

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физический институт им. П. Н. Лебедева
Российской академии наук

На правах рукописи

ЗАБКОВ Илья Васильевич

**ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОДНОМЕРНЫХ И ДВУМЕРНЫХ
ПЛАЗМОННЫХ НАНОСТРУКТУР**

Специальность 01.04.21 – Лазерная физика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физическом институте им. П. Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН).

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
Климов Василий Васильевич
(Физический институт им. П.Н. Лебедева
Российской академии наук)

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
Сарычев Андрей Карлович
(Институт теоретической и прикладной
электродинамики Российской академии наук,
главный научный сотрудник)
кандидат физико-математических наук,
Владимирова Юлия Викторовна
(Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова, научный сотрудник)

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт спектроскопии
Российской академии наук (ИСАН)

Защита диссертации состоится 9 октября 2017 года в 12:00 часов на заседании диссертационного совета Д 002.023.03 при ФИАН, расположенном по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский проспект, 53.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФИАН и на сайте www.lebedev.ru

Автореферат разослан «___» _____ 2017 года

Ученый секретарь диссертационного совета Д 002.023.03
доктор физико-математических наук

Золотько А. С.

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Активное развитие технологий привело к существенному прогрессу в изготовлении наноразмерных структур, а также к развитию методов работы с ними. В связи с этим актуальной задачей современной электродинамики является разработка методов эффективного управления электромагнитным излучением с помощью таких структур.

Важной является задача изучения влияния нанокружения на излучение квантовых источников света (атомы, молекулы, квантовые точки, центры окраски в кристаллах и пр. – далее двухуровневые системы), в частности, на характеристики их спонтанного распада [1]. Изменение параметров спонтанного излучения приводит к изменению флюоресценции молекул, что находит широкое применение в биотехнологиях и медицине [2,3]. Среди возможных приложений можно отметить создание ярких маркеров для задач флюоресцентной спектроскопии: иммуноферментного анализа, иммуногистохимического исследования [4], ДНК-ДНК гибридизации [5] и др. Модификация спонтанного распада является критически важным эффектом для создания миниатюрных источников излучения: лазеров, светоизлучающих диодов [6], а также источников одиночных фотонов [7]. Область применения последних включает в себя построение сверхчувствительных детекторов электромагнитного поля [8], создание квантового генератора случайных чисел [9], а также создание устройств для обработки и передачи квантовой информации (квантовые компьютеры, квантовая телепортация) [10].

Модификация характеристик спонтанного распада: его скорости, диаграммы направленности излучения и др., – происходит за счет взаимодействия излучаемой электромагнитной волны с окружением [11,12]. При этом источник излучения взаимодействует с собственными модами системы, вблизи которой он расположен. В качестве собственных мод могут выступать поверхностные плазмоны, возникающие на границе металлического и диэлектрического слоев [13], объемные плазмонные колебания, возникающие в частицах с конечным объемом [14], оптическое таммовское состояние в гибридных металло-диэлектрических структурах [15], моды с большим волновым вектором ($high-k$) в материалах с гиперболическим законом дисперсии

[16], моды шепчущей галереи в диэлектрических структурах [17] и др. Из вышеперечисленного следует, что развитие численных и аналитических методов исследования влияния нанокружения на излучение двухуровневых систем, а также поиск новых систем для эффективного управления их свойствами является **актуальной** задачей.

Другой важной задачей современной оптики является разработка и создание компактных устройств для управления поляризационными свойствами света. В основе стандартных методов управления поляризацией лежит эффект двойного лучепреломления в кристаллах, приводящий к фазовой задержке между двумя ортогональными компонентами электромагнитной волны. Поляризация изменяется непрерывно по мере распространения света, и устройства, работающие на этом принципе, являются относительно большими, поэтому сложно интегрируемы с современной компонентной базой. Использование метаматериалов [18] и метаповерхностей [19], состоящих из резонансных элементов размером меньше длины волны, является привлекательной альтернативой. Потенциальными областями применения являются разработка и создание жидкокристаллических дисплеев [20], проекторов [21], оптических носителей информации (DVD и Blue-Ray) [22], а также оптические вычисления [23].

Циркулярный дихроизм (ЦД) – это различное поглощение средой электромагнитных волн с правой и левой круговыми поляризациями. ЦД-спектроскопия является важным инструментом исследования киральных молекул, по-разному взаимодействующих с волнами разной поляризации. Так как большинство органических молекул являются киральными, ЦД-спектроскопия активно применяется в исследованиях биологических соединений [24], анализе структуры белков и ДНК [25], конформационном анализе [26]. Стандартные ЦД-спектрометры производят серию последовательных измерений с правой и левой круговыми поляризациями [27], что реализуется с помощью сложной аппаратной части для переключения поляризации и сбора данных. Создание устройств, осуществляющих пространственное разделение света различной поляризации, может привести к существенному удешевлению метода ЦД-спектроскопии [28].

Следовательно, задача создания устройств на базе метаматериалов и метаповерхностей, осуществляющих конверсию поляризации электромагнитной волны, является **актуальной**.

Цели и задачи работы

Целью диссертационной работы является изучение оптических свойств различных плазмонных и фотонных структур и возможности их применения для эффективного управления спонтанным распадом двухуровневых систем, а также для задачи конверсии поляризации электромагнитного поля. В рамках диссертации решались следующие задачи:

1. Исследование собственных колебаний кирального нанопара и их влияния на рассеяние плоской электромагнитной волны и излучение киральной молекулы.
2. Исследование оптических свойств димеров с распределенной компенсацией потерь, возбуждаемых двухуровневой системой.
3. Исследование собственных колебаний линейного кластера металлических наночастиц, и их влияния на спонтанный распад двухуровневых систем.
4. Исследование конверсии поляризации периодической решеткой киральных отверстий в металлической пленке с периодом, большим длины волны.

Научная новизна

1. Впервые получено аналитическое решение, описывающее собственные колебания бесконечного линейного кластера металлических наночастиц в квазистатическом приближении. Показано, что при небольшом расстоянии между сферами в системе возникает новый тип собственных колебаний.
2. Разработан подход к решению задачи взаимодействия излучения одиночного диполя, расположенного вблизи пространственно периодических систем. Решена задача о распаде электрического диполя, расположенного вблизи бесконечного линейного кластера металлических наночастиц.
3. Разработан подход к численному моделированию задач рассеяния электромагнитных волн объектами произвольной формы, сделанными из кирального материала. Исследован вопрос влияния кирального шара на

диаграмму излучения и скорость распада киральной молекулы. Показано существенное влияние шара на эти параметры.

4. Получено аналитическое решение, описывающее собственные плазмонные колебания двухмерного димера с распределенной компенсацией потерь. Показано, что помимо известных решений, обладающих РТ-симметрией, существуют моды (LCS-моды), позволяющие достичь полной компенсации потерь при меньшем, чем в случае с РТ, усилении в активной частице. Показано, что аналогичные моды существуют в системе, состоящей из двух шаров.
5. Показано, что периодическая решетка киральных отверстий в металлической пленке, имеющая период больше длины волны, позволяет добиться эффективной конверсии поляризации света в ненулевых дифракционных порядках.

