ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора физико-математических наук Стрельцова Владимира Николаевича на диссертацию Моритаки Сергея Сэидзировича «Плазмон-экситонное взаимодействие и оптические свойства наночастиц с металлическим ядром и J-агрегатной оболочкой», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6 – Оптика

Актуальность темы диссертации

Диссертация Моритаки Сергея Сэидзировича выполнена в рамках актуального направления современной нанооптики, связанного с исследованием эффектов плазмон-экситонного взаимодействия в композитных наноструктурах. Конкретным объектом исследования являются делокализованные экситоны Френкеля в упорядоченных молекулярных J-агрегатах органических красителей и созданные на их основе гибридные двухслойные и трехслойные металлоорганические наноструктуры. Эти структуры, помимо молекулярных J-агрегатов красителей во внешнем экситонном слое, содержат благородные металлы, а в ряде случаев ещё и дополнительный пассивный диэлектрический слой из органических материалов. Основная проблема, решаемая автором в диссертации, состоит в изучении физических механизмов ближнепольной электромагнитной связи в указанных композитных наноструктурах, возникающей между поверхностными плазмон-поляритонами, локализованными в металлической компоненте, и экситонными возбуждениями в упорядоченных агрегатах красителей, образующих внешнюю оболочку наносистемы. Выбранное направление исследований является весьма актуальным и востребованным в современной оптике и фотонике, поскольку знание физических механизмов плазмон-экситонного взаимодействия имеет принципиальное значение для разработки новых материалов с заданными оптическими свойствами. Более того, совместное использование плазмонных и экситонных материалов позволяет существенно расширить возможности по контролю над поведением оптических спектров композитных наноструктур по сравнению с чисто металлическими или чисто органическими системами.

Сделанный автором акцент на использование молекулярных J-агрегатов красителей в качестве экситонной подсистемы обусловлен тем, что такие супрамолекулярные комплексы обладают высокими значениями силы осциллятора перехода в J-полосе в сочетании с ее малой шириной. Эти отличительные свойства J-агрегатов делают их перспективными материалами гибридной фотоники и оптоэлектроники, особенно, в случае реализации сильной электромагнитной связи френкелевских экситонов с плазмонами, возбуждаемыми в металлических наноструктурах. В режиме сильной и ультрасильной связи происходит кардинальная перестройка оптических спектров гибридной системы по сравнению со спектрами невзаимодействующих подсистем. Поэтому исследования, проведенные в диссертационной работе, значимы не только с фундаментальной точки зрения, но и важны для ряда приложений, связанных с разработкой новых материалов для их применения при создании современных фотонных и оптоэлектронных устройств, в том числе оптических сенсоров и фотодетекторов, функционирующих на основе эффектов плазмон-экситонного взаимодействия.

Содержание работы

Диссертация состоит из введения, главы, представляющей собой обзор литературы по теме диссертации, трех глав основного текста, заключения, списка литературы и приложения. Общий объем диссертации составляет 188 страниц с 57 рисунками, 7 таблицами и 217 ссылками.

Во **Введении** Моритака Сергей Сэидзирович обосновывает актуальность выбранной темы, формулирует цели и задачи диссертации, научную новизну, теоретическую и практическую значимость работы, достоверность полученных результатов, формулирует положения, выносимые на защиту, и отмечает личный вклад.

В **Главе 1** автор делает обзор современного состояния исследований в области молекулярных агрегатов красителей и гибридных плазмон-экситонных наночастиц, содержащих J- и H-агрегаты во внешней оболочке. Изложены основные положения теории молекулярных экситонов в упорядоченных агрегатах красителей и представлены базовые сведения о поверхностных плазмон-поляритонах. Далее обсуждаются имеющиеся в литературе результаты исследований гибридных плазмон-экситонных частиц, а также теория поглощения и рассеяния света такими частицами. В целом обзор создает достаточно ясное впечатление о месте диссертации среди других имеющихся работ по соответствующей тематике. В конце главы описаны наиболее известные спектральные проявления режимов слабой и сильной плазмон-экситонной связи.

