

На правах рукописи

НАЛБАНДЯН Виктор Меружанович

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МОЛЕКУЛ С ПЛАЗМОН-
АКТИВИРОВАННЫМИ НАНОЧАСТИЦАМИ И ИХ
КЛАСТЕРАМИ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Специальность: 01.04.05 – Оптика

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Ульяновск 2017

Работа выполнена на кафедре радиофизики и электроники физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Оренбургский государственный университет»

Научный руководитель: Кучеренко Михаил Геннадьевич, доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Вартанян Тигран Арменакович, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики», центр "Информационные оптические технологии", главный научный сотрудник центра

Моисеев Сергей Геннадьевич, кандидат физико-математических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный университет», Научно-исследовательский институт имени С.П. Капицы, лаборатория квантовой электроники и оптоэлектроники, старший научный сотрудник лаборатории

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», г. Самара

Защита состоится 16 февраля 2018 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.278.01 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ульяновский государственный университет» по адресу: г. Ульяновск, ул. Набережная реки Свияги, д. 106, к. 1, ауд. 703.

С диссертацией и авторефератом диссертации можно ознакомиться в научной библиотеке Ульяновского государственного университета и на сайте ВУЗа <http://www.ulsu.ru>, а также с авторефератом можно ознакомиться на сайте Высшей аттестационной комиссии при Министерстве образования и науки РФ – <http://vak.ed.gov.ru>.

Автореферат разослан « » декабря 2017 г.

Отзывы на автореферат просим высылать по адресу: 432017, г. Ульяновск, ул. Л. Толстого, д. 42, УлГУ, Отдел подготовки кадров высшей квалификации.

Ученый секретарь
диссертационного совета, к.ф.-м.н.

Л.Н. Вострецова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В последнее время очень быстро растет число работ, посвященных изучению электромагнитных свойств различных плазмон-активированных наноструктур, поскольку все более отчетливо вырисовываются перспективы использования таких систем для решения целого ряда практических задач нанoeлектроники. Примерами наносистем являются однослойные и многослойные сфероидальные частицы, кластеры, образованные из таких частиц, а также цилиндрические оболочечные плазмонные наноструктуры [1]. Локальные поля, возникающие вблизи подобных структур в результате плазменных колебаний электронного газа, вызывают интерес экспериментаторов и теоретиков в связи с возможностью их использования в нанофотонике и наноэлектронике, ближнепольной микроскопии, оптоэлектронных приборах и оптических сенсорах [2]. Дальнейший прогресс в этой области невозможен без развития надлежащего теоретического описания взаимодействия атомов и молекул с плазмон-активированными наночастицами и их кластерами.

Важнейшим направлением наноиндустрии является оптическая ближнепольная микроскопия высокого разрешения SNOM (Scanning Nearfield Optical Microscopy) позволяющая применять методы оптической спектроскопии для локальных исследований нанообъектов, оказывая на них спектрально-селективное воздействие [3]. При внесении в окрестность донор-акцепторной пары, участвующей в процессе FRET (Förster resonance energy transfer), проводящего нанотела, скорость безызлучательного переноса энергии электронного возбуждения (БПЭЭВ) между молекулами может существенно измениться, поскольку металлическая наночастица (НЧ) или нанопровод выполняют функцию эффективной наноантенны [4,5]. Управляемое позиционирование наноантенны может быть использовано для увеличения скорости FRET, а вместе с ним и для повышения качества FRET-SNOM изображений. Кроме этого, широко развивается темнопольная микроскопия (DFM - dark field microscopy), в которой контраст изображения увеличивают за счет регистрации света, рассеянного только изучаемым образцом [6]. Делаются попытки изготовления оптических сенсоров из органических слоистых нанопроводов. Вблизи такого волновода образуется эванесцентная волна, которая чувствительна к малейшему изменению характеристик диэлектрической среды.

В то же время одним из перспективных методов управления эффективностью молекулярных радиационных переходов и скоростью переноса энергии может служить модуляция характеристик наноструктур с помощью внешнего магнитного поля. Этот метод позволяет изменять свойства локальных полей, возникающих вблизи системы молекула-наночастица, изменяя тем самым многие оптические свойства системы, например люминесцентные. Появились работы, в которых авторами выполнены

эксперименты по калибровке магнитного поля, на основе фотолюминесцентных спектров ионов эрбия в монокристаллах YVO_4 [7].

Нужно отметить, что в математических моделях, описывающих радиационные переходы в молекулах, находящихся вблизи проводящих наночастиц, кластеров, наноцилиндров, а также БПЭЭВ в их окрестности, не рассматривается влияние внешнего магнитного поля, которое может изменить скорость протекания этих процессов. Кроме этого, для некоторых процессов может оказаться важным учет вырожденности электронного газа металлов исследуемых нанообъектов.

Цель работы

Установление закономерностей влияния проводящих и гибридных наночастиц, различной структуры и геометрии, а также их кластеров, на радиационные переходы в молекулах вблизи поверхности наночастиц и безызлучательный перенос энергии электронного возбуждения от молекул к наночастицам и нанокластерам при наличии внешнего магнитного поля.

Для достижения этой цели были поставлены следующие **задачи**:

1. Расчет характеристик плазмонных колебаний в двухчастичных кластерах из сферических однородных или слоистых наночастиц, инициирующих радиационные переходы в молекулах и безызлучательный перенос энергии. Определение параметров поглощения света молекулами, характеристик спонтанного и вынужденного излучения молекул в ближнем поле композитных металлических наночастиц, двухчастичных кластеров и цилиндрических слоистых тел.

2. Определение скоростей поглощения, безызлучательного переноса энергии электронного возбуждения молекул к наночастицам, их кластерам и возможности модулирования этих скоростей внешним магнитным полем. Определение скорости спонтанного и вынужденного излучения молекул, инициированного плазмонными колебаниями в наночастицах, кластерах и цилиндрических проводниках во внешнем магнитном поле.

3. Расчет спектров электрической поляризуемости и сечения поглощения проводящих однородных или слоистых наночастиц и нанокластеров с учетом вырожденности электронного газа проводящих компонент.

Научная новизна работы

1. Предложена теоретическая модель с тензорным представлением динамической поляризуемости двухчастичного кластера в приближении квазитоочечных диполей. В рамках данной модели возможен учет влияния магнитного поля на компоненты тензора поляризуемости нанокластера.

2. Построена математическая модель, учитывающая влияние магнитного поля на поглощение, спонтанное и вынужденное излучение молекулы, расположенной вблизи наночастиц различной структуры, а также безызлучательный перенос энергии от молекул к наночастицам.

3. Произведен учет вырожденности электронного газа металлических и полупроводниковых частей композитов и кластеров в расчетах их спектров электрической дипольной поляризуемости и сечений поглощения света.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Предложен метод управления радиационными и безызлучательными процессами в молекулах и их комплексах внешним магнитным полем. Магнитное поле изменяет характер плазменных колебаний в проводящих наноцилиндрах, наночастицах и их кластерах, трансформируя, тем самым, спектры поляризуемости наноструктур.

2. На основе проведенных исследований появляется возможность создания наноструктурированных функциональных устройств и систем, предназначенных осуществлять локальное усиление электромагнитного поля в определенных областях пространства. Установленное влияние исследованных наноструктур на безызлучательный перенос энергии электронного возбуждения позволит повысить качество изображения ближнепольных оптических микроскопов.

3. Результаты исследований электрической поляризуемости проводящих и гибридных наночастиц с вырожденным электронным газом металлических и полупроводниковых частей композитов могут использоваться для более точной интерпретации экспериментальных спектров поглощения и рассеяния света наноструктурами.

Положения, выносимые на защиту

1. Плазменные колебания в сферических наночастицах, композитных слоистых наночастицах со структурой «ядро-оболочка», а также двухчастичных кластерах, образованных из таких частиц, оказывают существенное влияние на спонтанные и вынужденные радиационные переходы в близлежащих молекулах, равно как и на безызлучательные процессы с участием электронно-возбужденных молекул. Выражение для дипольной поляризуемости двухчастичного нанокластера имеет тензорный вид, учитывающий анизотропию такой системы.

2. Внешнее магнитное поле изменяет характер плазменных колебаний в проводящих наноцилиндрах, наночастицах и их кластерах, трансформирует спектры поляризуемости металлосодержащих наноструктур и может рассматриваться в качестве фактора управления эффективностью радиационных и безызлучательных молекулярных процессов.

