оказывается возможным управление нелинейным откликом среды посредством выбора интенсивности и частоты отстройки от резонанса пробного светового импульса, что приводит к различным режимам распространения света и изменению его амплитудно-фазовых характеристик.

3. Взаимодействие БЭК трехуровневых атомов с внешними оптическими полями в условиях электромагнитной индуцированной прозрачности приводит к эффективной генерации квадратурно-сжатого света в моде пробного поля на малых пространственных масштабах.

**Апробация работы.** Материалы диссертационной работы докладывались на Международных конференциях по сжатым состояниям и соотношениям неопределенности (ICSSUR'1999, Неаполь, Италия, 1999, ICSSUR'2001, Бостон, Массачусетс, США, 2001 и ICSSUR'2005, Besancon, Франция, 2005); на Российской гравитационной конференции (Владимир, 1999); на Всероссийской молодежной научной конференции по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и наноэлектронике (С.-Петербург, 1999); на Международной конференции студентов и аспирантов по фундаментальным наукам "Ломоносов-2000: молодежь и наука на рубеже XXI века" (Москва, 2000); на Международной конференции по квантовой оптике (ICQO'2000, Раубичи, Беларусь, 2000); на Шведско-Российском семинаре по перепутанным квантовым состояниям (SRWEQS'2000, С.-Петербург, 2000); на Международном симпозиуме по современным проблемам лазерной физики (MPLP'2000, Новосибирск, 2000); на Российско-Германском лазерном симпозиуме (RGLS'2000, Суздаль, 2000); на Международных конференциях по когерентной и нелинейной оптике – ICONO'2001, Минск, Беларусь, 2001 и ICONO'2005, С.-Петербург, 2005; на Российско-Французском лазерном симпозиуме (RFLS'2001, Суздаль, 2001); на Международной конференции "Лазерные и лазерно-информационные технологии: фундаментальные проблемы и приложения" (ILLA'2001, Владимир-Суздаль-Шатура, 2001); на Международной конференции по квантовой оптике (ICQO'2002, Раубичи, Беларусь,

2002); на Международной конференции по квантовой электронике (IQEC/LAT-YS 2002, Москва, 2002); на Российско-польской конференции по квантовой физике и коммуникациям (QPC'2002, Дубна, 2002); на Российско-Французском лазерном симпозиуме для молодых ученых (С.-Петербург – Пушкин, 2004); на Школе-семинаре для молодых ученых “Квантовые измерения и физика мезоскопических систем” (КИФМС'2005, Суздаль-Владимир, 2005).

**Публикации.** Основное содержание диссертации опубликовано в 17 основных публикациях, список которых приведен в конце автореферата.

**Личный вклад автора.** Результаты, представленные в диссертации, получены автором лично; выбор общего направления исследований и принципиальная постановка рассматриваемых задач осуществлялись совместно с научным руководителем. Автору принадлежит самостоятельное исследование конкретных проблем и решение соответствующих задач, включая как расчетную часть, так и интерпретацию результатов.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, содержащего 199 наименований. Полный объем диссертации – 147 страниц, включая 27 рисунков. Каждая глава имеет аннотацию и заканчивается основными выводами по результатам проведенных исследований.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ**

Во **введении** обоснована актуальность работы, сформулированы ее цель и основные решаемые задачи, обсуждается научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведены основные защищаемые положения, а также дается краткая характеристика содержания диссертации.

**Глава 1** посвящена обзору литературы по теме диссертации.

Обсуждаются способы формирования квантовых состояний вещества для БЭК и основные используемые приближения для теоретического описания наблюдаемых в нем явлений. Особое внимание уделено вопросу формирования в такой среде квантовых возмущений - собственных и индуцированных внешним воздействием (с помощью электромагнитных и оптических полей). Представлена методика расчета линейного/нелинейного отклика многоатомной среды, резонансной к внешнему оптическому излучению. Сделан обзор работ по нелинейным оптическим

процессам в твердых телах с периодической структурой; обсуждаются перспективы их использования при создании оптических устройств передачи и обработки информации. Приведены результаты принципиальных работ по формированию неклассических, и в частности сжатых, состояний света в лазерной физике, а также проанализировано современное состояние исследований и достижения по проблеме квантовых и оптических вычислений.

