

На правах рукописи



**Честнов Игорь Юрьевич**

**КРИТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В СИСТЕМЕ СВЯЗАННЫХ  
АТОМНО-ОПТИЧЕСКИХ СОСТОЯНИЙ В УСЛОВИЯХ  
ОПТИЧЕСКИХ СТОЛКНОВЕНИЙ**

Специальность 01.04.21 – Лазерная физика

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

**Научный руководитель** доктор физико-математических наук  
**Алоджанц Александр Павлович**

**Официальные оппоненты:** доктор физико-математических наук,  
профессор кафедры «Оптическая физика и современное естествознание» СПбНИУ ИТМО  
**Вартанян Тигран Арменакович**

кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник ОИВТ РАН  
**Саутенков Владимир Алексеевич**

**Ведущая организация** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет»

Защита диссертации состоится «19» мая 2014 г. в 15 ч на заседании диссертационного совета Д002.063.03 при ИОФ РАН по адресу: 119991, г. Москва, ул. Вавилова, д. 38.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИОФ РАН.

Автореферат разослан \_\_\_\_\_

Ученый секретарь

диссертационного совета \_\_\_\_\_  \_\_\_\_\_ / Т. Б. Воляк /

## Общая характеристика работы

### Актуальность работы

В последние десятилетия большинство исследований в области лазерной физики, физики конденсированного состояния, квантовой и атомной оптики стимулируются перспективой создания устройств, обладающих принципиально новыми физическими свойствами. В их число входят и низкопороговые источники лазерного излучения, и источники низкоинтенсивного, неклассического света, и новые среды для квантовой оптической обработки информации. Одним из перспективных подходов к решению связанных с этим задач является использование когерентных свойств связанных состояний среды (ансамбля атомов или полупроводниковой структуры) и поля, примером которых могут выступать поляритоны — бозонные квазичастицы, представляющие собой линейную суперпозицию фотонов и элементарных возбуждений в двухуровневой системе, — а также одетые материально-оптические состояния. При этом особое внимание уделяется изучению макроскопических когерентных свойств подобных систем и физике критических явлений — фазовых переходов в подобных системах, таких как бозе-эйнштейновской конденсация (БЭК) и переход к сверхтекучему состоянию.

Рассматриваемое направление является естественным продолжением современных фундаментальных исследований по лазерной физике, физике конденсированного состояния в атомных системах, для которых были подробно изучены явление БЭК и другие фазовые переходы. Несмотря на то, что атомный конденсат уже получен в разных лабораториях мира, экстремально низкие температуры конденсации (вплоть до десятков нК) существенным образом ограничивают возможность применения этого эффекта в практических целях. Этим и объясняется интерес к изучению высокотемпературных фазовых переходов, которые могут иметь место при взаимодействии среды с лазерным излучением. К настоящему моменту значительные успехи в этой области достигнуты в полупроводниковых микрорезонаторах с экситонными поляритонами. В частности, было показано макроскопическое заселение нижней поляритонной ветви в структурах на основе Cd/Te/CdMgTe при температуре порядка 5 К [1].

При описании фазовых переходов в подобных системах необходимо учитывать их неравновесную (или квазиравновесную) природу, обусловленную значительной ролью диссипативных эффектов. По этой причине обязательным условием обнаружения равновесного БЭК и сверхтекучих свойств связанных состояний вещества и поля является достижение термодинамического равновесия такими состояниями, что представляется затруднительным, поскольку время жизни поляритонов в условиях имеющихся экспериментов находится в диапазоне пикосекунд, что сопоставимо со временем установления термодинамического равновесия.

Вместе с тем в атомной оптике на основе управления как отдельными атомами, так и ансамблями атомов могут быть достигнуты существенно большие времена жизни элементарных атомных возбуждений, определяемые характерными спонтанными процессами. В диссертационной работе в связи с обозначенными выше задачами исследуются процессы, при которых особое значение имеет термодинамическое равновесие связанных состояний атомов и поля. При этом в качестве механизма термализации связанных атомно-оптических состояний оказывается возможным использовать процесс оптических столкновений (ОС) атомов с буферными частицами в присутствии электромагнитного излучения. Несмотря на то, что это явление известно довольно давно [2], термодинамические характеристики связанных атомно-оптических состояний в присутствии ОС пока полностью не изучены.

В работе основное внимание уделено влиянию термализации на физику фазовых переходов и критических явлений, протекающих в связанных атомно-оптических системах. Для реализации рассматриваемых фазовых переходов предлагается использовать специальные волноводные структуры. В отличие от полупроводниковых микрорезонаторов, содержащих двумерный поляритонный газ, предлагаемые структуры позволяют локализовать внутри одномерный газ связанных атомно-оптических состояний.

**Целью диссертационной работы** является исследование термализации, а также когерентных эффектов и фазовых переходов для связанных атомно-оптических состояний, имеющих место при взаимодействии ан-

самбля двухуровневых атомов с лазерным излучением в присутствии ОС с атомами буферного газа высокого давления.

В соответствии с целью диссертационной работы решались следующие основные задачи:

1. Построение теории термализации связанных (одетых) атомно-оптических состояний, осуществляемой за счет ОС двухуровневых атомов рубидия с атомами буферного газа, и сравнение с экспериментом.

2. Исследование особенностей формирования связанных атомно-оптических состояний внутри микроволноводных структур различной конфигурации, обладающих цилиндрической симметрией, для наблюдения фазовых переходов второго рода.

3. Исследование возможности осуществления фазового перехода к конденсату Бозе–Эйнштейна для одномерного идеального газа фотоподобных атомно-оптических поляритонов нижней дисперсионной ветви, формирующихся внутри биконического волновода. Определение параметров такого волновода, оптимальных для перехода к БЭК атомными поляритонами.

4. Исследование физических особенностей неравновесных фазовых переходов, в том числе лазерной генерации, происходящих в системе одетых атомно-оптических состояний в условиях ОС.