3. Для корректного расчета спектров электрической поляризуемости проводящих и гибридных наночастиц, а также их кластеров необходим учет вырожденности электронного газа металлических и полупроводниковых частей композитов в широком диапазоне температур.

Апробация результатов

Апробация работы проводилась на следующих конференциях: Всероссийская научно-методическая конференция «Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры» (Оренбург.

2013 – 2015, 2017), XV Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике (Санкт-Петербург. 2013), «XX Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых» (Ижевск. 2014), VIII Международная конференция «Фундаментальные проблемы оптики» (Санкт-Петербург. 2014), Russian-Japanes conference «Chemical Physics of Molecules and Polyfunctional Materials» (Orenburg. 2014), Международная конференция по фотонике и информационной оптике (Москва. 2015, 2017), IX Международная научная конференция «Хаос и структуры в нелинейных системах. Теория и эксперимент» (Казахстан, Караганда. 2015), Международная научная конференция «Наука и образование: фундаментальные основы, технологии, инновации» (Оренбург. 2015), IX Международная конференция молодых ученых и специалистов «Оптика-2015» (Санкт-Петербург. 2015), Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов– 2016» (Москва. 2016), XXIII Международная молодежная научная школа-конференция «Современные проблемы физики и технологий» (Москва. 2016), The 4th International Symposium “Molecular Photonics” dedicated to academician A.N. Terenin, (Peterhof, St. Petersburg. 2016), The 13th Nano Bio Info Chemistry Symposium and The 8th Japanese-Russian Seminar on Chemical Physics of Molecules and Polyfunctional Materials (Hiroshima, Japan. 2016).

Степень достоверности

Достоверность представленных в диссертационной работе результатов обеспечивается достаточно высоким уровнем строгости разработанных математических моделей, использованием в экспериментах апробированных методик измерения, высокоточной цифровой аппаратуры, компьютерных методов анализа и обработки экспериментальных данных.

Личный вклад

Разработка теоретических моделей, анализ результатов и подготовка публикаций осуществлялась автором совместно с научным руководителем. Компьютерная реализация моделей, получение и обработка результатов производилась лично автором.

Участие в научных проектах

Автор входил в состав коллективов по выполнению следующих научных проектов, выполняемых в Центре лазерной и информационной биофизики ОГУ: «Разработка методов формирования упорядоченных массивов наноструктур на основе оксида алюминия для люминесцентных сенсоров кислорода» (ФЦП, ГК 16.513.11.3042), «Плазмонные эффекты трансформации энергии электронного возбуждения молекулярных систем и квантовых точек вблизи проводящих поверхностей и нанотел» (ГЗ № 2.1180.2011), «Исследование плазмонных свойств двухкомпонентных композитных наночастиц для определения ближнепольных оптических характеристик гибридных молекулярных систем» (ГЗ № 233), «Разработка гибридных экситон-плазмонных наносистем, перспективных для создания новых

устройств молекулярной электроники и фотоники» (грант РФФИ и правительства Оренбургской обл. № 14-02-97000), «Разработка метода повышения эффективности работы электрохимических солнечных ячеек на основе диоксида титана за счет внедрения в конструкцию металлических наночастиц с плазмонным резонансом» (грант РФФИ № 15-08-04132), «Плазмонная передача энергии и повышение эффективности свечения молекулярных источников на поверхности цилиндрических наноструктур» (грант РФФИ и правительства Оренбургской обл. № 16-42-560671), «Плазмонные характеристики слоистых нанокомпозитных частиц со структурой "ядро-оболочка", многочастичных кластеров и пространственных решеток на их основе» (ГЗ № 3.7758.2017/БЧ).

Лауреат премии Губернатора Оренбургской обл. для талантливой молодежи в 2014 году (Указ губернатора Оренбургской обл. № 775-ук от 12.11.2014) за работу, результаты которой были включены в диссертацию.

Публикации

Основные результаты работы опубликованы в 25 работах, включающих в себя 4 статьи в журналах из списка ВАК, 15 докладов международных и 6 докладов российских конференций.

Структура и объем работы

Работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Диссертация содержит 174 страницы текста, включая 124 рисунка. Список литературы включает 148 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследований, отражена новизна работы, ее практическая и научная значимость, сформулированы цели и задачи исследования и определены выносимые на защиту положения.

В первой главе приводится краткий литературный обзор современных представлений о взаимодействии молекул с проводящими наночастицами, нанопроводами и квантовыми точками. Подробно рассматриваются различные виды наночастиц и наноструктур, их использование в приборах наноэлектроники и нанофотоники. Кроме того произведено описание существующих представлений о зависимости этих фотопроцессов от различных параметров среды. Рассмотрены особенности процессов, протекающих с участием электронно-возбужденных молекул в наноструктурах.

Во второй главе описана методика синтеза серебряных наночастиц методом химического восстановления и приведены электронные спектры поглощения и люминесценции окрашенных коллоидных растворов этих частиц. Измерение спектров поглощения образцов производилось на спектрофотометре T70 UV/Vis. Измерения спектров люминесценции растворов красителя (эритрозин) с добавлением наночастиц серебра проводились на спектрофлуориметрической установке. Для возбуждения молекул красителя использовался твердотельный лазер с диодной накачкой АТС 53–250.

Для исследования поверхностного плазмонного резонанса методом нарушенного полного внутреннего отражения на базе гониометра была собрана автоматизированная установка с координатно-поворотным столиком. Использовались прямоугольные треугольные призмы из тяжелого флинта, на гипотенузные грани которых методом магнетронного напыления наносились нанометровые слои из разных металлов: Ag, Au, Ag/Au.

Приводится вывод тензора диэлектрической проницаемости проводящей среды, где учитывается произвольное направление вектора индукции внешнего магнитного поля относительно характерных векторов исследуемой системы.

Показано, как частота электрон-фоонных столкновений различных металлов (Ag, Au, Cu, Al) зависит от температуры.

В третьей главе исследованы плазмонные колебания в намагниченных сферических и сфероидальных наночастицах, композитных слоистых наночастицах со структурой «ядро-оболочка», а также изучено их влияние на процессы с участием электронно-возбужденных молекул.

Металлические наночастицы и нанокомпозиты в магнитном поле приобретают анизотропные свойства, вследствие чего скалярные выражения для поляризуемости преобразуются в тензорные. Так, тензор поляризуемости сплошной сферической частицы с намагниченной электронной плазмой запишется в следующем виде

$$\tilde{\alpha}(\omega | \mathbf{B}) = R^3 [\tilde{\epsilon}(\omega | \mathbf{B}) - \epsilon_m] [\tilde{\epsilon}(\omega | \mathbf{B}) + 2\epsilon_m]^{-1} \quad (1)$$

R – радиус частицы, ϵ_m – диэлектрическая проницаемость окружающей среды, $\tilde{\epsilon}(\omega | \mathbf{B})$ – частотнозависимый тензор диэлектрической проницаемости материала частицы, зависящий от вектора индукции $\mathbf{B}$ внешнего магнитного поля.

Для композитной частицы с *диэлектрической сердцевинкой и металлическим* слоем, тензор поляризуемости запишется как

$$\tilde{\alpha}(\omega | \mathbf{B}) = R^3 \left[[\tilde{\epsilon}(\omega | \mathbf{B}) - \epsilon_m] [2\tilde{\epsilon}(\omega | \mathbf{B}) + \epsilon_c] - [2\tilde{\epsilon}(\omega | \mathbf{B}) + \epsilon_m] [\tilde{\epsilon}(\omega | \mathbf{B}) - \epsilon_c] \xi^3 \right] \times \\ \times \left[[\tilde{\epsilon}(\omega | \mathbf{B}) + 2\epsilon_m] [2\tilde{\epsilon}(\omega | \mathbf{B}) + \epsilon_c] - 2[\tilde{\epsilon}(\omega | \mathbf{B}) - \epsilon_m] [\tilde{\epsilon}(\omega | \mathbf{B}) - \epsilon_c] \xi^3 \right]^{-1}, \quad (2)$$

где $\xi = \rho / R$, R – радиус частицы, ρ , ϵ_c – радиус и диэлектрическая проницаемость сердцевинки соответственно, а для частицы с *металлической сердцевинкой и диэлектрической оболочкой*:

$$\tilde{\alpha}(\omega | \mathbf{B}) = R^3 \left[[\epsilon - \epsilon_m] [2\epsilon + \tilde{\epsilon}_c(\omega | \mathbf{B})] - [2\epsilon + \epsilon_m] [\epsilon - \tilde{\epsilon}_c(\omega | \mathbf{B})] \xi^3 \right] \times \\ \times \left[[\epsilon + 2\epsilon_m] [2\epsilon + \tilde{\epsilon}_c(\omega | \mathbf{B})] - 2[\epsilon - \epsilon_m] [\epsilon - \tilde{\epsilon}_c(\omega | \mathbf{B})] \xi^3 \right]^{-1}, \quad (3)$$

$\tilde{\epsilon}_c(\omega | \mathbf{B})$ – тензор диэлектрической проницаемости сердцевинки, зависящий от магнитного поля, ϵ – константа диэлектрической проницаемости оболочки.

