

На правах рукописи



003469138

Басиева Ирина Тасолтановна

ДИНАМИКА КОГЕРЕНТНЫХ И КООПЕРАТИВНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ  
В КЛАСТЕРАХ И КРИСТАЛЛАХ

01.04.21 – лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

14 МАЯ 2009

Москва-2009

Работа выполнена в Институте общей физики им. А. М. Прохорова РАН

**Научный руководитель:**

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник

**Пухов Константин Константинович**

**Официальные оппоненты:**

доктор физико-математических наук, профессор **Смирнов Валерий Алексеевич**

Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН

кандидат физико-математических наук

**Сакун Вадим Павлович**, Институт химической физики им. Н. Н. Семенова РАН

**Ведущая организация:** Научный центр волоконной оптики РАН

Защита диссертации состоится 25 мая 2009 года в 15 часов на заседании диссертационного совета Д002.063.02 при Институте общей физики им. А. М. Прохорова РАН по адресу: 119991, ГСП-1, Москва, ул. Вавилова, 38 корпус 3, конференц-зал

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института общей физики им. А. М. Прохорова РАН.

Автореферат разослан «\_\_» апреля 2009 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Макаров В. П.  
Тел. (499) 503-83-9

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Диссертация посвящена исследованию динамики когерентных и кооперативных взаимодействий в нанокластерах и активированных кристаллах методами аналитических вычислений и компьютерного моделирования.

В первой части работы изучается динамика энергетических состояний кластеров когерентно взаимодействующих частиц под воздействием лазерного излучения. В последние годы актуальными являются исследования когерентных квантовых оптических явлений на субволновом и атомарном уровне, которые позволяют по-новому взглянуть на проблемы обработки и передачи информации, создать новые квантовые вычислительные устройства и мощные алгоритмы квантовой параллельной обработки информации [1-5]. Необходимым условием для функционирования квантовых алгоритмов является возможность создания перепутанных состояний. Кристаллы фторидов с нанокластерами редкоземельных ионов зарекомендовали себя высокоэффективными лазерными средами. В то же время такие свойства нанокластеров как сильное когерентное взаимодействие ион-ион внутри нанокластера, приводящее к квантовому перепутыванию состояний и медленная декогерентизация указывают на их высокий потенциал в качестве логических элементов для квантовых компьютеров. При этом полученные в диссертации результаты могут быть распространены и на другие виды кластеров (кластеры квантовых точек, молекул красителя и т.п.). Универсальность результатов делает их актуальными и в смежных областях, занимающихся управлением квантовыми элементами.

Во второй главе диссертации исследуются кооперативные многочастичные взаимодействия РЗ ионов, составляющих наноансамбли и нанокластеры в высококонцентрированных лазерных кристаллах. Такие кооперативные взаимодействия обладают рекордной крутизной потенциала взаимодействия  $W = W_0(R/R_0)^S$ , где  $S=6, 8, 10, 12$ , - мультипольность взаимодействия, а  $n=2, 3, 4...$  - число ионов в ансамбле. При умеренных концентрациях активатора они проявляются слабо, однако в нанокластерах и высококонцентрированных кристаллах, где взаимодействие происходит между ближайшими соседями на расстояниях 3-4 Å, кооперативные взаимодействия могут доминировать, приводя к эффективной down-конверсии. Хотя теоретически этот процесс был предсказан Декстером [10] еще в 1957 г., кооперативная down-конверсия была

обнаружена Басиевым, Дорошенко, Осико и Прохоровым в 2000 году [11-13] в экспериментах по кооперативному тушению сначала ионов Nd, а затем и других ионов в лазерных кристаллах  $\text{CeF}_3$ . Нашей задачей было установить, какие кинетические и концентрационные закономерности присущи кооперативным взаимодействиям. С этой целью мы провели аналитические расчеты и компьютерное моделирование кооперативных процессов тушения и размножения оптических возбуждений, что является важным для конструирования новых лазерных сред ИК диапазона. Вследствие потенциала высокой крутизны, кооперативные доноры и кооперативные акцепторы могут также выполнять роль перезонансных зондов для возбуждения и регистрации (записи и считывания оптической информации) в квантовых логических устройствах.

Высококонцентрированные кристаллы в последние годы находят все более широкое применение в лазерной физике [8-10]. Увеличение концентрации активных  $\text{TR}^{3+}$  ионов в кристаллах позволило перейти от макро- к мини- и микролазерным системам, расширив их области применения. При возбуждении таких кристаллических систем проявляются многочастичные эффекты нерезонансного кооперативного тушения люминесценции, сенсбилизации и размножения возбуждений, которые обнаружены недавно и мало изучены. Аналитическое исследование и численное моделирование этих новых эффектов своевременно и актуально. Кроме того, полученные аналитические выражения для кинетики кооперативного переноса энергии имеют важное научное значение.

### Цель работы

Целью данной работы являлось изучение сильного когерентного и кооперативного взаимодействий редкоземельных ионов путем теоретического анализа и компьютерного моделирования. Исследование динамики энергетических состояний нанокластеров (димеров, тримеров и тетрамеров) когерентно взаимодействующих ионов в кристаллах имело целью демонстрацию их пригодности в качестве квантово-логических элементов. А изучение кинетики кооперативных эффектов в кристаллах привело к выявлению временных и концентрационных закономерностей переноса энергии и тушения люминесценции для различных мультипольностей многочастичного кооперативного взаимодействия и размерностей пространственной решетки (объемный каркас, плоская сеть, одномерная цепочка).

## Научная новизна

1. Показана принципиальная возможность использования нанокластеров когерентно взаимодействующих редкоземельных ионов в кристаллах в качестве квантово-логических элементов с перепутанными состояниями.

Получены точные аналитические решения уравнений для матрицы плотности, описывающих эволюцию состояний кластеров двух и трех флюоресцирующих частиц под влиянием монохроматического лазерного излучения.

При помощи численного эксперимента продемонстрирована эффективность применения бигармонической накачки для создания многоэкситонных и перепутанных состояний в кластерах.

Получено аналитическое решение временного уравнения Шредингера для случая бигармонической лазерной накачки слабой интенсивности, позволяющее рассчитывать соотношение интенсивностей для создания максимально перепутанных и многоэкситонных состояний.

2. На примере сильноразбавленных кристаллов (концентрация акцепторов  $c \ll 1$ ), методами компьютерного моделирования впервые рассчитаны кинетики кооперативного переноса энергии в ансамбле неупорядоченных частиц.

Для произвольной мультипольности  $S$  ( $S=6; 8; 10$ ), концентрации акцепторных частиц  $c$  и размерности пространственной решетки  $d$  ( $d=3; 2; 1$ ) установлен закон безызлучательного распада донорного возбуждения для кооперативного переноса энергии на двухчастичные акцепторы на дальней временной асимптотике, а именно  $N_D^*(t)/N_D^*(0) = \exp[-(Wt)^{d/(2S-d)}]$ , где  $N_D^*$  – число возбужденных доноров.

Показана резкая концентрационная зависимость средней скорости кооперативного переноса энергии на этой стадии  $W \sim c^{2S/d} W_0$  со степенью, доходящей до 20.

3. С использованием решеточных сумм для кристаллов  $\text{LaF}_3$  и  $\text{Yb}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ , из экспериментальных данных вычислены скорости элементарного акта кооперативного переноса энергии с одного донорного иона на двух и трехчастичные акцепторы энергии. Найденные величины ( $W_0(\text{Nd} \rightarrow 2\text{Ce})=24 \text{ c}^{-1}$ ,  $W_0(\text{Ho} \rightarrow 2\text{Ce})=127 \text{ c}^{-1}$ ,  $W_0(\text{Er} \rightarrow 3\text{Ce})=0,6 \text{ c}^{-1}$ ,  $W_0(\text{Tb} \rightarrow 2\text{Yb})=1,4 \text{ c}^{-1}$ ,  $W_0(\text{Tm} \rightarrow 2\text{Ce})=320 \text{ c}^{-1}$ ) сопоставлены с неприводимыми матричными элементами единичного тензорного оператора для соответствующих электронных переходов в донорных и акцепторных РЗ ионах, и выявлена корреляция их значений.