Достоверность результатов

Достоверность результатов, представленных в диссертации, подтверждается совпадением аналитических результатов с результатами численного моделирования, докладами на международных конференциях и публикациями в ведущих мировых научных журналах. Правильность используемых подходов для численного моделирования подтверждается совпадением численных результатов с экспериментальными для задачи рассеяния плоской волны на периодической решетке диэлектрических шаров [29].

Теоретическая и практическая значимость работы

Результаты данной диссертационной работы посвящены актуальным научным проблемам, и все они представляют теоретическую ценность. Кроме того, эти проблемы имеют перспективные научные применения.

Среди систем с распределенной компенсацией потерь преимущественно исследуются РТ-симметричные – в которых мнимые части показателей преломления активной и пассивной частей равны по модулю. Из-за существующих ограничений на достижимый коэффициент усиления активной среды (определяющий мнимую часть показателя преломления) чаще всего для реализации таких систем используются диэлектрические структуры, имеющие низкие оптические потери и размеры от единиц до десятков микрон.

Обнаруженные моды нового типа (LCS-моды) позволяют добиться полной компенсации потерь при накачках в активной среде, существенно меньших, чем в PT-случае. Они могут быть использованы для построения систем, по свойствам похожим на PT-симметричные системы, за счет применения плазмонных материалов. Фундаментальный интерес к исследованию этих систем связан, во-первых, с их необычными свойствами, например, нарушением PT-симметрии и осцилляциями энергии [42], а во-вторых, с их схожестью с квантовомеханическими системами, имеющими PT-симметричный гамильтониан [43]. Из возможных практических приложений можно отметить создание одномодовых лазеров для нового поколения оптоэлектронных устройств [44] и сверхчувствительных лазерных гироскопов [45]. Значительное увеличение радиационной скорости спонтанного распада двухуровневой системы за счет PT и LCS-мод может быть использовано для создания сверхбыстрых источников одиночных фотонов [11], которые могут быть использованы в устройствах передачи и обработки квантовой информации [15–17]. Кроме того, все полученные аналитические выражения для собственных плазмонных колебаний двух- и трехмерных димеров представляют академическую ценность.

Эффект различия скоростей спонтанного распада биологических молекул различной киральности, расположенных вблизи киральных структур, может быть использован для оптического разделения рацемических смесей [46–48]. Это является актуальной задачей современной фармацевтики, так как часто в процессе синтеза медикаментов образуются молекулы обеих киральностей, и необходимо проводить фильтрацию. Ключевым элементом в такой схеме разделения является реакционная камера, содержащая киральные частицы. Рацемическую смесь энантиомеров помещают в камеру и молекулы переводят в возбужденное состояние, например, фотовозбуждением. Из-за наличия киральных частиц один тип оптически активных энантиомеров излучает эффективно и быстро переходит в основное состояние, в то время как оставшаяся часть молекул одной киральности может быть ионизирована резонансным полем и в результате этого удалена из камеры. Таким образом требуемый чистый энантиомер останется в камере. В работах [46–48] аналитические выражения были получены для скоростей распада киральной молекулы вблизи одного и двух киральных шаров. Однако для реальных применений необходимо

рассматривать киральные структуры сложной формы, поэтому разработанный автором численный метод (позволяющий работать с киральными частицами произвольной формы) может быть использован для более детальной проработки механизма оптического разделения киральных молекул. Помимо этого, ценность представляет задача изучения собственных колебаний кирального шара и их влияния на параметры излучения киральной молекулы: скорость спонтанного распада и диаграмму направленности излучения.

Исследование линейных кластеров частиц интересно как с практической точки зрения – для использования их в качестве плазмонных волноводов или разветвителей [49], так и с фундаментальной – наблюдаются качественные изменения спектра по сравнению со спектрами частиц конечного объема. Несмотря на большой интерес к таким системам, основной используемой моделью для их описания остается дипольная, которая имеет очень ограниченную область применения. В связи с этим найденное аналитическое решение задачи на собственные моды линейного кластера шаров с учетом всех мультиполей имеет академическую ценность. Обнаруженные моды с сильной локализацией поля в зазоре между шарами обладают меньшими потерями по сравнению с дипольными модами, и поэтому более перспективны для приложений передачи информации. Кроме того, разработанный метод решения задачи о возбуждении периодической системы одиночными диполями является значительным вкладом в инструментарий теоретических исследований. Обнаруженное существенное увеличение скорости спонтанного распада двухуровневой системы, расположенной вблизи линейного кластера, может быть использовано для повышения эффективности флюоресценции молекул, что является важной задачей для множества биологических и медицинских применений [2].

В отличие от систем, в которых возбуждается только главный дифракционный порядок, рассматриваемая в диссертации система (периодическая решетка киральных отверстий с периодом, большим длины волны) позволяет управлять поляризацией в нескольких пространственных каналах. Это может найти применение в задачах ЦД-спектроскопии [41], а также для создания поляризационных светоделителей (polarized beam splitter) [50] и спектральных и поляризационных фильтров [51].

Положения, выносимые на защиту

1. Скорость распада двухуровневой системы может быть существенным образом увеличена за счет взаимодействия её излучения с линейным кластером металлических наночастиц.
2. В бесконечном линейном кластере металлических наночастиц существуют собственные моды с сильной локализацией поля в зазорах между частицами.
3. Взаимодействие излучения киральной молекулы с наночастицей, состоящим из кирального материала, приводит к увеличению скорости спонтанного распада, а также к качественному изменению диаграммы направленности излучения.
4. В системе с распределенной компенсацией потерь, состоящей из двух металлических частиц, одна из которых усиливает электромагнитное излучение, помимо известных РТ-симметричных колебаний существуют собственные колебания, для которых полная компенсация потерь достижима в случае, когда мнимая часть диэлектрической проницаемости в пассивной частице много больше коэффициента усиления в активной.
5. Система периодических киральных отверстий в металлической пленке с периодом, большим длины волны, позволяет эффективно управлять состоянием поляризации прошедшего излучения в различных дифракционных порядках.

Апробация результатов

Основные результаты работы докладывались на следующих международных конференциях:

1. 2nd Chinese-Russian Workshop / Youth Summer School on Laser Physics, Fundamental and Applied Photonics, Tianjin, China, 2012.
2. PIERS (Progress In Electromagnetics Research Symposium), Moscow, Russia, 2012.
3. ICONO/LAT: 2013, Moscow, Russia, 2013.
4. COMSOL Conference 2013 Rotterdam, Netherlands, 2013.
5. COMSOL Conference 2014 Cambridge, England, 2014.
6. XII Международная конференция по наноструктурированным материалам NANO 2014, Москва, Россия, 2014.
7. Quantum Plasmonics, Benasque, Spain, 2015.

8. 10th International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics – Metamaterials 2016, Chania, Greece, 2016.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 4 статьи в ведущих рецензируемых научных журналах, индексируемых в базе данных Web of Science.

