

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

На правах рукописи

Моритака Сергей Сэидзирович

Плазмон-экситонное взаимодействие и оптические свойства наночастиц
с металлическим ядром и J-агрегатной оболочкой

Специальность 1.3.6 — Оптика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2026

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

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
Лебедев Владимир Сергеевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор
Овчинников Олег Владимирович,
заведующий кафедрой оптики и спектроскопии
Воронежского государственного университета (ВГУ)

доктор физико-математических наук
Стрельцов Владимир Николаевич,
ведущий научный сотрудник Института общей
физики им. А.М. Прохорова Российской академии
наук (ИОФ РАН)

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное обра-
зовательное учреждение высшего образования
«Московский государственный университет имени
М.В.Ломоносова» (МГУ)

Защита диссертации состоится 19 октября 2026 г. в 11:00 на заседании диссерта-
ционного совета 24.1.262.01 на базе ФИАН по адресу: 119991, Москва, Ленинский
проспект, 53.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физического института имени
П.Н. Лебедева РАН и на сайте института www.lebedev.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 202__ г.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.12.262.01,
доктор физико-математических наук

А. С. Золотко

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

В связи с интенсивным развитием нанофотоники огромное количество работ, выполненных в течение последних двух десятилетий, посвящено изучению оптических свойств гибридных наночастиц и наноструктур, а также созданных на их основе композитных материалов. Прогресс в области разработки фотонных и оптоэлектронных устройств будущего поколения в значительной мере определяется исследованиями в области создания новых материалов с уникальными физико-химическими, в том числе спектральными и нелинейно-оптическими, свойствами [1–3]. Для этого широко используются разнообразные металлические, диэлектрические и полупроводниковые компоненты, а также молекулярные комплексы и их массивы [4, 5]. Важность исследований оптических свойств таких систем определяется как фундаментальной значимостью эффектов взаимодействия света со сложными композитными наноматериалами, так и многочисленными приложениями в фотонике и оптоэлектронике [6–8].

Для ряда актуальных приложений особый интерес представляют исследования в области оптики и спектроскопии гибридных плазмон-экситонных наноструктур, состоящих из металлической подсистемы и упорядоченных молекулярных агрегатов красителей, обладающих уникальными оптическими свойствами [9]. Наряду с гибридными неорганическими материалами, такие композитные наноматериалы формируют элементную базу нанофотонных, оптоэлектронных и светоизлучающих устройств будущего поколения, включая фотовольтаические элементы, оптические переключатели, датчики, фотонные и плазмонные нанолазеры и нанофотонные интегральные схемы [10]. Подобного рода гибридные частицы сочетают в себе достоинства экситонной подсистемы, связанные с большой силой осциллятора радиационного перехода и малой шириной J-полосы поглощения [11], и плазмонной подсистемы, способной приводить к сильному возрастанию локального поля вблизи поверхности частицы по сравнению с внешним электромагнитным излучением [12]. Оптические свойства металлических наночастиц как сравнительно простой (сфера, сфероид, цилиндр, диск, куб, призма), так и более сложной (гантели, звезды, тетраподы и др.) геометрической формы интенсивно изучались во многих работах (см. [13] и приведенные там ссылки). Свойства молекулярных J-агрегатов также активно исследуются [11] и могут быть успешно описаны в рамках экситонной модели Френкеля и ее обобщений. Для многих приложений ис-

пользование органических материалов оказывается более дешевым по сравнению с их неорганическими аналогами.

Использование гибридных органо/неорганических материалов расширяет возможности управления их спектральными свойствами по сравнению с чисто неорганическими или чисто органическими системами. Примерами таких структур являются двухслойные наночастицы с ядром благородного металла различного размера и формы, покрытые J-агрегатной оболочкой цианинового красителя, а также трехслойные наночастицы металл/прослойка/J-агрегат, диэлектрик/металл/J-агрегат и полупроводник/металл/J-агрегат [14]. Основные закономерности в спектрах поглощения и рассеяния света такими гибридными наночастицами определяются, в первую очередь, эффектами ближнепольной электромагнитной связи локализованного поверхностного плазмон-поляритона и экситона Френкеля, возбуждаемого в J-агрегатной оболочке красителя. Таким образом, исследования новых физических явлений и механизмов плазмон-экситонной связи в гибридных металлоорганических наноструктурах различного состава и размеров актуальны для создания новых материалов фотоники и оптоэлектроники.

Цели и задачи

Диссертация преследует следующие цели:

- (i) разработку самосогласованного теоретического подхода для объяснения и количественного описания эффектов электромагнитной плазмон-экситонной связи в гибридных системах “ядро-оболочка”;
- (ii) проведение детальных расчетов спектров поглощения и рассеяния света двухслойными и трехслойными металлоорганическими наночастицами с внешним слоем в виде упорядоченных молекулярных агрегатов красителей и анализ роли плазмон-экситонного взаимодействия в формировании этих спектров;
- (iii) исследование нитевидных J- и H-агрегатов красителей с двумя молекулами в непланарной элементарной ячейке и построение теоретической модели для надежного описания их оптических свойств.

В соответствии с поставленными целями сформулированы следующие конкретные задачи диссертации:

1. Обобщение теории делокализованных экситонов Френкеля и вывод аналитических выражений для угловых зависимостей коэффициентов фотопоглощения и

линейного дихроизма, позволяющих объяснить оптические явления в нитевидных агрегатах с двумя произвольно ориентированными молекулами в элементарной ячейке.

2. Исследование поляризационных и ориентационных эффектов для широко используемых в органической фотонике молекулярных агрегатов красителей и объяснение экспериментов по их спектрам поглощения поляризованного и естественно-поляризованного света.
3. Теоретический анализ эффекта расщепления J-полосы красителя в оболочке гибридной частицы на два экситонных резонанса. Разработка нового самосогласованного подхода к определению эффективности электромагнитной связи двух экситонов оболочки с дипольным плазмон-поляритоном, возбуждаемым в металлическом ядре гибридной наносферы.
4. Изучение механизмов плазмон-экситонной связи и их роли в формировании оптических спектров наночастиц биметалл/J-агрегат и металл/диэлектрик/J-агрегат. Анализ поведения спектральных пиков гибридных мод частиц с полупроводниковым или диэлектрическим ядром и двойной оболочкой металл/J-агрегат. Проведение точных и модельных расчетов для конкретных физических систем и анализ спектров поглощения и рассеяния света частицами различного состава и размеров.
5. Анализ применимости разработанных полуаналитических моделей и сравнение результатов с точными численными расчетами, проведенными на основе решений уравнений Максвелла и с помощью обобщенной теории Ми для концентрических сфер с учетом размерного эффекта рассеяния электронов на границе металл-диэлектрик и металл-полупроводник.

Научная новизна работы

Новой и оригинальной является построенная в диссертации теория поглощения поляризованного и естественно-поляризованного света, применимая для широкого класса агрегатов красителей с двумя молекулами в непланарной элементарной ячейке. Имеющиеся ранее аналитические модели Давыдова-МакРея-Каша относились к линейным агрегатам с одной молекулой в ячейке.

На основе разработанной теории впервые дано количественное объяснение всех основных особенностей и закономерностей в спектрах линейного дихроизма и поглощения поляризованного света J-агрегатами псевдоизоцианина, одного из наи-

более активно используемых упорядоченных молекулярных агрегатов в органической фотонике и фотохимии.

Предложен оригинальный аналитический подход к определению двух констант плазмон-экситонного взаимодействия в металлоорганических наносферах. На его основе разработан новый способ определения количественной меры эффективности ближнепольной электромагнитной связи ядра и оболочки в двухслойных наночастицах металл/ J -агрегат. Показано существенное преимущество предложенного подхода по сравнению с простой моделью двух связанных точечных осцилляторов, плазмонного и экситонного, находящихся друг от друга на некотором расстоянии r , или эквивалентной ей модели двухуровневого эффективного гамильтониана.

Конкретные расчеты и теоретический анализ проведены для большого числа наночастиц разнообразного состава и размеров, не исследованных ранее. Получены результаты, позволившие установить новые закономерности в оптических спектрах такого рода наносистем и углубляющие существующие представления о характере и механизмах плазмон-экситонной связи.

Теоретическая и практическая значимость работы

Разработанная экситонная модель молекулярных агрегатов с непланарной элементарной ячейкой описывает широкий класс агрегатов красителей, активно используемых в нанофотонике и фотохимии. Модель расширяет существующие теоретические способы описания оптических свойств упорядоченных супрамолекулярных систем и эффектов их взаимодействия с поляризованным и естественно поляризованным светом. Уникальный характер спектров поглощения поляризованного света таких систем делает их перспективными материалами для создания поляризационно-чувствительных оптоэлектронных устройств.