## Основные положения, выносимые на защиту

1. Эволюция состояний системы когерентно взаимодействующих редкоземельных ионов (либо иных одинаковых и находящихся на равном расстоянии двухуровневых оптических центров) под воздействием лазерного излучения. Компьютерное моделирование и теоретический анализ соответствующего уравнения для матрицы плотности показывают, что правильный выбор частот и интенсивностей лазерного излучения обеспечивает создание полностью перепутанных и многоэкситонных базисных состояний, а также реализацию квантово-логических операторов. При этом применение бигармонической накачки требует гораздо (на один-два порядка) меньших интенсивностей, чем применение нерезонансной одночастотной накачки. Аналитические выражения, позволяющие рассчитывать соотношения интенсивностей двух полей, необходимые для создания того или иного квантового состояния при взаимодействии ионов с излучением, меньше относительно межйонного взаимодействия.

2. Компактное аналитическое выражение для кинетики тушения люминесценции и переноса энергии с доноров на парные кооперативные акцепторы в статическом режиме  $N_D^*(t)/N_D^*(0) = \exp\left[-Wt \frac{d}{2S-d}\right]$ , совпадающее с предсказанным на основе анализа результатов компьютерного моделирования, в котором показатель времени в экспоненте имеет новую зависимость от мультипольности взаимодействия  $S$  и размерности пространства  $d$ , а зависимость средней скорости кооперативного переноса энергии  $W$  от концентрации акцепторных частиц  $W \sim c^{2S/d} W_0$  имеет степень, в два раза большую по сравнению с классическим Ферстеровским случаем.

## Достоверность результатов

Достоверность теоретических выкладок на протяжении всей работы подтверждается компьютерным моделированием в системе MATLAB и сопоставлением с теоретическими и экспериментальными результатами других авторов. Результаты численных экспериментов дополнительно проверялись и сопоставлялись с результатами моделирования на других программах («Математика» и Фортран) и доказали свою воспроизводимость.

## Научная и практическая ценность

1. Предложенное в работе создание логических элементов для квантовых вычислений на базе димеров, тетрамеров, гекса- и октомеров РЗ ионов в щелочноземельных кристаллах фторидов и хлоридов позволит реализовать условия эффективного перекутывания квантовых состояний с помощью многочастотного лазерного возбуждения нано-, микросекундной длительности при медленной декогерентизации. Выполненные расчеты, предложенные модели и схемы экспериментов будут востребованы для оптимизации условий наиболее простого и экономичного возбуждения чистых двух- – многоэкситонных квантовых состояний в наноразмерных и многомерных комплексах. Экспериментальная реализация квантовых регистров и квантовых вычислений на базе предложенных нанокластеров РЗ ионов является существенным продвижением в практическом создании квантовых вычислительных устройств.

2. Практическая ценность работы заключается также в разработке методов анализа кинетических процессов многочастичного кооперативного мультипольного переноса энергии с помощью компьютерного моделирования и полученных аналитических выражений. Они позволяют предложить новые высокоэффективные схемы многочастичной сенсibilизации и размножения оптических возбуждений с квантовым выходом 200 – 300 % для конверсии излучений ультрафиолетового и видимого диапазонов спектра в ближний ИК и средний ИК диапазоны. В результате могут быть созданы новые высокоэффективные люминофоры для солнечных элементов и новые лазерные кристаллы и керамики для среднего ИК диапазона длин волн. Полученные аналитические выражения  $N_D^*(t)$  и  $W(c)$  для тушения донорной люминесценции на двухчастичные кооперативные акцепторы имеют фундаментальное значение.

## Апробация работы

Результаты диссертационной работы докладывались на следующих конференциях:

International Conference on Dynamical Processes in Excited States of Solids (DPC'01), University Claude Bernard Lyon 1, France. P141 (2001);

5th International Conference on Excited States of Transition Elements (ESTE 2001), Wroclaw - Ladek Zdroj, Poland, 2001, P06;

International Conference on Dynamical Excited States of Solids, 2003 (DPC 2003), Christchurch, New Zealand;

International Conference on Coherent and Nonlinear Optics, International Conference on Lasers, Applications, and Technologies, 2005 (ICONO/LAT 2005), Санкт-Петербург, РФ;

Ninth International Conference on Hole Burning, Single Molecule and Related Spectroscopies: Science and Applications, 2006, Centre Paul Langevin, Aussois, France

International Conference on Physics of Optical Materials and Devices, 2006 (ICOM 2006), Herceg Novi, Montenegro;

International Conference on Dynamical Excited States of Solids, 2007 (DPC 2007), Segovia, Spain;

International Symposium "Quantum Informatics – 2007", Звенигород, РФ;

XIII Феофиловский симпозиум по спектроскопии кристаллов, активированных редкоземельными и переходными ионами, 2007, Иркутск, РФ.

Работа по тематике диссертации была поддержана (а результаты приняты) двухгодичным грантом INTAS для молодых ученых. Полученные во время работы по гранту результаты были доложены на семинарах в Ecole Polytechnique de Lausanne (Швейцария) и в НЦЛМТ ИОФ РАН.

Результаты по каждой из глав диссертации были доложены на семинарах НЦЛМТ ИОФ РАН.

Результаты диссертации изложены в 9 работах, из которых 5 опубликованы в журналах, определенных Высшей аттестационной комиссией.

### **Личный вклад автора**

Во всех совместных работах автором диссертации выполнены все численные эксперименты и их анализ. Значительная часть аналитических результатов получена автором самостоятельно. Другие же получены совместно с научным руководителем при непосредственном участии диссертанта. Большое значение для постановки задач и оценки прикладной значимости полученных результатов имели эксперименты, поставленные коллегами по лаборатории.

### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, двух глав (каждая из которых включает введение ко главе), заключения, списка авторской литературы и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертационной работы составляет 161 страницу печатного текста, включая 74 рисунка и основной список литературных ссылок из 98 наименований. В конце каждой главы представлены основные полученные в ней результаты.



## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе [A1-A5] исследуется динамика управления с помощью лазерного излучения квантовыми состояниями (в том числе перепутанными), в кластерах когерентно взаимодействующих частиц. Во введении к первой главе (первый параграф первой главы) дается краткий обзор основных свойств кластеров редкоземельных ионов, делающих их перспективными для изучения, позволяющий сформулировать цель исследования. Дается общее описание текущего состояния проблематики квантовых вычислений [1-5] и обоснование поставленной задачи.

Во втором параграфе первой главы сформулирован теоретический подход, используемый как для теоретического анализа проблемы, так и для поставленных численных экспериментов. Рассматривается совокупность связанных двухуровневых атомов во внешнем электромагнитном поле [5, 6]. Гамильтониан такой системы  $H$  может быть записан как сумма гамильтонианов, соответствующих невзаимодействующим атомам  $H_i$ , гамильтониана резонансного межатомного взаимодействия  $H_j$  и суммы гамильтонианов  $H_{ji}$ , описывающих взаимодействие атомов с внешним электромагнитным полем:

$$H = \sum_i H_i + \sum_{i < j} H_j + \sum_i H_{ji}. \quad (1)$$

При помощи спиновых операторов  $s_\alpha$  ( $\alpha = x, y, z$ ) гамильтониан  $i$ -го двухуровневого атома может быть записан как [5, 6]:

$$H_i = \hbar\omega_{0i}s_{zi}, \text{ где } \hbar\omega_{0i} - \text{энергия возбужденного состояния этого } i\text{-го атома.}$$

Гамильтониан  $H_{ji}$  можно записать как:  $H_{ji} = -2dE_0s_{xi} \cos(\omega t + \varphi)$ .