Личный вклад соискателя

Все изложенные в диссертации оригинальные результаты получены лично автором, либо при его непосредственном участии. Автор принимал непосредственное участие в выборе объектов исследования, постановке задач, аналитическом решении, численном моделировании и обсуждении полученных результатов. Непосредственно автором были разработаны методы численного моделирования киральных структур, расчета возбуждения периодической системы одиночным точечным источником.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 160 наименований. Общий объем 169 страниц, в том числе 69 рисунков.

Краткое содержание работы

Во **Введении** обоснована актуальность выбранной темы, показаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, определены цели и сформулированы положения, выносимые на защиту.

Глава 1 «Обзор литературы» посвящена обзору литературы по теме работы.

В **разделе 1.1** излагается история открытия киральности и создания искусственных киральных материалов.

В **разделе 1.2** приведены материальные уравнения Друде-Борна-Федорова, используемые для описания киральных сред, а также кратко описан метод решения уравнений Максвелла с этими материальными уравнениями, предложенный Бореном.

Раздел 1.3 посвящен эффекту Парселла и краткому выводу выражений для модификации скорости спонтанного распада двухуровневой системы в рамках квантовой и классической электродинамики. Показано, что оба подхода дают одинаковый результат. Обсуждаются основные работы, посвященные исследованию распада двухуровневой системы вблизи киральных структур.

В **разделе 1.4** приведен обзор экспериментальных работ, посвященных управлению поляризацией света с помощью метаматериалов (периодических решеток наноструктур) и метаповерхностей. Обсуждаются некоторые подходы к характеристике поляризации света: матрица Джонса и поляризационный эллипс.

В **разделе 1.5** рассматриваются системы с распределенной компенсацией потерь, имеющие PT-симметрию. При этом система называется PT симметричной если её диэлектрическая проницаемость описывается выражением $\varepsilon(x, y, z) = \varepsilon^*(x, y, -z)$. С помощью теории взаимодействующих мод (coupled mode theory) показываются основные свойства таких систем: нарушение PT симметрии (PT-symmetry breaking) и динамические осцилляции энергии (dynamic power oscillations). Далее обсуждаются экспериментальные работы, в которых наблюдались эти эффекты.

Раздел 1.6 посвящен обзору основных работ по исследованию собственных мод линейных кластеров плазмонных наночастиц. Подробно рассматривается дипольная модель без и с учетом запаздывания.

В **Главе 2** «Оптические свойства кирального наноразмерного шара» исследуются собственные моды киральной сферической частицы и их влияние на взаимодействие шара с плоской волной и с излучением киральной молекулы.

В **разделе 2.1** приведено краткое описание структуры главы.

В **разделе 2.2** описывается разработанный подход к численному моделированию структур произвольной формы, сделанных из кирального материала. Задача решается методом конечных элементов с помощью программы Comsol. В разделе описаны изменения, которые нужно внести в программу для того, чтобы можно было рассматривать материалы, описываемые материальными уравнениями Друде-Борна-Федорова.

В **разделе 2.3** решена задача на собственные колебания кирального шара. Под собственными колебаниями подразумевается ненулевое решение уравнений

Максвелла без внешних источников. Получены аналитические выражения для дисперсионного уравнения, а также для пространственного распределения полей собственных мод. Показано, что увеличение параметра киральности приводит к смещению резонансов в красную область и к увеличению добротности мод.

В разделе 2.4 исследуется рассеяние плоской волны на киральном шаре. Исследуется зависимость эффективности экстинкции шара от параметра киральности для разных поляризаций падающей волны: левой и правой круговых и линейной. Всем обнаруженным резонансам поставлены в соответствие собственные моды, найденные аналитически. В разделе показано, что результаты, полученные с помощью численного моделирования, хорошо совпадают с аналитическими результатами из работы [30], что является подтверждением правильности проводимых численных расчетов.

Раздел 2.5 посвящен изучению влияния кирального шара на излучение киральной молекулы. Киральная молекула представляется как суперпозиция электрического и магнитного дипольных моментов. На Рис. 1 показана зависимость полной скорости распада молекулы от безразмерного параметра киральности шара χ для четырех различных ориентаций дипольных моментов.

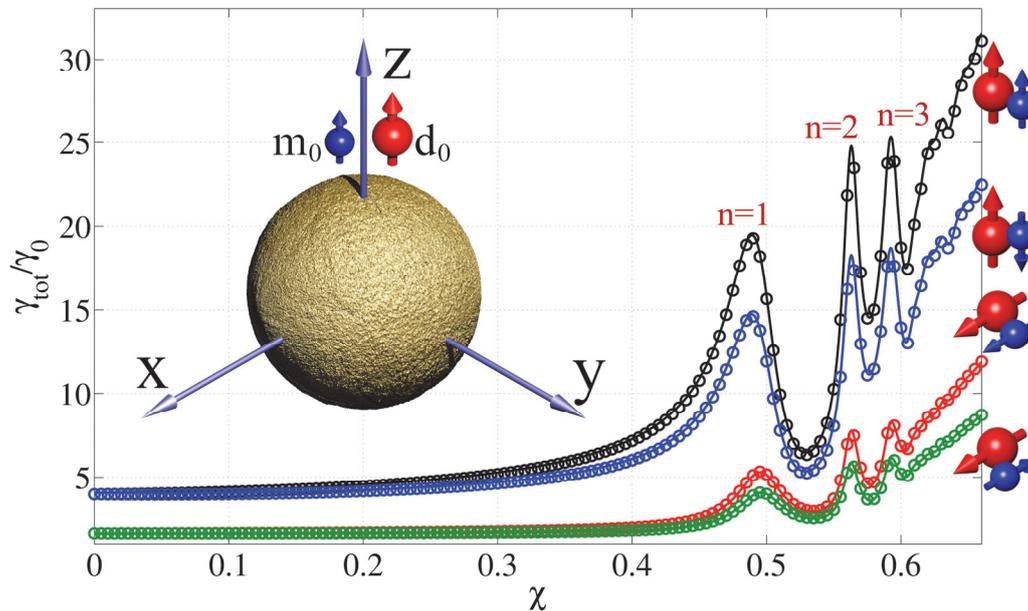


Рис. 1 Полная скорость распада киральной молекулы, расположенной рядом с киральным шаром, в зависимости от параметра киральности.

Из Рис. 1 видно, что молекулы, имеющие различную киральность (разная взаимная ориентация электрического и магнитного диполей, например, черная и

синяя линии), имеют разную скорость распада. Также было показано, что для различных резонансов из Рис. 1 имеется различная диаграмма направленности излучения киральной молекулы – см. Рис. 2.