Изученные в диссертации молекулярные агрегаты красителей привлекательны для использования в ряде приложений органической и гибридной фотоники и оптоэлектроники. Они могут найти применение при разработке экситонных волноводов, наноразмерных оптических переключателей, фотодетекторов и светоизлучающих устройств с “перестраиваемым” спектром излучения. Понимание эффектов взаимодействия света со сложными упорядоченными супрамолекулярными системами необходимо также в связи с рядом биологических и медицинских применений и их важной ролью в фотохимии природных соединений, в том числе в процессах фотосинтеза, где они выполняют роль светособирающих комплексов.

Гибридные металлоорганические системы сочетают в себе достоинства плаз-

монных и экситонных структур с возможностями эффективного управления оптическими свойствами в результате реализации различных режимов плазмон-экситонной связи. Использование в их составе J-агрегатов позволяет на качественно новом уровне изучать эффекты плазмон-экситонного взаимодействия в самых разных режимах благодаря наличию узких и интенсивных пиков поглощения.

Результаты исследования эффективности плазмон-экситонной связи в наночастицах различного состава и размеров представляют интерес для фундаментальных и прикладных исследований оптических явлений, обусловленных ближнепольной электромагнитной связью локализованных поверхностных плазмонов с молекулярными экситонами. Фундаментальная значимость результатов работы в этой части состоит в том, что они способствуют более глубокому пониманию механизмов электромагнитной связи в композитных структурах “ядро-оболочка”. В частности, предложен способ корректной характеристики эффективности плазмон-экситонного взаимодействия в таких системах с помощью двух констант связи. Практическая ценность результатов состоит в возможности их использования для разработки композитных материалов с целью создания элементной базы нанопотонных и оптоэлектронных устройств нового поколения. Результаты расчетов оптических спектров наночастиц с биметаллическим ядром, а также частиц полупроводник/металл/J-агрегат и металл/прослойка/J-агрегат важны для приложений оптики плазмон-экситонных структур к созданию новых материалов с заданными спектральными свойствами.

Положения, выносимые на защиту

1. Для нитевидных агрегатов с двумя молекулами в непланарной элементарной ячейке характер спектров поглощения света (K^{\parallel} и K^{\perp}), линейно-поляризованного параллельно (\parallel) и перпендикулярно (\perp) оси агрегата, сильно зависит от полярного, θ , и азимутального, φ , углов ориентации векторов дипольных моментов перехода в мономерах. Семикратное превышение коэффициентов поглощения K^{\parallel} над величинами K^{\perp} в окрестности J-полосы агрегата псевдоизоцианина определяется геометрией его ячейки с углами $\theta = 57^\circ$, $\varphi = 154^\circ$.
2. Коэффициент поглощения света, поляризованного перпендикулярно оси агрегата с двумя молекулами в непланарной элементарной ячейке, при положительной энергии экситонной связи содержит как узкую J-полосу ($\hbar\gamma_J \sim 30 - 50$ мэВ), так и широкую H-полосу ($\hbar\gamma_H \sim 100$ мэВ), в то время как для поглощения света, поляризованного параллельно оси, присутствует только H-полоса.

Это принципиальное отличие от агрегатов с одной молекулой в ячейке.

3. Корректным способом определения эффективности плазмон-экситонной связи в наносферах “ядро-оболочка” Ag/J-агрегат и Au/J-агрегат небольших размеров является использование двух констант связи g_+ и g_- , характеризующих взаимодействие дипольного плазмона с двумя экситонными модами. Эти моды возникают из-за расщепления J-полосы на две компоненты с разностью энергий $\sim 100 - 150$ мэВ, превышающей ее ширину $\sim 30 - 50$ мэВ.
4. Константы плазмон-экситонной связи g_+ и g_- сильно зависят от отношения объема оболочки к полному объему частицы и слабо зависят от самого этого объема. При отношении объемов 0.42 для частиц Ag/J-агрегат красителя ТСРР в воде константы связи равны 0.13 эВ и 0.11 эВ соответственно. Для частиц Au/J-агрегат красителей PIC и TDBC они в 1.5 – 2 раза ниже.
5. В наносферах с полупроводниковым ядром и двойной оболочкой Au/J-агрегат дополнительно к режимам слабой и сильной связи реализуется режим, при котором вблизи пика J-полосы возникает существенная асимметрия спектрального контура рассеяния света, описываемая формулой Фано. При толщинах золотого и J-агрегатного слоев 12 нм и 4 нм и радиусе ядра 60 нм параметр асимметрии q изменяется в диапазоне от -0.5 до -1.0 для Si, GaP и ZnSe.
6. Результаты расчетов сечений поглощения и рассеяния света трехслойными наночастицами биметалл/J-агрегат, металл/диэлектрик/J-агрегат и полупроводник/металл/J-агрегат демонстрируют возможности сильного изменения их оптических свойств благодаря реализации различных режимов плазмон-экситонной связи при изменении их состава и геометрических параметров.

Достоверность полученных результатов

Теоретические расчеты и анализ полученных в диссертации результатов выполнены с использованием самосогласованных и эффективных методов современной оптики и спектроскопии. При проведении расчетов использовались достоверные данные по оптическим константам материалов. Надежность использованных аналитических и численных методов была неоднократно доказана при решении широкого перечня задач нанофотоники и теории молекулярных экситонов. В ряде случаев достоверность результатов расчетов подтверждена сравнением с имеющимися экспериментальными данными, а также совпадением результатов расчетов, выполненных различными способами. Корректность ряда аналитических ре-

зультатов дополнительно подтверждается тем, что в качестве своих предельных случаев они содержат известные выражения для систем более простых типов. Основные выводы диссертационной работы неоднократно докладывались автором на научных конференциях и семинарах Отделения оптики ФИАН.

Апробация работы

Результаты диссертации доложены лично автором на восьми российских и международных конференциях: Международной конференции *VIII International Conference on Ultrafast Optical Science «UltrafastLight-2024»* (30 октября – 2 ноября 2024, Москва), 68-й Всероссийской научной конференции МФТИ (30 марта – 3 апреля 2026 г., Москва), Школе молодых ученых *«Быстропротекающие электровзрывные, электронные и электромагнитные процессы в импульсной электронике и оптоэлектронике»* БПИО-2025 (24 – 27 ноября 2025 г., Москва), 67-й Всероссийской научной конференции МФТИ (31 марта – 4 апреля 2025 г., Москва), Школе молодых ученых *«Быстропротекающие электровзрывные, электронные и электромагнитные процессы в импульсной электронике и оптоэлектронике»* БПИО-2024 (18 – 22 ноября 2024 г., Москва), 66-й Всероссийской научной конференции МФТИ (1 – 6 апреля 2024 г., Москва), Школе молодых ученых *«Быстропротекающие электровзрывные, электронные и электромагнитные процессы в импульсной электронике и оптоэлектронике»* БПИО-2023 (21 – 23 ноября 2023 г., Москва), 65-й Всероссийской научной конференции МФТИ (3 – 8 апреля 2023 г., Москва).

Публикации

Основные результаты диссертации опубликованы в виде семи статей в ведущих российских и зарубежных рецензируемых журналах, индексируемых базами данных Web of Science и Scopus, а также входящих в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук. Результаты диссертации также опубликованы в семи материалах конференций. Список публикаций автора по теме диссертации приведен на с. 22–23 автореферата.

Личный вклад автора диссертации

Личный вклад автора состоит в проведении численных расчетов, в отборе и анализе литературы по теме диссертации, в активном участии в обсуждении и

постановке задач, в совместном с научным руководителем анализе полученных результатов, написании статей и формулировке выводов диссертации.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав основного текста, заключения и приложения. Общий объем диссертации – 188 страниц, включая 57 рисунков и 6 таблиц. Список литературы содержит 217 наименований.

Основное содержание работы

Во **Введении** приведено обоснование актуальности исследования, сформулированы цели работы и задачи диссертации, ее научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, а также представлен список положений, выносимых на защиту.

Глава 1 содержит обзор современного состояния исследований по теме диссертации. Дана краткая сводка публикаций в области упорядоченных молекулярных агрегатов красителей, оптические свойства которых определяются возбуждением делокализованных экситонов Френкеля. Сжато изложены базовые принципы теории молекулярных экситонов. Приведено обсуждение диэлектрических свойств J-агрегатных материалов и оптических свойств плазмонных металлических наночастиц. Дан обзор имеющихся результатов по гибридным наночастицам из благородного металла и J-агрегата красителя, а также по эффектам плазмон-экситонной связи в двухслойных и трехслойных частицах. Представлены основные элементы теории поглощения и рассеяния света частицами “ядро-оболочка” (см. Рис. 1), используемые в диссертации. Приведены существующие модели плазмон-экситонной связи для металлоорганических частиц: двух связанных осцилляторов, точечных диполей и двухуровневого эффективного гамильтониана.