Глава 2. В этой главе автором представлены результаты разработанной модели процессов поглощения естественного и линейно-поляризованного света упорядоченными молекулярными агрегатами красителей, содержащими две молекулы в элементарной ячейке, ориентированные различным образом относительно оси агрегации. В своем теоретическом рассмотрении автор исходит из базовых квантовомеханических выражений для сечений поглощения света атомно-молекулярными системами. В результате детального теоретического анализа С.С. Моритакой получены наглядные аналитические формулы для коэффициента поглощения света, содержащие в явном виде его зависимости от полярного и азимутального углов взаимной ориентации молекул мономеров в элементарной ячейке и от направления поляризации падающего света. Корректность вывода этих общих формул подтверждается совпадением полученных на их основе более простых формул с рядом известных аналитических выражений, соответствующих различным предельным случаям. С.С. Моритакой подробно исследованы зависимости коэффициентов поглощения света двух поляризаций (параллельной оси агрегата и перпендикулярной этой оси) от углов взаимной ориентации молекул мономеров. Разработанная теоретическая модель использована в диссертации для количественного объяснения имеющихся экспериментальных данных по спектрам поглощения поляризованного света J-агрегатами бромида псевдоизоцианина, в том числе и конкретной степени поляризации его экситонных и вибронных полос. Несмотря на то, что указанный J-агрегат широко исследовался в фотохимии и фотонике на протяжении многих десятилетий, теоретическое объяснение его спектральных и поляризационных свойств до сих пор отсутствовало. В этом состоит основное достоинство второй главы диссертации.

В **Главе 3** автор проводит детальный анализ механизма плазмон-экситонной связи в двухслойных наночастицах сферической формы, состоящих из металлического плазмонного ядра и внешней экситонной оболочки J-агрегата красителя. В своем анализе С.С. Моритака удачно использует комбинацию метода эффективного гамильтониана и выражений обобщенной теории Ми в квазистатическом пределе. Главным новым элементом развиваемой в диссертации теории электромагнитной связи является учет эффекта расщепления экситонных мод в оболочке наночастицы. Автор уделяет большое внимание теоретическому анализу этого эффекта и убедительно демонстрирует, что он приводит к необходимости введения в теорию двух констант плазмон-экситонной связи вместо одной, как это делалось для двухслойных наносфер ранее. Это является одним из наиболее важных выводов всей диссертации.

В результате совместного анализа полюсов динамической поляризуемости гибридной частицы и собственных значений секулярного уравнения для эффективного гамильтониана в диссертации выводятся формулы для констант плазмон-экситонной связи g_+ и g_-. Основным результатом этой главы диссертации является разработка теоретического подхода к расчету этих констант связи в общем случае, когда существенный вклад в диэлектрическую проницаемость вносят межзонные переходы. Это играет ключевую роль для описания эффектов ближнепольной электромагнитной связи в частицах с золотым ядром и J-агрегатной оболочкой, которые часто исследовались в работах по плазмон-экситонной тематике. Автором проведены численные расчеты констант плазмон-экситонной связи для различных геометрических параметров частиц и разных значений диэлектрических констант металла, J-агрегата и окружающей среды. В результате в диссертационной работе сделан ряд важных выводов об эффективности плазмон-экситонной связи в частицах металл/J-агрегат. В частности, показано, что для рассмотренных систем константы связи не зависят от полного объема частицы, но сильно зависят от отношения объемов ядра и оболочки к полному объему, а также, что отношение констант g_+ и g_- варьируется в диапазоне от 0.7 до 2.2.