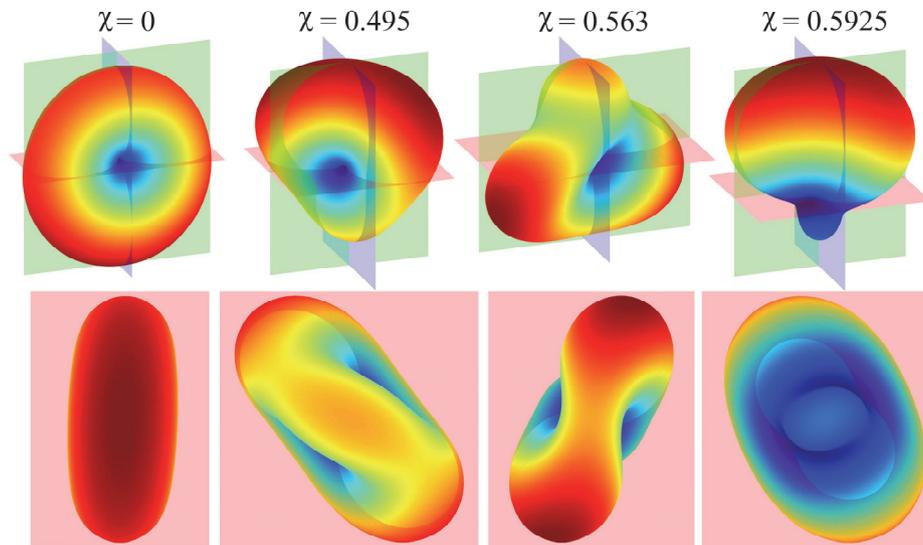


Рис. 2 Диаграмма направленности излучения киральной молекулы, ориентированной поперек оси z и расположенной вблизи кирального шара, для четырех значений параметра киральности χ . Каждая диаграмма изображена в двух перспективах. Цветные прозрачные плоскости соответствуют координатным плоскостям: xy – красная, xz – голубая, yz – зеленая.

В разделе 2.6 формулируются основные результаты, полученные в Главе 2.

Глава 3 «Оптические свойства димеров с распределенной компенсацией потерь» посвящена изучению локализованных колебаний в димерах, состоящих из одной пассивной и одной активной частиц. Геометрия задачи приведена на Рис. 3. Диэлектрические проницаемости активной и пассивной частиц равны ε_G и ε_L соответственно.

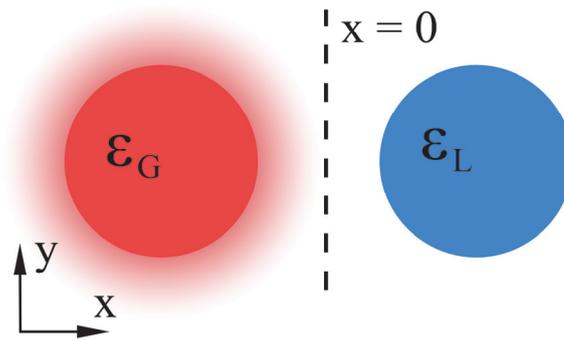


Рис. 3 Геометрия задачи: димер, состоящий из двух частиц, одна из которых является активной и компенсирует потери в другой, пассивной частице.

В разделе 3.1 описывается структура главы.

В разделе 3.2 исследуются собственные колебания двумерного димера в квазистатическом приближении. Получено аналитическое выражение для дисперсионного уравнения. Показано, что это уравнение имеет два типа решений. Первый тип соответствует известным РТ-симметричным решениям и требует равенства мнимых частей диэлектрических проницаемостей частиц. Второй тип (LCS-моды) может существовать и при значительной разнице мнимых частей диэлектрических проницаемостей активной и пассивной частиц. Дисперсионные кривые для этих двух типов собственных мод приведены на Рис. 10.

Необычная особенность LCS мод (чем больше ε_L'' , тем меньше должно быть ε_G'') становится понятной, если посмотреть на структуру распределения потенциала Рис. 5. Видно, что для выбранного случая $\varepsilon_L'' > \varepsilon_G''$ амплитуда потенциала в левой (активной) частице выше, чем в правой (пассивной). В результате асимметрия в распределении мнимой части диэлектрической проницаемости компенсируется асимметрией потенциала, и потери распределены симметрично (Рис. 6).

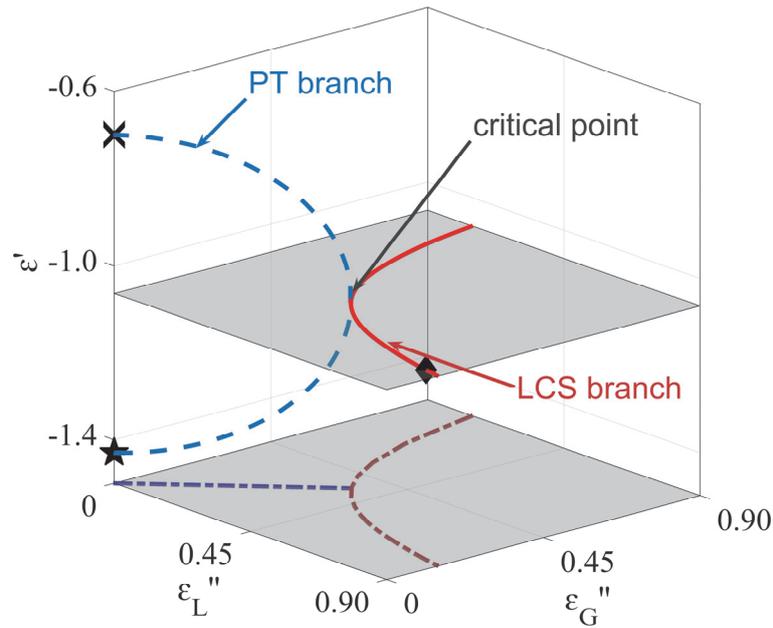


Рис. 4 Дисперсионные кривые собственных колебаний в двух частицах одинакового радиуса с диэлектрическими проницаемостями $\varepsilon_L = \varepsilon' + i\varepsilon_L''$, $\varepsilon_G = \varepsilon' - i\varepsilon_G''$, соответствующие собственным модам с $n=1$. Голубая пунктирная линия соответствует РТ-симметричным модам $\varepsilon_G'' = \varepsilon_L''$, красная сплошная линия – LCS-модам.

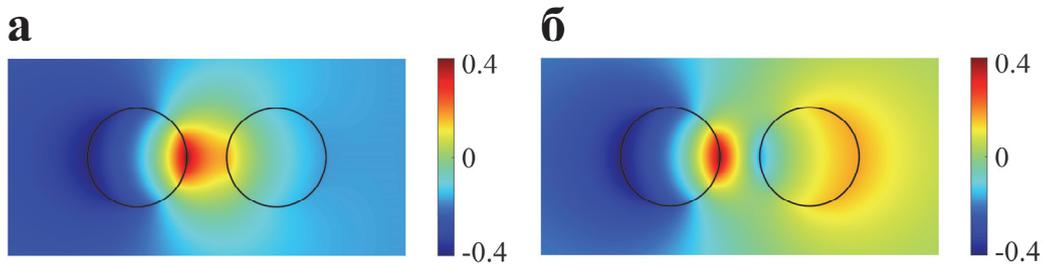


Рис. 5 Действительная (а) и мнимая (б) части потенциала LCS-моды: $\varepsilon_G = -1.06 - 0.156i$, $\varepsilon_L = -1.06 + 0.85i$. Точка с соответствующими параметрами отмечена на Рис. 4 ромбом.