### **Научная новизна**

1. Развита теория термализации связанных атомно-оптических состояний за счет ОС с частицами буферного газа высокого давления. Получено условие термализации и рассчитано время перехода к термодинамически равновесному состоянию для одетых состояний.

2. Впервые предсказан фазовый переход в сверхизлучательное состояние для параметра порядка — среднего числа фотонов, испускаемых атомами, в присутствии ОС с частицами буферного газа при наличии термализации связанных атомно-оптических состояний. Показано, что при больших (вплоть до десятков ТГц) отрицательных значениях атомно-оптической отстройки частоты от резонанса, соответствующей красной области спектра, и соблюдении условия термализации поляритоны нижней дисперсионной ветви претерпевают высокотемпературный фазовый переход второго рода в когерентное состояние.

3. Предсказан высокотемпературный (сотни градусов Кельвина) фазовый переход к БЭК для атомно-оптических поляритонов в биконическом волноводе, возникающих при взаимодействии двухуровневых атомов с квантованным нерезонансным оптическим излучением в режиме сильной связи в присутствии ОС с частицами буферного газа.

### **Практическая значимость**

Предсказанные как равновесные, так и неравновесные фазовые переходы в связанной атомно-оптической системе в присутствии ОС могут стать основой создания новых источников когерентного, в том числе низкопорогового, излучения, а также сред для создания систем квантовой обработки информации.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Одетые атомно-оптические состояния термализуются в результате оптических столкновений с атомами буферного газа высокого давления в присутствии монохроматического электромагнитного поля, нерезонансного атомному переходу. Явление термализации существенно зависит как от знака, так и от величины отстройки от резонанса и ограничено только характерным временем спонтанных переходов в двухуровневой атомной среде.

2. В системе связанных атомно-оптических состояний в условиях их термодинамически равновесной заселенности, определяемой процессами оптических столкновений, осуществляется высокотемпературный фазовый переход второго рода в сверхизлучательное состояние для фотоноподобных поляритонов нижней дисперсионной ветви.

3. Высокотемпературная конденсация Бозе–Эйнштейна одномерного газа атомных поляритонов нижней дисперсионной ветви происходит в резонаторе - биконическом волноводе с плавно меняющимся по определенному закону радиусом благодаря удержанию поляритонов внутри такого волновода в специальном потенциале, задаваемом его (волновода) параметрами.

4. В системе одетых состояний, образуемых взаимодействием ансамбля двухуровневых атомов с внешним лазерным полем, а также модой резонатора, в присутствии оптических столкновений, происходит неравно-

весный фазовый переход к лазерной генерации, определяемый комбинацией параметров: отстройкой собственной частоты резонатора от перехода в связанной атомно-оптической системе, добротностью резонатора, а также величиной столкновительного уширения.

### Апробация работы

Результаты работы прошли апробацию на следующих российских и международных конференциях:

**V Всероссийская молодежная конференция по фундаментальным и инновационным вопросам современной физики**, г. Москва, 10-15 ноября 2013 г.; **6<sup>th</sup> International symposium on modern Problems of Laser Physics (MPLP'2013)**, Россия, г. Новосибирск, 25-31 августа 2013 г.; **2<sup>nd</sup> International conference on quantum technologies**, Россия, г. Москва, 20-24 июля 2013 г.; **Третья российско-тайваньская школа-семинар «Нелинейная оптика и фотоника»**, Россия, г. Владимир, 14-18 июня 2013 г.; **International Conference on Coherent and Nonlinear Optics (ICONO)**, Россия, г. Москва, 18-22 июня 2013 г.; **VII семинар Д. Н. Клышко**, г. Москва, МГУ, 25-27 мая 2011 г.; **Международная конференция «Фундаментальные проблемы оптики – 2012»**, Россия, г. Санкт-Петербург, 15-19 октября 2012 г.; **2<sup>nd</sup> Chinese-Russian Summer School on "Laser physics, Fundamental and Applied photonics"**, Китай, г. Тяньцзинь, 4-9 августа 2012 г.; **2<sup>nd</sup> Russian-Chinese symposium on laser physics**, Россия, г. Москва, 26-31 октября 2012 г.; **German-French-Russian Laser Symposium**, Германия, г. Гесвайнштайн, 13-17 апреля 2011 г.; **Международная конференция молодых ученых и специалистов «Оптика – 2011»**, Россия, г. Санкт-Петербург, 17-21 октября 2011 г.; **1<sup>st</sup> International Russian-Chinese conference/youth school-workshop “Modern laser physics and laser information technologies for science and manufacture”**, Россия, г. Владимир/Суздаль, 23-28 сентября 2011 г.; **International Scientific Workshop Photonics & Micro- and Nano-structured Materials**, Армения, г. Ереван, 28-30 июня 2011 г.; **«Mixed States of light and Matter»**, **WE-Heraeus-Seminar**, Германия, г. Бонн, 07-10 Февраля 2010 г.

По теме диссертационной работы опубликовано 8 статей в журналах из перечня ВАК.

## Личный вклад автора

Представленные в диссертации результаты оригинальны и получены автором лично. Выбор направления исследования, постановка задач и интерпретация полученных результатов производились совместно с научным руководителем и соавторами статей.