В **Главе 2** на основе базовых выражений теории молекулярных экситонов разработана теоретическая модель описания поглощения линейно- и естественно-поляризованного света нитевидными упорядоченными агрегатами с двумя молекулами в элементарной ячейке (см. Рис. 2а). Показано, что их оптические свойства сильно зависят от полярного, θ , и азимутального, φ , углов взаимной ориентации дипольных моментов перехода, \mathbf{d}_1 и \mathbf{d}_2 , в молекулах мономеров (см. Рис. 2б).

Коэффициент поглощения света агрегатами с двумя молекулами в непланарной элементарной ячейке, K_{tot}^α , определяется суммой коэффициентов поглощения, K_q^α , на индивидуальных переходах из основного состояния $|g\rangle$ в состояние $|e_q\rangle$ эк-

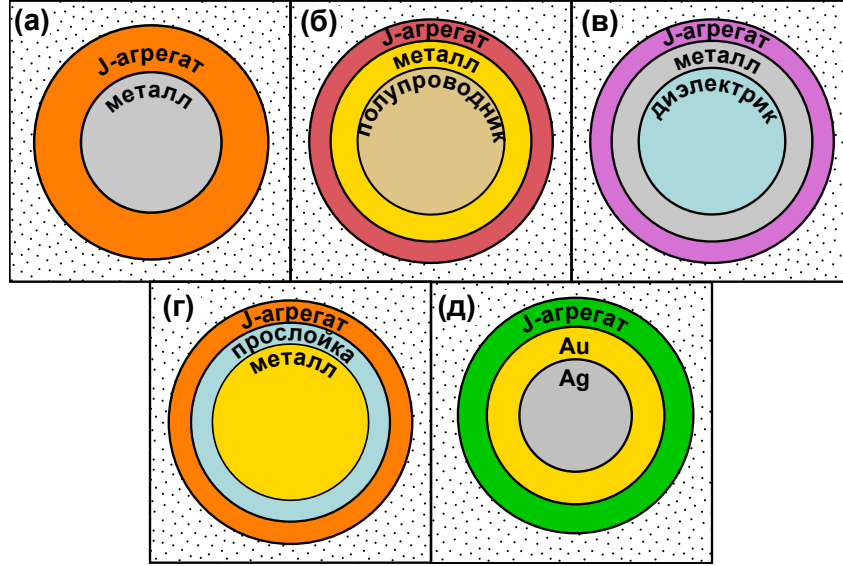


Рис. 1: Схематические изображения исследуемых в диссертации гибридных наночастиц различных типов: (а) – металл/J-агрегат, (б) – полупроводник/металл/J-агрегат, (в) – диэлектрик/металл/J-агрегат, (г) – металл/прослойка/J-агрегат, (д) – биметалл/J-агрегат.

ситонной зоны с волновым числом q . Результат выглядит следующим образом

$$K_q^\alpha(\omega_k) = N \frac{4\pi^2 d^2}{\hbar^3 \omega_k c} E_q^2(\theta, \varphi) S_q(\theta, \varphi, \Phi) a_q(\omega_k), \quad K_{\text{tot}}^\alpha(\omega_k) = \sum_q K_q^\alpha(\omega_k). \quad (1)$$

Здесь ω_k и α – частота и значение поляризации света, N – концентрация агрегатов, \hbar – постоянная Планка, c – скорость света в вакууме, d – модуль дипольного момента синглетного перехода в молекуле красителя, $E_q(\theta, \varphi)$ – закон дисперсии экситонов, a_q – спектральный контур полосы перехода $|g\rangle \rightarrow |e_q\rangle$ (нормировка $\int a_q(\omega) d\omega = 1$). Зависимость коэффициента поглощения от направления вектора поляризации света выделена в виде безразмерного фактора

$$S_q(\theta, \varphi, \Phi) = \frac{1}{2} \sin^2 \theta \sin^2 \Phi \sin^2 \left(\frac{\varphi}{2} \right) f_M(\pi - ql) + \left[\cos^2 \theta \cos^2 \Phi + \frac{1}{2} \sin^2 \theta \sin^2 \Phi \cos^2 \left(\frac{\varphi}{2} \right) \right] f_M(ql), \quad (2)$$

где Φ – угол между вектором поляризации света и осью агрегата. Формула (2) содержит функцию

$$f_M(ql) = f_M(q_j l) = \begin{cases} \frac{2}{M+1} \text{ctg}^2 \left(\frac{q_j l}{2} \right), & j = 1, 3, 5, \dots, \\ 0, & j = 2, 4, 6, \dots, \end{cases} \quad (3)$$

которая определяет распределение силы осциллятора между экситонными переходами на дно и на потолок экситонной зоны. Функция f_M зависит от полного числа M агрегированных молекул, дискретного значения волнового числа $q = q_j$ экситона ($j = 1, \dots, M$) и расстояния l между соседними молекулами.

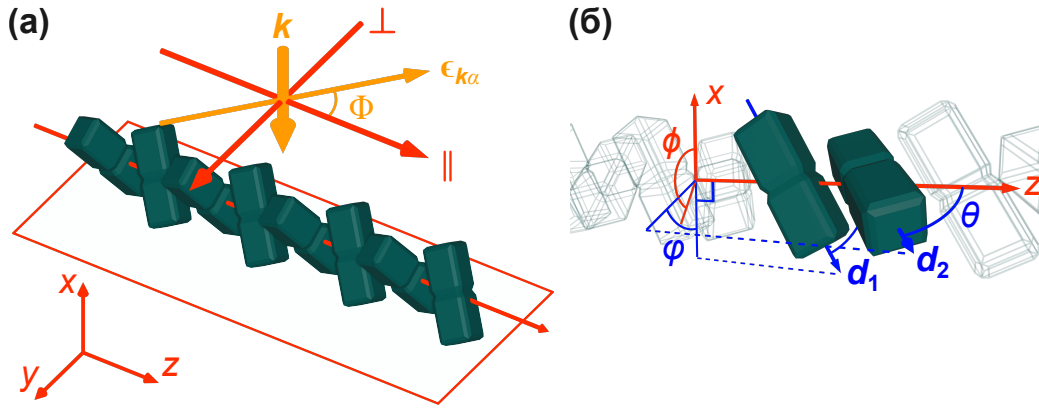


Рис. 2: Схематическое изображение (а) геометрической структуры нити агрегата с непланарной ячейкой, содержащего $M = 8$ молекул, и (б) элементарной ячейки с двумя молекулами. Ось z системы координат направлена вдоль оси агрегата. Угол Φ обозначает поворот вектора поляризации $\epsilon_{k\alpha}$ относительно оси агрегата z . θ – полярный угол отклонения дипольных моментов перехода \mathbf{d}_1 и \mathbf{d}_2 молекул мономеров от оси z . Угол φ – азимутальный угол между двумя диполями в ячейке. ϕ – азимутальный угол поворота агрегата вокруг собственной оси.

Изучены спектры поглощения света, поляризованного параллельно и перпендикулярно оси агрегата с двумя молекулами в непланарной элементарной ячейке. Показано, что разработанная модель содержит в качестве своих частных случаев известные ранее результаты для агрегатов J- и H-типов с одной молекулой в ячейке, а также HV- и X-агрегатов. Продемонстрированы принципиальные различия в поведении спектров поглощения поляризованного света исследуемыми агрегатами по сравнению с этими частными случаями. Наиболее значимым является то, что в агрегатах с непланарной ячейкой при положительной энергии экситонной связи ($E_c > 0$) реализуется ситуация, когда спектр поглощения света, поляризованного параллельно оси агрегата, содержит только широкую H-полосу, тогда как для света перпендикулярной поляризации в дополнение к H-полосе присутствует узкая J-полоса (Рис. 3). Напротив, в традиционной модели Давыдова-МакРея-Каша для агрегатов с одной молекулой в ячейке при $E_c > 0$ отсутствует J-полоса, представляющая наибольший интерес для многих задач нанопотоники.

С использованием разработанной модели впервые дано объяснение экспериментальных спектров поглощения и линейного дихроизма агрегатов псевдоизоцианина (PIC), полученных ранее в диапазоне длин волн от $\lambda = 440$ нм до 620 нм [15]. Из сопоставления теории с экспериментом определены углы ориентации молекул в элементарной ячейке, $\theta = 57^\circ$ и $\varphi = 154^\circ$. Рисунок 4 демонстрирует очень хорошее совпадение теории с экспериментом. В частности, дано объяснение превышения в 7 раз коэффициента поглощения света, поляризованного параллельно оси агрегата.