**Глава 2** содержит оригинальные результаты по способам генерации когерентных квантовых состояний и возбуждению неустойчивостей в атомной среде.

В § 2.1 рассматриваются вопросы формирования перепутанных (entangled) состояний БЭК двухуровневых атомов  $^{23}\text{Na}$  и квантовой моды электромагнитного поля в одночастичном приближении. В приближении Хартри (для бозе-газа) вектор состояния идеального (при  $T = 0$ ) БЭК, состоящего из  $A$  двухуровневых атомов, можно представить в виде:

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{A!}} (\alpha a^+ + \beta b^+)^A |0\rangle_{ab} = \sum_{p=0}^A Q_p |A-p\rangle_a |p\rangle_b, \quad (1)$$

где  $|0\rangle_{ab} = |0\rangle_a |0\rangle_b$  – вакуумное атомное состояние; операторы  $a^+(a)$  и  $b^+(b)$  характеризуют рождение (уничтожение) атомов на нижнем "a" и верхнем "b" уровнях ( $\omega_b > \omega_a$ ), соответственно; параметры  $\alpha$  и  $\beta$  определяют амплитуды вероятностей нахождения атомов на соответствующих уровнях и удовлетворяют условию нормировки  $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$ . Здесь "a" =  $3S_{1/2}, F = 1$ , "b" =  $3S_{1/2}, F = 2$  – магнитные подуровни сверхтонкой структуры для терма основного состояния  $3S_{1/2}$  атомов натрия  $^{23}\text{Na}$ ; резонансная частота рассматриваемых переходов лежит в радиодиапазоне и составляет  $\omega_{ab}/2\pi = 1772\text{МГц}$ . Коэффициенты  $Q_p$  задают амплитуды атомных мод БЭК, индекс суммирования  $p$  определяет число возбужденных атомов.

Соответствующий гамильтониан для рассматриваемой двухуровневой схемы взаимодействия одномодового электромагнитного поля с веществом соответствует модели Джейнса-Каммингса и может быть представлен в следующем виде:

$$H = \hbar \left[ \omega_a a^+ a + \omega_b b^+ b + \frac{1}{2} \lambda_a (a^+)^2 a^2 + \frac{1}{2} \lambda_b (b^+)^2 b^2 + \omega_d d^+ d + k(d^+ a^+ b + b^+ a d) \right], \quad (2)$$

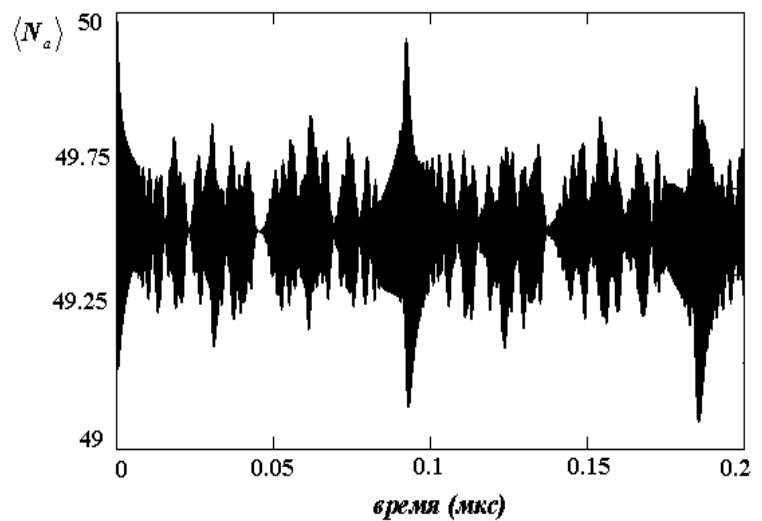
где  $d^+(d)$  - операторы рождения (уничтожения) квантов электромагнитно-



го поля, члены с  $\omega_a, \omega_b$  задают энергию на атомных уровнях, члены с  $\lambda_i$  описывают атомную нелинейность в борновском приближении рассеяния медленных атомов, член с  $k$  учитывает внутренние индуцированные переходы между атомными уровнями под действием электромагнитного поля (атомно-полевая константа связи).