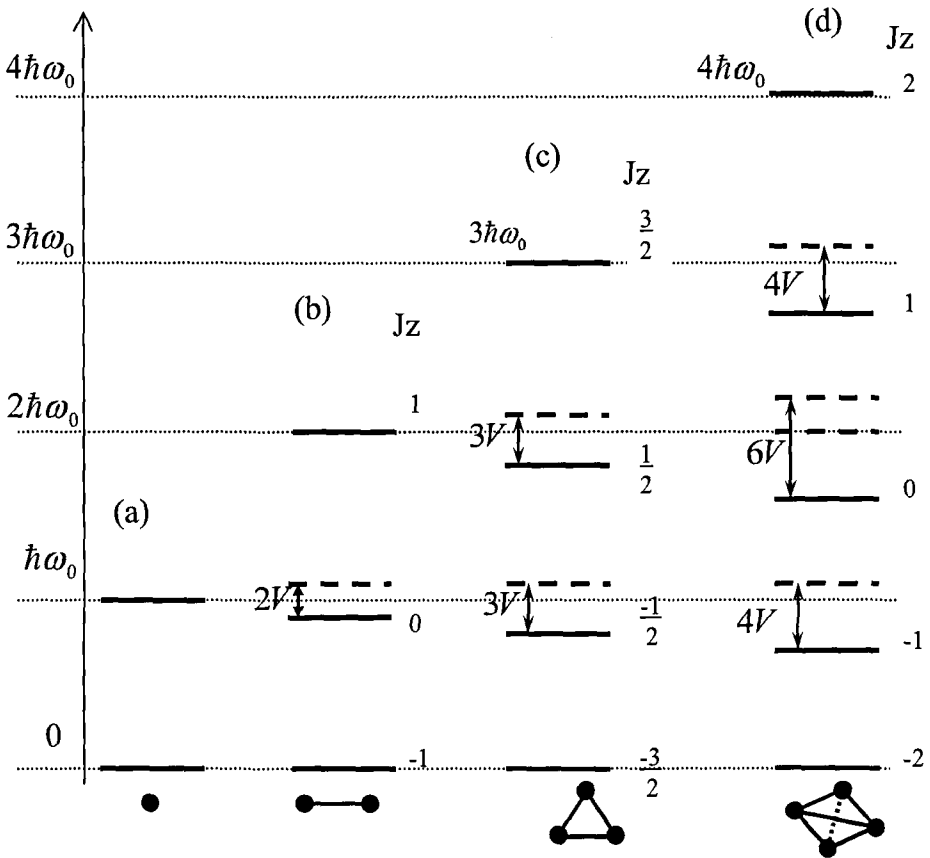
Здесь  $dE_0$  – частота Раби, где  $d$  – соответствующий дипольный момент перехода атома, напряженность  $E$  электрической составляющей внешнего электромагнитного поля взята в виде  $E = E_0 \cos(\omega t + \varphi)$ . Для описания эволюции энергетических состояний в кластерах одинаковых, расположенных на равном расстоянии, флюоресцирующих частиц гамильтониан системы может быть выражен через операторы квадрата полного спина системы атомов  $\hat{J}^2$  и проекции спина  $\hat{J}_z$  на ось  $z$ , и для линейно поляризованного лазерного излучения на частоте  $\omega$  и обладающего амплитудой  $E_0$ , может быть записан следующим образом [5]:

$$H = H_0 + H_{\text{int}}, \quad (2)$$

$$H_0 = \hbar\omega_0\hat{J}_z + \hbar V(\hat{J}_z^2 - \hat{J}^2), \quad (3)$$

$$H_{\text{int}} = -2dE_0\hat{J}_x \cos(\omega t + \varphi). \quad (4)$$

где  $V$  - величина когерентного взаимодействия соседних ионов в кластере. Выражением (3) задается общий вид гамильтониана для всех рассматриваемых кластеров. Структура уровней кластеров, состоящих из двух, трех и четырех таких ионов, приведена на рисунке 1.



**Рис. 1.** Энергетические уровни двухуровневого иона (а) и кластеров из двух (b), трех (c) и четырех (d) когерентно взаимодействующих ионов. Здесь  $\hbar\omega_0$  – частота перехода индивидуального атома,  $V$  – величина когерентного взаимодействия атомов в кластере. Справа дано значение  $J_z$ , далее используемое в качестве индексов элементов матрицы плотности  $\rho$ .

В качестве базиса выбирается набор собственных векторов  $|J, M\rangle$  оператора полного спина  $J$  и его проекции на ось  $z$   $J_z$ , являющихся также и стационарными состояниями гамильтониана  $H_0$ . Временная динамика состояний кластеров описывается уравнением для матрицы плотности, диагональные элементы которой соответствуют населенностям уровней кластера, а недиагональные – мере перепутанности этих состояний. Показано, как преобразуется гамильтониан  $H$  при переходе во вращающуюся систему координат, форма его составляющей, отвечающей за взаимодействие с электромагнитным полем для одночастотной и многочастотной накачек. Даны обозначения и структура первой главы.

В третьем параграфе первой главы исследуется динамика энергетических состояний кластеров из двух, трех, четырех и пяти атомов под действием одночастотной, в том числе и нерезонансной, накачки. Промоделированы и исследованы теоретически одно-, двух-, трех- и четырех-фотонные переходы между различными уровнями, показано, что в определенный момент времени могут быть получены как базисные многоэкситонные состояния, так и полностью перепутанные (Белловские состояния, состояния Гринбергера-Золингера-Хорна) [1-5]. Например, для тетрамера с помощью одночастотного лазерного излучения можно получить перепутанность основного, вакуумного состояния с самым верхним, четырехэкситонным состоянием, либо перепутанность одноэкситонного состояния с трехэкситонным. Для случая кластеров, состоящих из двух или трех когерентно взаимодействующих ионов (рис. 1 b и c), получены точные аналитические решения уравнения для матрицы плотности, позволяющие рассчитать динамику и длительность импульсов, необходимых для создания требуемых базисных либо перепутанных состояний, не прибегая к численным методам, в том числе и при сильном взаимодействии атома с лазерным излучением (превосходящем силу межйонного взаимодействия). Сложная динамика элементов матрицы плотности тримера показана на рисунке 2, аналитическое решение (сплошные линии) и численное, показанное на рисунке 2 точками, полностью совпадают. Из рисунка видно, что последовательно достигается высокая перепутанность различных состояний – сначала основного  $|-3/2\rangle$  с одноэкситонным  $|-1/2\rangle$ , потом основного с двухэкситонным  $|1/2\rangle$ , и, наконец, основного с трехэкситонным  $|3/2\rangle$ .