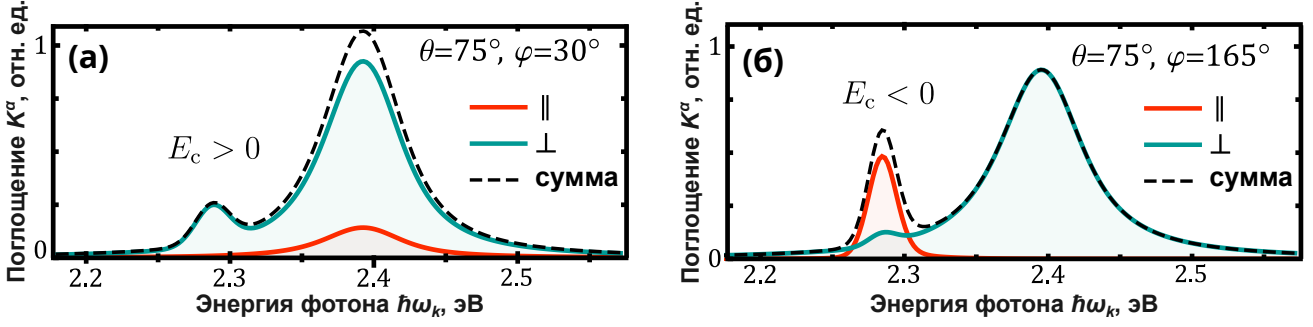


Рис. 3: Коэффициенты поглощения поляризованного света K^α нитевидного агрегата с двумя молекулами в непланарной элементарной ячейке в зависимости от энергии фотона $\hbar\omega_k$. Красные и зеленые кривые – коэффициенты поглощения света, поляризованного параллельно (\parallel) и перпендикулярно (\perp) оси агрегата. Черная штриховая кривая – коэффициент поглощения, суммированный по двум поляризациям α . Расчеты проводились при значениях параметров: $E_0 = 2.34$ эВ; $\theta = 75^\circ$, $\varphi = 30^\circ$, $\mathcal{E} = 80$ мэВ (а); $\theta = 75^\circ$, $\varphi = 135^\circ$, $\mathcal{E} = 55$ мэВ (б).

та, над соответствующей величиной для перпендикулярно поляризованного света в максимуме J-полосы ($\lambda_J = 573$ нм).

В Главе 3 предложен и реализован физически обоснованный способ характеристики эффективности плазмон-экситонной связи в гибридных наночастицах, состоящих из металлического ядра и J-агрегатной оболочки. Ключевым новым моментом разработанной модели является то, что локализованный дипольный плазмон-поляритон одновременно участвует во взаимодействии с двумя экситонными модами J-агрегатной оболочки. Указанные моды обладают различными собственными частотами, ω_{ex}^+ и ω_{ex}^- , расщепленными в случае использования J-агрегатного материала на величину 100 – 150 мэВ. Это расщепление существенно превосходит характерные ширины J-полосы красителей, 30 – 50 мэВ. Учет эффекта расщепления экситонных мод естественным образом приводит к необходимости введения в теорию двух констант плазмон-экситонной связи. В противоположность этому, имеющиеся модели плазмон-экситонной связи для двухкомпонентных наночастиц основаны на модели двух точечных диполей с другой симметрией (аксиальной) и включают в рассмотрение лишь одну константу связи.

Эффективное сечение экстинкции света наносферой металл/J-агрегат (см. Рис. 1а) небольших размеров описывается в квазистатическом приближении формулой

$$\sigma_{\text{ext}}(\omega) = \frac{4\pi\omega\sqrt{\epsilon_h}}{c} \text{Im}\{\alpha(\omega)\}, \quad (4)$$

которая включает в себя частоту света, ω , скорость света в вакууме, c , диэлектрическую проницаемость окружающей частицу среды, ϵ_h , а также дипольную поляризуемость двухслойной частицы, $\alpha = \alpha(\omega)$ [16]. Если плазмон-экситонная

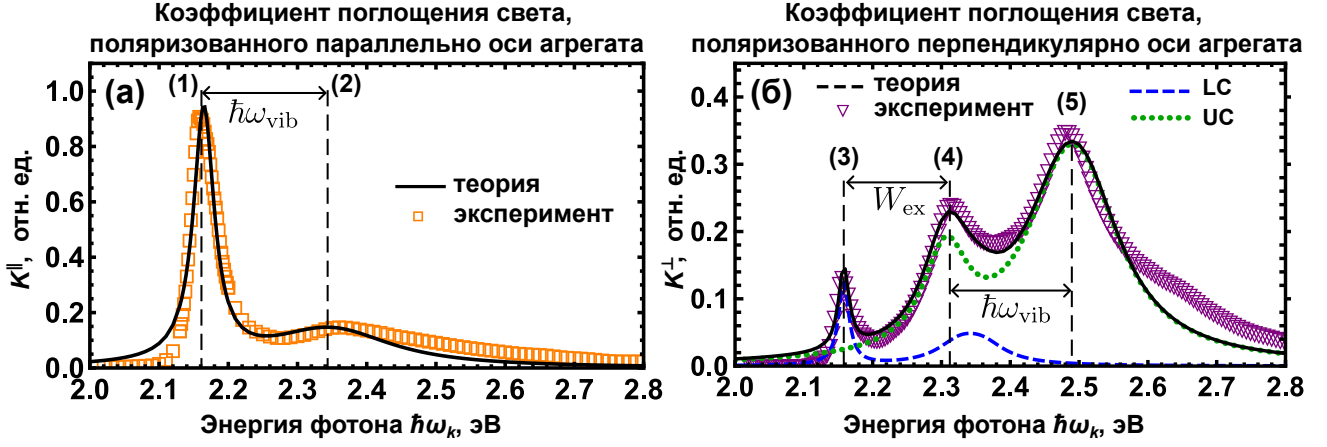


Рис. 4: Коэффициент поглощения поляризованного света K^α агрегатом PIC-Vg в зависимости от энергии фотона $\hbar\omega_k$. (а) и (б) – спектры поглощения света, поляризованного параллельно (\parallel) и перпендикулярно (\perp) оси агрегата. Сплошные кривые – расчеты в рамках разработанной модели, маркеры – эксперимент [15]. Синие штриховые и зеленые пунктирные кривые на рис. (б) – вклады переходов на дно (LC) и потолок (UC) экситонной зоны, соответственно. Ширина экситонной зоны $W_{\text{ex}} = 142$ мэВ, колебательный квант $\hbar\omega_{\text{vib}} = 169$ мэВ.

связь эффективна, то результирующий спектр радикально отличается от суперпозиции спектров металлической частицы и J-агрегата [17].

Предложенный в диссертации способ определения количественной меры эффективности плазмон-экситонной связи в частицах “ядро-оболочка”, обладающих сферической симметрией, основан на методе эффективного гамильтониана,

$$\hat{H} = \hat{H}_{\text{pl}} + \hat{H}_{\text{ex}} + \hat{\mathcal{V}}. \quad (5)$$

Здесь операторы \hat{H}_{pl} и \hat{H}_{ex} относятся к металлическому ядру и J-агрегатной оболочке в отсутствие плазмон-экситонной связи, а оператор $\hat{\mathcal{V}}$ описывает взаимодействие подсистем. В диссертации построение этих операторов проводится таким образом, чтобы собственные значения гамильтониана (5) находились в точном соответствии с полюсами поляризуемости гибридной наночастицы, $\alpha = \alpha(\omega)$. В качестве ключевого промежуточного шага из исходных выражений квазистатического приближения обобщенной теории Ми (см. [16]) после ряда трудоемких преобразований получено уравнение на комплексные полюса поляризуемости α :

$$1 - \frac{32\pi^2}{9} \frac{V_{\text{sh}}}{V} [C_{\text{sh}}^\infty \tilde{\alpha}_{\text{sh}}^\infty + C_{\text{ex}}^+ \tilde{\alpha}_{\text{ex}}^+(\omega) + C_{\text{ex}}^- \tilde{\alpha}_{\text{ex}}^-(\omega)] (\tilde{\alpha}_{\text{m}}^\infty + \tilde{\alpha}_{\text{pl}}(\omega)) = 0, \quad (6)$$

решения которого определяют частоты и ширины гибридных мод наносферы металл/J-агрегат. Полученный вид уравнения (6) в явном виде содержит вклады различных составляющих поляризуемости единицы объема невзаимодействующих ядра и оболочки: $\tilde{\alpha}_{\text{pl}}$, описывающая вклад плазмонного резонанса ядра, $\tilde{\alpha}_{\text{ex}}^+$

и $\tilde{\alpha}_{\text{ex}}^-$ – резонансные вклады двух экситонных мод оболочки, а также фоновые составляющие поляризуемостей единицы объема ядра и оболочки, $\tilde{\alpha}_{\text{m}}^\infty$ и $\tilde{\alpha}_{\text{sh}}^\infty$. В уравнение (6) также входят отношение объема оболочки, V_{sh} , к полному объему частицы, V , и безразмерные коэффициенты

$$C_{\text{sh}}^\infty = \frac{\varepsilon_{\text{J}}^\infty + 2\varepsilon_{\text{h}}}{\varepsilon_{\text{h}} + 2\varepsilon_{\text{J}}^\infty}, \quad C_{\text{ex}}^\pm = \frac{4V_{\text{c}}}{V + 4V_{\text{c}} \mp \sqrt{V^2 + 8VV_{\text{c}}}}, \quad (7)$$

где $\varepsilon_{\text{J}}^\infty$ – фоновая часть диэлектрической проницаемости агрегата (без учета резонансного вклада J-полосы), V_{c} – объем ядра частицы. Уравнение (6) отражает влияние разнообразных факторов на поведение гибридных мод частицы “ядро-оболочка” и позволяет построить на его основе эффективный гамильтониан (5).

