

ОТЗЫВ

официального оппонента Соколова Игоря Михайловича о диссертационной работе Натальи Анатольевны Лозинг "**Квантово-кинетическая теория фотолюминесценции в приложении к описанию ансамблей примесных центров в твердых средах с использованием метода Боголюбова-Борна-Грина-Кирквуда-Ивона**", представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6 - Оптика.

Диссертационная работа Лозинг Н.А. посвящена анализу коллективных корреляционных эффектов, имеющих место при взаимодействии квазирезонансного излучения с плотными ансамблями примесных центров, внедренных в прозрачную диэлектрическую среду.

Коллективные эффекты в плотных ансамблях, расстояние между излучателями в котором соизмеримо с длиной волны излучения, затрагивают самые фундаментальные проблемы квантовой электродинамики такие, как изменение скорости спонтанного распада атомов и молекул и связанные с этим явления супер и субизлучения, кооперативный лэмбовский сдвиг, слабую и сильную (андерсоновскую) локализацию света и т.п.

Эти ансамбли являются также объектами пристального внимания в связи с широким кругом их практического применения в квантовой электронике и квантовой оптике. В последнее время интерес к системам с сильными межатомными корреляциями, обусловленными межатомным взаимодействием, усилился, поскольку они являются перспективным ресурсом для решения задач квантовой информатики. Квантовая запутанность состояний излучателей, обусловленная их взаимодействием в плотных средах, может служить основой алгоритмов квантовых вычислений, а возможное формирование коллективных субизлучательных долгоживущих состояний весьма перспективно для создания ячеек квантовой памяти. Следует также отметить, что большинство методов детектирования состояния исследуемых в диссертации систем, а также практически все предложенные схемы их практического использования основаны на их взаимодействии с электромагнитным излучением.

Взаимодействие отдельных излучателей между собой, а также возможная их случайная неупорядоченность не позволяют корректно описать состояния рассматриваемых систем с помощью только одноатомной матрицы плотности. По этим же причинам их оптические свойства не удастся описать в рамках традиционных подходов макроскопической электродинамики, основанных на приближении среднего поля.

Таким образом, диссертационная работа Н.А. Лозинг, посвященная исследованию влияния межатомных корреляций на фотолюминесценцию ансамблей примесных центров в твердотельных диэлектриках при последовательном микроскопическом учете эффектов ближнего поля, является несомненно **актуальной**.

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения.

Во введении описаны цель и решаемые задачи, проведен обзор научной литературы, сформулированы выносимые на защиту положения.

Первая глава посвящена описанию используемого в диссертации метода исследования. Этот метод основан на применении цепочек уравнений Боголюбова-Борна-Грина-Кирквуда-

Ивона (ББГКИ), модифицированных для решения задач оптики и спектроскопии. Помимо общего подхода сформулированы основные приближения, используемые для получения замкнутых «укороченных» систем уравнений.

Во второй главе анализируется флуоресценция системы из двух излучателей при учете их диполь-дипольного взаимодействия. Особенностью решаемой задачи является рассмотрение двух излучателей, различающихся как частотами, так и величинами дипольных моментов их оптических переходов. На основе укороченных уравнений ББГКИ в результате численного решения уравнений для двухатомной матрицы плотности определяется спектр возбуждения, а также спектральный состав флуоресценции при непрерывном воздействии внешнего лазерного излучения произвольной интенсивности.

Третья глава посвящена рассмотрению коллективных эффектов в макроскопическом ансамбле примесных центров (атомов) в прозрачном диэлектрике. Основное внимание уделено анализу внутренней, безрезонаторной бистабильности этого ансамбля. Для описания бистабильности автором была выведена система нелинейных уравнений для элементов матрицы плотности атомов. Решение этой системы для широкого круга условий возбуждения позволило детально исследовать характер стационарных состояний рассматриваемой атомной подсистемы, а также найти критические значения параметров, определяющие границы существования этих состояний.

В заключении приведены основные результаты исследования.

Наиболее интересными и значимыми новыми результатами, полученными в работе, являются следующие:

1. На основе метода ББГКИ разработан последовательный подход к описанию флуоресценции ансамблей неидентичных излучателей, возбуждаемых когерентным излучением произвольной интенсивности, позволяющий учесть взаимодействие излучателей между собой и связанные с этим взаимодействия корреляции.

2. Разработанный подход дал возможность провести детальное исследование спектров возбуждения фотолюминесценции пары органических молекул в твердотельной матрице. Показано, что учет корреляций, обусловленных межмолекулярным диполь-дипольным взаимодействием, позволяет объяснить наблюдавшиеся в ранее проведенных экспериментах особенности спектров. Помимо спектров возбуждения рассчитаны спектры вторичного излучения рассматриваемой пары молекул. Проанализировано, как коллективные эффекты модифицируют спектры нелинейной резонансной флуоресценции.