Найдено стационарное решение и получено соотношение для распределения энергии по спектру возмущенного БЭК для задачи с гамильтонианом взаимодействия (2) в приближении (1). Показано существование двух спектральных ветвей такого связанного состояния поля со средой, одна из которых – высокочастотная – характеризует квантовый “светлый” магнотон, образованный модами БЭК и квантом электромагнитного поля. Другая ветвь – низкочастотная – соответствует собственному элементарному возбуждению БЭК и описывает “темный” магнотон. Интересной особенностью является возможность формирования в конденсате устойчивых во времени коллективных (спиновых) образований – квантовых структур в охлажденном атомном газе, – аналогично эффекту захвата (пленения) светового излучения в известных экспериментах по наблюдению “запаздывания” света при его резонансном взаимодействии с БЭК.

В § 2.2 исследуется квантовая динамика атомно-полевых мод, возникающих при взаимодействии БЭК с одномодовым электромагнитным полем. Приводится точное решение для временной эволюции амплитуд заполнения атомных уровней. Показано, что процесс индуцированных электромагнитным полем коллективных возбуждений в среде приводит к возникновению в системе эффекта коллапса и возрождения волновой функции БЭК, что выражается в появлении в определенные моменты времени резких всплесков населенности (возрождение) нижнего уровня  $\langle N_a \rangle$  на фоне почти стационарного поведения системы. В области атомно-полевого резонанса происходит размытие эффекта с



**Рис.1** Временная зависимость для средней населенности  $\langle N_a \rangle$  нижнего уровня атомов  $^{23}\text{Na}$ , находящихся в состоянии БЭК при атомно-полевым резонансе с внешним электромагнитным полем. Число атомов в БЭК  $A=100$ , атомно-полевая константа связи  $k=1.7 \cdot 10^9 \text{ c}^{-1}$ , атомная нелинейность  $\lambda = 2.1 \cdot 10^5 \text{ c}^{-1}$ .

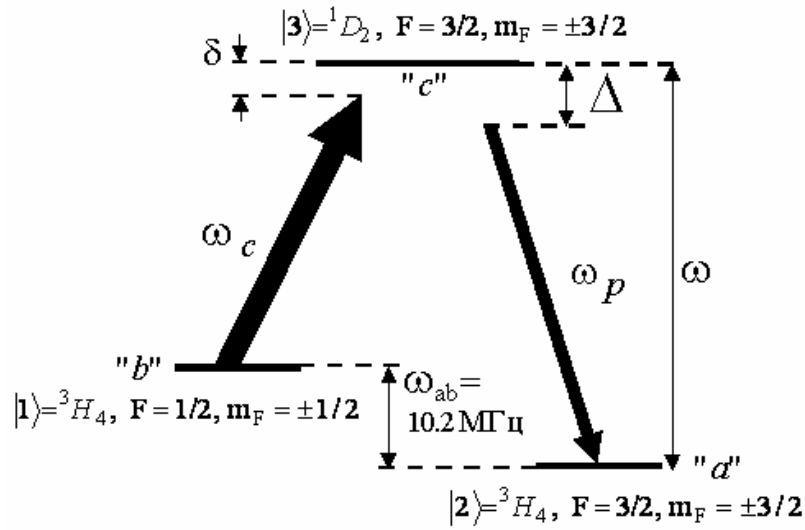
выделением его тонкой структуры в форме дополнительных возмущений, распределенных по времени на основной картине – рис.1. Приводится расчет характерных времен и соответствующих спектров подобных возмущений. Основываясь на исследовании спектров возбуждений БЭК, показано, что при резонансном взаимодействии возникают исключительно низкочастотные коллективные моды, что связано с индуцированными внешним полем межуровневыми переходами. Это представляет самостоятельный интерес в связи с вопросами генерации электромагнитного излучения в БЭК.

В § 2.3 проведено исследование квантовой статистики, квантовых флуктуаций и фазовых корреляций рассматриваемых связанных состояний атомов БЭК и электромагнитного поля. Получена наглядная картина временной эволюции атомной статистики БЭК и ее изменений в ходе атомно-полевого взаимодействия; анализируется зависимость атомной статистики БЭК от различных параметров, в частности от числа атомов. На основе операторного подхода с использованием симметричных свойств (в рамках алгебры Ли с симметрией  $SU(2)$ ) продемонстрировано возникновение возмущений в системе, связанных с нарушением основных коммутационных соотношений для введенных атомно-полевых операторов системы из-за существующего взаимодействия. Как следствие, возникают неклассические корреляции в системе, которые соответствуют генерации в БЭК нового типа сжатых (фазово-коррелированных) состояний, реализующихся при взаимодействии атомов и электромагнитного поля.

