

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию 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», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6 – оптика

Кандидатская диссертация Лозинг Н.А. посвящена теоретическому исследованию особенностей фотолюминесценции коллективных систем квантовых излучателей при воздействии непрерывного лазерного излучения с учетом эффектов локального поля. В работе предложен оригинальный подход, позволяющий согласованным и самодостаточным образом исследовать эволюцию атомных систем и производить расчет их оптических спектров с учетом коллективных эффектов. Предложенный метод применен к исследованию системы двух излучателей, связанных диполь-дипольным взаимодействием, и ансамбля большого числа частиц с внутренней кооперативной обратной связью и нелинейным оптическим откликом.

Актуальность исследований в данном направлении не вызывает сомнений. Взаимодействие ансамблей элементарных излучателей (атомов и молекул) с внешним полем и возникающие при этом межчастичные корреляции, включая явление квантовой запутанности, уже давно являются объектами обширных исследований в квантовой оптике и смежных областях. Однако в последние годы, в связи с интенсивным развитием экспериментальных возможностей управления одиночными квантовыми системами и размещения их в различных средах и структурах, интерес к данной тематике существенно возрос. Знания, получаемые при изучении кооперативных оптических явлений, обеспечивают более глубокое понимание фундаментальных процессов взаимодействия оптических центров между собой и с окружающей средой. Кроме того, кооперативность и квантовая запутанность, которые появляются при диполь-дипольном взаимодействии

квантовых излучателей, являются важным ресурсом для реализации схем квантовых вычислений и квантовой метрологии.

Научная и практическая значимость диссертации следует из того, что полученные в ней результаты позволяют описывать процесс фотолюминесценции малых и больших ансамблей квантовых излучателей с учетом кооперативных оптических эффектов, рассчитывать кинетику состояний системы излучателей, спектры возбуждения и испускания фотолюминесценции. Полученные в данной работе результаты могут найти применение в практических задачах по созданию запутанных состояний, что является отдельной темой в направлениях квантовых вычислений и квантовой сенсорики. Формирование субизлучательных состояний является перспективным для использования в оптических устройствах квантовой памяти. Показанная в данной работе возможность оптических пороговых явлений, обусловленных коллективными эффектами и стимулируемых изменением плотности рассеивающей среды, может быть актуальна с точки зрения разработок систем оптических переключателей и оптической логики, а также для экспериментальной проверки свойств кооперативных процессов.

Достоверность научных результатов обеспечивается использованием строгих математических методов квантовой механики и квантовой оптики, согласием частных случаев с другими теоретическими работами, а также с экспериментальными результатами, имеющимися на данный момент в литературных источниках.

Новизна проведенных исследований и полученных результатов обусловлена новизной поставленных задач. Представлен оригинальный подход к выводу основного кинетического уравнения для описания динамики взаимодействующих систем с внешним лазерным излучением и расчету спектров возбуждения и испускания фотолюминесценции. Впервые изучена динамика пары неидентичных квантовых излучателей, для которых получены уравнения, описывающие стационарные спектры излучения и возбуждения фотолюминесценции. Также впервые исследована динамика интенсивности излучения большого коллективного ансамбля оптических центров в диэлектрической среде в условиях безрезонаторной оптической

бистабильности. Полученные результаты применены для описания оригинальных и известных в научной литературе экспериментальных результатов по лазерной фотолюминесцентной спектроскопии.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и пяти приложений. Общий объем диссертации составляет 103 страницы машинописного текста, диссертация включает 28 рисунков и список цитируемой литературы из 97 наименований.

Во введении описаны суть исследования, его цель и решаемые задачи. Приведен обзор научной литературы. Сформулированы положения, выносимые на защиту. Приведен список работ автора и информация об апробации результатов.

В первой главе описан общий формализм, применяемый к исследованию фотолюминесценции примесных центров в твердых средах. Описан общий подход к построению цепочек уравнений и основные приближения, необходимые для получения замкнутых систем уравнений и выводу из них уравнений для матрицы плотности излучателей, а также уравнений, описывающих измеряемые спектроскопические величины и зависимости.

Во второй главе представлен вывод основного управляющего уравнения для эволюции во времени матрицы плотности парного излучателя. Приводятся результаты численного решения уравнений для матрицы плотности излучателей и результаты численного моделирования спектров возбуждения фотолюминесценции, спектров испускания фотолюминесценции и спектров поглощения пробного сигнала. Показывается согласие результатов численных расчетов с данными экспериментов.

Третья глава посвящена изучению свойств фотолюминесценции плотного коллективного ансамбля излучателей внутри диэлектрической среды. Произведен анализ внутренней оптической бистабильности и динамики переходных процессов при переключениях излучающей системы между ее стационарными состояниями. Продемонстрировано согласие полученных результатов с результатами оригинальных экспериментов по

лазерной фотолюминесцентной спектроскопии микрокристаллов алмаза с центрами окраски.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации.