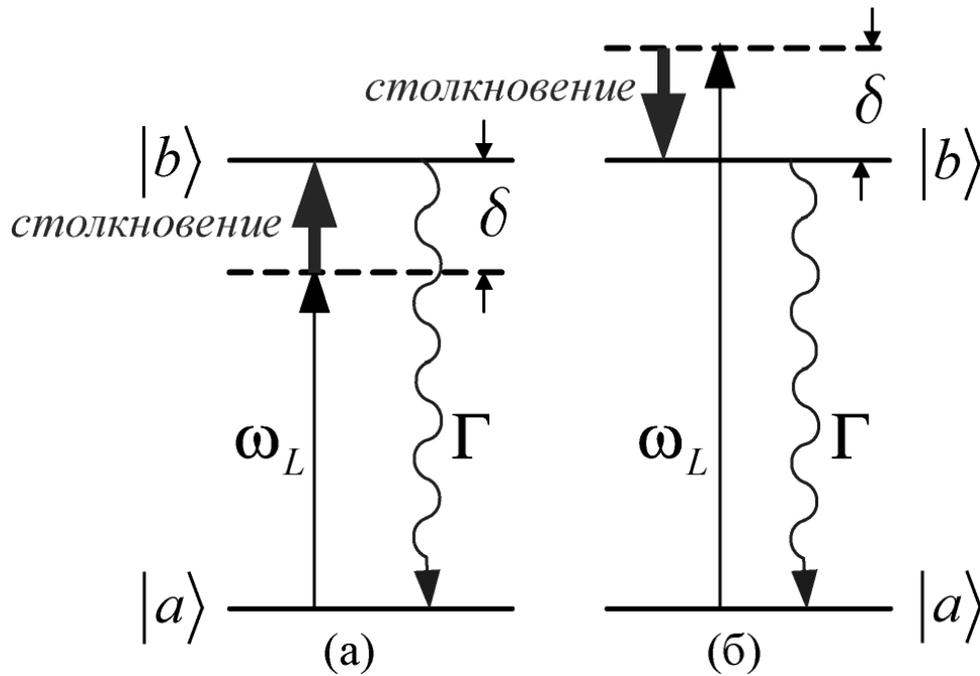
## Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, обзора литературы, трех глав, заключения и списка литературы из 167 наименований, изложена на 115 страницах и содержит 26 рисунков.

## Содержание работы

*Во введении* обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы ее цели, аргументирована научная новизна исследований. Показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения. Описан личный вклад автора и представлены сведения об апробации работы и публикациях.

*Первая глава* посвящена описанию физического явления ОС. В ней также приведен обзор исследований различных фазовых переходов, имеющих место в связанных материально-оптических системах. В частности, при описании процессов, протекающих в газовых средах, дается определение явлению ОС. Элементарный акт ОС (см. рис. 1) можно представить как столкновение двухуровневого атома  $A$  (с нижним уровнем  $|a\rangle$  и верхним уровнем  $|b\rangle$ ) с атомом  $B$  буферного газа в присутствии нерезонансного перехода в атоме  $A$  электромагнитного излучения, в ходе которого происходит излучение (или поглощение) фотона с энергией  $\hbar\omega_L$ , сопровождающееся переходом в атоме  $A$ .



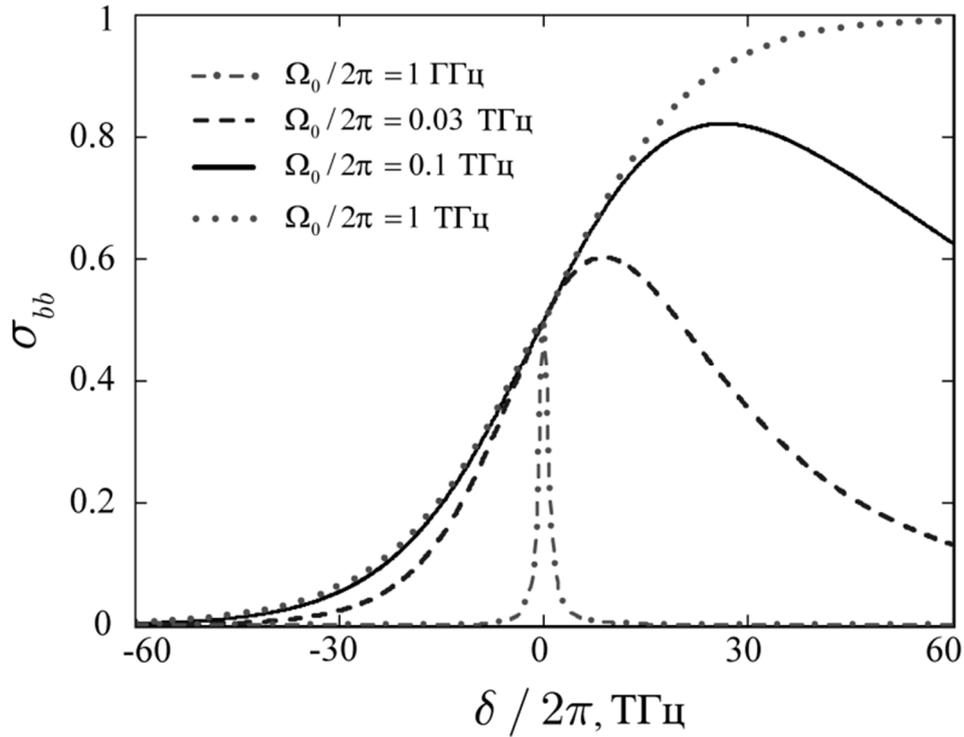
**Рис 1.** Схема процесса столкновительно индуцированного поглощения фотона с частотой  $\omega_L$  двухуровневым атомом для случаев (а) отрицательного значения атомно-оптической отстройки  $\delta = \omega_L - \omega_{at} < 0$  и (б) положительного  $\delta > 0$ ;  $\omega_{at}$  – частота атомного перехода, волнистая стрелка соответствует спонтанной флуоресценции, характеризуемой полушириной естественного уширения  $\Gamma$ .

Особое внимание уделено процессам ОС, протекающим вдали от области резонансного атомно-оптического взаимодействия, когда величина расщепления Раби порядка тепловой энергии атомов. Дан обзор различным методам и подходам к описанию феномена ОС, а также описано влияние этих процессов на форму столкновительно уширенной линии атомов как в слабом электромагнитном поле, так и в случае, когда поле приводит к перемешиванию состояний атома и поля, т.е. к формированию связанных состояний. Отличительной особенностью рассматриваемых в диссертации задач является акцент на термодинамических характеристиках атомно-оптических систем, которым ранее уделялось сравнительно немного внимания.

В работе показано, что ОС способны вызывать переходы между связанными (одетыми) состояниями атомов и поля, в связи с чем обоснована возможность достижения ими термодинамического равновесия за счет ОС.