В § 2.4 исследуются поляризационные состояния в системе, состоящей из квантованного электромагнитного поля и БЭК атомов, которые связаны взаимодействием. Показано, что возникает процесс периодического чередования эффектов поляризации и деполяризации во времени, определяемый наличием тонкой структуры коллапсов и возрождений для параметра, характеризующего степень поляризации системы – аналогично коллапсу и возрождению населенности, о котором речь шла в § 2.2. В расчетах использованы физические параметры, взятые из известных экспериментов с БЭК для атомов  $^{23}\text{Na}$ . Полученные в диссертации результаты качественно соответствуют наблюдаемым в эксперименте явлениям.

**Глава 3** основана на результатах теоретических исследований нелинейных процессов с импульсами света, распространяющимися в оптических волокнах, допированных атомами редкоземельных элементов.

В §§3.1,3.2 рассмотрена задача формирования и конкуренции линейного и нелинейного откликов среды для оптического волокна, в центральную жилу которого внедрены примесные трехуровневые атомы для возможности осуществления  $\Lambda$ -схемы взаимодействия (рис. 2). В таких



**Рис.2**  $\Lambda$ -схема взаимодействия с использованием энергетических уровней атома  $^{59}\text{Pr}$ . Волна накачки  $\vec{E}_c$  на частоте  $\omega_c$ , центральная частота  $\omega_p$  пробного импульса (амплитуды  $A_p$ ) отстроена на величину  $\Delta$  от резонанса верхнего ("c") и нижнего ("a") уровней (частота  $\omega$ ). Уровни "a", "b" - соответствуют сверхтонкому расщеплению.

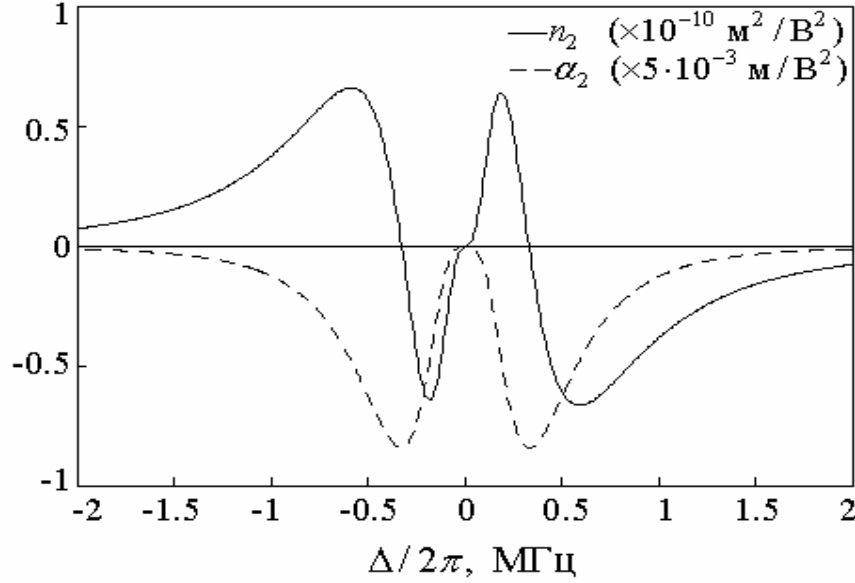
системах, которые принято называть допированными оптическими волокнами, общая восприимчивость среды может быть представлена в виде суммы восприимчивости  $\chi_M$  матрицы и резонансной восприимчивости  $\chi_{AT}$ , определяемой внедренными в нее атомами:

$$\chi^{(1)} = \chi_M^{(1)} + \chi_{AT}^{(1)} \quad (3a)$$

$$\chi^{(3)} = \chi_M^{(3)} + \chi_{AT}^{(3)}, \quad (3b)$$

где  $\chi^{(1)}$ ,  $\chi^{(3)}$  – соответственно линейная и нелинейная (керровская) восприимчивости.