Тензор диэлектрической проницаемости металла в магнитном поле имеет сложную структуру и в общем случае состоит из девяти ненулевых компонент. В большинстве решенных задач рассматривался частный случай, когда вектор индукции $\mathbf{B}$ магнитного поля был направлен вдоль оси Z , являющейся естественной осью симметрии системы. В таком случае тензор выглядел следующим образом [8]

$$\vec{\varepsilon}(\omega | \mathbf{B}) = \begin{pmatrix} \varepsilon_{\perp} & ig & 0 \\ -ig & \varepsilon_{\perp} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{\parallel} \end{pmatrix}, \quad (4)$$

$$\varepsilon_{\perp} = 1 - \frac{\omega_p^2(\omega + i\gamma)}{\omega[(\omega + i\gamma)^2 - \Omega_L^2]}, \quad \varepsilon_{\parallel} = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\gamma\omega}, \quad g = \frac{\omega_p^2\Omega_L^2}{\omega[(\omega + i\gamma)^2 - \Omega_L^2]},$$

где $\omega_p = \sqrt{4\pi n_e e^2 / m}$ – ленгмюровская (плазменная) частота, γ – коэффициент диссипации, $\Omega_L = eB / mc$ – ларморовская (циклотронная) частота электрона в магнитном поле индукции B .

Одним из распространенных типов исследованных частиц, является сферический слоистый нанокомпозит, состоящий из металлического ядра, покрытого квазикристаллическим слоем из молекулярного J-агрегата. Особенность такого композита заключается в том, что в нем возникает два вида квазичастиц различной физической природы. В слое молекулярного кристалла могут генерироваться френкелевские экситоны. В металлической части композита возникают плазмоны – коллективные колебания плотности электронного газа относительно ионов металла. Для такой системы в дипольной поляризуемости (3) изменяется константа диэлектрической проницаемости ε слоя – она становится зависимой от частоты ω электромагнитного поля [9]

$$\varepsilon_{\text{exiton}}(\omega) = \varepsilon_0 - \frac{f^2}{[\omega + i\Gamma]^2 - \omega_{\text{res}}^2}. \quad (5)$$

ε_0 – высокочастотная компонента диэлектрической проницаемости, f – сила осциллятора экситонного перехода, ω_{res} – частота перехода соответствующая центру экситонной зоны J-агрегата, Γ – частота затухания экситонов для J-агрегата.

В результате проведенных расчетов впервые было обнаружено, что спектры электрической дипольной поляризуемости наночастиц различной структуры в магнитном поле подвергаются трансформации, а именно: происходит расщепление плазмонного пика на две, либо три компоненты (рис. 1).

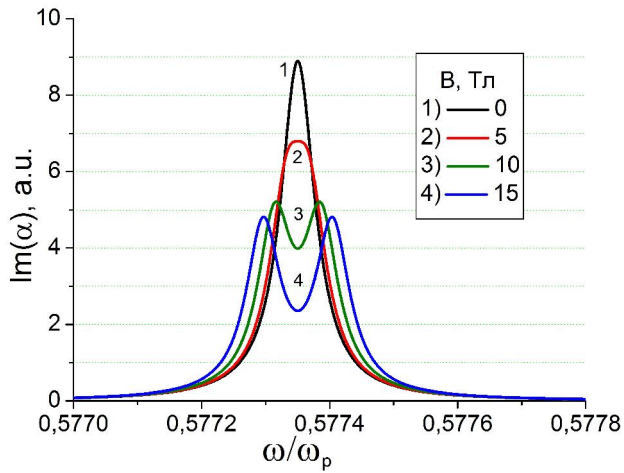


Рис. 1. Спектры мнимой части электрической поляризуемости частицы в магнитном поле индукции B .

Для объяснения экспериментально наблюдаемых изменений в электронных спектрах поглощения, а также спонтанного и вынужденного излучения окрашенных растворов с металлическими наночастицами, предложена простая теоретическая модель. При наличии внешнего магнитного поля индукции $\mathbf{B}$ скорость $w_{abs}(\omega | \mathbf{B}, \mathbf{r})$ поглощения фотонов молекулой с вектором $\mathbf{p}$ электронного дипольного момента перехода, находящейся на малом (по сравнению с длиной волны излучения) расстоянии r от центра сферической наночастицы с поляризуемостью $\tilde{\alpha}(\omega | \mathbf{B})$, определяется выражением

$$w_{abs}(\omega | \mathbf{B}, \mathbf{r}) = \frac{2}{\hbar^2} \frac{\gamma_D}{(\omega - \omega_{if})^2 + \gamma_D} \left| \mathbf{p} \left[\tilde{\mathbf{I}} + \tilde{\mathbf{G}}(\mathbf{r}) \tilde{\alpha}(\omega | \mathbf{B}) \right] \mathbf{E}_0(\omega) \right|^2, \quad (6)$$

$$\tilde{\mathbf{G}}(\mathbf{r}) = r^{-5} (3\mathbf{r} \otimes \mathbf{r} - \tilde{\mathbf{I}} r^2).$$

Здесь $\mathbf{E}_0(\omega)$ – вектор напряженности электрической составляющей иницирующего поглощение фотона первичного электромагнитного поля (поля источника возбуждения), $\tilde{\mathbf{G}}(\mathbf{r})$ – квазистатическая диадическая функция Грина точечного дипольного источника, $\tilde{\mathbf{I}}$ – единичный тензор второго ранга, γ_D – ширина, а ω_{if} – резонансная частота лоренцева контура полосы поглощения молекулы.

При моделировании процессов поглощения и спонтанного испускания фотонов молекулой вблизи частицы, использовались, как типичные, параметры для золотой частицы. Молекулы же подбирались так, чтобы их частоты поглощения и испускания были близки к частоте плазмонного резонанса для НЧ. На рисунке 2 показан рассчитанный спектр поглощения фотонов комбинированной системой молекула-НЧ в магнитном поле различной индукции. Происходит расщепление части спектра условно отвечающего за плазмонный резонанс частицы, а часть спектра, отвечающая за поглощение молекулы – уменьшается по амплитуде.

Если на металлическую НЧ наносится диэлектрический либо металлический слой, то это приводит к сдвигу плазмонной частоты. Таким образом, помимо магнитного поля, возникает еще один способ управления резонансными частотами дипольной поляризуемости системы.

В третьей главе приведены результаты детального исследования слоистых композитных частиц и их влияние на радиационные спектры, а также на скорость БПЭЭВ от молекулы к частице.