Термализация является необходимым условием получения фазовых переходов для связанных состояний в атомных системах, интерес к которым значительным образом возрос в последние два десятилетия в связи с успешными экспериментальными и теоретическими исследованиями конденсации Бозе–Эйнштейна для поляритонов, формирующихся в полупроводниковых структурах. В качестве альтернативы для подобных систем рассматриваются атомные поляритоны, обладающие рядом преимуществ, связанных, в том числе, с большим временем жизни возмущений в среде, которые могут быть термализованы за счет ОС.

*Вторая глава* посвящена исследованию возможности достижения связанной атомно-оптической системой состояния термодинамического равновесия за счет ОС на примере двухуровневых атомов (рубидия) и атомов буферного газа в присутствии нерезонансного атомному переходу лазерного поля. Изложена теория термализации одетых состояний и проведен сравнительный анализ с имеющимися экспериментальными результатами. В основу теоретического описания взаимодействия двухуровневых атомов с квантовым оптическим полем в присутствии столкновительных процессов положен формализм матрицы плотности, основанный на использовании уравнения Линдблада. При этом рассматривается область, находящаяся вдали от резонансного атомно-оптического взаимодействия, когда атомно-оптическая отстройка много больше резонансной частоты Раби. Решение уравнения Линдблада для матрицы плотности производится в базисе одетых состояний. Расчет проведен для компонент блоховского вектора псевдоспина. Учет термодинамических свойств осуществляется включением в систему дифференциальных уравнений членов, описывающих термодинамически равновесную разность населенностей одетых состояний, характеризующуюся бальцмановским распределением населенностей по уровням энергии.



**Рис. 2.** Зависимость населенности верхнего атомного уровня  $\sigma_{bb}$  от атомно-оптической отстройки  $\delta/2\pi$  при различных значениях резонансной частоты Раби  $\Omega_0/2\pi$  в атмосфере буферного газа аргона при давлении 500 бар.

Выявлено, что в рассматриваемом процессе термализации ключевую роль играют процессы ОС, связывающие систему одетых состояний с тепловым резервуаром буферного газа, а также процессы спонтанной эмиссии, разрушающие одетые состояния. При этом термодинамическое равновесие достигается, если скорость термализующих систему процессов ОС много больше скорости спонтанной эмиссии, описываемой полушириной линии естественного уширения  $\Gamma$ . Скорость термализации находится из уравнений для компонент вектора Блоха, откуда следует условие термализации

$$\frac{\Gamma}{\gamma} = \frac{\Omega_0^2}{\delta^2} = 1, \text{ где } \gamma - \text{полуширина линии столкновительного уширения, } \Omega_0 - \text{резонансная частота Раби, } \delta - \text{атомно-оптическая отстройка.}$$

Получено выражение для времени термализации  $T_{\text{therm}}$ , которое для имеющихся экспериментальных условий [3] составляет 3.37 нс для атомов рубидия в атмосфере аргона при давлении 500 бар и мощности лазерного излучения 300 мВт, что существенно меньше собственного времени жизни атомного возбуждения  $\tau_{\text{spont}} = 27$  нс.

Теоретически предсказано, что полностью термодинамически равновесное состояние возможно лишь в пределе бесконечно больших значений частоты Раби, пропорциональной мощности лазерного излучения. В то же время при экспериментально достижимом значении резонансной частоты Раби 0.1 ТГц, соответствующей 300 мВт мощности непрерывного лазерного излучения (сплошная кривая на рис. 2), в системе наблюдается квазиравновесное состояние, которое нарушается при больших положительных атомно-оптических отстройках вследствие процессов спонтанной эмиссии.

Для сравнения теоретических расчетов с результатами эксперимента анализируется поведение нормированной суммарной интенсивности компонент триплета флуоресценции (триплета Моллоу)  $I$  в процессе термализации. В термодинамически равновесном состоянии зависимость  $I$  от атомно-оптической отстройки  $\delta$  может быть аппроксимирована формулой

$$I \cong \frac{\Gamma}{1 + e^{-\hbar\delta/k_B T}}.$$

Сравнительный анализ результатов теории термализации и экспериментальных данных по ее наблюдению в горячих парах рубидия в присутствии ОС с частицами буферного газа высокого давления продемонстрировал хорошее качественное соответствие. Условия эксперимента при этом полностью соответствовали тем, которые являются необходимыми для наблюдения термализации атомно-оптических состояний. Количественные несовпадения предсказаний теории и экспериментальных данных обусловлены рядом приближений, выполненных в ходе расчета, а именно: приближение двухуровневой модели энергетической структуры атомов рубидия, невыполнение ударного предела при больших атомно-оптических отстройках, а также наличие многочастичных столкновений в сверхплотных атомных газах в реальных экспериментальных условиях.

В *третьей главе* на основе полученного условия термодинамического равновесия связанных (одетых) состояний развивается теория равновесных фазовых переходов. Для термодинамического описания атомно-оптической системы вводится нормированная на количество атомов плотность поляритонов  $\rho$  как сумма доли возбужденных атомов и числа фото-

нов, рождаемых в результате излучения этих атомов. Поляритонная модель атомно-оптического взаимодействия справедлива в пределе малой плотности числа поляритонов, когда  $\rho < 1$ . Это условие выполняется при термодинамическом равновесии, когда атомы находятся преимущественно в нижнем энергетическом состоянии  $|a\rangle$ . Найденная зависимость параметра порядка – нормированной амплитуды поля от нормированной на тепловую энергию атомно-полевой отстройки – описывает появление отличного от нуля когерентного фотонного поля, начиная с некоторого порогового значения отрицательной отстройки на характерной частоте, соответствующей поляритонам нижней дисперсионной ветви.