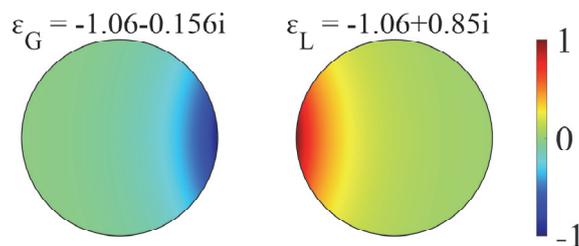


Рис. 6 Безразмерная величина джоулевых потерь в системе, состоящей из двух частиц. Параметры такие же, как и на Рис. 5.

Раздел 3.3 посвящен исследованию собственных мод трехмерного димера: системы, состоящей из двух шаров. Аналитические выражения для дисперсионного уравнения получены для РТ-симметричного случая как в дипольном приближении, так и при учете всех мультиполей. Исследована структура собственных мод в двух случаях. В первом случае, когда расстояние между шарами большое ($R_{12} / R > 2.6$, где R_{12} – расстояние между шарами, а R – их радиус) имеется набор мод, эквивалентных модам РТ симметричного двумерного димера. В случае, когда шары расположены ближе, взаимодействие мод, имеющих различную мультипольность, приводит к образованию нового типа мод, являющихся их суперпозицией.

Численно решена задача об излучении электрического диполя, расположенного между двумя шарами. При этом помимо РТ-симметричного также рассмотрен случай, когда мнимые части диэлектрических проницаемостей шаров $\varepsilon_L'', \varepsilon_G''$ могут отличаться. Обнаружены резонансы в области $\varepsilon_L'' > \varepsilon_G''$, соответствующие возбуждению собственных мод, аналогичных LCS-модам, найденным в двумерном димере.

В разделе 3.4 приводятся основные выводы по Главе 3.

В Главе 4 «Оптические свойства линейного кластера сферических наночастиц» исследуются собственные колебания бесконечного линейного кластера металлических наноразмерных шаров и их влияние на излучение диполя.

В разделе 4.1 приводится краткое введение.

В разделе 4.2 получено аналитическое решение задачи поиска собственных колебаний кластера в квазистатическом приближении с учетом всех мультиполей. Показано, что дипольная модель (когда каждая сфера представляется точечным электрическим диполем) хорошо работает только в случае, когда $d > 3a$, где d, a – расстояние между шарами и их радиус. Также показано, что при $d < 2.4a$ в спектрах возникает новый тип мод с $|\varepsilon| < 1$, где ε – резонансное значение диэлектрической проницаемости шаров.

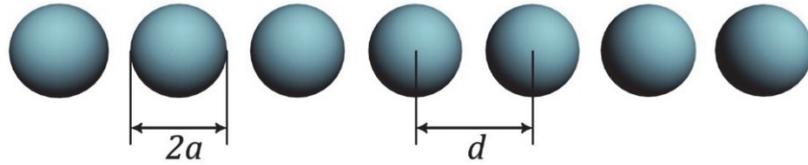


Рис. 7 Геометрия задачи: бесконечный линейный кластер металлических шаров.

Также исследована структура потенциала собственных мод и показано, что моды с $|\varepsilon| < 1$ имеют высокую локализацию потенциала в зазоре между сферами.

В разделе 4.3 найденные аналитические решения сравниваются с результатами численного моделирования полной системы уравнений Максвелла. Для этого методом конечных элементов решается задача о возбуждении кластера решеткой фазированных диполей (около каждого шара имеется возбуждающий диполь) и вычисляется изменение скорости диссипации энергии одного из диполей. Показано, что учет запаздывания приводит только к количественному изменению спектров, полученных в квазистатическом пределе в случае, когда возбуждающие диполи ориентированы вдоль оси кластера.

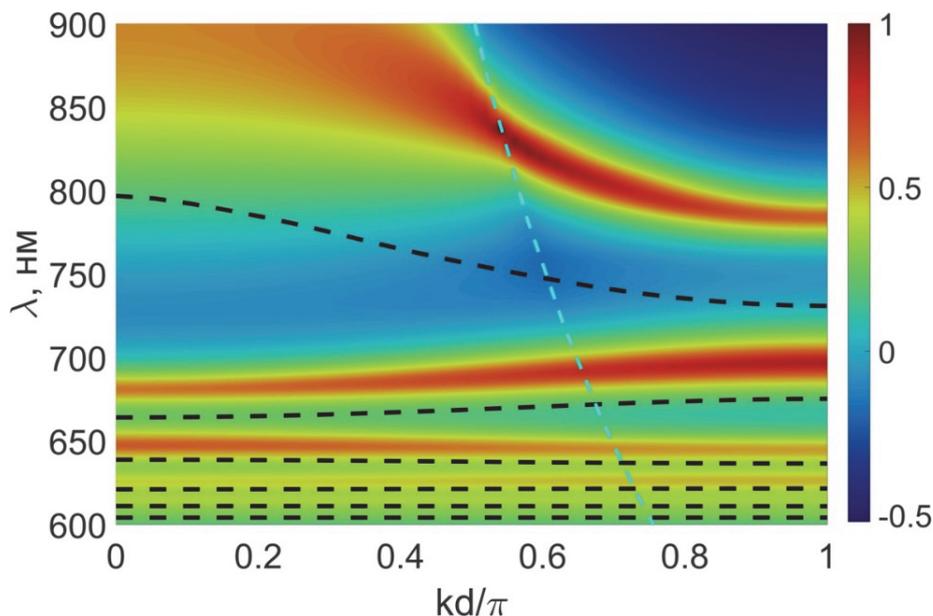


Рис. 8 Дисперсионные кривые собственных мод линейного кластера с $a = 15$, $d = 60$. Возбуждающие диполи ориентированы вдоль оси кластера. Рассматриваются серебряные шары, размещенные в кремниевой матрице. Цветом показана нормированная на единицу энергия, излучаемая диполем, который входит в периодическую решетку возбуждающих систему диполей.

Черными линиями показаны моды, полученные в квазистатическом пределе, синей линией – световой конус. По оси y отложена длина волны в свободном пространстве.

Показано, что запаздывание приводит к смещению мод в красную область, а также к уменьшению добротности мод в области вне светового конуса за счет появления радиационных потерь. Определено, что запаздывание не приводит к существенному изменению спектров в случае, когда $\lambda_H / a \approx 80$, где λ_H – длина волны в пространстве, окружающем кластер. Тогда как в случае, когда $\lambda_H / a \approx 8$, ошибка в определении спектрального положения моды в рамках квазистатической модели может составлять сотни нанометров.

В разделе 4.4 описан метод ASM (Array Scanning Method), позволяющий решить задачу о возбуждении пространственно периодической системы одиночным точечным источником. Суть этого метода заключается в том, что поле, возбуждаемое одним диполем, можно представить в виде интеграла по полям, возбуждаемым периодической решеткой диполей. Последняя задача и решалась в разделе 4.3 для нахождения собственных мод линейного кластера шаров. Правильность работы данного метода проиллюстрирована на примере модельной задачи, для которой имеется аналитическое решение: об излучении диполя вблизи металлической пленки.

В разделе 4.5 приведены результаты вычисления модификации скорости спонтанного распада электрического диполя, расположенного вблизи линейного кластера шаров. Показано, что в спектрах распада имеется высокоамплитудный резонанс, лежащий в области сгущения собственных мод кластера, имеющих высокую мультипольность (Рис. 9).

