«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор Федерального государственного

бюджетного образовательного учреждения

высшего образования «Московский государственный

университет имени М. В. Ломоносова»,

начальник управления научной политики,

член-корреспондент РАН,

доктор физ.-мат. наук, профессор

_____ А. А. Федянин

«25» сентября 2026 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова» на диссертационную работу 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

Диссертационная работа Моритаки Сергея Сэидзировича «Плазмон-экситонное взаимодействие и оптические свойства наночастиц с металлическим ядром и J-агрегатной оболочкой» посвящена исследованию механизмов взаимодействия света с упорядоченными молекулярными агрегатами красителей, а также с гибридными двухслойными и трехслойными металлоорганическими наночастицами, в которых такие агрегаты формируют внешнюю оболочку. Изучение такого рода систем представляет большой интерес в контексте решения актуальной проблемы фотоники и оптоэлектроники – создания новых материалов с заданными оптическими и спектральными свойствами. Исследуемые в диссертации упорядоченные J-агрегаты красителей являются объектами интенсивных исследований в фотохимии, а также в органической и гибридной фотонике. Эти супрамолекулярные системы обладают рекордно узкой полосой экситонного перехода среди органических полимерных материалов и высокой силой осциллятора перехода. Современные методы синтеза наноструктур и микроматериалов позволяют создавать агрегаты с различными спектральными положениями экситонного перехода в J-полосе красителей, перекрывающими практически весь видимый спектральный диапазон.

Молекулярные агрегаты представляют интерес не только сами по себе, но и в качестве экситонного материала в составе гибридных плазмон-экситонных систем. В этом случае их уникальные свойства сочетаются с достоинствами металлической

плазмонной компоненты, в которой благодаря возбуждению поверхностных плазмон-поляритонов электромагнитное поле усиливается и локализуется в пространстве на субволновых масштабах. При этом в гибридной системе реализуются различные режимы ближнепольной электромагнитной связи (от слабой до сильной и ультрасильной) между плазмонными и экситонными возбуждениями, которые приводят к качественным изменениям в оптических спектрах гибридных систем по сравнению с простой суперпозицией спектров их невзаимодействующих компонент. Разнообразные эффекты плазмон-экситонной связи открывают больше возможностей по управлению спектральными свойствами гибридных материалов на основе таких композитных систем, чем это позволяет делать использование чисто плазмонных материалов. В связи с этим обстоятельством в последние годы важным самостоятельным направлением гибридной фотоники стало исследование физических механизмов и эффектов взаимодействия со светом гибридных плазмон-экситонных наноструктур и наночастиц. Еще одной причиной повышенного внимания к изучаемым в диссертации гибридным наночастицам металл/J-агрегат является то, что технология их синтеза методами коллоидной химии часто оказывается менее затратной и более экологичной, чем изготовление аналогичных систем на основе металлов и неорганических полупроводников эпитаксиальными методами. Таким образом, выбранная в диссертации Моритаки С. С. тематика исследований, несомненно, является актуальной, а полученные результаты представляют значительный интерес для органической и гибридной нанофотоники.

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.

Во **введении** описана актуальность и цель работы, решаемые задачи, научная новизна и значимость результатов проведенных исследований, положения, выносимые на защиту, личный вклад автора, достоверность полученных результатов, представлена информация о публикациях автора по теме диссертации и об апробации работы.

В **первой главе** автор перечисляет существующие теоретические подходы к анализу оптических свойств молекулярных агрегатов и гибридных металлоорганических наночастиц. Обсуждаются используемые в работе результаты теории делокализованных экситонов Френкеля применительно к упорядоченным молекулярным агрегатам красителей. Излагаются свойства локализованных поверхностных плазмон-поляритонов, а также приводятся имеющиеся результаты исследований двухслойных и трехслойных гибридных частиц, содержащих металлическую и J-агрегатную компоненты. Перечислены основные эффекты и спектральные проявления ближнепольного электромагнитного взаимодействия в режимах слабой и сильной плазмон-экситонной связи, обсуждается явление интерференции Фано применительно к исследуемым системам.