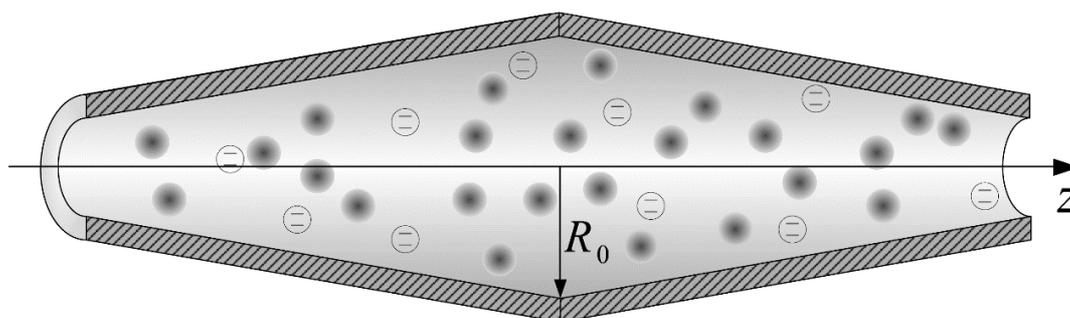
Взаимодействие одномодового оптического поля с ансамблем идентичных атомов рассматривается в рамках гамильтониана Дике при условии сохранения общего числа фотонов, что позволяет использовать большой канонический ансамбль с отличным от нуля химическим потенциалом для описания термодинамических свойств связанной системы. На основе расчета статистической суммы получены самосогласованные уравнения на параметр порядка  $\lambda$  (нормированное среднее число фотонов) и равновесную плотность атомно-оптических возбуждений. Их нетривиальное решение ( $\lambda \neq 0$ ) позволило определить как химический потенциал, соответствующий энергии связанных состояний термализованной атомно-оптической системы, так и критическое значение нормированной атомно-оптической отстройки, при котором происходит переход фотонного поля в когерентное (сверхизлучательное) состояние [4].

Для наблюдения фазовых переходов в системе термализованных поляритонных состояний предложено использовать волноводные и резонаторные структуры с цилиндрической симметрией, позволяющие увеличить время жизни фотона в среде. Кроме того, на основе квантования волнового вектора в плоскости, перпендикулярной оси волновода, оказывается возможным определить его эффективную массу через минимальную энергию фотона, связанную с частотой отсечки волновода. Для описания связанных атомно-оптических состояний в резонаторе используется поляритонный базис для операторов рождения (уничтожения) квазичастиц в среде. Пола-

гаем также выполненным условие сильной связи, когда коллективный параметр связи атомов и поля много больше характерных скоростей столкновительных процессов, процессов спонтанного распада в двухуровневой среде, а также скорости утечки фотонов через стенки резонатора.

Для получения БЭК поляритонов предложен биконический волновод, радиус которого при соблюдении режима взаимодействия с одной поперечной модой выбирается порядка половины длины волны излучения. В результате пространственные степени свободы в поперечном сечении волновода оказываются подавленными, и поляритонный газ внутри является эффективно одномерным.

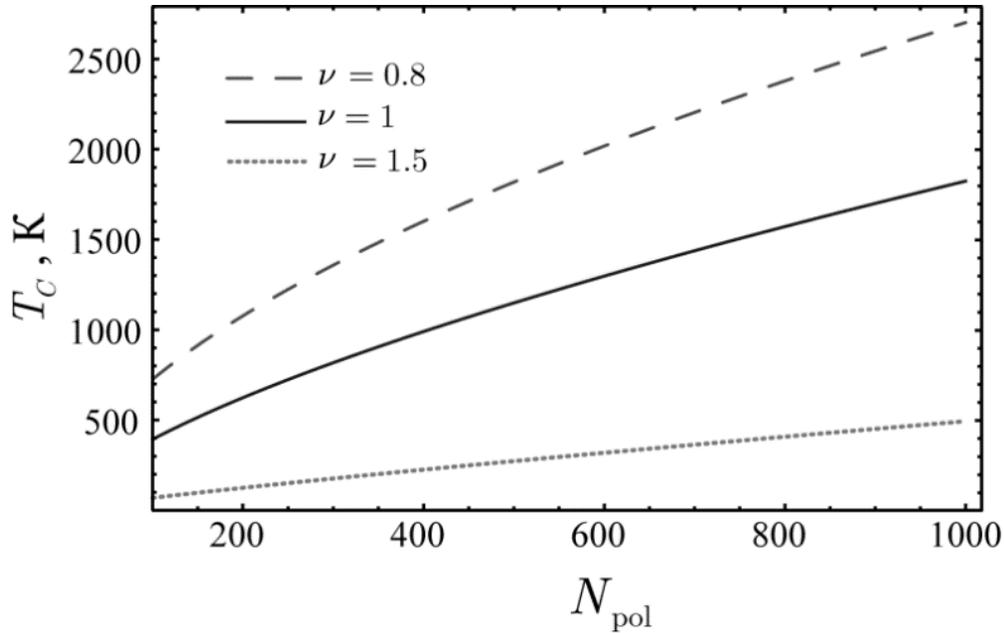
На основе решения скалярного уравнения Гельмгольца для векторного потенциала электромагнитного поля внутри металлического биконического волновода найдено дисперсионное соотношение для фотона, локализованного внутри волновода. При этом специфическая зависимость радиуса волновода от продольной координаты позволяет выделить в гамильтониане системы эффективный потенциал удержания (trapping) для поляритона [5,6]. В диссертации исследовалась зависимость критической температуры фазового переход к БЭК поляритонов нижней дисперсионной ветви как функции от формы такого потенциала.



**Рис. 3.** Биконический резонатор для пленения и удержания (trapping) фотонов. Радиус волновода описывается зависимостью  $R(z) = R_0/(1-\alpha^{\nu}|z|^{\nu})$ , где  $\alpha$  – параметр кривизны,  $\nu$  определяет степень потенциала удержания. При  $\nu = 1$  в пределе малых значений  $\alpha$  изменение радиуса волновода вдоль его длины можно полагать линейным.