По диссертационной работе имеются следующие **замечания**:

1. При определении спектра испускания кооперативной пары квантовых излучателей не уделено достаточного внимания фактору, определяющему пространственную диаграмму флуоресценции. Также мало или практически отсутствует обсуждение возможности экспериментального наблюдения многопиковых спектров резонансной флуоресценции и поглощения пробного сигнала, что контрастирует с другими результатами, которые подкреплены литературными данными.
2. При описании безрезонаторной бистабильности, несмотря на то, что использовалась простейшая модель двухуровневого излучателя, было бы уместным привести результаты исследования на устойчивость полученных зависимостей стационарных населенностей.
3. В тексте диссертации присутствуют опечатки, а также некоторая несогласованность обозначений. Например, символом I обозначена полная интенсивность излучения на стр. 40, а также величина, определяющая энергию фотонной моды f на стр. 48, что затрудняет понимание текста. На рис. 3.2 линии для разных случаев различаются только цветом, что затрудняет восприятие результатов при монохромной печати.

Тем не менее, эти замечания не носят принципиального характера и не снижают научной значимости работы. Диссертация представляет собой цельное и законченное научное исследование, содержание которого соответствует целям работы и названию диссертации. Все защищаемые научные положения и выводы хорошо обоснованы. Работа характеризуется необходимой новизной и достоверностью полученных результатов. По теме диссертации опубликовано 4 работы в ведущих рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК, а полученные результаты неоднократно докладывались на международных и всероссийских конференциях. Автореферат диссертации правильно и полно отражает ее содержание.

На основании вышесказанного считаю, что диссертационное исследование Лозинг Н.А. «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:

Калачев Алексей Алексеевич, доктор физико-математических наук по специальности 01.04.05 – оптика, доцент по специальности 01.04.05 – оптика, член-корреспондент РАН, директор Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук».

Эл. почта: a.kalachev@knc.ru, раб. тел. (843)2319000.



/Калачев А.А./

28.02.2023

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук».

Адрес: 420111, Казань, ул. Лобачевского, 2/31.

Список публикаций

официального оппонента А.А. Калачева 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. Kukharchyk N, Sholokhov D, Morozov O, Korableva SL, Cole JH, Kalachev AA, Optical vector network analysis of ultranarrow transitions in $166\text{Er}^{3+}:\text{7LiYF}_4$ crystal. *Opt Lett*. 2018 Feb 15;43(4):935.
2. Kukharchyk N, Sholokhov D, Morozov O, Korableva SL, Kalachev AA, Bushev PA. Optical coherence of $166\text{Er}:\text{7LiYF}_4$ crystal below 1 K. *New J Phys*. 2018 Feb 19;20(2):023044.
3. Akhmedzhanov R, Gushchin L, Nizov N, Nizov V, Sobgayda D, Zelensky I, Kalachev A, Electromagnetically induced transparency in an isotopically purified $\text{Nd}^{3+}:\text{YLiF}_4$ crystal. *Phys Rev B*. 2018 Jun 13;97(24):245123.
4. Chuprina IN, Perminov NS, Tarankova DY, Kalachev AA. Generating pure single-photon states via spontaneous four-wave mixing in a system of coupled microresonators. *Laser Phys Lett*. 2018 Oct 1;15(10):105104.
5. Turaikhanov DA, Shkalikov A V, Kalachev AA, Imangulova IR, Losevskii NN, Razuvaeva E V., The Formation of Single-Photon IR Wave Packets with an Orbital Angular Momentum Using Vortex Phase Plates. *Opt Spectrosc*. 2019 Jan 6;126(1):25–28.
6. Chuprina IN, Kalachev AA. Generating frequency-bin qubits via spontaneous four-wave mixing in a photonic molecule. *Phys Rev A*. 2019 Oct 31;100(4):043843.
7. Turaykhanov DA, Akatev DO, Latypov IZ, Shkalikov A v., Kalachev AA. Preparing States of Single-Photon Superposition in the Basis of Laguerre–Gauss Modes with Spontaneous Parametric Scattering. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2020 Mar 13;84(3):304–7.
8. Andrianov SN, Kalachev AA, Shindyaev OP, Shkalikov A v. A Quantum Control NOT Gate Based on Four-Wave Mixing in a Cavity for Photonic Qubits with Orbital Angular Momentum. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2020 Mar 13;84(3):299–303.
9. Shukhin AA, Keloth J, Hakuta K, Kalachev AA. Heralded single-photon and correlated-photon-pair generation via spontaneous four-wave mixing in tapered optical fibers. *Phys Rev A*. 2020 May 11;101(5):053822.
10. Turaykhanov DA, Akat'ev DO, Vasiliev A V., Ablayev FM, Kalachev AA. Quantum hashing via single-photon states with orbital angular momentum. *Phys Rev A*. 2021 Nov 11;104(5):052606.

11. Akat'ev DO, Vasiliev A V, Shafeev NM, Ablayev FM, Kalachev AA. Multiqudit quantum hashing and its implementation based on orbital angular momentum encoding. *Laser Phys Lett*. 2022 Dec 1;19(12):125205.
12. Berezhnoi AD, Zakirov AI, Kalachev AA. Quantum memory based on SiV-centers in nanodiamonds. *Laser Phys Lett*. 2022 Dec 1;19(12):125206.
13. Akat'ev DO, Kalachev AA. Optical parametric oscillator with quantum memory for quantum repeaters. *Laser Phys*. 2023 Jan 1;33(1):015202.
14. Akhmedzhanov RA, Gushchin LA, Kalachev AA, Nizov NA, Nizov VA, Sobgayda DA, Memory for polarization state of light based on atomic frequency comb in a $^{153}\text{Eu}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$ crystal. *Laser Phys Lett*. 2023 Jan 1;20(1):015204.