Для того, чтобы в методе эффективного гамильтониана корректно учесть диссипацию энергии в ядре и оболочке гибридной наночастицы, для задач диссертации был адаптирован подход, развитый в работе [18] по квантовой оптике для описания вакуумного расщепления Раби в системе атомных осцилляторов в микрорезонаторе. Результирующее секулярное уравнение для эффективного гамильтониана (5) имеет наиболее простой вид для частиц с серебряным ядром:

$$\begin{vmatrix} \mathcal{L}_{\text{pl}}(\omega) & (2\check{\omega}_{\text{pl}}\check{\omega}_{\text{ex}}^+)^{1/2}g_+ & (2\check{\omega}_{\text{pl}}\check{\omega}_{\text{ex}}^-)^{1/2}g_- \\ (2\check{\omega}_{\text{pl}}\check{\omega}_{\text{ex}}^+)^{1/2}g_+ & \mathcal{L}_{\text{ex}}^+(\omega) & 0 \\ (2\check{\omega}_{\text{pl}}\check{\omega}_{\text{ex}}^-)^{1/2}g_- & 0 & \mathcal{L}_{\text{ex}}^-(\omega) \end{vmatrix} = 0, \quad (8)$$

$$\mathcal{L}_{\text{pl}}(\omega) = \check{\omega}_{\text{pl}}^2 - \omega^2 - i\gamma_{\text{pl}}\omega, \quad \mathcal{L}_{\text{ex}}^\pm(\omega) = (\check{\omega}_{\text{ex}}^\pm)^2 - \omega^2 - i\gamma_{\text{ex}}\omega.$$

В секулярное уравнение (8) входят собственные частоты электродипольной плазмонной моды, $\check{\omega}_{\text{pl}}$, и двух экситонных мод оболочки, $\check{\omega}_{\text{ex}}^+$ и $\check{\omega}_{\text{ex}}^-$, а также коэффициенты затухания, γ_{pl} и γ_{ex} . Анализ показал, что ширины обеих экситонных мод оболочки равны друг другу и ширине J-полосы красителя, $\gamma_{\text{ex}} = \gamma_{\text{J}}$. Установлено влияние на константы связи g_+ и g_- фоновых составляющих поляризуемостей единиц объема ядра $\tilde{\alpha}_{\text{m}}^\infty$ и оболочки $\tilde{\alpha}_{\text{sh}}^\infty$. В диссертации также выполнено обобщение теории на случай золотого ядра, когда в исследуемом спектральном диапазоне существенную роль играют межзонные переходы.

Константы связи дипольного плазмона, локализованного в ядре частицы, и двух экситонных мод во внешней J-агрегатной оболочке найдены в аналитическом виде из условия эквивалентности секулярного уравнения (8) и уравнения на полюса динамической поляризуемости (6). Результат имеет вид

$$g_\pm^2 = \frac{8\pi^2 V_{\text{sh}}}{9 V} \frac{\left(1 - \frac{32\pi^2 V_{\text{sh}}}{9 V} C_{\text{sh}}^\infty \tilde{\alpha}_{\text{sh}}^\infty \tilde{\alpha}_{\text{m}}^\infty\right)}{\left[1 - \frac{8\pi V_{\text{sh}}}{3 V} (1 - C_{\text{sh}}^\infty) \tilde{\alpha}_{\text{sh}}^\infty\right]^2} \eta_\pm \check{f}_{\text{pl}} \check{f}_{\text{ex}}^\pm \check{\omega}_{\text{pl}} \check{\omega}_{\text{ex}}^\pm. \quad (9)$$

Квадраты констант связи g_+ и g_- пропорциональны произведению эффективных сил осцилляторов плазмона, \check{f}_{pl} , и экситонных мод оболочки, \check{f}_{ex}^{\pm} , собственных частот, $\check{\omega}_{pl}$ и $\check{\omega}_{ex}^{\pm}$, а также безразмерных факторов η_+ и η_- , которые отражают различия в эффективности связи плазмона с верхней и нижней экситонными модами оболочки и включают в себя зависимости от отношения объемов ядра и оболочки к полному объему наночастицы, V_c/V и V_{sh}/V . Формула (9) также содержит вклад фоновых поляризуемостей ядра и оболочки, $\tilde{\alpha}_m^{\infty}$ и $\tilde{\alpha}_{sh}^{\infty}$. В диссертации также получены формулы для констант g_+ и g_- , в которых они выражены через исходные оптические константы металла и J-агрегата.

С помощью полученных формул выполнен детальный анализ зависимостей констант плазмон-экситонной связи от параметров частиц “ядро-оболочка”. Выяснено, что константы g_+ и g_- сильно зависят от отношения объема оболочки к полному объему частицы, V_{sh}/V , но слабо зависят от самого объема V . На Рис. 5 приведены результаты расчетов g_+ (а) и g_- (б) для частиц с серебряным ядром при различных значениях отношения радиуса ядра к полному радиусу частицы, R_c/R , и разных значений фоновой диэлектрической проницаемости J-агрегата, ϵ_J^{∞} . Видно, что отношение g_+/g_- констант связи достигает 1.3 – 2.2 раз. Выполненные в диссертации расчеты показывают, что константы связи оказываются приблизительно в 2 раза выше для гибридных частиц с серебряным ядром по сравнению с частицами с золотым ядром. Для частиц Ag/TCPP, Au/PIC и Au/TDBC константы $\hbar g_+$ связи плазмона с верхней экситонной модой оболочки составляют, соответственно, 131 мэВ, 42 мэВ и 56 мэВ, а величины константы $\hbar g_-$ связи с нижней экситонной модой оказываются равными 108 мэВ, 36 мэВ и 55 мэВ.

На примерах наночастиц Ag/J-агрегат и Au/J-агрегат продемонстрировано, что полученные формулы дают надежные результаты по спектрам экстинкции в тех случаях, когда оказывается неприменимой модель двух связанных осцилляторов с одной константой g , обычно используемая для оценки эффективности плазмон-экситонной связи. Применимость разработанной теории подтверждена хорошим количественным согласием ее результатов с расчетами, проведенными на основе точных решений уравнений Максвелла. Это наглядно демонстрирует Рис. 6а, где сравниваются расчеты для частиц Au/TDBC в воде с использованием разработанной теории (красные кривые) и точные расчеты в рамках обобщенной теории Ми (черные кривые). В то же время на Рис. 6б показана неприменимость модели двух связанных осцилляторов даже при варьировании константы g в широких пределах. Аналогичные выводы следуют из расчетов для наносфер