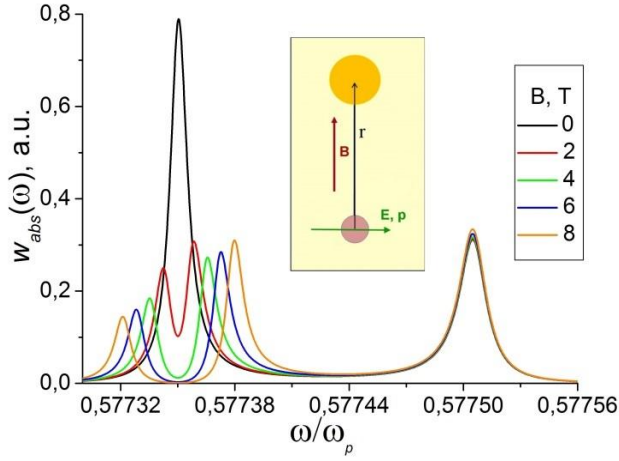


Рис. 2. Скорость поглощения фотонов при разных значениях величины магнитного поля $R = 7 \text{ нм}$, $r = 12 \text{ нм}$, $\omega_p = 13.87 \times 10^{15} \text{ с}^{-1}$

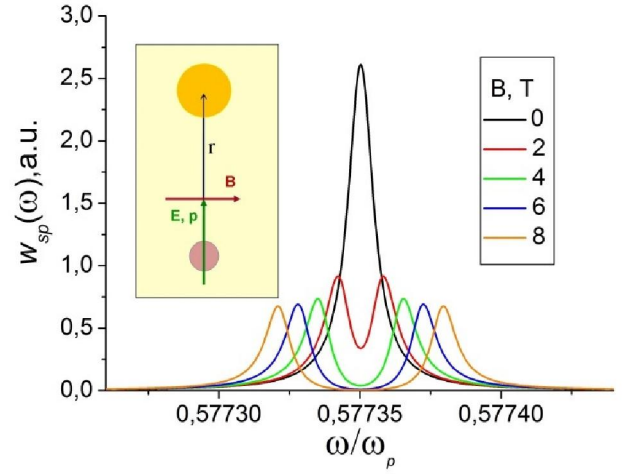


Рис. 3. Скорость спонтанной эмиссии кластера при воздействии на систему внешним магнитным полем индукции B

Выражение для скорости спонтанной эмиссии молекулы, расположенной вблизи НЧ, при наличии внешнего магнитного поля может быть записана в следующем виде

$$w_{sp}(\omega | \mathbf{B}, \mathbf{r}) = \frac{4}{3} \frac{\omega^3}{\hbar c^3} \left[\mathbf{p}^2 + \mathbf{p} \left| \tilde{\mathbf{G}}(\mathbf{r}) \tilde{\alpha}(\omega | \mathbf{B}) \right|^2 \mathbf{p} + 2 \text{Re} \mathbf{p} \left(\tilde{\mathbf{G}}(\mathbf{r}) \tilde{\alpha}(\omega | \mathbf{B}) \right) \mathbf{p} \right] \quad (7)$$

С помощью этого выражения были построены частотные зависимости скорости спонтанного излучения молекулы, расположенной вблизи наночастицы (рис. 3). Система была исследована для различных наборов геометрических и диэлектрических параметров.

Были получены и исследованы выражения для скорости БПЭЭВ от молекулы к металлсодержащему нанокластеру во внешнем магнитном поле

$$U(\omega | \mathbf{B}, \mathbf{r}) = \frac{1}{2\hbar} V \text{Im} \left[\mathbf{E}^*(\omega) \tilde{\alpha}(\omega | \mathbf{B}) \mathbf{E}(\omega) \right] = \frac{1}{2\hbar} V \text{Im} \left[\mathbf{p} \tilde{\mathbf{G}}(\mathbf{r}) \tilde{\alpha}(\omega | \mathbf{B}) \tilde{\mathbf{G}}(\mathbf{r}) \mathbf{p} \right], \quad (8)$$

а также формула для спектральной плотности числа N_{sp} фотонов, испущенных объединенной системой «молекула-наночастица» на частоте ω

$$N_{\omega} = \left(\frac{d}{d\omega} N_{sp}(\omega | \mathbf{B}, r, \theta) \right)_{out} = \frac{1}{2\pi} \cdot \left[\frac{w_{sp}(\omega | \mathbf{B}, r, \theta) U(\omega | \mathbf{B}, r, \theta)}{(\omega - \omega_{if})^2 + U^2(\omega | \mathbf{B}, r, \theta)} \right] \cdot \eta(\omega | \mathbf{B}, r, \theta) \quad (9)$$

Здесь, в (8), $\mathbf{E}(\omega)$ – напряженность поля, создаваемого возбужденной молекулой в области расположения наночастицы, V – объем частицы, $\eta(\omega | \mathbf{B}, r, \theta)$ – обобщенный квантовый выход люминесценции.

Было установлено, что скорость БПЭЭВ в системе «молекула-наночастица» может, как увеличиваться, так и уменьшаться в магнитном поле.

Это зависит от взаимной ориентации векторов $\mathbf{p}, \mathbf{B}$ и $\mathbf{r}$. Так, при $(\mathbf{r} | \mathbf{B})^\wedge \mathbf{p} = 45^\circ$ спектральные плотности $U(\omega)$ и N_ω монотонно возрастают с увеличением B , а при $(\mathbf{r} | \mathbf{B})^\wedge \mathbf{p} = 90^\circ$, наоборот, уменьшаются.

В четвёртой главе детально исследованы плазменные колебания в кластерах из двух сферических однородных или слоистых наночастиц в магнитном поле, как для проводников с классическим, так и с вырожденным электронным газом. Показано, что инициация радиационных переходов в молекулах существенно зависит от степени вырожденности электронного газа металла.

В приближении квазитоочечных диполей получено выражение для тензора дипольной динамической поляризуемости кластера, образованного двумя сферическими наночастицами, помещенными в электромагнитное поле, изменяющееся на оптических частотах, и постоянное магнитное поле.

$$\begin{aligned} \tilde{\alpha}_{cl}(\omega) = & \left[\tilde{\mathbf{I}} - \tilde{\alpha}_1(\omega) \tilde{\alpha}_2(\omega) \tilde{\mathbf{G}}(\mathbf{R}) \tilde{\mathbf{G}}(\mathbf{R}) \right]^{-1} \times \\ & \times \left\{ \tilde{\alpha}_1(\omega) \left[\tilde{\mathbf{I}} + \tilde{\alpha}_2(\omega) \tilde{\mathbf{G}}(\mathbf{R}) \right] + \tilde{\alpha}_2(\omega) \left[\tilde{\mathbf{I}} + \tilde{\alpha}_1(\omega) \tilde{\mathbf{G}}(\mathbf{R}) \right] \right\}. \end{aligned} \quad (10)$$

Здесь, в (10), R – расстояние между центрами частиц кластера, $\tilde{\alpha}_1(\omega), \tilde{\alpha}_2(\omega)$ – тензоры дипольных динамических поляризуемостей отдельных невзаимодействующих частиц образующих кластер.

Для каждой композитной частицы определенного типа использовался соответствующий тензор поляризуемости (1), (2), или (3). Как было отмечено выше, скалярные величины поляризуемости отдельных частиц становятся тензорами второго ранга в магнитном поле.

Полученное выражение (10) является универсальным для расчета поляризуемости кластера из разных частиц. В качестве таких частиц рассмотрены сферические нанокомпозиты типа «ядро-оболочка», составленные из различных материалов, проводников, полупроводников или изоляторов. Для конкретных веществ и определенных диапазонов температур электронный газ металлических компонентов нанокомпозитов может характеризоваться либо как классический, либо как вырожденный. Учитывалось, что сплошные частицы кластера обладают анизотропными характеристиками, и их собственные поляризуемости, как и диэлектрические проницаемости, представляются тензорами второго ранга. Кроме того, для кластера из однородных частиц был рассчитан коэффициент диссипации (поглощения) энергии поля в анизотропной системе с помощью выражения

$$k_D(\omega) = \omega \operatorname{Im} [\mathbf{n}_E \tilde{\alpha}_{cl}(\omega) \mathbf{n}_E], \quad \mathbf{n}_E = \mathbf{E} / E \quad (11)$$

На рисунке 4 показан спектр поглощения кластера для случая, когда вектор $\mathbf{E}$ направлен под углом $\pi/4$ относительно вектора магнитной индукции $\mathbf{B}$ и вектора $\mathbf{R}$.