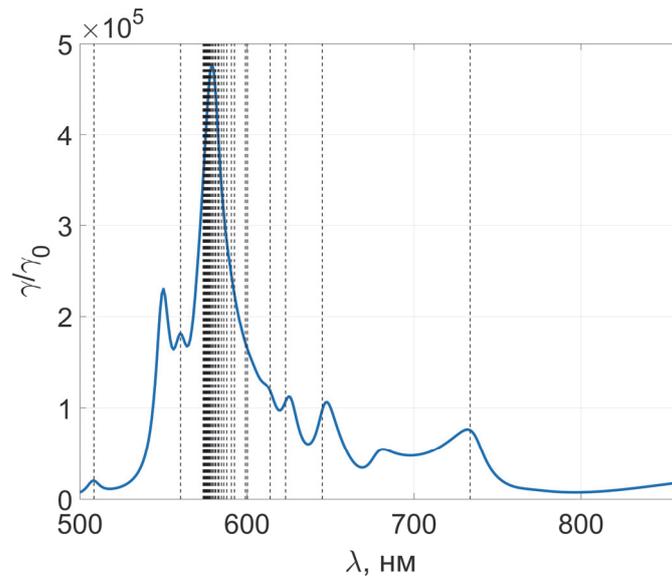


Рис. 9 Скорость распада диполя, расположенного вблизи бесконечного периодического кластера серебряных сферических частиц, размещенных в кремниевой матрице, в зависимости от длины волны излучения. Параметры кластера: $a = 5$ нм и $d = 11$ нм.

В разделе 4.6 приводится заключение к Главе 4.

Глава 5 «Оптические свойства массива киральных нанотверстий» посвящена исследованию конверсии поляризации света периодической решеткой киральных отверстий в золотой пленке толщиной 220 нм. При этом рассматривается решетка, имеющая период больше длины волны $W > \lambda$, и исследуется поляризация света во всех дифракционных порядках. Геометрия задачи представлена на Рис. 10.

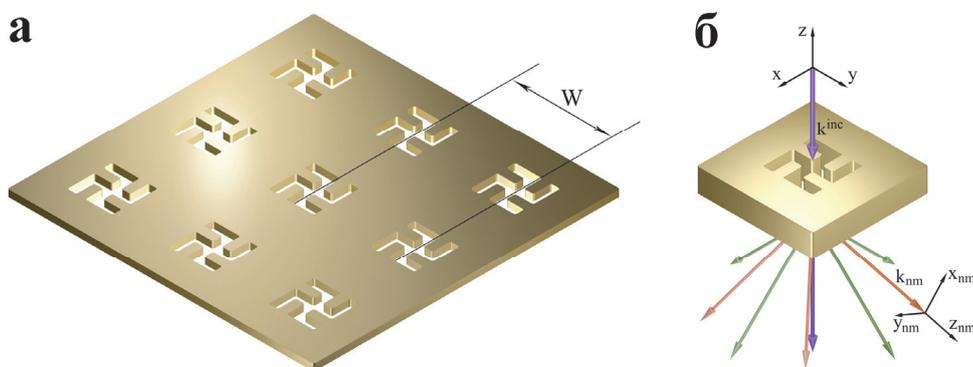


Рис. 10 Геометрия задачи. (а) Периодическая решетка киральных отверстий в золотой пленке. (б) Дифракция плоской волны (показан один период решетки).

В **раздел 5.1** приводится введение.

В **разделе 5.2** описывается метод, используемый для определения поляризации волны в каждом дифракционном порядке на основании известного распределения электрического и магнитного полей в плоскости, параллельной металлической пленке.

В **разделе 5.3** производится сравнение результатов численного моделирования с результатами эксперимента для модельной задачи: рассеяния плоской волны гексагональной решеткой шаров. Обнаружено хорошее совпадение результатов подтверждающее корректность используемых методов расчета.

В **разделе 5.4** исследуется случай, когда падающая волна имеет круговую поляризацию. При этом поляризация волны в нулевом дифракционном порядке остается неизменной, а в ненулевых порядках наблюдается сильная конверсия. Обнаружены режимы, при которых падающая волна с левой круговой поляризацией преобразуется в волну с линейной поляризацией или с поляризацией, близкой к правой круговой, в дифракционных порядках с $|n|=|m|=1$ (Рис. 11 а и б). Показано, что конверсия является более эффективной, когда закрученность падающей волны совпадает с закрученностью формы отверстия. Также показано, что обнаруженный эффект конверсии поляризации не определяется киральностью отверстий, хотя и усиливается за счет него. Аналогичный результат может быть получен и для отверстий, имеющих цилиндрическую форму.

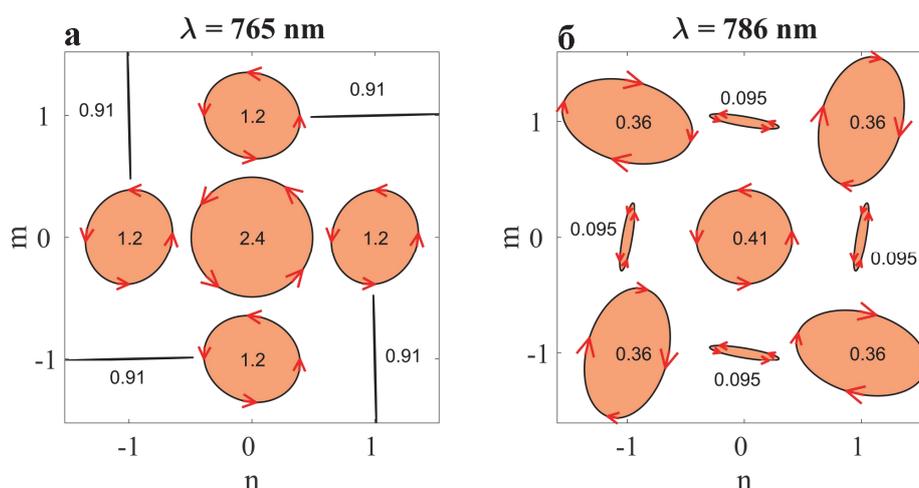


Рис. 11 Распределение состояний поляризации и коэффициентов прохождения (в процентах) – во всех возникающих дифракционных порядках при облучении

волной с левой круговой поляризацией периодической решетки левозакрученных киральных отверстий. Приведены результаты для двух длин волн 765 нм (а) и 786 нм (б). Стрелки показывают направления вращения вектора электрического поля.

В разделе 5.5 исследуется конверсия падающей волны с линейной поляризацией (Рис. 12). Показано, что эллиптичность волны в нулевом дифракционном порядке может достигать 12° , что свидетельствует о сильном циркулярном дихроизме. Также показано, что в порядках $|n|=1, m=0$ волна имеет эллиптичность 40° ($\pm 45^\circ$ соответствует волнам с круговой поляризацией).

В разделе 5.6 приводится заключение к Главе 5.