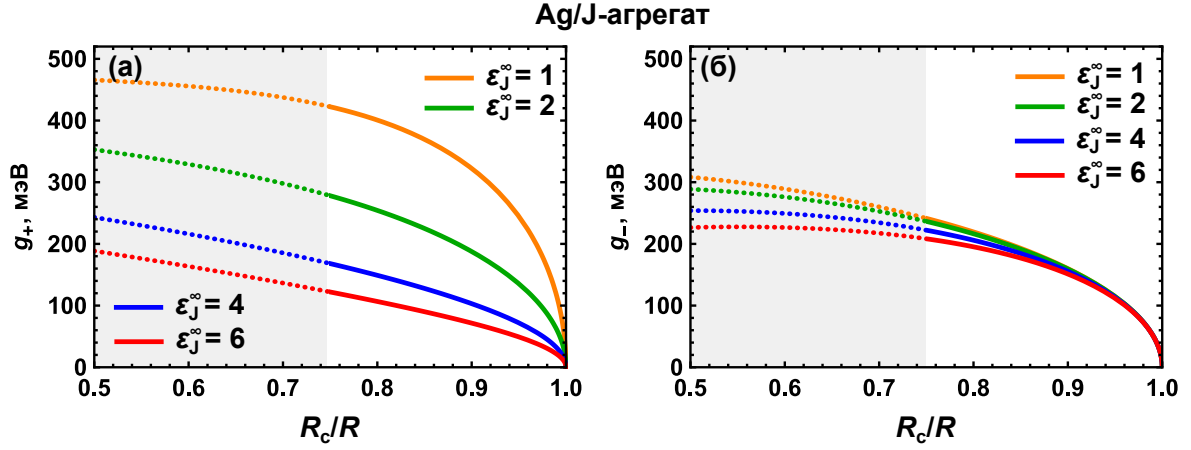


Рис. 5: Константы плазмон-экситонной связи, $\hbar g_+$ (а) и $\hbar g_-$ (б), для частиц Ag/J-агрегат в зависимости от отношения радиуса ядра, R_c , к полному радиусу частицы, $R = 10$ нм. Оранжевые, зеленые, синие и красные кривые – результаты расчетов при различных значениях диэлектрической проницаемости J-агрегата вдали от резонанса: $\varepsilon_J^\infty = 1, 2, 4$ и 6 , соответственно. Другие параметры расчетов: $\hbar\omega_J = 3.07$ эВ, $\hbar\gamma_J = 0.06$ эВ, $f_J = 0.5$, $\varepsilon_h = 1.77$.

Ag/TCPP и Au/PIC. Таким образом, предложенный в диссертации подход обладает существенными преимуществами по сравнению с традиционными моделями двух связанных осцилляторов или двухуровневого эффективного гамильтониана.

В Главе 4 выполнен комплекс численных расчетов для разнообразных трехслойных наночастиц: (i) частицы с диэлектрическим или полупроводниковым ядром, покрытые двойной оболочкой металл/J-агрегат, (ii) частицы с металлическим ядром, внешней J-агрегатной оболочкой и промежуточным пассивным слоем, (iii) частицы с биметаллическим ядром из серебра и золота и J-агрегатной оболочкой. Одна из основных целей главы заключалась в нахождении новых примеров систем с наиболее яркими проявлениями различных эффектов плазмон-экситонной связи, а также в анализе влияния диэлектрических констант материалов и геометрических параметров на характер оптических спектров.

Проведены расчеты спектров фотопоглощения трехслойных наночастиц SiO₂/Au/J-агрегат и SiO₂/Ag/J-агрегат с внешним слоем агрегата красителя TDBC (см. Рис. 1в). Благодаря большой силе осциллятора перехода, $f_J = 0.22$, использование этого красителя обеспечивает большие энергетические расщепления, ≈ 90 мэВ, двух экситонных мод оболочки. Внешний радиус металлических наночастиц, SiO₂/Au и SiO₂/Ag, выбран равным $R_2 = 10$ нм, а толщина J-агрегатного слоя – $l_J = 1$ нм. Благодаря изменению толщины металлического слоя регулировалось положение плазмонного резонанса [14], что позволило установить качественные различия в поведении гибридных мод частиц в условиях больших и малых от-

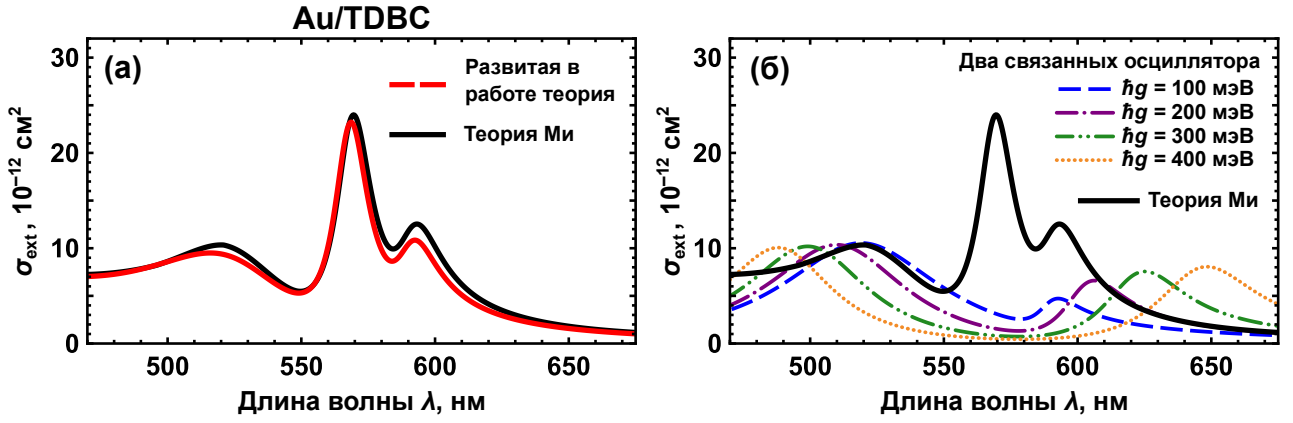


Рис. 6: Сечения экстинкции света, $\sigma_{\text{ext}}(\lambda)$, двухслойных наночастиц Au/J-агрегат красителя TDBC в воде. Радиус ядра $R_c = 15$ нм, полный радиус частицы $R = 18$ нм. Параметры J-агрегата: $\hbar\omega_J = 2.12$ эВ, $\hbar\gamma_J = 0.048$ эВ, $\epsilon_J = 2.3$, $f_J = 0.22$ [9]. (а) Сравнение расчетов в рамках развитой в диссертации теории (красная штриховая кривая) и обобщенной теории Ми (сплошная черная кривая). (б) Сравнение результатов, полученных в рамках теории Ми (черная кривая) и модели двух связанных осцилляторов (цветные кривые) при различных значениях константы плазмон-экситонной связи от $\hbar g = 100$ до 400 мэВ.

строек частоты плазмона, ω_{pl} , от частот двух экситонных мод, ω_{ex}^+ и ω_{ex}^- . Это показано на Рис. 7а на примере частиц $\text{SiO}_2/\text{Au}/\text{J}$ -агрегат. Зависимости положений спектральных пиков гибридных мод от энергии плазмона приведены на Рис. 7б. Хорошо видна область двойного антипересечения. Полученные результаты наглядно демонстрируют постепенный переход между режимами слабой и сильной связи дипольного плазмона с двумя экситонными резонансами J-агрегатной оболочки при увеличении толщины, ℓ_m , золотого слоя от 1 нм до 4 нм.

Проанализированы основные закономерности, возникающие в спектрах поглощения и рассеяния света трехслойных наносфер полупроводник/металл/J-агрегат красителя TDBC в качестве внешней оболочки (см. Рис. 16). На примере полупроводниковых материалов Si, GaP и ZnSe показано, что использование существенно различных значений диэлектрической проницаемости ядра ($\epsilon = 16, 11$ и 7 для Si, GaP и ZnSe, соответственно) позволяет при одних и тех же значениях геометрических параметров системы реализовать переход от режима слабой связи, при котором результирующий спектр фотопоглощения системы близок к суперпозиции спектров ее плазмонной и экситонной подсистем, к режиму сильной связи.

В диссертации показано, что в трехслойных наночастицах полупроводник/металл/J-агрегат (см. Рис. 16) может быть реализован еще один режим с асимметричным спектральным контуром вблизи максимума J-полосы. Это особенно наглядно продемонстрировано на примере спектров рассеяния света частицами