3. На основе базовой системы уравнений в рамках метода ББГКИ получено аналитическое выражение для скорости радиационной релаксации неподвижных излучателей в прозрачном диэлектрике. Проанализировано изменение этой скорости, обусловленное эффектами локального поля и определяемое свойствами рассматриваемого диэлектрика.

4. Для условий бистабильности исследован процесс оптического перехода рассматриваемой системы между ее стационарными состояниями с низким и высоким уровнями интенсивности фотолюминесценции. Произведена симуляция экспериментов по лазерной фотолюминесцентной спектроскопии микрокристаллов алмаза с германиевыми центрами окраски. Предложена интерпретация наблюдавшегося в них явления спонтанного возрастания интенсивности фотолюминесценции.

Результаты, полученные в диссертации, **надежно обоснованы**, их **достоверность** обусловлена корректным применением адекватных методов современной теоретической и математической физики. Полученные результаты детально проанализированы. Там, где это возможно, проведено сопоставление предельных случаев с известными теоретическими результатами других авторов. Особо следует отметить согласие с известными из литературы экспериментальными данными. Результаты работы неоднократно апробированы на представительных международных конференциях.

Научная и практическая значимость диссертации определяется тем, что в ней детально проанализирован оригинальный метод описания коллективных эффектов. В отличие от традиционно используемого метода связанных осцилляторов развиваемый автором подход позволяет существенно расширить область исследуемых эффектов. Так, в рамках этого подхода сравнительно легко можно учесть реальную сверхтонкую и зеемановскую структуру уровней рассеивателей, можно проводить описание не только микро и мезоскопических, но и макроскопических ансамблей. И, наконец, этот подход позволяет проанализировать влияние межатомных взаимодействий и связанных с этим корреляций на нелинейные оптические эффекты, что и было успешно продемонстрировано автором в представленной диссертации. Существенным является обобщение разрабатываемого подхода на практически важный случай неодинаковых рассеивателей. Кроме этого, данный метод можно использовать не только для ансамблей примесных центров, но и для случая атомов и молекул, охлажденных до субдоплеровских температур в специальных ловушках. Все это дает мощный инструмент для решения широкого круга задач теоретического описания систем с сильными межчастичными корреляциями.

Полученные в диссертации результаты вносят важный вклад в понимание физики коллективных явлений и их влияния на нелинейные эффекты в оптике. Особо следует отметить анализ корреляций в ансамблях малого числа рассеивателей, которые могут быть использованы в задачах генерации перепутанных состояний, что чрезвычайно важно для решения базовых проблем квантовой информатики. Следует также отметить, что большим достоинством этой теоретической работы является ее ориентация на эксперимент и то, что она проведена в тесном контакте с одной из ведущих экспериментальных групп, работающих в области молекулярной спектроскопии. Все это позволило провести детальную интерпретацию ряда уже проведенных экспериментов, а также может послужить стимулом для дальнейших экспериментальных исследований в этой области.

По материалам представленной работы имеются следующие **замечания**:

1. В первой главе при обсуждении базовых уравнений, описывающих кооперативные эффекты, приведена система (1.7)-(1.10), которая не является замкнутой. В ней отсутствует уравнение для оператора двухчастичной корреляционной функции $g_{aa'}$.

2. Во второй главе при описании ансамбля двух рассеивателей используется представление коллективных состояний. Но для разных рассеивателей некоторые из этих состояний не являются стационарными, поэтому некорректно, как это делается в диссертации, говорить об их энергии. Из текста непонятно также, по каким физическим причинам центральный пик в спектре возбуждения флуоресценции располагается на средней частоте двух рассеивателей, хотя они различаются не только частотами, но и дипольными моментами перехода.

3. При исследовании спектров флуоресценции во второй главе было бы полезно в качестве контрольного расчета провести рассмотрение рассеяния слабого излучения и убедиться, что в этом предельном случае спектр вторичного излучения не зависит от спектра коллективных состояний, а определяется только частотой возбуждающего лазера.

4. В третьей главе автор учитывает корреляции между активными рассеивателями «а» и частицами «b» диэлектрической среды. При этом недостаточно четко обосновано пренебрежение двухчастичными корреляциями активных частиц между собой, как и корреляциями частиц диэлектрика (автор полагает, что $g_{aa} = g_{bb} = 0$). Кроме этого, при переходе к модели сплошной диэлектрической среды не обсуждается вопрос об обычно вводимых в таких моделях полостях вокруг каждого из активных атомов.