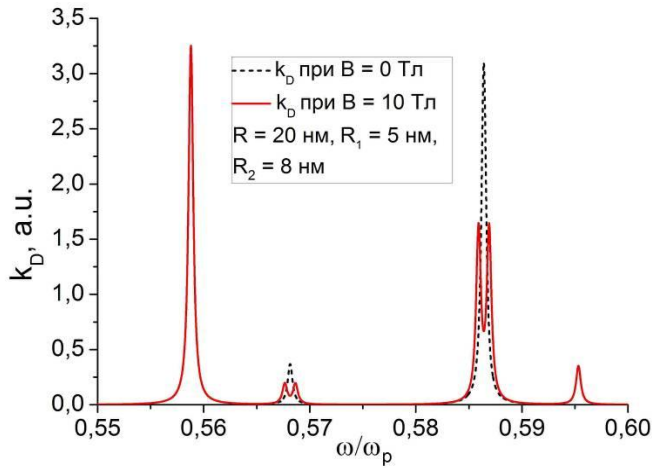


Рис. 4. Частотная зависимость коэффициента k_D диссипации энергии кластера в условиях взаимной ориентации векторов системы под углом $\pi/4$, $\omega_p = 10^{15} \text{ c}^{-1}$, $\gamma = 5 \cdot 10^{11} \text{ c}^{-1}$

поляризуемости двухчастичного экситон-плазмонного нанокластера, находящегося во внешнем магнитном поле. Проведено сравнение спектров поляризуемостей отдельной металлической частицы и двухчастичного гибридного нанокластера, состоящего из металлической НЧ и наночастицы из молекулярного кристалла. В спектрах поляризуемости такого кластера, появляются дополнительные пики, которые отвечают экситонному резонансу.

В случае *вырожденного электронного газа металла* поляризуемость отдельной частицы (1) отличается от ее поляризуемости, для случая металла с классическим электронным газом [10]

$$\alpha(\omega) = a^3 \left[1 + \frac{3\varepsilon_m[k(\omega)a \operatorname{ctg} k(\omega)a - 1]}{2[\varepsilon(\omega) - \varepsilon_m][k(\omega)a \operatorname{ctg} k(\omega)a - 1] + \varepsilon(\omega)[k(\omega)a]^2} \right] \quad (12)$$

$$k^2(\omega) = -\frac{4m_e^{3/2}e^{5/2}}{\pi\hbar^3\varepsilon(\omega)}\sqrt{2\varphi_0}, \quad \varphi_0 = \frac{(9\pi N_e)^{2/3}\hbar^2}{2^{7/3}m_e a^2},$$

где a – радиус частицы, φ_0 – потенциал, определяющий характерную для каждого металла или полуметалла длину $l = \hbar^{3/2}(2\varphi_0 m_e^3 e^5)^{-1/4}$ томас-фермиевского экранирования. Динамическая поляризуемость сферического слоистого нанокомпозита, который представляет собой концентрическую структуру из различных металлов, записывается в виде [11]:

$$\alpha(\omega) = \frac{\varepsilon(\omega)k[j_1'(kR_2) - \beta y_1'(kR_2)] - \varepsilon_m(1/R_2)[j_1(kR_2) - \beta y_1(kR_2)]}{\varepsilon(\omega)k[j_1'(kR_2) - \beta y_1'(kR_2)] + 2\varepsilon_m(1/R_2)[j_1(kR_2) - \beta y_1(kR_2)]} R_2^3, \quad (13)$$

$$\beta(\omega, k, k_c, R_1) = \frac{\varepsilon(\omega)k j_1'(kR_1) - \varepsilon_c(\omega)j_1(kR_1)k_c j_1'(k_c R_1) / j_1(k_c R_1)}{\varepsilon(\omega)k y_1'(kR_1) - \varepsilon_c(\omega)y_1(kR_1)k_c j_1'(k_c R_1) / j_1(k_c R_1)},$$

R_1 и R_2 – радиусы частицы и ядра соответственно.

Установлено, что спектры реальной и мнимой части поляризуемости кластера состоящего из двух композитных частиц с металлическими ядрами имеют два плазмонных резонанса, разнесенных по частоте, а из частиц с диэлектрическими ядрами и металлическими оболочками – четыре. Обнаружено, что частоты плазмонных резонансов имеют сильную зависимость от соотношения толщин слоев композитных частиц.

Помимо этого, в четвертой главе приводятся расчёты

Были исследованы зависимости дипольных поляризуемостей кластеров, состоящих из *двух сплошных проводящих сферических наночастиц*, а также *двухслойных металлических наночастиц*, от конфигурационных параметров системы, с учетом вырожденности электронного газа ее металлических компонентов. В этом случае влияние магнитного поля на поляризуемости кластеров не рассматривалось – в связи с существенным усложнением теоретической модели. Установлено, что спектры динамических поляризуемостей и сечений поглощения кластеров при сильном вырождении электронного газа металлов имеют сложную мультирезонансную структуру.

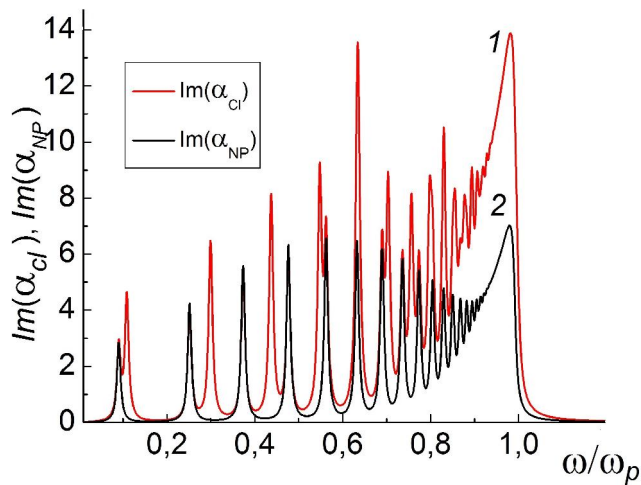


Рис. 5. Спектры мнимых частей поляризуемостей кластера (1) и отдельной сферической наночастицы (2)

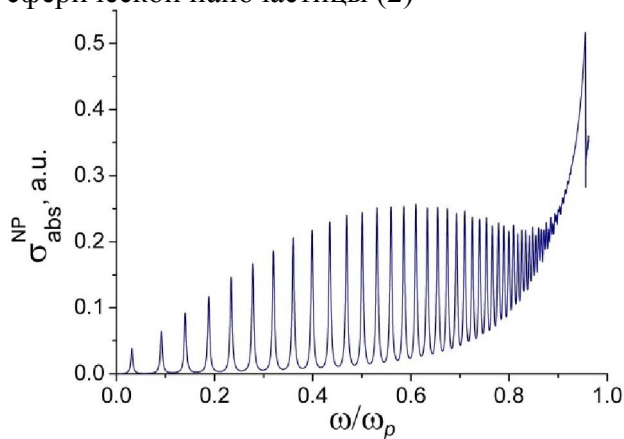


Рис. 6а. Сечение поглощения отдельной слоистой частицы радиусом $R_1 = 6$ нм и радиусом сердцевинки $R_{1c} = 4$ нм

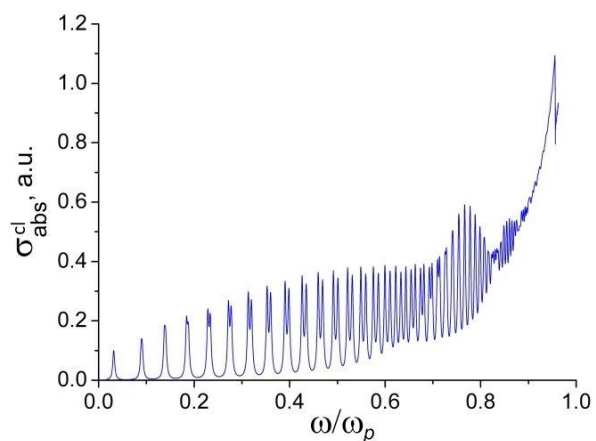


Рис. 6б. Спектр сечения поглощения двухчастичного кластера размером $R = 15$ нм.

$$R_1 = R_2 = 6, R_{1c} = R_{2c} = 4 \text{ нм}$$

Выявлен анизотропный характер поглощения энергии электромагнитного поля кластером: величина сечения поглощения σ_{abs} зависит от направления вектора напряженности $\mathbf{E}_0$ внешнего электрического поля относительно оси кластера R .

Кроме детального исследования поляризуемости и сечения поглощения двухчастичных кластеров разной природы, было *изучено их влияние на*

радиационные характеристики молекулы и скорость БПЭЭВ от молекулы к кластеру. В качестве типичного был рассмотрен кластер, состоящий из металлической частицы (золото) и частицы из молекулярного кристалла (антрацен).