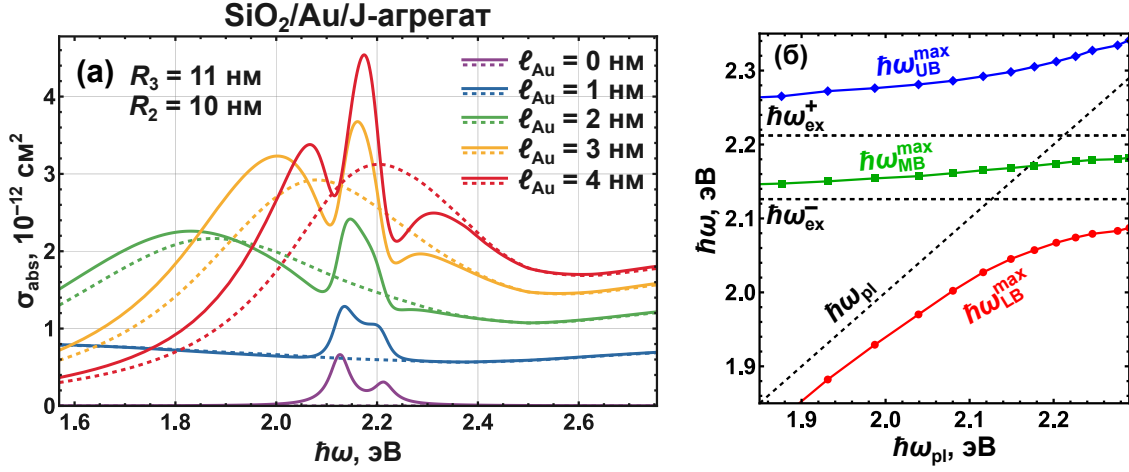


Рис. 7: (а) Сечения поглощения света, σ_{abs} , наночастицами SiO₂/Au/J-агрегат красителя TDBC в воде в зависимости от энергии фотона, $\hbar\omega$ (сплошные кривые). Полный радиус частицы $R_3 = 11 \text{ нм}$, внешний радиус промежуточной золотой оболочки $R_2 = 10 \text{ нм}$, ее толщина ℓ_{Au} варьируется от 0 до 4 нм. Штриховые кривые – результаты для частиц SiO₂/Au. (б) Положения максимумов, $\hbar\omega_{\text{UB}}^{\text{max}}$, $\hbar\omega_{\text{MB}}^{\text{max}}$ и $\hbar\omega_{\text{LB}}^{\text{max}}$, спектральных пиков трехслойной частицы в зависимости от положения, $\hbar\omega_{\text{pl}}$, плазмонного резонанса наноболочки SiO₂/Au.

ZnSe/Au/TDBC с радиусом $R = 74 \text{ нм}$ (см. Рис. 8). Этот контур успешно описан известной формулой Фано [19]. Показано, что при перестройке длины волны от 555 нм до 567 нм сечение рассеяния света частицей возрастает в 2.3 раза. Характерные ширины пиков рассеяния частицами ZnSe/Au без J-агрегатного покрытия составляют более 100 нм, в то время как для частиц ZnSe/Au/TDBC резкий рост сечения рассеяния в окрестности асимметричного пика происходит на существенно меньших масштабах, $\Delta\lambda = 12 \text{ нм}$. Значение параметра асимметрии q в формуле Фано составляет $q = -1.0$. Подобные асимметричные контуры найдены также для трехслойных частиц GaP/Au/TDBC и Si/Au/TDBC. Для них параметр асимметрии оказался равен $q = -0.7$ и $q = -0.5$ соответственно.

На примере трехслойных частиц Au/TMA/TDBC с промежуточным диэлектрическим слоем (см. Рис. 1г) показано существенное различие в поведении сечений поглощения вблизи резонансных длин волн верхней, $\lambda_{\text{ex}}^+ = 510 \text{ нм}$, и нижней, $\lambda_{\text{ex}}^- = 544 \text{ нм}$, расщепленных экситонных мод оболочки. Установлено, что для наночастиц с радиусом ядра $R_c = 50 \text{ нм}$ при увеличении толщины ℓ_s пассивной органической прослойки TMA от нуля до 20 нм в окрестности λ_{ex}^- происходит образование спектрального пика. В противоположность этому, вблизи λ_{ex}^+ имеет место ярко выраженный провал, который слабо изменяется с увеличением ℓ_s .

Проведены расчеты спектров поглощения и рассеяния света частицами с биметаллическим ядром, состоящим из внутренней серебряной и внешней золо-

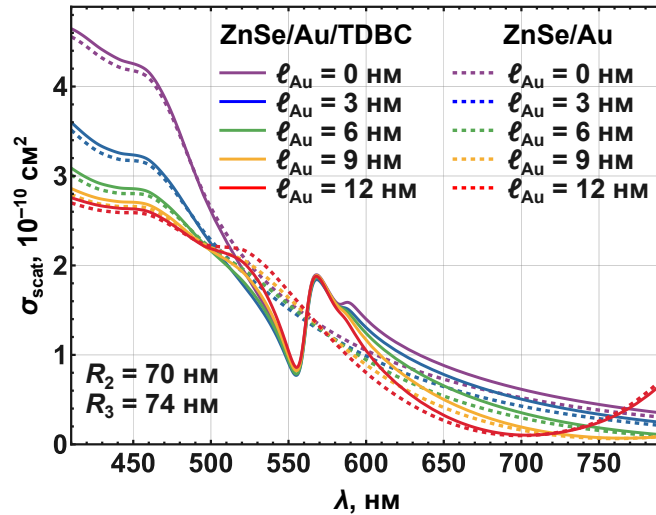


Рис. 8: Сечение рассеяния света частицами ZnSe/Au/TDBC в зависимости от длины световой волны λ при различных значениях толщины, l_{Au} , промежуточного золотого слоя. Внешние радиусы золотого слоя и J-агрегатной оболочки выбраны равными $R_2 = 70$ нм и $R_3 = 74$ нм.

той частей (см. Рис. 1д), покрытым внешней оболочкой J-агрегата красителя TC@Thia(Et) смешанного типа. На этом примере продемонстрирована возможность эффективного управления глубиной провала, обусловленного сильной плазмон-экситонной связью, в спектрах рассеяния света за счет изменения соотношения объема серебра и золота в наночастице с биметаллическим ядром.

В целом результаты расчетов оптических спектров трехслойных наночастиц различного состава и размеров, содержащих металлическую и J-агрегатную компоненту, демонстрируют новые возможности реализации разнообразных режимов плазмон-экситонной связи за счет выбора конкретных параметров системы.

В **Заключении** приведены основные результаты работы.

Приложение содержит список обозначений для параметров, используемых в диссертации для описания оптических свойств плазмонной и экситонной компонент двухслойных наносфер металл/J-агрегат.

Заключение

В ходе диссертационной работы получены следующие основные результаты:

1. Разработана теоретическая модель описания процессов поглощения поляризованного и естественно-поляризованного света нитевидными агрегатами с двумя молекулами в непланарной элементарной ячейке. Получены аналитические формулы для коэффициентов поглощения света и линейного дихроизма. Показано, что они содержат известные выражения для линейных J- и H-агрегатов с

одной молекулой в ячейке в качестве частных случаев.

2. Впервые дано количественное описание спектров фотопоглощения и линейного дихроизма J-агрегата красителя псевдоизоцианина, исследованных ранее экспериментально в видимом диапазоне. Объяснено семикратное превышение коэффициента поглощения света, поляризованного параллельно оси агрегата, над коэффициентом поглощения света, поляризованного перпендикулярно этой оси, на длине волны максимума J-полосы ($\lambda_J = 573$ нм).
3. Предложен новый способ характеристики эффективности плазмон-экситонного взаимодействия в наносферах металл/J-агрегат, который для частиц небольших размеров надежно описывает электромагнитную связь дипольного плазмона в ядре с двумя экситонными модами оболочки. Получены аналитические выражения для двух констант связи g_+ и g_- и показано, что для типичных энергий расщепления экситонных резонансов 100 – 150 мэВ отношение g_+/g_- варьируется в диапазоне 0.7 – 2.2.
4. Установлено хорошее согласие результатов построенной модели с точными расчетами в рамках теории Ми спектров экстинкции света наносферами Ag/J-агрегат красителя TCPP и Au/J-агрегат красителей PIC и TDBC. Для частиц с серебряным ядром константы плазмон-экситонной связи оказываются в два раза выше, чем для золотого, и составляют $\hbar g_+ = 0.13$ эВ и $\hbar g_- = 0.11$ эВ при отношении объема оболочки к полному объему частицы, равном 0.42.
5. Проведены расчеты сечений рассеяния света частицами с полупроводниковым ядром, золотым промежуточным слоем и оболочкой J-агрегата красителя TDBC. Показано, что варьирование толщины золотого слоя позволяет дополнительно к режимам слабой и сильной связи реализовать асимметричный спектральный контур, описываемый формулой Фано с параметром асимметрии q , равным -0.5 , -0.7 и -1.0 для материалов ядра Si, GaP и ZnSe при толщинах золотого и J-агрегатного слоев 12 нм и 4 нм и радиусе ядра 60 нм.
6. Проведенные расчеты сечений поглощения и рассеяния света разнообразными трехслойными частицами биметалл/J-агрегат, металл/диэлектрик/J-агрегат и полупроводник/металл/J-агрегат позволили установить геометрические параметры и конкретные составы частиц, при которых реализуются основные режимы плазмон-экситонной связи, определяющие качественно различный характер оптических спектров подобного рода систем.