Показано, что в силу плавности изменения радиуса биконического резонатора вдоль продольной координаты (малости параметра  $\alpha$  (рис. 3))

массу поляритонов внутри резонатора можно считать постоянной величиной. По этой же причине расстояние между продольными поляритонными модами много меньше тепловой энергии. Тогда в квазиклассическом приближении оказывается возможным аналитически рассчитать критическую температуру конденсации поляритонов. Согласно изображенной на рис. 4 зависимости, эта температура может принимать большие значения в виду фотоноподобного характера поляритонов нижней дисперсионной ветви с эффективной массой  $2,8 \cdot 10^{-36}$  кг. Это позволяет рассчитывать на наблюдение высокотемпературной конденсации поляритонов в реальных экспериментальных условиях.



**Рис. 4.** Зависимость критической температуры  $T_c$  от числа поляритонов  $N_{\text{pol}}$  при разных значениях степени потенциала удержания поляритонов в ловушке.

Подход, применяемый для описания перехода к БЭК, справедлив при выполнении следующих условий:

$$\Delta E_n \ll k_B T \ll \hbar \Omega_{R0}. \quad (1)$$

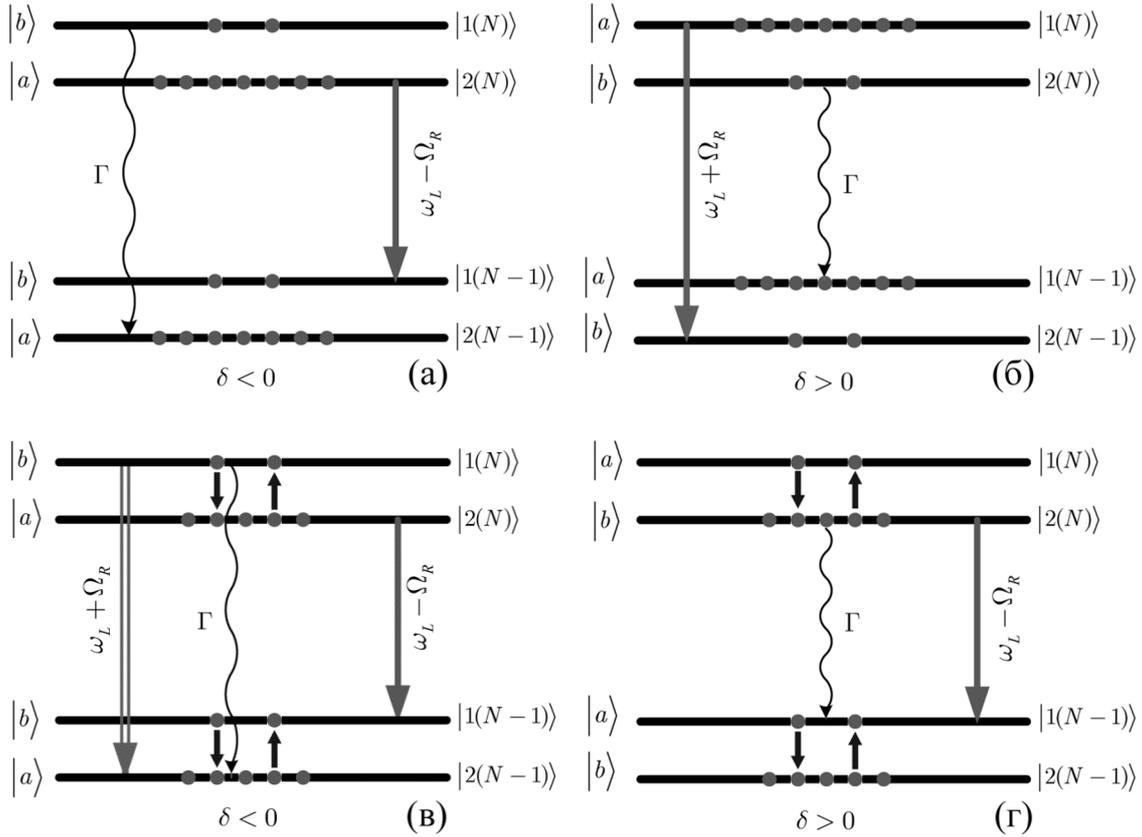
Первое неравенство в (1) представляет собой условие применимости квазиклассического приближения, когда энергетический зазор между квантованными состояниями фотона в ловушке биконического волновода  $\Delta E_n$  существенно меньше тепловой энергии. В этом случае фотонные (и поляритонные) моды могут быть рассмотрены как континуум уровней, засе-

ленных в соответствии с распределением Бозе–Эйнштейна. Второе неравенство в (1) подразумевает, что тепловой энергии недостаточно для того, чтобы заселить верхнюю поляритонную ветвь, отделенную от нижней энергетическим зазором  $\hbar\Omega_{R0}$ . В этом случае мы можем пренебречь влиянием поляритонов верхней дисперсионной ветви.

При анализе поведения поляритонного БЭК внутри резонатора простейшей (линейной) формы, когда  $\nu = 1$ , установлено, что конденсат, будучи выведенным из состояния равновесия, испытывает осцилляции с частотой, имеющей значения порядка терагерца.

*Четвертая глава* обобщает результаты, полученные в главах 2 и 3, на случай неравновесных процессов, происходящих в лазерном резонаторе с конечной добротностью. А именно — исследуются неравновесные фазовые переходы, а также лазерная генерация, в системе одетых атомно-оптических состояний с учетом потерь излучения в резонаторе.

В диссертации развита теория взаимодействия одетого атома с резонаторной модой с учетом процессов ОС, спонтанных переходов и резонаторных потерь, которая описывает все возможные переходы между уровнями энергии одетых состояний (рассматриваются только переходы между соседними парами одетых состояний, различающихся на один фотон). Структура уровней одетых состояний (рис. 5) представляет собой ограниченный лишь флуктуациями числа фотонов набор пар состояний  $|1(N)\rangle$  и  $|2(N)\rangle$ , различающихся по числу фотонов электромагнитного поля  $N$ . Переходы между уровнями энергии образуют так называемый триплет Моллоу, состоящий из центральной компоненты на частоте внешнего монохроматического поля  $\omega_L$  и двух боковых компонент, смещенных на величину частоты расщепления Раби  $\Omega_R$ . Реализация конкретного фазового перехода управляется частотой резонатора, изменение которой позволяет выделить из гамильтониана взаимодействия процессы, описывающие переходы между различными состояниями, и свести схему уровней энергии к эффективной двухуровневой.