В пятой главе проведены исследования локализованных плазмонных колебаний в замагниченных однородных или слоистых наноцилиндрах и их влияние на поглощение света молекулами.

Были подробно исследованы двухслойные цилиндрические наносистемы радиуса R с внутренней жилой радиуса ρ , на которые падает монохроматическая электромагнитная волна с напряженностью $\mathbf{E}_0(\omega)$ электрической компоненты, перпендикулярной оси Z цилиндра. Исследованы различные варианты сочетаний материалов структурированных (слоистых) наноцилиндров: металл/диэлектрик, металл/молекулярный слой, диэлектрик/металл. Для каждого типа структуры удельные поляризуемости (на единицу длины) цилиндра были различными. Формула для тензора дипольной поляризуемости единицы длины слоистого композитного цилиндра с металлической жилой выглядит следующим образом [12]

$$\begin{aligned} \vec{\alpha}(\vec{\epsilon}_c(\omega|\mathbf{B}), \epsilon, \epsilon_m) = & \left[(\vec{\epsilon}_c(\omega|\mathbf{B}) + \epsilon)(\epsilon - \epsilon_m) + (\vec{\epsilon}_c(\omega|\mathbf{B}) - \epsilon)(\epsilon + \epsilon_m)\xi^2 \right] \times \\ & \times \left[(\vec{\epsilon}_c(\omega|\mathbf{B}) + \epsilon)(\epsilon + \epsilon_m) + (\vec{\epsilon}_c(\omega|\mathbf{B}) - \epsilon)(\epsilon - \epsilon_m)\xi^2 \right]^{-1} R^2 \end{aligned} \quad (14)$$

где $\epsilon_c, \epsilon, \epsilon_m$ – диэлектрические проницаемости внутреннего, внешнего слоев и окружающей среды соответственно, $\xi = \rho/R$. В том случае, когда цилиндр имеет внешний металлический слой и диэлектрическую жилу, ϵ становится частотно- и магнитозависимым тензором 2-го ранга.

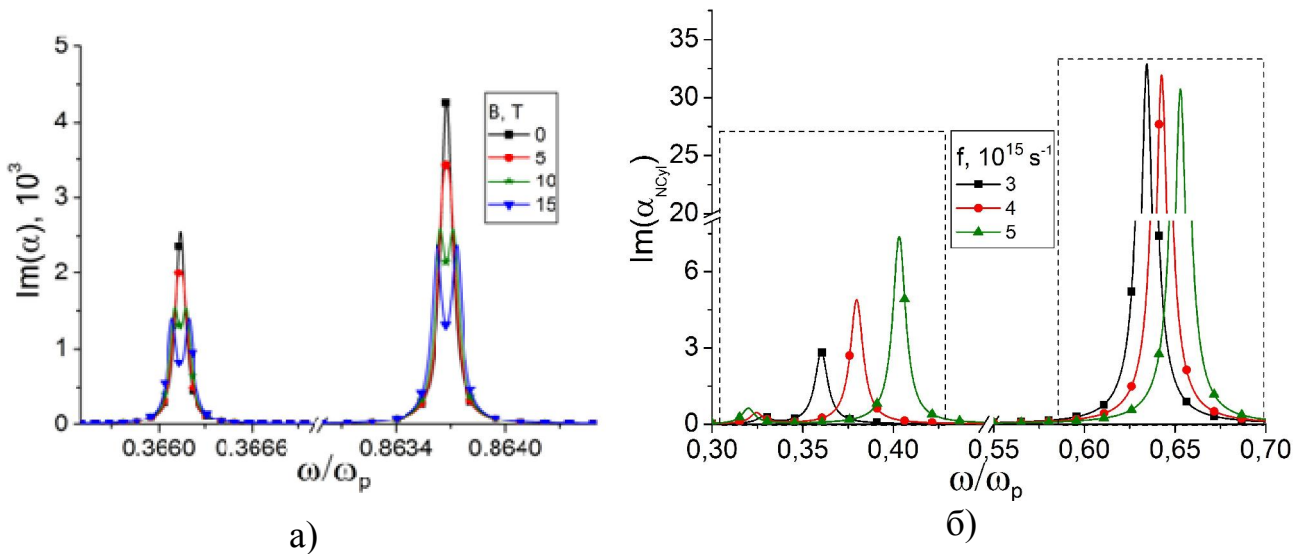


Рис. 7. Спектры мнимых частей удельной поляризуемости наноцилиндров разной структуры: а) диэлектрическая жила с металлическим слоем, б) металлическая жила с молекулярным слоем при различных значениях силы осциллятора f

Было установлено, что, как и в случае сферических плазмонных наночастиц, в случае наноцилиндров при наложении внешнего магнитного поля происходит расщепление линий спектра на частоте плазмонного резонанса, причем расщепленные компоненты с дальнейшим увеличением B расходятся по частоте, уменьшаясь, при этом, по амплитуде (рис. 7а).

Спектр мнимой части поляризуемости сплошной металлической жилы имеет один резонанс на плазмонной частоте $\omega = \omega_p / \sqrt{2}$. При добавлении внешнего молекулярного слоя из J-агрегатов, кроме плазмонного, возникают еще два резонанса в низкочастотной области (рис. 7б). Один из них соответствует чисто экситонному случаю, а второй отвечает за экситон-плазмонное взаимодействие.

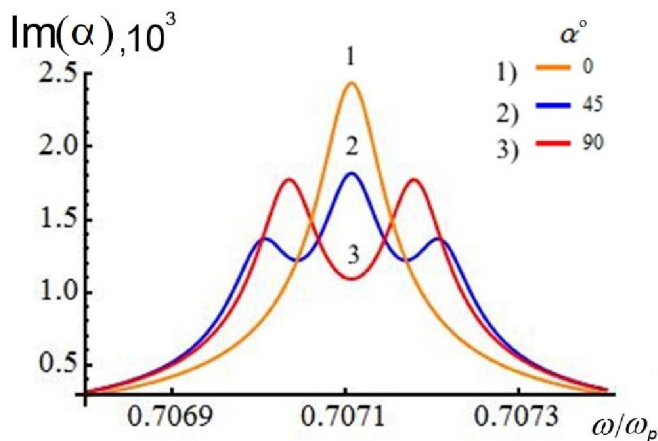


Рис. 8. Частотная зависимость дипольной поляризуемости наноцилиндра при разных взаимных ориентациях векторов $\mathbf{E}_0$ и $\mathbf{B}$. $B=15$ Тл

Установлено, что количество расщепленных спектральных полос зависит от взаимного направления векторов напряженности иницирующего электрического поля $\mathbf{E}_0$ и вектора индукции магнитного поля $\mathbf{B}$. Так, при $\mathbf{E}_0 \perp \mathbf{B}$ наблюдается расщепление на две полосы, а в случае произвольной величины угла между 0 и $\pi/2$ – на три полосы. Если же $\mathbf{E}_0 \parallel \mathbf{B}$, то влияние магнитного поля на спектры никак не проявляется (рис. 8).

Напряженность $\mathbf{E}(r, \theta)$ поля вблизи слоистого цилиндрического композита с замагниченным металлическим слоем определяется выражением

$$\mathbf{E}(r, \theta) = \mathbf{E}_0 - \vec{\nabla} \vec{A}(\varepsilon_1, \vec{\varepsilon}_2(\omega | \mathbf{B}), \varepsilon_3) \mathbf{E}_0 \mathbf{r} / r^2, \quad (15)$$

$\mathbf{r}$ – радиус-вектор, проведенный в точку расчета напряженности E .

Выявлено, что на частоте плазмонного резонанса происходит увеличение напряженности до 10^3 раз относительно внешнего поля $\mathbf{E}_0$ (рис. 9а). Увеличивая величину магнитного поля, можно уменьшать значение напряженности ближнего поля.