Используя формализм матрицы плотности и учитывая наведенную поляризацию среды, выполнен расчет для  $\chi^{(1)}$  и  $\chi^{(3)}$  в такой волноводной среде. В результате выписаны явные выражения для показателей преломления ( $n$ ) и поглощения ( $\alpha$ ) допированного оптического волокна при прохождении через такую среду пробного светового импульса  $A_p$  в присутствии сильной волны оптической накачки  $\vec{E}_c$ :



**Рис.3** Частотные зависимости нелинейного показателя преломления  $n_2$  и коэффициента нелинейного поглощения  $\alpha_2$  для пробного импульса света в фотонно-кристаллическом оптическом волокне, допированном атомами  $^{59}\text{Pr}$  (0.05 at.%) в присутствии излучения накачки с интенсивностью  $I_c = 478 \text{ Вт/см}^2$ .

$$n = n_0 + n_2 |A_p|^2 \quad (4a)$$

$$\alpha = \alpha_0 + \alpha_2 |A_p|^2, \quad (4b)$$

где  $n_0 = 1 + \frac{1}{2} \text{Re}(\chi_M^{(1)}) + \frac{1}{2} \text{Re}(\chi_{AT}^{(1)})$ ,  $\alpha_0 = \beta_p \text{Im}(\chi_M^{(1)}) + \beta_p \text{Im}(\chi_{AT}^{(1)})$ ,  
 $n_2 = \frac{3}{8} \text{Re}(\chi_M^{(3)}) + \frac{3}{8} \text{Re}(\chi_{AT}^{(3)})$ ,  $\alpha_2 = \frac{3}{4} \beta_p \text{Im}(\chi_M^{(3)}) + \frac{3}{4} \beta_p \text{Im}(\chi_{AT}^{(3)})$ ;  $n_0$ ,  $\alpha_0$  - линейные значения параметров;  $n_2$ ,  $\alpha_2$  - нелинейные добавки к показателю преломления и коэффициенту поглощения для керровской среды.

Получено, что в такой среде достигаются гигантские значения коэффициентов керровской нелинейности  $n_2$  и нелинейного поглощения  $\alpha_2$  – рис.3. Наличие области с отрицательным нелинейным поглощением определяет эффект усиления пробного импульса за счет энергии поля накачки, а отрицательная нелинейность позволяет изменять дисперсию среды.

Эти результаты показывают, что в системе могут реализовываться условия нелинейной компенсации, когда из-за конкуренции линейных и нелинейных эффектов разных знаков становятся возможными режимы бездисперсионного и/или в отсутствие оптических потерь распространения пробного светового импульса. Отличительной особенностью данных режимов является *наблюдаемое* уменьшение значения групповой скорости распространяющегося светового импульса (до значений порядка сотен м/с – так называемый эффект “замедления” света) и явление *электромагнитной индуцированной прозрачности*. Показано, что при определенной настройке рассматриваемой схемы взаимодействия поля со средой в допированном оптическом волокне распространяются оптические солитоны и/или реализуется режим компрессии огибающей пробного импульса.

В § 3.3 представлены результаты численного моделирования процесса распространения оптических импульсов в допированном волокне на основе решений нелинейного уравнения Шредингера; материальные параметры среды взяты из литературы для фотонного кристалла, допированного атомами  $^{59}\text{Pr}$ . Получены солитонный режим распространения и режим компрессии – сжатия во времени огибающей пробного светового импульса – при соответствующих управляющих параметрах задачи. Характерное расстояние, на котором происходит максимальная компрессия, составляет порядка 0.1 мм, степень компрессии - 4.75 (при выбранных параметрах: диаметр сердцевины волокна - 1.95 мкм, концентрация атомов примеси  $^{59}\text{Pr}$  - 0.05 at.%, интенсивность волны накачки -  $I_c = 478 \text{ Вт/см}^2$ , отношение интенсивностей пробного импульса и волны накачки  $I_p / I_c = 0.02$ , длительность пробного импульса  $\tau_p = 70$  мкс, частота отстройки пробного импульса от резонанса  $\Delta / 2\pi = 159.6$  КГц). Используя полученный также эффект значительного спектрального уширения распространяющегося пробного импульса на выходе из среды, предложена комбинированная двухкаскадная схема компрессии оптического импульса при условии  $\Lambda$ -резонанса для взаимодействующих волн. На первом этапе световой импульс приобретает положительную частотную модуляцию с малой деформацией своей огибающей; на втором этапе импульс эффективно сжимается за счет совместного действия (конкуренции) дисперсии и нелинейности.