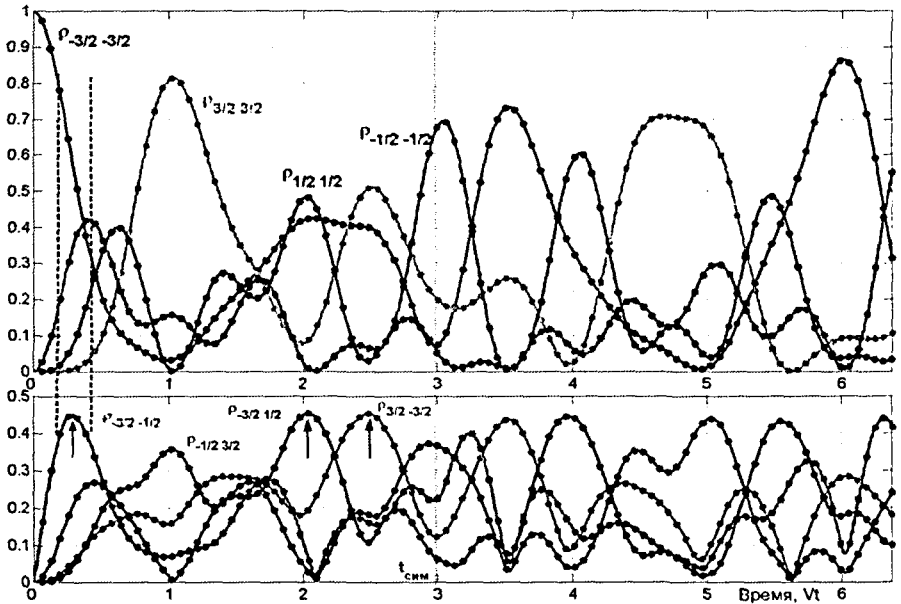
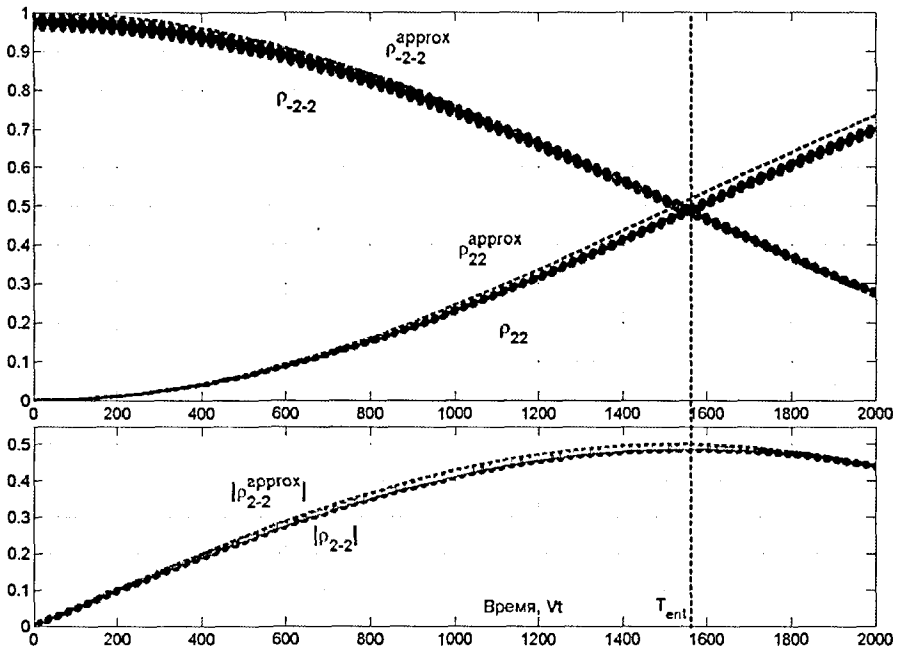


Рис. 2. Эволюция населенностей уровней  $\rho_{-3/2 -3/2}$  и  $\rho_{3/2 3/2}$  в ансамбле трех двухуровневых ионов при начальном заселении основного (вакуумного) уровня ( $\rho_{-3/2 -3/2}(0)=1$ ) при энергии взаимодействия с излучением большей, чем энергия взаимодействия между частицами  $A=3V$ . Шкала времени выбрана безразмерной –  $tV$ . Стрелками показаны моменты высокой перепутанности состояний:  $\rho_{-3/2 -1/2}, \rho_{-3/2 1/2}, \rho_{-1/2 3/2}, \rho_{1/2 3/2} \rightarrow 0,5$ .

Для всех рассмотренных типов кластеров даны приближенные выражения для динамики состояний под воздействием лазерного излучения относительно невысокой интенсивности (меньше, чем сила межйонного взаимодействия), имеющие простой аналитический вид, и также позволяющие рассчитать временные периоды, с которыми осциллируют населенности уровней и их перепутанность. Например, чтобы перепутать вакуумное состояние  $|-2\rangle$  с самым верхним четырехэкситонным  $|2\rangle$  состоянием тетрамера (см. рис. 3), можно использовать четырехфотонную накачку на частоте  $\hbar\omega_0$ , и приближенная динамика для случая слабого излучения представляется в виде:

$$\rho_{-2-2} = (1 + \cos \omega't) / 2, \quad \rho_{22} = (1 - \cos \omega't) / 2, \quad \rho_{-22} = -\sin \omega't / 2 \quad (5)$$

с периодом  $\omega' = A^4 / 12V^3$ , где  $A = E_0 d / \hbar$  характеризует величину взаимодействия дипольного момента атома с полем ( $|A|$  - аналог частоты Раби для мономера).



**Рис. 3.** Эволюция населенностей основного ( $\rho_{-2,-2}$ ) и четырехэкситонного ( $\rho_{2,2}$ ) уровней в кластере четырех двухуровневых ионов при начальном основном состоянии (заселенность  $\rho_{-2,-2}$ ) при энергии взаимодействия с излучением, меньшей относительно энергии взаимодействия между ионами  $A=V/3$ . Пунктиром показаны приближенные значения, рассчитанные по формуле (1). Момент  $T_{ent}$  максимальной перепутанности вакуумного и четырехэкситонного уровней ( $\rho_{2,-2} = 0,5$ ) показан вертикальной пунктирной линией. Шкала времени в единицах  $V^t$ .

В четвертом и пятом параграфах первой главы рассмотрены возможности управления энергетическими состояниями кластеров из двух и четырех ионов с помощью бигармонической накачки. Особое внимание уделяется приготовлению при помощи бигармонической накачки всех возможных базисных

возбужденных состояний (например, для тетрамеров это одно-, двух-, трех-, и четырех-экситонное состояния) и перепутанных Белловских состояний [1-2]. Четвертый параграф первой главы посвящен теоретическому рассмотрению случая слабой бигармонической накачки димеров и тетрамеров. Получено приближенное аналитическое решение для эволюции энергетических состояний димеров и тетрамеров, что позволяет рассчитать параметры, требуемые для приготовления тех или иных заданных состояний. Предсказаны соотношения интенсивностей, позволяющие достичь максимальной перепутанности состояний – например, в димере для получения в определенный момент времени  $T_{ent}$  полностью перепутанного вакуум-бизекситонного состояния интенсивность излучения на второй частоте  $\hbar\omega_0 + \hbar V$  должна быть в  $A_2/A_1^2 = 3 \pm 2\sqrt{2}$  раз больше интенсивности силы излучения на первой частоте  $\hbar\omega_0 - \hbar V$ , см. рис. 4.

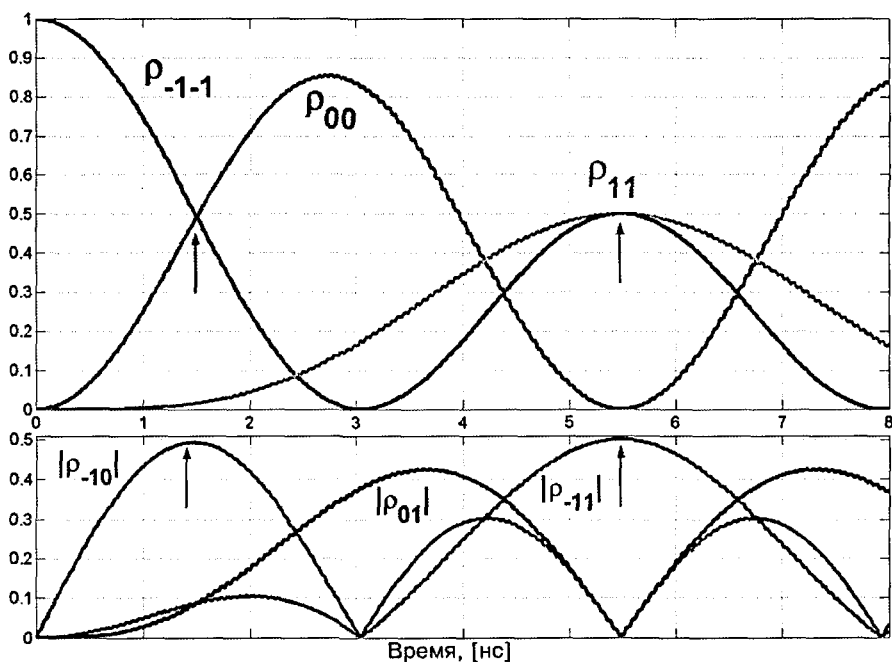


Рис. 4. Эволюция элементов матрицы плотности димера при бигармонической накачке на резонансных частотах  $\hbar\omega_0 - \hbar V$  и  $\hbar\omega_0 + \hbar V$  со специально подобранными параметрами излучения  $A_2=0.41A_1$ ,  $A_1=1.4V/100$  ( $A_2/A_1 = \sqrt{2}-1$ ). Моменты максимальной перепутанности ( $\rho_{-10} = 0,5$  и  $\rho_{-11} = 0,5$ ) показаны стрелками.