Сделанные замечания не являются принципиальными с точки зрения основных результатов, полученных автором, и не влияют на положительное впечатление от работы, которая представляет собой завершённое теоретическое исследование, выполнена на очень высоком научном уровне и содержит ряд новых и практически значимых результатов, достоверность которых не вызывает сомнений. Содержание диссертации подробно изложено в четырех статьях. Автореферат правильно и достаточно полно отражает содержание диссертации.

На основе всего вышеизложенного я считаю, что диссертация Лозинг Натальи Анатольевны "Квантово-кинетическая теория фотолюминесценции в приложении к описанию ансамблей примесных центров в твердых средах с использованием метода Боголюбова-Борна-Грина-Кирквуда-Ивона" представляет собой законченную научно-квалификационную работу, удовлетворяющую всем требованиям к кандидатским диссертациям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 года, а ее автор, Лозинг Наталья Анатольевна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6 - Оптика.

Официальный оппонент:

Соколов Игорь Михайлович, д.ф.-м.н. (01.04.02 – теоретическая физика), профессор (01.04.02 – теоретическая физика), профессор Высшей школы фундаментальных физических исследований Физико-механического института федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, 2 уч. корпус, телефон +7 (812) 5527660; e-mail: sokolov_im@spbstu.ru

27 февраля 2023

И.М. Соколов



С.И. Соколов, д.ф.-м.н.
ОБЩЕСТВЕННЫЙ ЭКСПЕРТ
Специалист
20.23.г.

Список публикаций

официального оппонента И.М. Соколова в рецензируемых научных изданиях по тематике диссертации Н.А. Лозинг "Квантово-кинетическая теория фотолюминесценции в приложении к описанию ансамблей примесных центров в твердых средах с использованием метода Боголюбова-Борна-Грина-Кирквуда-Ивона" за последние пять лет

- 1) N. V. Larionov, I. M. Sokolov, and Ya. A. Fofanov, "Features of the Angular Distribution of Light Scattered by a Cold Atomic Ensemble Placed in a Static Electric Field," *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, vol. 83, no. 3, pp. 251–255, Mar. 2019.
- 2) S. E. Skipetrov and I. M. Sokolov, "Intensity of Waves Inside a Strongly Disordered Medium" *Physical Review Letters*, vol. 123, no. 23, p. 233903, December 2019.
- 3) S. E. Skipetrov and I. M. Sokolov, "Search for Anderson localization of light by cold atoms in a static electric field" *Phys Rev B*, vol. 99, no. 13, p. 134201, April 2019.
- 4) Y. A. Fofanov, I. M. Sokolov, R. Kaiser, and W. Guerin, "Subradiance in dilute atomic ensembles: Role of pairs and multiple scattering," *Phys Rev A*, vol. 104, no. 2, p. 023705, Aug. 2021.
- 5) S. E. Skipetrov and I. M. Sokolov, "Transport of light through a dense ensemble of cold atoms in a static electric field," *Phys Rev A*, vol. 100, no. 1, p. 013821, Jul. 2019.
- 6) I. M. Sokolov and W. Guerin, "Comparison of three approaches to light scattering by dilute cold atomic ensembles," *Journal of the Optical Society of America B*, vol. 36, no. 8, p. 2030, Aug. 2019.
- 7) A. S. Kuraptsev and I. M. Sokolov, "Many-body cooperative effects in an ensemble of pointlike impurity centers near a charged conductive surface," *Phys Rev A*, vol. 100, no. 6, p. 063836, Dec. 2019.
- 8) A. S. Kuraptsev and I. M. Sokolov, "Influence of atomic motion on the collective effects in dense and cold atomic ensembles," *Phys Rev A*, vol. 101, no. 3, p. 033602, Mar. 2020.
- 9) A. S. Kuraptsev and I. M. Sokolov, "Incomplete spontaneous decay in a waveguide caused by polarization selection," *Phys Rev A*, vol. 101, no. 5, p. 053852, May 2020.
- 10) I. M. Sokolov, "Subradiance of Cold and Dilute Atomic Ensembles Excited by Resonant Pulsed Radiation," *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, vol. 132, no. 1, pp. 56–62, Jan. 2021.

11) P. Weiss, A. Cipris, R. Kaiser, I. M. Sokolov, and W. Guerin, "Superradiance as single scattering embedded in an effective medium," *Phys Rev A*, vol. 103, no. 2, p. 023702, Feb. 2021.

12) A. S. Kuraptsev and I. M. Sokolov, "Light propagation in a random three-dimensional ensemble of point scatterers in a waveguide: Size-dependent switching between diffuse radiation transfer and Anderson localization of light," *Phys Rev A*, vol. 105, no. 6, p. 063513, Jun. 2022