В § 3.4 проанализированы возможности наблюдения в эксперименте “сверхсветового” режима распространения пробного импульса в допированном волокне. Показано, что из-за малости значения спектральной ширины области, в которой мог бы реализоваться такой режим сверхсветового распространения для рассматриваемой системы, по сравнению с реально достижимой спектральной шириной используемого оптического импульса, а также из-за несимметричных трансформаций его огибающей при

проявлении дисперсионных эффектов третьего порядка, которые становятся доминирующими в этом случае, данный режим практически не наблюдаем в эксперименте.

Заключительная глава 4 посвящена исследованию эффектов взаимодействия многочастичного БЭК трехуровневых атомов с внешними оптическими полями для случая двулучевой  $\Lambda$ -схемы при условии, близком к резонансу.

В § 4.1 показано, что реализация в многоатомной среде гигантских значений оптической нелинейности в такой  $\Lambda$ -схеме взаимодействия оптических полей может быть использована не только для управления амплитудно-фазовыми характеристиками волновых пакетов (оптических импульсов), что было продемонстрировано в предыдущей главе 3, но также и для эффективного управления квантовой статистикой светового излучения. В этом случае осуществление режима с “замедленным светом” для пробного светового импульса определяет наблюдаемую в эксперименте временную задержку импульса в среде (из-за процессов энергообмена в связанной системе поле-среда), позволяющую управлять его динамическими характеристиками. С другой стороны, – гигантские значения нелинейного показателя преломления открывают возможность эффективной генерации сжатого света на малых длинах взаимодействия. Необходимые численные оценки для проявления этих эффектов приведены в диссертации.

В § 4.2 выполнен анализ квантовых нелинейных многочастичных атомно-оптических взаимодействий для бозе-газа. Используется метод среднего поля Боголюбова. В рамках данного подхода линейный по полю атомно-оптический гамильтониан Джейнса-Каммингса может быть обобщен на нелинейный случай. Для режима, когда реализуется перекачка энергии в системе, упрощенный гамильтониан, ответственный только за оптическое взаимодействие, имеет вид:

$$H_{\text{int}} = -\frac{k_0^2}{2} (\bar{\rho}_{32}^{(1)} a^+ + \bar{\rho}_{23}^{(1)} a) - \frac{k_0^4}{2} (\bar{\rho}_{32}^{(3)} a^+ N_f + \bar{\rho}_{23}^{(3)} N_f a). \quad (5)$$

Здесь  $a$  ( $a^+$ ) – оператор уничтожения (рождения) фотонов пробного поля,  $N_f = a^+ a$  – оператор числа фотонов,  $\bar{\rho}_{32}^{(1,3)}$  – соответствующие линейные/нелинейные коэффициенты при разложении матричного элемента перехода на частоте Раби  $g_2$  пробного поля:

$$\bar{\rho}_{32} \cong \bar{\rho}_{32}^{(1)} g_2 + \bar{\rho}_{32}^{(3)} |g_2|^2 g_2, \quad (6)$$

константа атомно-оптического взаимодействия  $k_0 = \mu_{32} \sqrt{\frac{\omega}{2\hbar\epsilon_0 V}}$  ( $V$  – характерный объем взаимодействия в БЭК,  $\omega$  – средняя частота пробного

поля,  $\mu_{32}$ -дипольный матричный элемент) определяет различные по полю порядки для процесса перекачки энергии в системе (при условии  $\omega \approx g_2$ ).