В пятом параграфе общие результаты проиллюстрированы на примере парных и четверных центров ионов неодима во фториде кальция (M и N центры) [7, A4], для которых имеются все необходимые экспериментальные данные о взаимодействиях Nd-Nd, электрическом дипольном моменте перехода  $d$  и временах декогерентизации. Показано, что для создания перепутанных либо инвертированных многоэкситонных состояний с помощью бигармонической накачки путем каскадных резонансных переходов требуются в 50-100 раз меньшие интенсивности лазерного излучения по сравнению с многофотонной одночастотной накачкой. С помощью численного решения уравнения для матрицы плотности типа Линдблада, учитывающего декогерентизацию, показано, что возможно создание качественных квантовых состояний путем понижения температуры до одного-двух К°, и/или при использовании бигармонической накачки повышенной интенсивности с длительностью импульсов порядка 0,5-1 нс.

В шестом параграфе первой главы рассмотрена динамика энергетических состояний тетрамера под влиянием более доступной широкополосной накачки. Показана возможность создания четырехэкситонного состояния с помощью одновременного воздействия лазерных импульсов на четырех резонансных частотах. Рассмотрена пригодность широкополосных лазерных импульсов, а также последовательно действующих бигармонических лазерных импульсов для создания перепутанных состояний. Показано, что можно достичь высокой (до 90 %) степени перепутанности с помощью широкополосной лазерной накачки.

В седьмом параграфе первой главы исследованы процедуры реализации основных квантово-логических операторов. Проводится изоморфизм между четырьмя нижними энергетическими уровнями тетрамера и тензорным произведением двухуровневых состояний двух квантовых битов. Показано, что правильным выбором частот и интенсивностей лазерного излучения можно обеспечить приготовление необходимого начального состояния и реализовать все рассмотренные квантово-логические операторы. Например, для вращения одного из двух кубитов требуется бигармоническая накачка с одинаковой интенсивностью импульсов: для вращения первого кубита – на частотах  $\hbar\omega_0$  и  $\hbar\omega_0 - 2\hbar V$  (двухфотонные нерезонансные переходы), а для вращения второго кубита – на частотах  $\hbar\omega_0 - 3\hbar V$  и  $\hbar\omega_0 + \hbar V$  (однофотонные резонансные переходы).

В восьмом параграфе первой главы предложен метод отбора электронных переходов РЗ ионов, перспективных для постановки квантово-когерентных экспериментов, по минимальной скорости декогерентизации (дефазировки), и в то же время обладающих достаточно высокими значениями дипольных моментов перехода для обеспечения сильного когерентного взаимодействия с резонансными квантовыми переходами соседних атомов и с когерентным полем оптического возбуждения. Дано теоретическое обоснование процедуры отбора.

В конце главы приведены основные результаты, полученные в первой главе.

В Приложении А дано теоретическое рассмотрение релаксационных явлений и показана прямая связь между дефазировкой или уширением спектральных линий штарк-штарковских переходов в РЗ ионах и индивидуальным свойством их электронных переходов. В приложении В даны теоретические выкладки для спектров гамильтониана для случая монохроматической накачки тетрамеров и пентамеров. Приложения В и С посвящены поиску собственных значений гамильтониана для монохроматической накачки тетрамеров и пентамеров, соответственно. В приложении D приведено аналитическое приближенное решение для динамики населенностей энергетических уровней димера для случая слабой бигармонической накачки импульсами с одинаковой интенсивностью.

Во второй главе [A7-A9] рассмотрена кинетика процесса кооперативного переноса энергии и тушения донорной люминесценции на двух- и трехчастичные акцепторы в ансамбле случайно распределенных частиц в статическом режиме, то есть при отсутствии миграции возбуждения между донорами. Во введении ко второй главе (первый параграф второй главы) описано современное состояние проблемы, дается краткий исторический обзор по исследованию кинетики тушения доноров в ансамбле случайно распределенных одночастичных акцепторов [14-19]. Указано существование случаев, когда резонанс между донором и одним акцептором отсутствует, но возможен резонанс и мультипольное взаимодействие сразу с двумя частицами (кооперативными акцепторами) [10, 11], что позволяет сформулировать задачу исследования о кооперативном переносе энергии и выявлении его кинетических закономерностей.



Во втором, теоретическом, параграфе второй главы задача формализуется, выявляется основная сложность в ее теоретическом исследовании – вопрос усреднения скоростей тушения по различным случайным конфигурациям расположения акцепторов.

Предлагается ряд упрощений, позволяющих, с помощью дальнейших теоретических выкладок, получить компактное аналитическое выражение для кинетики переноса энергии с доноров на двухчастичные акцепторы.

Кинетика донорного тушения на кооперативные двухчастичные акцепторы записывается в виде  $I_2(t) \equiv N_D^*(t) / N_D^*(0) = \left\langle \prod_{i>j} [1 + p_i p_j \varphi_{ij}(t)] \right\rangle$  (6),

где  $\varphi_{ij} = \exp -tW_{ij} - 1$ .

Здесь  $p_i$  равно 1, если в позиции  $i$  находится акцептор, и равно 0 в противном случае,  $W_{ij}$  – вероятность элементарного акта кооперативного переноса энергии от одного донора на две частицы  $i$  и  $j$ , играющих роль одного кооперативного акцептора. Распределение акцепторных частиц по  $N$  узлам решетки считается равновероятным, так что  $\langle p_i \rangle = N_A / N \equiv c$ , где  $N_A$  – число акцепторных частиц.

Далее используется приближение

$$I_2(t) \approx \left\langle \prod_{j>1} (1 + p_1 p_j \varphi_{1j}) \right\rangle \left\langle \prod_{j>2} (1 + p_2 p_j \varphi_{2j}) \right\rangle \left\langle \prod_{j>3} (1 + p_3 p_j \varphi_{3j}) \right\rangle \times \dots, \quad (7)$$

результатом которого будет выражение для кинетики переноса на парные кооперативные акцепторы в виде  $I_2 = \exp P_2(t)$  с

$$P_2(t) = \sum_{i=1}^{N-1} \ln \left\{ 1 - c \left[ 1 - \exp \sum_{j=i+1}^N \ln(1 + c\varphi_{ij}) \right] \right\} \quad (8)$$

Обобщение этого выражения на случай передачи энергии на  $m$  ( $m=3, 4, 5\dots$ ) акцепторов можно получить с помощью рекуррентного соотношения, записывая  $P_m(t)$  в виде:

$$P_m = \sum_{i_1=1}^{N-m+1} P_m^{(i_1)}(t), \quad \text{где } P_m^{(i_1)}(t) \text{ зависит от функции } \sum_{i_m=i_{m-1}+1}^N \ln[1 + c\varphi_{i_1 i_2 \dots i_m}(t)]$$

с  $\varphi_{i_1 i_2 \dots i_m} = \exp[-W_{i_1 i_2 \dots i_m} t] - 1$ ,  $W_{i_1 i_2 \dots i_m}$  – вероятность элементарного акта передачи энергии возбуждения на  $m$  составляющих акцептор частиц, расположенных в узлах  $i_1, i_2 \dots i_m$ .