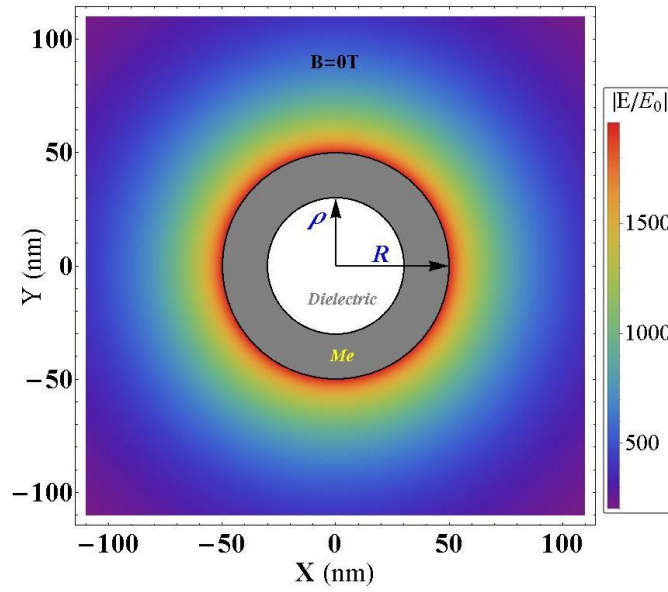


Рис. 9а. Распределение вектора напряженности $\mathbf{E}$ вблизи композитного наноцилиндра на частоте $\omega = 0.7071 \omega_p$, $\rho = 30$ нм, $R = 50$ нм, $B = 0$ Тл, $\mathbf{E} = \mathbf{E}_{0x}$

На построенных векторных диаграммах заметно перераспределение локального поля (рис. 9б), происходящее вследствие влияния магнитного поля на плазмонную антенну-рефлектор.

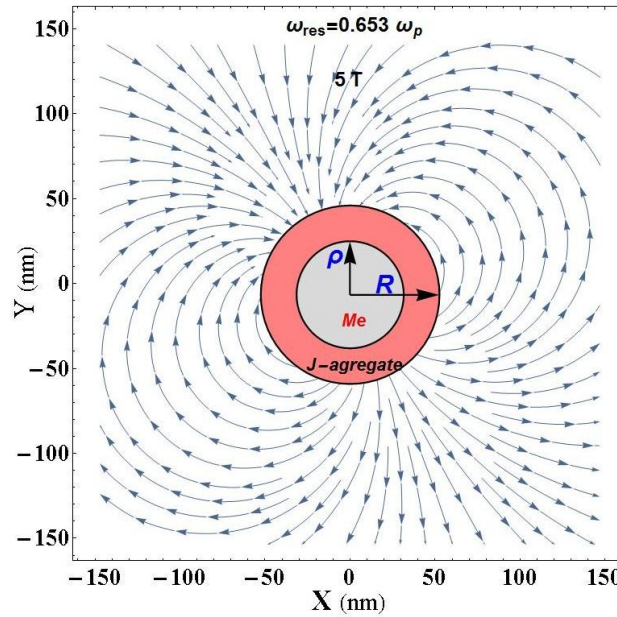


Рис. 9б. Векторное распределение напряженности электрического поля вокруг слоистого наноцилиндра с металлической жилой и молекулярным слоем.

$B = 5$ Тл, $\rho = 30$ нм, $R = 50$ нм

На основе полученных данных в пятой главе изучена и реализована модель поглощения фотонов молекулой, размещенной вблизи металлической нанопроволоки бесконечной длины.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В результате выполнения диссертационной работы была достигнута поставленная цель и решены все сопутствующие ей задачи. При этом:

1. Получено выражение для тензора дипольной поляризуемости двухчастичного нанокластера в монохроматическом электромагнитном поле оптической частоты. Выражение справедливо для кластеров, образованных как из однородных сферических, так и слоистых композитных наночастиц. При расчетах была учтена анизотропия самого кластера, а также частиц его образующих. Установлено, что спектр дипольной поляризуемости, определяющий сечение поглощения и скорость спонтанного излучения двухчастичного кластера, состоящего из сферических слоистых частиц с проводящими ядрами, имеет две резонансные частоты, а из частиц с диэлектрическими ядрами и металлическими оболочками – четыре. Показано, что положение плазмонных резонансов на спектрах дипольной поляризуемости кластеров сильно зависит от соотношения толщин слоев композитных наночастиц. Выявлено влияние геометрических и физических параметров системы на процесс безызлучательной передачи энергии электронного возбуждения от молекулы к гибриднему плазмон-экситонному кластеру. Исследованы спектры люминесценции молекул, расположенных вблизи слоистых сферических нанокомпозитов.

2. Показано, что внешнее магнитное поле изменяет характер плазмонных колебаний в проводящих наноцилиндрах, наночастицах и их кластерах. При этом трансформируются как оптические спектры поглощения самих наносистем, так и радиационные характеристики молекул, расположенных вблизи поверхности частиц. Как и в случае однородных проводящих частиц в магнитном поле для кластеров наблюдаются аналогичные расщепления спектральных полос на отдельные компоненты, которые с увеличением индукции магнитного поля уменьшаются по амплитуде и расходятся в противоположных направлениях частотной шкалы. Выявлено влияние магнитного поля на скорость поглощения фотонов, а также на скорость спонтанного излучения молекулы, находящейся вблизи наночастицы. Построены спектры люминесценции молекул и частотные зависимости скорости безызлучательного переноса энергии электронного возбуждения от молекул к наночастицам и кластерам в магнитном поле. Получена картина формирования электрического поля вблизи сплошного и слоистого наноцилиндров, расположенных во внешнем магнитном поле, в зависимости от частоты излучения.

3. Исследованы спектры электрической поляризуемости проводящих и гибридных наночастиц, а также их кластеров с учетом вырожденности электронного газа металлических и полупроводниковых частей композитов в широком диапазоне температур. Установлено, что спектры динамических поляризуемостей и сечений поглощения кластеров имеют сложную мультirezонансную структуру и сильно зависят от конфигурационных параметров кластера, а также степени вырождения электронного газа металлов. Показан анизотропный характер поглощения энергии электромагнитного поля двухчастичным кластером.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Климов, В.В. Наноплазмоника / В.В. Климов. –М.: Физматлит. 2009. –480 с.
2. Mayer, K.M. Localized surface plasmon resonance sensor / K.M. Mayer , J.H. Hafner // Chemical Reviews. – 2011. – V. 111. – P. 3828-3857.
3. Zayats, A. Nano-Optics and Near-Field Optical Microscopy / A. Zayats, D. Richards. Artech House. 2009. – 365 p.
4. Bharadwaj, P. Optical Antennas / P. Bharadwaj, B. Deutsch, L. Novotny // Adv. Opt. Photon. – 2009. – V. 1. – P. 438–483.
5. Govorov, A.O. Theory of plasmon enhanced Förster energy transfer in optically excited semiconductor and metal nanoparticles / A.O. Govorov, J. Lee, N.A. Kotov // Physical Review B. – 2007. – V. 76. – P. 125308.
6. Hill, D.J. Waveguide Scattering Microscopy for Dark-Field Imaging and Spectroscopy of Photonic Nanostructures / D.J. Hill et al. // ACS Photonics. – 2014. – 1(8). – P. 725-731.
7. Zhang, J. Absorption induced photoluminescence intensity modulation of Er^{3+} : YVO_4 single crystal under pulsed high magnetic field / J. Zhang et al. // Journal of Luminescence. – 2013. – V.144. – P. 53-56.
8. Гинзбург, В.Л. Волны в магнитоактивной плазме / В.Л. Гинзбург, А.А. Рухадзе. – М.: Наука. 1975. – 256 с.
9. Давыдов, А.С. Теория твердого тела / Давыдов А.С. –М.: Наука. 1976. –640с.
10. Кучеренко, М.Г. Динамическая поляризуемость нанопара в случае вырожденного электронного газа и ее роль в плазмонном механизме передачи энергии / М.Г. Кучеренко // Вестник ОГУ. – 2012. – №1. (137). – С. 141-149.
11. Кучеренко, М.Г. Межмолекулярный безызлучательный перенос энергии вблизи шаровой нанооболочки с вырожденным электронным газом / М.Г. Кучеренко // Материалы Всероссийской конференции «Фотоника органических и гибридных наноструктур». Черноголовка. – 2011. – С.89.
12. Кучеренко, М.Г. Локализованные плазмоны в замагниченном наноплазмоне и сферическом слоистом композите / М.Г. Кучеренко // Материалы Всероссийской конференции «Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры». Оренбург. – 2016. – С. 1220-1227.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в журналах, входящих в перечень ВАК и международные базы цитирования:

1. Кучеренко, М.Г. Модификация спектра дипольной электрической поляризуемости кластера из двух проводящих сферических наночастиц во внешнем магнитном поле / М.Г. Кучеренко, В.М. Налбандян // Вестник ОГУ. – 2014. – № 1. (162). – С. 118-126.