В данном подходе, оператор уничтожения фотона может быть представлен в виде  $\hat{a} = f + \hat{c}$ , где  $f = \langle \hat{a} \rangle$  определяет классическую амплитуду, а оператор  $\hat{c} = \hat{a} - \langle \hat{a} \rangle$  – малую флуктуационную часть поля ( $\langle \hat{c} \rangle = 0$ ). В этом случае решение на основе гамильтониана (5) сводится к решению системы дифференциальных уравнений для среднего поля  $f$  и квантовых шумов  $\hat{c}$ . В результате получены два различных режима в зависимости от среднего числа фотонов в пробном импульсе: при малых интенсивностях пробного поля реализуется эффект конкуренции между поглощением и усилением пробного поля, распространяющегося в БЭК; начиная с некоторого порогового значения интенсивности пробного поля наблюдается параметрический рост числа фотонов в нем за счет перекачки энергии поля накачки. При определенном выборе параметров взаимодействия возможен режим эффективной генерации квадратурно-сжатого света в пробном поле в процессе его взаимодействия с БЭК. При длине взаимодействия 3.8 см на выходе системы наблюдается квадратурно-сжатый свет со степенью сжатия порядка 60% (использованы следующие параметры: концентрация атомов БЭК  $N = 3.3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ , интенсивность волны накачки  $I_c = 55 \text{ мВт/см}^2$ , интенсивность пробного импульса  $I_p = 80 \text{ мкВт/см}^2$ , длительность огибающей пробного импульса  $\tau_p \approx 1 \text{ мкс}$ ). Для этого случая проведен сравнительный анализ значений характерных времен обсуждаемых эффектов: времени сжатия  $\tau_{sq}$ , времени задержки света средой  $\tau_d$ , времени релаксационных процессов для нижних уровней в используемой  $\Lambda$ -схеме  $\tau_{12}$  при соответствующей длительности пробного импульса  $\tau_p$ . Получено общее соотношение между ними:

$$\tau_p < \tau_{sq} \cong \tau_d < \tau_{12}, \quad (7)$$

выполнение которого необходимо для эффективной генерации квадратурно-сжатого света в БЭК.

**В заключении** сформулированы основные выводы и результаты диссертации.

## Основные результаты

1. Развита квантовая теория взаимодействия атомного БЭК с квантовым электромагнитным (радиочастотным) полем; получены эффекты

коллапса и возрождения волновой функции в такой системе и выявлена их сверхтонкая структура.

2. Показано, что коллективный когерентный процесс атомно-полевого взаимодействия приводит к формированию в БЭК устойчивых во времени коллективных образований (квантовых спиновых структур), для которых рассмотрена генерация нового типа фазово-коррелированных и сжатых спиновых состояний.

3. Развита теория когерентного нелинейного атомно-оптического взаимодействия трехуровневых атомов в допированном волокне с пробным световым импульсом в присутствии сильной оптической волны накачки. Найдены условия, когда коэффициенты керровской нелинейности и нелинейного поглощения среды принимают гигантские значения и могут быть отрицательными. Предложен новый способ нелинейного управления оптическими свойствами такого допированного волокна в условиях полной компенсации поглощения в среде, а также при компрессии огибающей пробного светового импульса, реализующейся на малых длинах его распространения в среде.

4. Впервые получен эффект электромагнитной индуцированной прозрачности в допированном волокне, когда оптическое поле накачки обеспечивает низкий уровень оптических потерь и приводит к наблюдаемому эффекту замедления света при распространении пробного светового импульса. Предложен новый способ управления динамикой распространения пробного импульса в условиях проявления этих эффектов при изменении его интенсивности на входе в среду.

5. Впервые рассмотрена генерация квадратурно-сжатого света при нелинейном взаимодействии трехуровневых атомов БЭК с пробным световым полем. Определены условия эффективного подавления его квантовых флуктуаций, которое происходит в отсутствие поглощения, а также при усилении интенсивности распространяющегося пробного поля за счет энергообмена с излучением накачки.



## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1. А.П.Алоджанц, А.Ю.Лексин, А.В.Прохоров, С.М.Аракелян. Пределные измерения в квантовой и атомной оптике, локализованные мезоскопические поляризационные квантовые состояния.// *Laser Physics*, 2000, **10**, №2, с. 603-613.
2. A.P.Alodjants, A.Yu.Leksin, A.V.Prokhorov, S.M.Arakelian. Phase transitions and switching effect in quantum optics and atomic physics. – In: Program and Book of Abstracts of the International Conference on Quantum Optics'2000, Raubichi, Belarus, 2000, p.14.
3. A.V.Prokhorov, A.Yu.Leksin, A.P.Alodjants, S.M.Arakelian. Quantum macroscopic XOR operation using nonclassical states formation in Mach-Zehnder interferometer.// *Proc. of SPIE*, 2001, **4429**, pp.8-13.
4. A.P.Alodjants, A.V.Prokhorov, A.Yu.Leksin, S.M.Arakelian, "Nonclassical interference and quantum computing in mesoscopic systems: information and entropy aspects"// *Proc. of SPIE*, 2001, **4429**, pp.52-57.
5. С.М. Аракелян, А.П. Алоджанц, А.Ю. Лексин, А.В. Прохоров. Формирование макроскопической суперпозиции поляризационных состояний света и квантовый логический элемент "XOR" на основе интерферометра Маха-Цендера. //Сб. научных трудов Академии инженерных наук РФ, Верхне-Волжское отделение, к 10-летию АИН РФ, Владимир, 2001, с.70-77.
6. A.P.Alodjants, A.Yu.Leksin, A.V.Prokhorov, S.M.Arakelian. Limiting measurements in quantum and atomic optics: localized mesoscopic polarization quantum states. //*Proc. Of Sixth International Conference on Squeezed States and Uncertainty Relations*, Eds. D.Han, Y.S.Kim, S.Solimeno. – Greenbelt: Goddard Space Flight Center, 2000, pp.284-287.
7. А.В. Прохоров, А.Ю. Лексин, А.П. Алоджанц С.М. Аракелян. Квантовые вычисления на основе нелинейных туннельно-связанных систем с распределенной обратной связью.// *Изв. РАН, Сер. физ.*, 2002, **66**, №7, с.968-972.
8. Alexander P. Alodjants, Andrei Yu. Leksin, Alexei V. Prokhorov, Sergei M. Arakelian. Quantum limit for observation of self-switching effect of light in nonlinear spatially inhomogeneous optical system. // *Molecular Crystals & Liquid Crystals*, 2002, **375**, pp.185-194.
9. A.P. Alodjants, A.Yu. Leksin, A.V. Prokhorov, S.M. Arakelian. Quantum logic gates based on macroscopic nonclassical polarization states of light.// *Laser Physics*, 2002, **12**, №6, pp.956-962.

10. А.В. Прохоров, А. П. Алоджанц, С.М. Аракелян. Перепутанные спиновые состояния бозе-конденсата в электромагнитном поле. // *Оптика и спектроскопия*, 2003, **94**, №1, с.55-67.
11. А.Р. Alodjants, A.V. Prokhorov, S.M. Arakelian. Formation of the SU(3)-polarization states in atom-quantum electromagnetic field system under condition of the bose-einstein condensate existence. // *Particles and Nuclei, Letters*, 2003, **1**, pp. 66-71.
12. А. Р. Alodjants, А. V. Prokhorov, and S. M. Arakelian. Entangled States of the Bose Condensate of Two-Level Atoms Interacting with a Quantum Electromagnetic Field.// *Laser Physics*, 2003, **13**, №8, pp.1-14.
13. А.В. Prokhorov, N.V. Korolkova, G. Leuchs. Nonlinear control of light pulses in doped fibers. / - In: Issue of Erlangen-Nuremberg University, 2005, Erlangen, Germany, p.73.
14. S.M. Arakelian, A.V. Prokhorov, I. Vadeiko. Nonlinear interaction of light with Bose-Einstein condensate: new methods to generate subpoissonian light. // [arXiv:quant-ph/0406231](https://arxiv.org/abs/quant-ph/0406231), 2004; I. Vadeiko, A.V. Prokhorov, A.V. Rybin, S.M. Arakelian. Nonlinear interaction of light with Bose-Einstein condensate: new methods to generate subpoissonian light.// *Phys. Rev. A*, 2005, in press.
15. А.В. Прохоров, А.П. Алоджанц, С.М. Аракелян. Генерация неклассических состояний света в бозе-эйнштейновском конденсате в условиях электромагнитной индуцированной прозрачности.// *Письма в ЖЭТФ*, 2004, **80**, №12, с.870-874.
16. А.В. Prokhorov , N.V. Korolkova, S.M. Arakelian. Nonlinear control of light pulses in doped fibers.// *Laser Physics*, 2005, **3**, pp.1-12 .
17. А.В. Прохоров, Н.В. Королькова, С.М. Аракелян. Нелинейное управление распространением оптических импульсов в допированных световодах.// *Оптика и спектроскопия*, 2005, в печати.

Изд. лиц. №020275. Подписано в печать 20.05.05.  
Формат 60x84/16.  
Бумага для множит. техники. Гарнитура Таймс. Печать на ризографе.  
Усл.печ.л. 0,93. Уч.изд.л. 0,98. Тираж 100 экз.  
Заказ \_\_\_\_\_.

Редакционно-издательский комплекс  
Владимирского государственного университета  
600000, Владимир, ул. Горького, 87