**Рис. 5.** Уровни одетых атомных состояний  $|1(N)\rangle$ ,  $|2(N)\rangle$  и переходы между ними в отсутствии термализации (а), (б), в присутствии термализации (в), (г), в нерезонансной области, когда  $|\delta| > \Omega_0$ , при разных знаках атомно-оптической отстройки  $\delta$ : (а), (в) отстройка отрицательна, (б), (г) отстройка положительна. Одинарными вертикальными стрелками показан переход, участвующий в лазерной генерации. Волнистая стрелка соответствует доминирующей компоненте атомной флуоресценции. Двойная стрелка соответствует равновесному фазовому переходу в сверхизлучательное состояние.

В качестве процессов, отвечающих за перераспределение населенностей между уровнями одетых состояний, рассмотрены спонтанная эмиссия фотонов из возбужденного атомного состояния и ОС. Когда давление буферного газа невелико и скорость ОС низка, доминирует первый процесс. При больших значениях атомно-оптической отстройки (когда  $|\delta| > \Omega_0$ ), согласно определению, одетые состояния практически совпадают с атомными. Под действием спонтанной эмиссии основное атомное состояние всегда заселено больше верхнего (см. рис. 5а,б). Тогда можно выделить пару одетых уровней, между которыми устанавливается инверсия населенностей. Следовательно, на частоте перехода между этими состояниями можно наблюдать лазерную генерацию. При этом вне зависимости от знака

атомно-оптической отстройки переход, отвечающий за лазерную генерацию, в базисе атомных состояний соответствует процессу рамановского типа излучения кванта энергии при переходе снизу вверх (сплошные одинарные стрелки на рис. 5а,б). Эффективность такого процесса достаточно низка, что проявляется в уменьшении эффективного коллективного параметра связи одетого атома и резонаторной моды с ростом атомно-оптической отстройки пропорционально  $\Omega_0^2/4\delta^2$ , что приводит к увеличению порога генерации.

Рассмотрение распределения населенностей одетых состояний в присутствии термализующих процессов ОС показывает, что в верхний одетый уровень всегда будет заселен меньше нижнего (см. рис. 5в,г). При этом, если параметры системы удовлетворяют условию термализации, при отрицательной отстройке на переходе между этими уровнями можно наблюдать фазовый переход к когерентному состоянию поля резонатора, аналогичный переходу в сверхизлучательное состояние фотонного поля, описанному в главе 3 (двойная стрелка на рис. 5в). При этом нормированное на количество атомов число фотонов в резонаторной моде играет роль параметра порядка. Этот переход может быть также интерпретирован как переход к конденсации для одетых поляритонов нижней ветви – квазичастиц, представляющих собой суперпозицию возбуждения одетого атома и фотона резонаторной моды.

Показано, что в системе, где доминируют ОС, также может наблюдаться лазерная генерация на переходе, соответствующем красной компоненте триплета Моллоу, т.е. между одетыми уровнями  $|2(N)\rangle$  и  $|1(N-1)\rangle$  (одинарная стрелка на рис. 5в). В этом случае ОС играют роль накачки верхнего одетого уровня. При положительных отстройках эффективный параметр связи максимален, поскольку данный переход соответствует переходу с возбужденного атомного уровня на нижний, т.е. лазерной генерации в присутствии инверсии атомных уровней. Явление усиления на данном переходе в присутствии ОС уже было экспериментально и теоретически исследовано для ансамбля атомов натрия в атмосфере инертного газа умеренного давления (до 4 атм) [7].

На основе решения системы уравнений Максвелла-Блоха для поляризации и разности населенностей одетых состояний и амплитуды резонаторной моды, учитывающих также столкновительные процессы, спонтанную флуоресценцию и утечку фотонов из резонатора, рассчитана

пороговая разность населенностей, частота генерации, а также определено поведение параметра порядка.

Так, при положительных отстройках  $\delta$  для перехода  $|2(N)\rangle \rightarrow |1(N-1)\rangle$ , соответствующего лазерной генерации в присутствии инверсии населенностей в атомной системе, квадрат параметра порядка тем выше, чем выше скорость ОС при выполнении пороговых условий генерации  $S_z^{(st)} < S_z^{(thr)}$ , где  $S_z^{(st)}$  определяет стационарную разность населенностей в отсутствие резонаторного поля,  $S_z^{(thr)}$  – зависящая от добротности резонатора и величины столкновительного уширения пороговая разность населенностей одетых состояний для случая, когда частота резонатора близка к частоте перехода  $|2(N)\rangle \rightarrow |1(N-1)\rangle$ .

В **Заключении** сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы.

1. Решена задача о термализации связанных атомно-оптических (одетых) состояний при взаимодействии двухуровневых атомов щелочных металлов с околарезонансным лазерным излучением в присутствии буферного газа высокого давления. Установлено, что связанные (одетые) атомно-оптические состояния достигают термодинамического равновесия за счет частых ОС с горячими частицами буферного газа.

2. Найдено условие достижения связанной атомно-оптической системой термодинамического равновесия, зависящее существенным образом от атомно-оптической отстройки. Определено выражение для времени термализации одетых состояний. Рассчитанное по экспериментальным данным значение почти на порядок меньше времени жизни возбужденного состояния, соответствующего D-линии атома рубидия.

3. Предсказан фазовый переход в сверхизлучательное состояние для фотонов, образующихся при взаимодействии двухуровневых атомов рубидия с оптическим полем при достижении термодинамического равновесия для связанных атомно-оптических состояний за счет ОС. Показано, что при больших отрицательных значениях атомно-оптической отстройки  $\delta$  и соблюдении условия термализации поляритоны нижней дисперсионной ветви претерпевают высокотемпературный фазовый переход второго рода в некоторое когерентное состояние с ненулевым значением параметра порядка – нормированной на число атомов амплитуды поля, которое с учетом взаимодействия поляритонов может быть рассмотрено как сверхтекучее.