2. Kucherenko, M. Absorption and spontaneous emission of light by molecules near metal nanoparticles in external magnetic field / M. Kucherenko, V. Nalbandyan // *Physics Procedia*. – 2015. – V. 73. – P. 136–142.
3. Кучеренко, М.Г. Спектры поляризуемости нанокластеров из двух композитных частиц во внешнем магнитном поле / М.Г. Кучеренко, В.М. Налбандян // *Вестник ОГУ*. – 2015. – № 13. (188). – С. 156-161.
4. Кучеренко, М.Г. Дипольные поляризуемости и сечения поглощения двухчастичных нанокластеров из проводящих однородных и слоистых частиц с вырожденным электронным газом / М.Г. Кучеренко, В.М. Налбандян // *Известия вузов. Физика*. – 2016. – Т. 59. – № 9. – С. 87-93.

Публикации в других изданиях:

5. Кучеренко, М.Г. Влияние магнитного поля на межмолекулярный безызлучательный перенос энергии вблизи сфероидальной металлической наночастицы / М.Г. Кучеренко, С.А. Пеньков, В.М. Налбандян, Д.С. Большаков // *Материалы Всероссийской научно-методической конференции «Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры»*. Оренбург. – 2013. – С. 1107-1114.
6. Налбандян, В.М. Спектр электрической поляризуемости полупроводникового двухчастичного нанокластера в магнитном поле / В.М. Налбандян, М.Г. Кучеренко // *Тезисы докладов XV Всероссийской молодежной конференции по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике*. Санкт-Петербург, – 2013. – С. 56.
7. Кучеренко, М.Г. Спектр электрической поляризуемости двухчастичного металлического нанокластера во внешнем магнитном поле / М.Г. Кучеренко, В.М. Налбандян // *Материалы Всероссийской научно-методической конференции «Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры»*. Оренбург. – 2014. – С. 1439-1448.
8. Налбандян, В.М. Динамическая поляризуемость двухчастичного композитного нанокластера во внешнем магнитном поле / В.М. Налбандян, М.Г. Кучеренко // *Материалы XX Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых*. Ижевск. – 2014. – С. 314-315.
9. Кучеренко, М. Г. Спектры поглощения и рассеяния света двухчастичными металлическими и гибридными нанокластерами во внешнем магнитном поле / М.Г. Кучеренко, В.М. Налбандян // *Сборник трудов VIII Международной конференции «Фундаментальные проблемы оптики»*. Санкт-Петербург. – 2014. – С. 116-119.
10. Kucherenko, M.G. Influence of magnetic field on absorption spectra of hybrid nanoclusters / M.G. Kucherenko, V.M. Nalbandyan // *Proceedings of Russian - Japanes conference «Chemical Physics of Molecules and Polyfunctional Materials»*. Orenburg. – 2014. – P. 59-61.

11. Налбандян, В.М. Влияние магнитного поля на оптические свойства наноструктурированных систем / В.М. Налбандян // Материалы ежегодной областной научно-практической конференции «Молодые ученые Оренбуржья – науке XXI века». Оренбург. – 2014. – С. 226-228.
12. Кучеренко, М.Г. Поглощение и спонтанное излучение света молекулой вблизи металлической наночастицы во внешнем магнитном поле / М.Г. Кучеренко, В.М. Налбандян // Материала IV Международной конференции по фотонике и информационной оптике. Москва. – 2015. – С. 244-245.
13. Кучеренко, М.Г. Спектры дипольной поляризуемости кластеров из двух проводящих наночастиц с вырожденным электронным газом / М.Г. Кучеренко, В.М. Налбандян // Материалы Всероссийской научно-методической конференции «Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры». Оренбург. – 2015. – С. 1084-1090.
14. Налбандян, В.М. Сечение поглощения двухчастичного кластера из проводящих слоистых наночастиц с вырожденным электронным газом / В.М. Налбандян, М.Г. Кучеренко // Материалы 9-ой Международной научной конференции «Хаос и структуры в нелинейных системах. Теория и эксперимент», посвященной 90-летию академика Е.А.Букетова. Казахстан, Караганда. – 2015. – С. 525-530.
15. Кучеренко, М.Г. Люминесценция молекул вблизи слоистых сферических нанокомпозитов с экситон-плазмонной связью / М.Г. Кучеренко, А.П. Русинов, В.М. Налбандян // Материалы Международной научной конференции, посвященной 60-летию Оренбургского государственного университета «Наука и образование: фундаментальные основы, технологии, инновации». Оренбург. – 2015. – С. 167-173.
16. Кучеренко, М.Г. Особенности молекулярной люминесценции гибридных наноструктур, определяемые электродипольной поляризуемостью частиц и их кластеров в магнитном поле / М.Г. Кучеренко, В.М. Налбандян // Материалы Международной научной конференции, посвященной 60-летию Оренбургского государственного университета «Наука и образование: Фундаментальные основы, технологии, инновации». Оренбург. – 2015. – С. 174-180.
17. Налбандян, В.М. Влияние магнитного поля на скорость безызлучательного переноса энергии от молекулы к наночастице и на люминесценцию молекулы / В.М. Налбандян, М.Г. Кучеренко // Сборник трудов IX международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика-2015». Санкт-Петербург. – 2015. – С. 55-57.
18. Налбандян, В.М. Сечение поглощения двухчастичных кластеров из однородных и слоистых проводящих наночастиц с вырожденным электронным газом / В.М. Налбандян, М.Г. Кучеренко // Материалы Международной молодежной конференции «Физика СПб». Санкт-Петербург. – 2015. – С. 126-127.

19. Налбандян, В.М. Ближнее поле двухслойного наноцилиндра с проводящей оболочкой или сердцевинной во внешнем магнитном поле / В.М. Налбандян, Г.С. Коловертнов // Тезисы докладов Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2016». Москва. – 2016. – С. 79-81.
20. Налбандян, В.М. Электрическая поляризуемость двухслойного наноцилиндра во внешнем магнитном поле / В.М. Налбандян, М.Г. Кучеренко // Тезисы докладов XXIII Международной молодежной научной школы-конференции «Современные проблемы физики и технологий». Москва. – 2016. – С. 298-300.
21. Kucherenko, M.G. Peculiarities of molecular luminescence near layered nanocomposites with exciton-plasmon coupling / M.G. Kucherenko, V.M. Nalbandyan, A.P. Rusinov, L.V. Terenina // Book of Abstract. The 4-rd International Symposium «Molecular photonics» dedicated to academician A.N. Terenin. St. Petersburg, Russia. – 2016. – P.21.
22. Kucherenko, M.G. Intermolecular Radiationless Energy Transfer in Porous Material Cavity With Silver Nanoparticle / M.G. Kucherenko, D.A. Kislov, V.M. Nalbandyan // Book of Abstract. The 4-rd International Symposium «Molecular photonics» dedicated to academician A.N. Terenin. St. Petersburg, Russia. – 2016. – P.28.
23. Kucherenko, M.G. Förster resonance energy transfer in Porous Media with Silver Nanoparticles / M.G. Kucherenko, D.A. Kislov, V.M. Nalbandyan // Abstract Book of The 13th Nano Bio Info Chemistry Symposium and The 8th Japanese-Russian Seminar on Chemical Physics of Molecules and Polyfunctional Materials. Hiroshima, Japan. – 2016. – P. 55, JR09.
24. Kucherenko, M.G. Molecular Luminescence near Layered Nanocomposites with Pronounced Exciton-Plasmon Coupling / M.G. Kucherenko, V.M. Nalbandyan, A.P. Rusinov, L.V. Terenina // Abstract Book of The 13th Nano Bio Info Chemistry Symposium and The 8th Japanese-Russian Seminar on Chemical Physics of Molecules and Polyfunctional Materials. Hiroshima, Japan. – 2016. – P. 56, JR 10.
25. Кучеренко, М.Г. Структура ближнего поля слоистого наноцилиндра с замагниченной металлической жилой и экситоногенной оболочкой / М.Г. Кучеренко, В.М. Налбандян // Сборник научных трудов VI Международной конференции «Фотоника и информационная оптика». Москва. – 2017. – С. 414-415.