Тогда  $P_{m+1}(t)$  можно представить в виде  $P_{m+1}(t) = \sum_{i=1}^{N-m} P_{m+1}^{(i)}(t)$ , (9)

$$\text{где } P_{m+1}^{(i)} = \ln \left\{ 1 - c \left[ 1 - \exp \left\{ \sum_{i_1=i}^{N-m+1} \tilde{P}_m^{(i_1)}(t) \right\} \right] \right\},$$

а  $\tilde{P}_m^{(i_1)}(t)$  получается из  $P_m^{(i_1)}(t)$  заменой в выражении для  $P_m^{(i_1)}(t)$  функции  $\sum_{i_n=i_1+1}^N \ln[1 + c\varphi_{i_1, i_n}(t)]$  на функцию  $\sum_{i_n=i_1+1}^N \ln[1 + c\varphi_{i_1, i_n+1}(t)]$ . Этот результат (9) важен при расчете кинетики кооперативного переноса энергии при больших концентрациях акцепторных частиц, которые занимают определенные узлы в кристаллической решетке.

Не менее важной и ценной является попытка получить аналог корневого затухания Ферстера-Галанина [13-17], но для кооперативного переноса энергии.

Используя приближение сплошной среды и малой концентрации и сводя интеграл к гамма-функции, мы получаем приближенную формулу для  $P_2$ :

$$P_2^{exp}(\infty) = \left[ \frac{2k}{1-2k} \right]^p \Gamma(1-p) c^{p+1} (W_0 t)^{d(p+1)/2S} = \left[ \frac{d}{S-d} \right]^{2S-d} \Gamma \left( \frac{2S-2d}{2S-d} \right) c^{2S-d} (W_0 t)^{2S-d}, \quad (10)$$

где введено обозначение  $P = \frac{d}{2S-d}$ .

Таким образом, для произвольных мультипольностей  $S$  (включая мультипольности  $S=6; 8; 10$  для диполь-дипольного, диполь-квадрупольного и квадруполь-квадрупольного взаимодействий соответственно) и произвольных размерностей пространства  $d$  (включая размерности  $d=3$  – объемный каркас;  $2$  – плоская сеть;  $1$  – одномерная цепочка) временная и концентрационная (от  $c$ ) зависимость интенсивности кооперативного переноса и тушения получена в следующем виде:

$$I_2(t) = \exp \left[ - W t^{\frac{d}{2S-d}} \right], \quad (11)$$

где  $W$  – средняя скорость кооперативного тушения:

$$W = \frac{d}{S-d} \left[ \Gamma \left( \frac{2S-2d}{2S-d} \right) \right]^{2S-d/d} c^{2S/d} W_0 \quad (12)$$

В трехмерном пространстве  $d=3$  для диполь-дипольного взаимодействия ( $S=6$ ) кинетика затухания обнаруживает более сильную неэкспоненциальность (степень при времени  $t$  равна  $1/3$ ) по сравнению с традиционным Ферстеровским законом (степень при  $t$  равна  $1/2$ ). При этом средняя скорость кооперативного переноса (тушения) пропорциональна четвертой степени концентрации

акцепторных частиц, в то время как скорость тушения на одночастичные акцепторы, полученная в классических работах [14-19], пропорциональна квадрату концентрации. Полученное выражение демонстрирует еще более сильную зависимость от концентрации (до двадцатой степени, в случае двумерного или одномерного пространства и квадруполь-квадрупольного взаимодействия) одновременно с сильно растущей неэкспоненциальностью кинетики (уменьшением степени, в которой время входит в экспоненту затухания интенсивности донорной люминесценции).

Это иллюстрируют таблицы 1 и 2, где даны значения степенных показателей временной и концентрационной зависимостей для различных размерностей пространства  $d$  и мультипольностей взаимодействия  $S$ .

$S \backslash d$	1	2	3
6	0,091	0,200	0,333
8	0,067	0,143	0,231
10	0,053	0,111	0,176

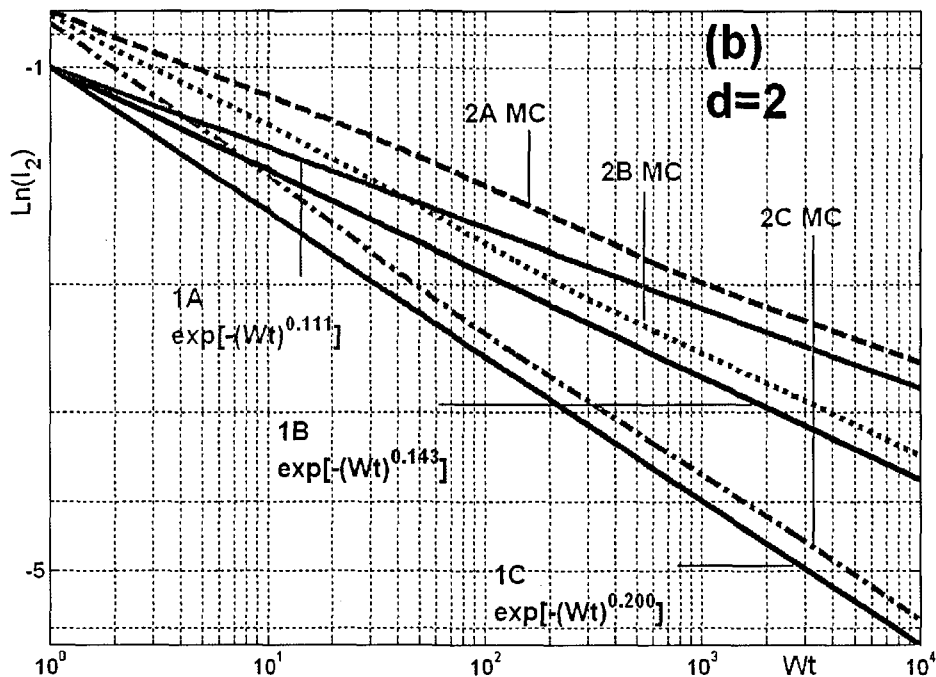
$S \backslash d$	1	2	3
6	12	6	4
8	16	8	5,3
10	20	10	6,7

**Таблица 1.** Значение показателя степени  $d/(2S-d)$  в экспоненциальной зависимости  $I_2(t)$  от времени:  $I_2(t) \sim t^{d/(2S-d)}$ .

**Таблица 2.** Значение показателя степени  $2S/d$  в экспоненциальной зависимости средней скорости кооперативного тушения  $W$  от концентрации  $W(c) \sim c^{2S/d}$ .

В третьем параграфе второй главы приводятся результаты моделирования средней и дальней стадий тушения методом Монте-Карло. Приводятся графики расчетов по формуле (11) и результатов моделирования методом Монте-Карло (уравнение (6)) для малых концентраций акцепторных частиц  $c$ . Данные приведены в двойном логарифмическом масштабе зависимости интенсивности  $I_2$  от логарифма времени. В этих координатах угол наклона прямой на дальней асимптотике соответствует значению показателя времени в уравнении (11). Наклоны  $d/(2S-d)$  модельных кривых хорошо соответствуют при больших временах значениям, вычисленным по формуле (11) для различных значений мультипольности и размерности пространства. В частности, на рисунке 5 приведена кинетика дальней стадии тушения в случае двумерного пространства ( $d=2$ ). Из Рисунка 5 видно, что на больших временах углы наклона кинетики тушения, полученной из численного эксперимента моделированием Монте-Карло

(пунктирные линии), совпадают с углами наклона, предсказанными теорией (формула 11, сплошные линии). Результаты моделирования методом Монте-Карло подтверждают теоретические выкладки и соответствуют общей аналитической формуле (11), полученной для кинетики затухания на дальней стадии.