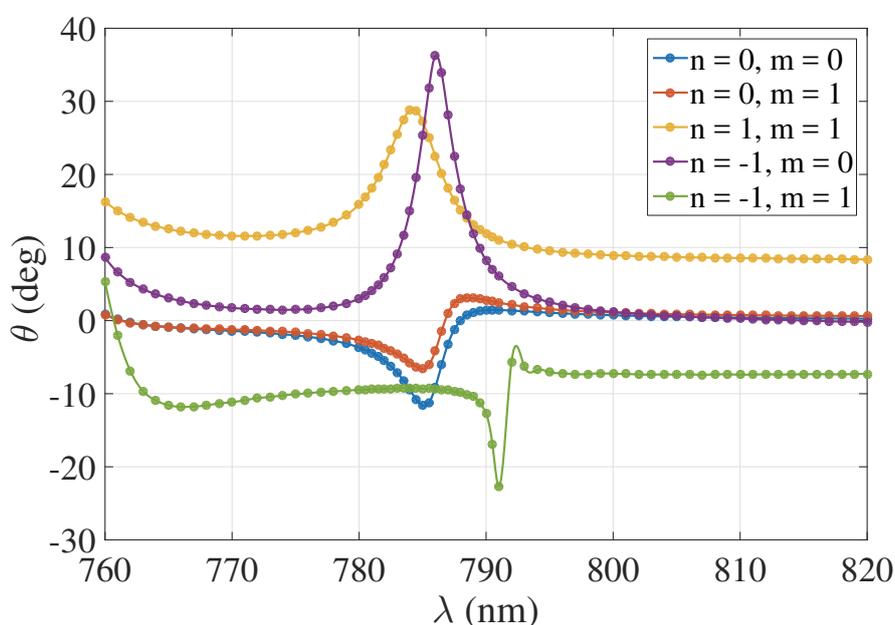


Рис. 12 Эллиптичность θ в зависимости от длины волны во всех уникальных дифракционных порядках при освещении периодической решетки отверстий в форме левозакрученных гаммадионов линейно поляризованной волной (вдоль оси OY)

В заключении приведены основные результаты работы.

Основные результаты работы

1. Получено аналитическое решение задачи о собственных колебаниях бесконечного линейного кластера шаров в квазистатическом приближении с учетом всех мультиполей. Показано, что в случае, когда расстояние между

границами шаров меньше 0.4 радиуса, в спектре возникает новый тип мод с сильной локализацией поля в зазоре между шарами. Эти собственные моды, существующие при $\varepsilon_s / \varepsilon_H \approx -1$ (где ε_s и ε_H – диэлектрические проницаемости шаров и окружающего их пространства), могут быть смещены из ультрафиолетовой области спектра в видимую для серебряных шаров помещением их в диэлектрическую матрицу с большим показателем преломления.

2. Проведен численный расчет модовой структуры линейного кластера шаров с учетом запаздывания. Показано, что в случае $\lambda_H / a \approx 80$ имеется хорошее совпадение с квазистатическими результатами, где λ_H – длина волны в среде, окружающей кластер, a – радиус шаров. Обнаружено, что по мере увеличения размера системы собственные моды смещаются в красную область. Показано, что величина смещения может достигать сотен нанометров для мод низкой мультипольности при $\lambda_H / a \approx 8$.
3. Развита метод численного расчета задач возбуждения одиночным точечным источником пространственно периодических систем. С помощью этого метода решена задача о возбуждении бесконечного линейного кластера серебряных наночастиц электрическим диполем и найдена зависимость его скорости распада от длины волны. Показано, что скорость распада может быть увеличена на несколько порядков за счет взаимодействия с большим числом спектрально близких мод, имеющих высокую мультипольность.
4. Проведено исследование собственных колебаний кирального шара и их влияния на излучение киральной молекулы. Показано, что скорость распада киральной молекулы, расположенной вблизи кирального шара, может быть увеличена в 3-5 раз в зависимости от ориентации и киральности молекулы, по сравнению со случаем аналогичного шара без киральности. Также показано, что диаграмма излучения киральной молекулы существенно изменяется за счет возбуждения собственных мод кирального шара.
5. Развита метод численного моделирования киральных сред произвольной формы. Проведена его верификация на задачах возбуждения кирального шара плоской волной и киральной молекулой. Показано различие эффективностей экстинкции шара при его возбуждении волнами с правой и левой круговыми поляризациями.

6. Получено аналитическое решение, описывающее собственные плазмонные колебания двумерного димера с распределенной компенсацией потерь. Показано существование нового типа мод, позволяющих достичь компенсации потерь при меньшем, чем для известных РТ-мод, усилении в активной частице. С помощью численного моделирования показано, что аналогичные моды существуют в системе, состоящей из двух шаров.
7. Исследована конверсия поляризации света периодической решеткой киральных отверстий в золотой пленке субмикронных толщин. Показано, что падающая волна с левой круговой поляризацией может быть преобразована в волну с поляризацией, близкой к правой круговой, в дифракционных порядках $|n|=|m|=1$. Также показано, что падающая волна с линейной поляризацией может быть преобразована в волну с поляризацией, близкой к круговой, в порядках $|n|=1, m=0$.

Список публикаций по теме диссертации

Публикации в рецензируемых научных журналах, индексируемых в базе данных Web of Science:

1. Забков И.В., Климов В.В., Трешин И.В., Глазов О.А., Плазмонные колебания в линейном кластере сферических наночастиц // Квантовая электроника. – 2011. – Vol. 41, № 8. – P. 742–747.
2. Klimov V.V., Zabkov I.V., Pavlov A.A., Guzatov D.V., Eigen oscillations of a chiral sphere and their influence on radiation of chiral molecules // Opt. Express. – 2014. – Vol. 22, № 15. – P. 18564.
3. Moufarej E., Maurin I., Zabkov I., Lalotis A., Ballin P., Klimov V., Bloch D., Infiltrating a thin or single-layer opal with an atomic vapour: Sub-Doppler signals and crystal optics // Europhysics Lett. – 2014. – Vol. 108. – P. 17008.
4. Klimov V.V., Zabkov I.V., Pavlov A.A., Shiu R.-C., Chan H.-C., Guo G.Y., Manipulation of polarization and spatial properties of light beams with chiral metafilms // Opt. Express. – 2016. – Vol. 24, № 6. – P. 6172.

Тезисы докладов в сборниках трудов конференций:

1. Забков И.В., Климов В.В., Оптические свойства линейных кластеров плазмонных наночастиц // 53-ая научная конференция МФТИ, Труды. – Москва, Россия. – 2010. - с. 13-14.
2. Klimov V.V., Guzatov D.V., Zabkov I.V., Radiation of chiral molecule near chiral nanostructure // Progress In Electromagnetics Research Symposium, Abstracts. – Moscow, Russia. – 2012 – p. 24.
3. Zabkov I.V., Klimov V.V., Comsol simulation of light interaction with chiral structures // ICONO/LAT: 2013, The International Conference on Coherent and Nonlinear Optics and The Lasers, Application and Technologies Conference, Technical Digest. – Moscow, Russia. – 2013 – IThB3.
4. Zabkov I., Klimov V., Pavlov A., Guzatov D., COMSOL Multiphysics Simulation of Chiral Molecule Interaction with Chiral Structures // COMSOL Conference Rotterdam 2013, User Presentations Online Digest (<https://www.comsol.com/2013-user-presentations>). – Rotterdam, Netherlands. – 2013.
5. Zabkov I., Klimov V., Pavlov A., Guzatov D., Purcell Effect via Numerical Simulation // COMSOL Conference Cambridge 2014, User Presentations Online Digest (<https://www.comsol.com/2014-user-presentations>). – Cambridge, England. – 2014.