4. Предложен специальный биконический резонатор цилиндрической симметрии с изменяющимся вдоль продольной координаты радиусом, предназначенный для увеличения времени жизни фотонов, а также пленения поляритонов и создания эффективного удерживающего потенциала для наблюдения бозе-конденсации поляритонов нижней ветви. На основе расчета структуры электромагнитного поля внутри резонатора определены его оптимальные параметры — геометрическая форма и физические размеры, необходимые для достижения БЭК.

5. Предсказан высокотемпературный фазовый переход к БЭК одномерного газа атомных фотоноподобных поляритонов нижней дисперсионной ветви при больших (вплоть до десятка ТГц) отрицательных атомно-оптических отстройках от резонанса. Установлена зависимость критической температуры от потенциала удержания (и, следовательно, формы волновода) и числа поляритонов. Продемонстрировано, что критическая температура при определенных реально достижимых параметрах системы может быть существенно выше комнатной, что позволит наблюдать в эксперименте конденсацию поляритонов в рассматриваемом волноводе.

6. Выяснено, что в системе одетых атомно-оптических состояний осуществляется переход к формированию лазерного (когерентного) излучения при любом знаке атомно-оптической отстройки. Теоретически определены основные характеристики этого процесса: порог генерации и амплитуда поля резонаторной моды. Спецификой такой генерации в резонаторе является возможность достижения инверсии населенностей атомных уровней одновременно с процессами термализации.

### **Список публикаций в журналах, включенных в перечень ВАК**

1. *Chestnov I. Yu., Alodjants A.P., Arakelian S.M.* Lasing and high temperature phase transitions in atomic systems with dressed state polaritons // *Physical Review A*. — 2013. — Vol. 88. — P. 063834.
2. *Chestnov I. Yu., Alodjants A.P., Arakelian S.M.* High temperature BEC with photon-like atomic polaritons // *The European Physical Journal Special Topics*. — 2013. — Vol. 217. — P. 177–181.
3. *Честнов И. Ю., Алоджанц А.П., Аракелян С.М.* Высокотемпературная БЭК фотоноподобных атомных поляритонов // *Оптика и спектроскопия*. — 2013. — Т. 115, № 3. — С. 415–420.

4. *Chestnov I. Yu., Alodjants A.P., Arakelian S.M., Klaers J., Vewinger F., Weitz M.* Bose-Einstein condensation for trapped atomic polaritons in a biconical waveguide cavity // *Phys. Rev. A.* — 2012. — Vol. 85. — P. 053648.
5. **Честнов И. Ю.,** *Алоджанц А.П., Аракелян С.М.* «Сверхизлучательный» фазовый переход в условиях оптических столкновений // *Наносистемы: физика, химия, математика.* — 2012. — Т. 3, № 2. — С. 73–84.
6. **Честнов И. Ю.,** *Алоджанц А.П., Аракелян С.М.* Фазовый переход для связанных атомно-оптических состояний в присутствии оптических столкновений // *Известия РАН. Серия физическая.* — 2012. — Т. 76. — С. 1251–1255.
7. *Alodjants A. P., Chestnov I. Yu., Arakelian S.M.* High-temperature phase transition in the coupled atom-light system in the presence of optical collisions // *Phys. Rev. A.* — 2011. — Vol. 83. — P. 053802.
8. *Chestnov I. Yu., Alodjants A.P., Arakelian S.M., Nipper J., Vogl U., Vewinger F., Weitz M.* Thermalization of coupled atom-light states in the presence of optical collisions // *Phys. Rev. A.* — 2010. — Vol. 81. — P. 053843.

### Список цитированной литературы

- [1] *Kasprzak J., Richard M., Kundermann S., Baas A., Jeambrun P., Keeling J. M. J., Marchetti F. M., Szymanska M. H., André R., Staehli J. L., Savona V., Littlewood P. B., Deveaud B., Dang L. S.* Bose-Einstein condensation of exciton polaritons // *Nature.* — 2006. — Vol. 443, № 7110. — P. 409–414.
- [2] *Яковленко С.И.* Поглощение мощного резонансного излучения при столкновительном уширении линии // *УФН.* — 1982. — Т. 136, № 4. — С. 593–620.
- [3] *Chestnov I. Yu., Alodjants A.P., Arakelian S.M., Nipper J., Vogl U., Vewinger F., Weitz M.* Thermalization of coupled atom-light states in the presence of optical collisions // *Phys. Rev. A.* — 2010. — Vol. 81. — P. 053843.
- [4] *Андреев А. В., Емельянов В. И., Ильинский Ю. А.* Кооперативные явления в оптике: Сверхизлучение. Бистабильность. Фазовые переходы. — М.: Наука, 1988. — 228 с.
- [5] *Klaers J., Schmitt J., Vewinger F., Weitz M.* Bose-Einstein condensation of photons in an optical microcavity // *Nature.* — 2010. — Vol. 468. — P. 545–548.
- [6] *Berman O. L., Lozovik Y. E., Snoke D. W.* Theory of Bose-Einstein condensation and superfluidity of two-dimensional polaritons in an in-plane harmonic potential // *Phys. Rev. B.* — 2008. — Vol. 77, № 15. — P. 155317.
- [7]. *Марков Р. В., Пархоменко А. И., Плеханов А. И., Шалагин А. М.* Генерация на резонансном переходе атомов натрия при нерезонансном оптическом возбуждении // *Журнал экспериментальной и теоретической физики.* — 2009. — Т. 136, № 2(8). — С. 211–223.

Подписано в печать 13.03.14.  
Формат 60×84/16. Усл. печ. л. 1,39. Тираж 80 экз.

Заказ

Издательство

Владимирского государственного университета  
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых.  
600000, Владимир, ул. Горького, 87.