**Рис. 5.** Аналитическое приближение по формуле (11) – кривая 1 и моделирование методом Монте-Карло (кривая 2) кинетики кооперативного тушения на больших временах. 1А и 2А – диполь-дипольное взаимодействие  $S=6$ ; 1В и 2В – диполь-квадрупольное взаимодействие  $S=8$ ; 1С и 2С – квадруполь-квадрупольное взаимодействие  $S=10$ . Концентрация  $c=0.01$ , размерность  $d=2$ .

Различие кривых на начальном участке связано с наличием на линиях моделирования (MC) начально упорядоченной стадии за счет ближнего порядка.

В четвертом параграфе второй главы приведен анализ начальной стадии кинетики затухания люминесценции при переносе энергии от донора на двух и трехчастичные акцепторы для случая больших концентраций, когда расстояние между донором и акцепторами уменьшается до одной или нескольких

постоянных решетки. Моделирование подтвердило гипотезу, что в таком случае зависимость скорости тушения на начальной стадии от концентрации является квадратичной в случае двухчастичных акцепторов и кубической в случае трехчастичных [11-13, А7-А9]. Приводятся расчетные кинетики, демонстрирующие, что начальная стадия кооперативного тушения на двухчастичные акцепторы для экспериментально изученных в [11-13] концентраций акцепторных частиц  $>20\%$  хорошо описывается экспоненциальным законом тушения на значительную глубину падения интенсивности люминесценции со скоростью, квадратично зависящей от концентрации. При уменьшении концентрации акцепторных частиц, кинетика тушения быстро становится неэкспоненциальной, особенно в случае тушения на трехчастичные акцепторы.

В пятом параграфе второй главы исследуются пространственные масштабы кооперативного переноса энергии (тушения) в решетке  $\text{CeF}_3$ . Изучена величина вклада различных координационных сфер, занятых акцепторными частицами в решетке  $\text{CeF}_3$  в общую скорость тушения при стопроцентном заполнении катионных узлов кристалла акцепторными частицами. Кроме того, здесь приводятся решеточные суммы для различных типов решеток и мультипольностей взаимодействия, процентная доля вклада различных координационных сфер акцепторных частиц в полное кооперативное тушение донора в решетке  $\text{CeF}_3$ . Приводятся данные, демонстрирующие, что от 60 до 80 % полной скорости тушения обеспечено 12-ю соседними катионами Се из четырех ближайших координационных сфер. При этом скорость тушения для диполь-дипольного взаимодействия приближается к асимптотическому значению медленнее, чем значения для диполь-квадрупольного и квадруполь-квадрупольного взаимодействий. Эти ближайшие 12 акцепторов располагаются на расстоянии  $(1 - 1.41)R_{\min}$ , что позволяет их рассматривать как упорядоченный кластер.

В шестом параграфе второй главы исследованы микропараметры элементарного кооперативного переноса энергии. Представлена таблица со значениями скоростей тушения для различных редкоземельных донорных ионов. В частности, показано, что скорость тушения в случае переноса энергии  $\text{Tm} \rightarrow 2\text{Ce}$  и  $\text{Ho} \rightarrow 2\text{Ce}$  существенно выше, чем в случае переноса  $\text{Nd} \rightarrow 2\text{Ce}$ ,

что коррелирует со значительно бóльшими величинами приведенных матричных элементов  $U^{(2)}$ ,  $U^{(4)}$ ,  $U^{(6)}$ , определяющих силу донорных переходов. С помощью решеточных сумм для двухчастичного и трехчастичного тушения в решетке  $\text{CeF}_3$ , расчет которых приведен в предыдущих разделах, рассчитана элементарная эффективность кооперативного переноса энергии ( $W_0(D \rightarrow 2A)$  и  $W_0(D \rightarrow 3A)$ ) на минимальном расстоянии ( $R_{\min} = 3,7 \text{ \AA}$ ) и микропараметры кооперативного переноса энергии  $C_{D-2A}$  и  $C_{D-3A}$ , а также характерный Ферстеровский радиус. Например, для переноса энергии  $\text{Nd} \rightarrow 2\text{Ce}$   $W_0 = 24 \text{ c}^{-1}$  для диполь-дипольного взаимодействия,  $C_{DA} = 1,6 \cdot 10^{-4} \text{ nm}^{12}/\text{c}$ ,  $R_F = 0,26 \text{ nm}$ .

Сравнение результатов расчета элементарных характеристик скорости многочастичного переноса энергии друг с другом показывает корреляцию элементарных скоростей переноса с величинами электронных матричных элементов вступающих во взаимодействие ионов и резкую, близкую к степенной, зависимость скорости переноса с близкими матричными элементами от числа акцепторных частиц, вступающих во взаимодействие с донором (одночастичные, двух- и трехчастичные акцепторы).

В конце главы даны основные результаты главы II.

### **Заключение**

В заключении приведены основные результаты диссертации.

1) Показана принципиальная возможность приготовления базисных экситонных состояний, а также перепутанных состояний в структурах, состоящих из двух, трех, четырех или пяти когерентно взаимодействующих ионов или других оптических центров. Получены аналитические решения для динамики состояний под воздействием одночастотной накачки в отсутствие декогеренции в димерах и тримерах. Для всех рассмотренных типов нанокластеров, состоящих из двух, трех, четырех или пяти оптических центров, получены приближенные аналитические выражения, совпадающие с точным численным решением для случая слабого поля  $A < V$ .

2.) Предложена и показана перспективность применения бигармонической накачки для создания перепутанных состояний, а также инверсии населенностей в димерах и тетрамерах, соответствующих естественным кластерам РЗ ионов – М и N-центрам в кристаллах типа  $\text{CaF}_2$ , что требует на один-два порядка меньших интенсивностей лазерного излучения по сравнению с одночастотной двухфотонной накачкой. Для случая слабой бигармонической накачки димеров и

тетрамеров получено приближенное аналитическое решение для спектров гамильтониана, позволяющее рассчитать оптимальное соотношение интенсивностей, необходимое для максимальной перепутанности состояний.

На примере структуры уровней тетрамера, сопоставленной двум квантовым битам, показана возможность реализации основных квантово-логических операторов при помощи бигармонической накачки.

3) С помощью теоретического анализа и компьютерных моделей, описывающих кинетические закономерности кооперативного тушащего переноса энергии в разбавленных кристаллах  $c < 1$ , исследованы различные стадии кооперативного переноса энергии.

Для модели сплошной среды с непрерывным распределением акцепторных частиц аналитически решена задача о кинетике долговременной асимптотики кооперативного двухчастичного переноса энергии в ансамбле неупорядоченных частиц при произвольных значениях мультипольности  $S$ , концентрации  $c$  и размерности пространства  $d$ .

Получен компактный аналитический вид кинетики затухания донорной люминесценции  $I(t) = \exp[-(Wt)^{d/(2S-d)}]$ , совпадающий с предсказанным на основе анализа результатов компьютерного моделирования, в котором показатель времени в экспоненте имеет новую зависимость от мультипольности взаимодействия  $S$  и размерности пространства  $d$ , а зависимость средней скорости кооперативного переноса энергии  $W$  от концентрации акцепторных частиц  $W \sim c^{2S/d} W_0$  имеет степень, в два раза большую по сравнению с классическим Ферстеровским случаем.

4) Показано, что в области высоких концентраций активных ионов  $c = 0,2 \div 1$  начальная стадия кинетики кооперативного тушения экспоненциализуется на значительную глубину  $I(t) \sim \exp(-Wt)$ . Подтвержден квадратичный характер концентрационной зависимости скорости переноса в случае двухчастичных кооперативных акцепторов и кубичный в случае трехчастичных.