Глава 4 посвящена исследованию плазмон-экситонной связи в трехслойных наночастицах, включающих помимо металла и J-агрегата третью компоненту: диэлектрическую, полупроводниковую или состоящую из другого металла. В этой главе основным теоретическим методом расчета является теория Ми, обобщенная на случай многослойных сфер. На примере частиц диэлектрик/металл/J-агрегат с перестраиваемой частотой плазмонного резонанса автор демонстрирует двойное антипересечение энергетических ветвей гибридных плазмон-экситонных мод. Это служит наглядным подтверждением того факта, что выводы о «трехмодовом» характере плазмон-экситонного взаимодействия справедливы не только для двухслойных частиц, рассмотренных в главе 3, но и для более сложных частиц. Автором выполнены численные расчеты для частиц биметалл/J-агрегат, металл/диэлектрик/J-агрегат и полупроводник/металл/J-агрегат, которые не были исследованы ранее, и установлены значения их параметров, при которых реализуются те или иные основные режимы плазмон-экситонной связи, определяющие ключевые особенности поведения их спектров поглощения и рассеяния света. Наиболее важным новым результатом С.С. Моритаки здесь является нахождение примеров нанооболочек Si/Au, GaP/Au и ZnSe/Au с внешним J-агрегатным покрытием цианинового красителя TDBC, в спектрах рассеяния которых возникает ярко выраженный контур Фано с параметром асимметрии $q = -0.5$, -0.7 и -1.0 соответственно.

В **Заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы.

В **Приложении** приведен список обозначений, использованных автором в теоретическом рассмотрении, представленном в третьей главе диссертации.

В целом диссертация написана понятным языком и аккуратно оформлена. Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации.

Новизна, научная и практическая значимость результатов

Все результаты диссертации Моритаки С. С. являются новыми. В теории делокализованных экситонов Френкеля главным фундаментальным результатом автора является вывод аналитических формул для коэффициентов поглощения поляризованного света молекулярными агрегатами с двумя молекулами в элементарной ячейке, а в теории плазмон-экситонной связи – разработка оригинального способа расчета констант ближнепольной электромагнитной связи на основе метода многомодового эффективного гамильтониана. При этом для гибридных

металлоорганических наночастиц типа «ядро-оболочка» автором было показано, что в экситонной оболочке таких частиц возбуждаются две экситонные моды, которые связаны с плазмонной модой металлического ядра с различной эффективностью («силой»). Поскольку «сила взаимодействия» подсистем определяет режим ближнепольной электромагнитной связи и реализацию тех или иных характерных эффектов, построенная С.С. Моритакой модель и выведенные выражения для констант связи являются весьма значимыми для понимания эффектов взаимодействия излучения с гибридными частицами «ядро-оболочка». Следует также отметить научную значимость созданной автором модели описания процессов поглощения поляризованного света упорядоченными молекулярными агрегатами красителей, содержащими две молекулы в элементарной ячейке, которые часто выступают в качестве экситонной подсистемы в составе композитных плазмон-экситонных наночастиц. Эта модель описывает широкий класс молекулярных агрегатов цианиновых красителей, уникальные спектральные свойства которых являются перспективными для создания новых органических и гибридных материалов. С помощью созданной модели автор впервые дал количественное объяснение экспериментальных данных по широко используемому J-агрегату псевдоизоцианина. Практическая ценность полученных в диссертации результатов главным образом связана с продемонстрированными в ней новыми возможностями по управлению спектральными свойствами трехслойных гибридных наночастиц за счет выбора их геометрических параметров и составляющих их материалов.

Достоверность и обоснованность результатов

Достоверность полученных в диссертации результатов не вызывает сомнений. Сделанные С.С. Моритакой выводы являются обоснованными и подкреплены результатами аналитических выкладок, точных численных расчетов, проверкой предельных случаев и сравнением с экспериментом. Материалы, вошедшие в диссертацию С.С. Моритаки, были опубликованы в семи статьях в рецензируемых научных изданиях и прошли апробацию на восьми конференциях.