Вторая глава посвящена исследованию фотопоглощения и линейного дихроизма молекулярных агрегатов с двумя молекулами в элементарной ячейке. Впервые получены наглядные формулы для коэффициента поглощения поляризованного света, в которых в явном виде выделена аналитическая зависимость от углов ориентации молекул в непланарной ячейке. Показано, что полученные выражения

содержат в качестве предельных случаев все предыдущие результаты имеющейся модели Давыдова–МакРея–Каша для агрегатов с одной молекулой в ячейке, а также предельные случаи так называемых HB-агрегатов (англ. Herringbone, «елочка») и X-агрегатов. На основе разработанной теории в диссертационной работе впервые объяснены все особенности спектров фотопоглощения и линейного дихроизма J-агрегата красителя псевдоизоцианина (PIC), который на протяжении многих лет интенсивно исследовался в фотохимии и часто использовался в качестве экситонного материала в составе гибридных металлоорганических наноструктур.

В **третьей главе** предложен и реализован новый подход к характеризации эффективности плазмон-экситонной связи в двухслойных наночастицах, состоящих из металлического плазмонного ядра и J-агрегатной экситонной оболочки. На примере частиц сферической формы в квазистатическом приближении показано, что электродипольная мода ядра одновременно взаимодействует с двумя экситонными модами, которые возникают в оболочке частицы из-за наличия двух интерфейсов (внутреннего – с ядром и внешнего – с окружающей средой). Одновременно с этим продемонстрировано, что модель двух связанных осцилляторов с одной константой связи, традиционно используемая для описания плазмон-экситонного взаимодействия двух подсистем, не позволяет даже качественно объяснить оптические свойства таких систем. На основе последовательно использованного автором диссертации метода эффективного гамильтониана реализован способ расчета двух констант плазмон-экситонной связи g_+ и g_- в исследуемой системе. Для констант связи получены аналитические формулы, выраженные через исходные объемы подсистем и диэлектрические параметры материалов гибридной частицы. Далее на этой основе автором проведен тщательный теоретический анализ зависимостей величин двух констант связи от параметров наночастицы. Установлено, 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. Продемонстрировано, что результаты расчетов сечений экстинкции с помощью полученных в работе выражений находятся в хорошем соответствии с расчетами в рамках обобщенной теории Ми.

Четвертая глава посвящена исследованию спектров поглощения и рассеяния света трехслойными частицами различных типов: (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 диэлектрическим слоем, (iii) частицы с биметаллическим ядром из серебра и золота и J-агрегатной оболочкой. Численные расчеты выполнены в рамках теории Ми для многослойных сфер различного радиуса, дополненной корректным учетом размерных эффектов в рассеянии свободных электронов на границе металла с окружающей его средой. Для частиц SiO_2/Ag/TDBC и SiO_2/Au/TDBC показан постепенный переход между режимами слабой и сильной связи дипольного плазмона с двумя экситонными резонансами J-агрегатной оболочки. Показан переход от режима слабой к сильной связи для частиц с двойной оболочкой Ag/TDBC и Au/TDBC при использовании в качестве ядра полупроводниковых материалов Si, GaP и ZnSe, прозрачных в области экситонного перехода J-агрегата TDBC, но обладающих высокими значениями диэлектрической проницаемости ($\varepsilon = 16$, 11 и 7 соответственно). Найдены примеры частиц Si/Au/TDBC, GaP/Au/TDBC и ZnSe/Au/TDBC с радиусом ядра 60 нм, для которых в окрестности

центра J-полосы реализуется асимметричный контур рассеяния света, описываемый известной формулой Фано со значениями параметра асимметрии $q = -0.5$, -0.7 и -1.0 соответственно.

В **заключении** приведены основные результаты диссертационной работы.

В качестве основных результатов диссертационной работы можно выделить следующее:

1. Разработана модель описания поглощения света нитевидными агрегатами с двумя молекулами в непланарной элементарной ячейке. Получены аналитические формулы для коэффициентов поглощения света и линейного дихроизма. Показано, что эти формулы переходят в предельных случаях к известным выражениям для линейных J- и H-агрегатов.