Список публикаций автора по теме диссертации

Статьи в рецензируемых журналах:

1. S. S. Moritaka, V. S. Lebedev / Orientational effects in the polarized absorption spectra of molecular aggregates // Journal of Chemical Physics. — 2024. — Vol. 160. — No. 7. — 074901 (18 pages).
2. С. С. Моритака, В. С. Лебедев / Обобщенная аналитическая модель описания спектров поглощения света линейными молекулярными агрегатами // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. — 2023. — Т. 118. — Вып. 11. — С. 794–801.
3. С. С. Моритака, В. С. Лебедев / Роль резонансов оболочки в формировании плазмон-экситонной связи в наночастицах металл/J-агрегат // Квантовая электроника. — 2026. — Т. 56. — № 2. — С. 112–128.
4. С. С. Моритака, В. С. Лебедев / Анализ спектров экстинкции и режимов ближнепольной электромагнитной связи в плекситонных наночастицах в модели связанных осцилляторов // Квантовая электроника. — 2024. — Т. 54. — № 6. — С. 362–370.
5. С. С. Моритака, А. В. Мекшун, В. С. Лебедев / Спектры поглощения и рассеяния света гибридными наноболочками полупроводник/металл/J-агрегат // Квантовая электроника. — 2024. — Т. 54. — № 8. — С. 501–510.
6. С. С. Моритака, А. В. Мекшун, В. С. Лебедев / Спектры поглощения и рассеяния света наночастицами с биметаллическим ядром Au/Ag и внешней оболочкой с двумя J-полосами молекулярных агрегатов // Краткие сообщения по физике ФИАН. — 2024. — № 12. — С. 63–72.
7. С. С. Моритака, В. С. Лебедев / Влияние геометрических параметров и оптических констант трехслойных металлоорганических наносфер на поведение их спектров поглощения // Краткие сообщения по физике ФИАН. — 2023. — № 12. — С. 112–120.

Тезисы докладов на конференциях:

1. Влияние межзонных переходов в металле на поведение энергетических ветвей гибридных плазмон-экситонных мод наночастиц типа “ядро-оболочка” / С. С. Моритака, В. С. Лебедев // Школа молодых ученых «Быстропротекающие электровзрывные, электронные и электромагнитные процессы в импульсной

- электронике и оптоэлектронике» БПИО-2025 (24 – 27 ноября 2025 г., Москва). Сборник тезисов докладов школы молодых ученых БПИО-2025: с. 48–50.
2. Зависимость расщепления гибридных мод наночастиц Металл/J-агрегат от нерезонансных составляющих поляризуемости ядра и оболочки / С. С. Моритака // 67-я Всероссийская научная конференция МФТИ (31 марта – 4 апреля 2025 г., Москва). В сборнике трудов: с. 113–115.
 3. Описание оптических спектров плазмонных наночастиц с распределенной экситонной оболочкой в модели связанных диполей / С. С. Моритака, В. С. Лебедев // Школа молодых ученых «Быстропротекающие электровзрывные, электронные и электромагнитные процессы в импульсной электронике и оптоэлектронике» БПИО-2024 (18 – 22 ноября 2024 г., Москва). Сборник тезисов докладов школы молодых ученых БПИО-2024: с. 60–62.
 4. Absorption and nonlinear optical properties of J-aggregates with two molecules in a unit cell / S. Moritaka // VIII International Conference on Ultrafast Optical Science «UltrafastLight-2024» (October 30th – November 2nd, 2024, Moscow). Book of abstracts: p. 116.
 5. Описание компонент Давыдовского расщепления в спектрах поглощения поляризованного света трубчатými молекулярными агрегатами / С. С. Моритака // 66-я Всероссийская научная конференция МФТИ (1 – 6 апреля 2024 г., Москва). В сборнике трудов: с. 122–124.
 6. Поляризационные эффекты в ориентированных агрегатах красителей / С. С. Моритака, В. С. Лебедев // Школа молодых ученых «Быстропротекающие электровзрывные, электронные и электромагнитные процессы в импульсной электронике и оптоэлектронике» БПИО-2023 (21 – 23 ноября 2023 г., Москва). Сборник тезисов докладов школы молодых ученых БПИО-2023: с. 67–70.
 7. Связь геометрии непланарной ячейки молекулярного агрегата с его поляризованным спектром поглощения / С. С. Моритака, А. Д. Кондорский // 65-я Всероссийская научная конференция МФТИ (3 – 8 апреля 2023 г., Москва). В сборнике трудов: с. 119–120.

Список использованной литературы

1. Vats G., Hodges B., Ferguson A. J., Wheeler L. M., Blackburn J. L. Optical Memory, Switching, and Neuromorphic Functionality in Metal Halide Perovskite Materials and Devices // *Advanced Materials*. — 2023. — Vol. 35, no. 37. — P. 2205459.
2. Балыкин В. И. Плазмонный нанолазер: современное состояние и перспективы // *Успехи физических наук*. — 2018. — Т. 188, № 9. — С. 935–963.
3. Popkova A. A., Antropov I. M., Tselikov G. I., Ermolaev G. A., Ozerov I., Kir-taev R. V., Novikov S. M., Evlyukhin A. B., Arsenin A. V., Bessonov V. O., Volkov V. S., Fedyanin A. A. Nonlinear Exciton-Mie Coupling in Transition Metal Dichalcogenide Nanoresonators // *Laser & Photonics Reviews*. — 2022. — Vol. 16, no. 6. — P. 2100604.
4. Baranov D. G., Wersäll M., Cuadra J., Antosiewicz T. J., Shegai T. Novel Nanostructures and Materials for Strong Light–Matter Interactions // *ACS Photonics*. — 2018. — Vol. 5, no. 1. — P. 24–42.
5. Smirnov M., Ovchinnikov O., Dedikova A., Shapiro B., Vitukhnovsky A., Shatskikh T. Luminescence properties of hybrid associates of colloidal CdS quantum dots with J-aggregates of thiatrimethine cyanine dye // *Journal of Luminescence*. — 2016. — Vol. 176. — P. 77–85.
6. Kim Y., Barulin A., Kim S., Lee L. P., Kim I. Recent advances in quantum nanophotonics: plexcitonic and vibro-polaritonic strong coupling and its biomedical and chemical applications // *Nanophotonics*. — 2023. — Vol. 12, no. 3. — P. 413–439.
7. Бункин А. Ф., Михалевич В. Г., Стрельцов В. Н. Вынужденное рассеяние на упругих колебаниях наночастиц в оптическом резонаторе с нанодисперсным заполнением // *Известия Российской академии наук. Серия физическая*. — 2021. — Т. 85, № 6. — С. 794–798.
8. Chen C., Chen Y., Fang Z., Ge R., Wu J., Chen X. Hybrid material integration for active photonic applications // *APL Photonics*. — 2024. — Vol. 9, no. 3. — P. 030903.
9. Лебедев В. С., Кондорский А. Д. Оптика плазмон-экситонных наноструктур: теоретические модели и физические явления в системах металл/J-агрегат // *Успехи физических наук*. — 2025. — Т. 195, № 1. — С. 50–93.

10. Cao E., Lin W., Sun M., Liang W., Song Y. Exciton-plasmon coupling interactions: from principle to applications // *Nanophotonics*. — 2018. — Vol. 7, no. 1. — P. 145–167.
11. Ma S., Du S., Pan G., Dai S., Xu B., Tian W. Organic molecular aggregates: From aggregation structure to emission property // *Aggregate*. — 2021. — Vol. 2, no. 4. — e96.
12. Климов В. В. Наноплазмоника. — Москва : Физматлит, 2009.
13. Harris N., Blaber M. G., Schatz G. C. Optical Properties of Metal Nanoparticles // *Encyclopedia of Nanotechnology*. — Dordrecht : Springer Netherlands, 2016. — P. 3027–3048.
14. Лебедев В. С., Медведев А. С. Оптические свойства трехслойных металло-органических наночастиц с внешней оболочкой молекулярных J-агрегатов // *Квантовая электроника*. — 2013. — Т. 41, № 11. — С. 1065–1077.
15. Misawa K., Ono H., Minoshima K., Kobayashi T. New model of excitonic bands and molecular arrangement of highly oriented J-aggregates in polymer films prepared by a novel method // *Journal of Luminescence*. — 1994. — Vol. 60/61. — P. 812–815.
16. Bohren C. F., Huffmann D. R. Absorption and Scattering of Light by Small Particles. — New York : John Wiley & Sons, 1998.
17. Лебедев В. С., Медведев А. С. Эффекты плазмон-экситонного взаимодействия при поглощении и рассеянии света двухслойными наночастицами металл J-агрегат // *Квантовая электроника*. — 2012. — Т. 42, № 8. — С. 701–713.
18. Rudin S., Reinecke T. L. Oscillator model for vacuum Rabi splitting in microcavities // *Physical Review B*. — 1999. — Vol. 59, issue 15. — P. 10227–10233.
19. Fano U. Effects of Configuration Interaction on Intensities and Phase Shifts // *Physical Review*. — 1961. — Vol. 124, issue 6. — P. 1866–1878.