Замечания

Останавливаясь на недостатках диссертационной работы, отмечу следующее:

1. В главе 2 дано объяснение экспериментальных данных для J-агрегатов красителя псевдоизоцианина. Однако не указано, существуют ли другие исследования молекулярных агрегатов с двумя молекулами в элементарной ячейке, для которых была бы применима разработанная теория.
2. В главе 4 получены отрицательные значения параметра асимметрии q для трехслойных частиц полупроводник/металл/J-агрегат. Однако автор не обсуждает, является ли знак параметра асимметрии в таких системах принципиальным или же возможны положительные значения q, близкие к единице, если взять другие значения геометрических параметров системы.
3. В главе 2 расчеты коэффициента поглощения света выполнены для агрегатов с определенным количеством молекул мономеров в их составе. При этом не указано, в какой мере полученные результаты чувствительны к варьированию этой величины.
4. В Приложении автор приводит список используемых обозначений, что в целом облегчает чтение диссертации. Тем не менее, в ряде мест текста (например, с. 96, строки 9-18) следовало более ясным образом пояснить различия в индексах, характеризующих такие

важные величины, как «α_J», «α_{sh}» и «$\alpha_{ex}^{\pm}$», которые касаются эффекта расщепления экситонных мод оболочки и связанных с этим эффектом аспектов плазмон-экситонной связи. Отсутствие подробных пояснений на эту тему затрудняет чтение раздела 3.3 диссертации на стр. 96, 101 и 102.

Приведенные замечания носят скорее рекомендательный характер и не снижают высокий уровень научного исследования.

Заключение

Диссертация Моритаки Сергея Сэидзировича «Плазмон-экситонное взаимодействие и оптические свойства наночастиц с металлическим ядром и J-агрегатной оболочкой» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, удовлетворяющую всем требованиям к кандидатским диссертациям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 года, а ее автор, С.С. Моритака, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6 – Оптика.

Официальный оппонент:

ведущий научный сотрудник лаборатории лазерной спектроскопии
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Федерального исследовательского центра
«Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук»,

доктор физико-математических наук, Стрельцов Владимир Николаевич

«30» сентября 2026 г.

119991, Россия, г. Москва, ул. Вавилова, д. 38

Телефон: +7 (903) 161-67-03

E-mail: mpvstrel@mail.ru

Список основных публикаций официального оппонента доктора физико-математических наук В.Н. Стрельцова по тематике диссертации С.С. Моритаки «Плазмон-экситонное взаимодействие и оптические свойства наночастиц с металлическим ядром и J-агрегатной оболочкой» за последние 5 лет

1. Bunkin A. F., Mikhalevich V. G., Oshurko V. B., and Streltsov V. N., Dynamics of Nanoparticle Distribution in Liquid Suspensions in a Laser Beam, *Physics of Wave Phenomena* **33**(6), 458-462 (2025).
2. Bunkin A. F., Mikhalevich V. G., and Streltsov V. N., Stationary Field Oscillations in an Optical Resonator with a Nanodisperse Filling under Monochromatic Excitation. *Physics of Wave Phenomena* **30**(1), 15–18 (2024).
3. Bunkin A. F., Mikhalevich V. G., and Streltsov V. N., Phase Conjugation of Sound Beams in Piezoelectric Semiconductors in an Alternating Magnetic Field. *Acoustical Physics* **69**(1), 20–23 (2023).
4. Bunkin A. F., Davydov M. A., Mikhalevich V. G., Streltsov V. N., Fedorov A. N., and Pershin S. M., Dynamic Stimulated Low-Frequency Light Scattering in a Nanodispersed Liquid Medium. *Physics of Wave Phenomena* **31**(1), 15–20 (2023).
5. Bunkin A. F., Mikhalevich V. G., and Streltsov V. N., Sound Scattering in a Nanodispersed Medium in the Field of a Standing Electromagnetic Wave. *Physics of Wave Phenomena* **30**(4), 256–259 (2022).