С использованием рассчитанных решеточных сумм для кристаллов  $\text{CeF}_3$  и  $\text{Yb}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  из экспериментальных данных вычислены скорости элементарного кооперативного переноса энергии  $W_0(\text{Tm} \rightarrow 2\text{Ce}) = 320 \text{ c}^{-1}$ ,  $W_0(\text{Ho} \rightarrow 2\text{Ce}) = 127 \text{ c}^{-1}$ ,  $W_0(\text{Nd} \rightarrow 2\text{Ce}) = 24 \text{ c}^{-1}$ ,  $W_0(\text{Tb} \rightarrow 2\text{Yb}) = 1,4 \text{ c}^{-1}$ ,  $W_0(\text{Er} \rightarrow 3\text{Ce}) = 0,6 \text{ c}^{-1}$  (для диполь-дипольного взаимодействия), величина которых сопоставлена с матричными элементами электронных переходов и друг с другом.

## Список работ

[A1] И. Т. Басиева, С. К. Секацкий, К. К. Пухов, Т. Т. Басиев, G. Dietler, *Когерентная мультиполярная передача энергии электронного возбуждения в кластерах резонансно взаимодействующих частиц и ее использование для квантовой информатики*, Препринт № 6, ИОФРАН РФ, Москва, (2003)

[A2] I. T. Basieva, S. K. Sekatskii, K. K. Pukhov, T. T. Basiev, and G. Dietler, *Clusters and Superlattices of Resonantly Interacting Fluorescent Centers as Quantum Computer Hardware*, *Laser Phys.*, 14 (2004), 1393-1402.

[A3] I. T. Basieva, S. K. Sekatskii, and J. Dietler, *Coherent Fluorescence Resonance Energy Transfer in symmetrical clusters of fluorescent centers*; *Chem. Phys. Letters*, 402 (2005), 433 - 438

[A4] S. K. Sekatskii, T. T. Basiev, I. T. Basieva, G. Dietler, V. V. Fedorov, A. Ya. Karasik, Yu. V. Orlovskii, and K. K. Pukhov; *Experimental preparation of entangled Bell's vacuum-single exciton and vacuum-biexciton states for pair centers of neodymium ions in a crystal*, *Opt. Communicat.*, 259 (2006), 298-303

[A5] I. T. Basieva, T. T. Basiev, G. Dietler, K. K. Pukhov, and S. K. Sekatskii; *Quantum control of exciton states in clusters of resonantly interacting fluorescent particles using biharmonic laser pumping*, *Physical Review B*, 74 (2006), 165329

[A6] I. T. Basieva, T. T. Basiev, G. Dietler, K. K. Pukhov, S. K. Sekatskii; *Using biharmonic laser pumping for preparation of pure and entangled multiexciton states in clusters of resonantly interacting fluorescent centers*, *Journal of Luminescence*, 127 (2007), 48-54

[A7] И.Т. Басиева, К.К. Пухов, Т.Т. Басиев; *Кинетика кооперативного тушения. Теория и моделирование методом Монте-Карло*, *Письма в ЖЭТФ*, 74, № 11 (2001), 612-615

[A8] T.T. Basiev, I. T. Basieva, M. A. Doroshenko, V. V. Osiko, A. M. Prokhorov, K. K. Pukhov; *Cooperative quenching: experiment, theory and Monte-Carlo computer simulation*, *Journal of Luminescence*, 94-95 (2001), 349-354

[A9] T. T. Basiev, K. K. Pukhov, I. T. Basieva; *Cooperative quenching kinetics: Computer simulation and analytical solution*, *Chem. Phys. Letters*, 432 (2006) 367-370.



## Литература

[1] D. M. Greenberger, M. Horne, and A. Zeilinger; In: *Bell's Theorem, Quantum Theory, and Conceptions of the Universe*, edited by M. Kafatos (Kluwer, Dordrecht, 1989), 73.

[2] Bell, John S; *Speakable and Und Unspeakable in Quantum Mechanics*, Cambridge University Press (1987), ISBN 0-521-36869-3

[3] И. В. Багратин, Б. А. Гришанин, В. Н. Задков; *Запутанные состояния квантовых систем*, Успехи физических наук, том 171, № 6 (июнь 2001 г.), 625-646

[4] С. Я. Килин; *Квантовая информация*, Успехи физических наук, том 169, № 5 (май 1999 г.), 507-525

[5] L. Quiroga and N. F. Johnson; *Entangled Bell and Greenberger-Horne-Zeilinger States of Excitons in Coupled Quantum Dots*, Phys. Rev. Lett., vol. 83 (1999), 2270

[6] R.H. Dicke; *Coherence in Spontaneous Radiation Processes*, Phys. Rev., vol. 93 (1954), 99

[7] V. V. Fedorov, W. Beck, T. T. Basiev, A. Ya. Karasik, C. Flytzanis; *Fine level splitting of aggregate neodymium centers in CaF<sub>2</sub> crystals*; Chemical Physics 257 (2000), 275-281

[8] А. М. Прохоров et. al.; *Активные среды твердотельных лазеров*; Изв. АН СССР, Сер. физич., т. 51, № 8 (1987), 1285-1294

[9] А. М. Прохоров, Х. С. Багдасаров, В. И. Жеков, В. А. Лобачев, А. А. Маненков, Т. М. Мурина; *Кросс-релаксационный ИАГ: Er<sup>3+</sup>-лазер*; Известия АН СССР, серия физическая, т. 84, № 9 (1984), 1765-1770

[10] D.L. Dexter; Phys. Rev., 108 (1957), 630

[11] Т. Т. Басиев, М. Е. Дорошенко, В. В. Осико; *Кооперативная безызлучательная кросс-релаксация в кристаллах твердых растворов La<sub>1-x</sub>Ce<sub>x</sub>F<sub>3</sub>*; Письма в ЖЭТФ, т. 71, № 1 (2000), 14-19

[12] Т. Т. Басиев, М. Е. Дорошенко, В. В. Осико, А. М. Прохоров; *Высокоэффективный кооперативный перенос энергии с ионов Ho<sup>3+</sup> и Tm<sup>3+</sup> на ионы Ce<sup>3+</sup> в кристаллах*, ЖЭТФ, т. 93, вып. Б (2001), 1178-1183

[13] Т. Т. Basiev, М. Е. Doroshenko, V. V. Osiko, V. A. Konuushkin, V. N. Skvortsov, A. G. Papashvili, K. K. Pukhov, G. Hager, S. Smith; *Direct and*

*cooperative sensitization of Ce<sup>3+</sup> 4-5 μm laser transition*, ASSL-2001 (2001), Technical Digest, OSA, 93-95

[14] Th. Förster *Zh. Naturforsch* 4a (1949), 321

[15] М. Д. Галанин; *ЖЭТФ* 28 (1955), 485

[16] В.У. Sveshnikov, V.I. Shirokov; *Opt. Spectrosc.* 12 (1962) 5764

[17] A. Blumen, J. Manz; *On the concentration and time dependence o the energy transfer to randomly distributed acceptors*, *J. Chem. Phys.* 71 (11) (1979) 4694

[18] В.П. Сахун; *Физ. тверд. тела (Ленинград)*, 14 (1972), 2199 [*Sov. Phys. Solid State*, 14 (1972), 1906]

[19] С. И. Голубов, Д. В. Конобеев; *Физ. тверд. тела (Ленинград)*, 13 (1971), 3185 [*Sov. Phys. Solid State* 13 (1971), 2679].

Подписано в печать: 14.04.2009

Заказ № 1857      Тираж - 70 экз.

Печать трафаретная.

Типография «11-й ФОРМАТ»

ИНН 7726330900

115230, Москва, Варшавское ш., 36

(499) 788-78-56

[www.autoreferat.ru](http://www.autoreferat.ru)