Цитируемая в автореферате литература

1. Purcell E.M., Spontaneous Emission Probabilities at Radio Frequencies // Phys. Rev. – 1946. – Vol. 69. – P. 681.
2. Lakowicz J.R., Radiative Decay Engineering: Biophysical and Biomedical Applications // Anal. Biochem. – 2001. – Vol. 298, № 1. – P. 1–24.
3. Aslan K., Gryczynski I., Malicka J., Matveeva E., Lakowicz J.R., Geddes C.D., Metal-enhanced fluorescence: an emerging tool in biotechnology // Curr. Opin. Biotechnol. – 2005. – Vol. 16, № 1. – P. 55–62.
4. Lakowicz J.R., Malicka J., D’Auria S., Gryczynski I., Release of the self-quenching of fluorescence near silver metallic surfaces // Anal. Biochem. – 2003. – Vol. 320, № 1. – P. 13–20.
5. Lakowicz J.R., Malicka J., Gryczynski I., Silver particles enhance emission of fluorescent DNA oligomers. // Biotechniques. – 2003. – Vol. 34, № 1. – P. 62–

- 66, 68.
6. Painter O., Two-Dimensional Photonic Band-Gap Defect Mode Laser // *Science*. – 1999. – Vol. 284, № 5421. – P. 1819–1821.
 7. Lounis B., Orrit M., Single-photon sources // *Reports Prog. Phys.* – 2005. – Vol. 68, № 5. – P. 1129–1179.
 8. Polzik E.S., Carri J., Kimble H.J., Spectroscopy with squeezed light // *Phys. Rev. Lett.* – 1992. – Vol. 68, № 20. – P. 3020–3023.
 9. Rarity J.G., Owens P.C.M., Tapster P.R., Quantum Random-number Generation and Key Sharing // *J. Mod. Opt.* – 1994. – Vol. 41, № 12. – P. 2435–2444.
 10. Michler P., A Quantum Dot Single-Photon Turnstile Device // *Science*. – 2000. – Vol. 290, № 5500. – P. 2282–2285.
 11. Климов В.В., Наноплазмоника. Москва: ФИЗМАТИЛ, – 2010. 480 p.
 12. Novotny L., Hecht B., Principles of Nano-Optics. Cambridge University Press, – 2006. 558 p.
 13. Lakowicz J.R., Radiative decay engineering 3. Surface plasmon-coupled directional emission // *Anal. Biochem.* – 2004. – Vol. 324, № 2. – P. 153–169.
 14. Lakowicz J.R., Malicka J., Gryczynski I., Gryczynski Z., Geddes C.D., Radiative decay engineering : the role of photonic mode density in biotechnology // *J. Phys. D. Appl. Phys.* – 2003. – Vol. 36. – P. R240–R249.
 15. Badugu R., Descrovi E., Lakowicz J.R., Radiative decay engineering 7: Tamm state-coupled emission using a hybrid plasmonic–photonic structure // *Anal. Biochem. Elsevier Inc.*, – 2014. – Vol. 445. – P. 1–13.
 16. Jacob Z., Smolyaninov I.I., Narimanov E.E., Broadband Purcell effect: Radiative decay engineering with metamaterials: Optics // *Appl. Phys. Lett.* – 2012. – Vol. 100, № 18. – P. 181105.
 17. Wolters J., Schell A.W., Kewes G., Nüsse N., Schoengen M., Döscher H., Hannappel T., Löchel B., Barth M., Benson O., Enhancement of the zero phonon line emission from a single nitrogen vacancy center in a nanodiamond via coupling to a photonic crystal cavity // *Appl. Phys. Lett.* – 2010. – Vol. 97, № 14. – P. 141108.
 18. Gorkunov M.V., Ezhov A.A., Artemov V.V., Rogov O.Y., Yudin S.G., Extreme optical activity and circular dichroism of chiral metal hole arrays // *Appl. Phys. Lett.* – 2014. – Vol. 104, № 22. – P. 221102.
 19. Zhao Y., Belkin M.A., Alù A., Twisted optical metamaterials for planarized

- ultrathin broadband circular polarizers // *Nat. Commun.* – 2012. – Vol. 3. – P. 870.
20. Bahadur B., *Liquid Crystal Displays* // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* – 1984. – Vol. 109, № 1. – P. 3–93.
 21. Brennesholtz M., Stupp E., *Projection Displays*. Wiley, – 2008. 450 p.
 22. Wang J.J., Deng X., Liu F., Chen L., Nikolov A., Liu X., Deng J., Sciortino P., High performance 100 mm-in-diameter true zero-order waveplates fabricated by imprint lithography // *J. Vac. Sci. Technol. B Microelectron. Nanom. Struct.* – 2005. – Vol. 23, № 6. – P. 2950.
 23. Calabretta N., Liu Y., Huijskens F.M., Hill M.T., DeWaardt H., Khoe G.D., Dorren H.J.S., Optical Signal Processing Based on Self-Induced Polarization Rotation in a Semiconductor Optical Amplifier // *J. Light. Technol.* – 2004. – Vol. 22, № 2. – P. 372–381.
 24. Berova N., Nakanishi K., Woody R.W., *Circular Dichroism: Principles and Applications*, 2nd Edition / ed. Robert W. Woody, Nina Berova. Wiley-VCH, – 2000. 912 p.
 25. Whitmore L., Wallace B.A., *Protein secondary structure analyses from circular dichroism spectroscopy: Methods and reference databases* // *Biopolymers.* – 2008. – Vol. 89, № 5. – P. 392–400.
 26. Freedman T.B., Cao X., Dukor R.K., Nafie L.A., Absolute configuration determination of chiral molecules in the solution state using vibrational circular dichroism // *Chirality.* – 2003. – Vol. 15, № 9. – P. 743–758.
 27. Johnson W.C., A Circular Dichroism Spectrometer for the Vacuum Ultraviolet // *Rev. Sci. Instrum.* – 1971. – Vol. 42, № 9. – P. 1283–1286.
 28. Shaltout A., Liu J., Kildishev A., Shalaev V., Photonic spin Hall effect in gap-plasmon metasurfaces for on-chip chiroptical spectroscopy // *Optica.* – 2015. – Vol. 2, № 10. – P. 860.
 29. Moufarej E., Maurin I., Zabkov I., Lalotis A., Ballin P., Klimov V., Bloch D., Infiltrating a thin or single-layer opal with an atomic vapour: Sub-Doppler signals and crystal optics // *EPL (Europhysics Lett.)*. – 2014. – Vol. 108, № 1. – P. 17008.
 30. Bohren C.F., Light scattering by an optically active sphere // *Chem. Phys. Lett.* – 1974. – Vol. 29, № 3. – P. 458–462.