2. Впервые дано количественное теоретическое описание спектров фотопоглощения и линейного дихроизма J-агрегата красителя псевдоизоцианина. Дано объяснение превышения в 7 раз коэффициента поглощения света, поляризованного параллельно оси агрегата, над соответствующей величиной для света перпендикулярной поляризации.

3. Предложена новая модель плазмон-экситонной связи в наносферах металл/J-агрегат небольших размеров, которая описывает ближнепольное взаимодействие плазмонной моды ядра частицы с двумя экситонными модами ее оболочки. Получены аналитические формулы для констант плазмон-экситонной связи g_+ и g_- и показано, что для характерных энергий расщепления экситонных мод 100 – 150 мэВ отношение g_+/g_- варьируется от 0.7 до 2.2.

4. Для разработанной модели установлено хорошее согласие ее результатов с точными расчетами по 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, равным –0.5, –0.7 и –1.0 для материалов ядра Si, GaP и ZnSe при толщинах J-агрегатного и золотого слоев 12 нм и 4 нм и радиусе ядра 60 нм.

6. Расчеты сечений фотопоглощения и рассеяния трехслойными наночастицами 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.

Достоверность результатов диссертации подтверждается использованием эффективных и надежных аналитических и численных методов. В ряде случаев

достоверность результатов работы подтверждается сравнением с имеющимися экспериментальными данными, проверкой предельных случаев, а также совпадением результатов расчетов, проведенных различными способами. Результаты работы прошли апробацию на восьми российских и международных конференциях.

Результаты диссертации имеют высокую научную значимость, которая главным образом состоит в углублении существующего понимания механизмов электромагнитной связи в композитных двух- и трехслойных металлоорганических наночастицах. В частности, предложен и реализован последовательный и физически обоснованный способ характеризации эффективности электромагнитной связи дипольного плазмона с двумя экситонными модами оболочки частиц металл/J-агрегат. Разработанная в диссертации экситонная модель упорядоченных агрегатов с двумя молекулами в элементарной ячейке расширяет существующие теоретические способы описания эффектов взаимодействия таких систем с поляризованным и естественно-поляризованным светом. Практическая значимость полученных результатов состоит в возможности их использования для разработки гибридных органо-неорганических материалов с заданными оптическими свойствами, что востребовано в целях создания элементной базы нанофотонных и оптоэлектронных устройств нового поколения.

Основные результаты работы являются новыми. В частности, новой является построенная в диссертации теория фотопоглощения широкого класса агрегатов красителей с двумя молекулами в элементарной ячейке, на основе которой впервые дано количественное объяснение всех основных особенностей в спектрах J-агрегата псевдоизоцианина, активно используемого в органической фотонике и фотохимии на протяжении многих лет. Предложен и реализован оригинальный способ характеризации количественной меры эффективности электромагнитной связи в гибридных наносферах металл/J-агрегат, впервые установлены зависимости констант связи дипольного плазмона с двумя экситонными модами оболочки от геометрических параметров этих систем и диэлектрических констант входящих в их состав материалов. Конкретные расчеты выполнены для целого ряда наночастиц, которые ранее не исследовались.

Результаты диссертации могут быть использованы в фундаментальных и прикладных исследованиях в таких научных организациях, как Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Институт спектроскопии РАН, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Воронежский государственный университет, Московский физико-технический институт, Центр фотохимии РАН и др.

Диссертация написана хорошим языком, материал понятно изложен и наглядно проиллюстрирован. Полученные результаты опубликованы в 7 статьях в отечественных и зарубежных рецензируемых научных журналах, индексируемых базами данных WoS 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. Результаты работы неоднократно докладывались на международных и всероссийских научных конференциях.

Содержание диссертационной работы Моритаки Сергея Сэидзировича «Плазмон-экситонное взаимодействие и оптические свойства наночастиц с металлическим ядром и J-агрегатной оболочкой» соответствует специальности 1.3.6 –

Оптика. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации и правильно отражает основные результаты и выводы работы.

Отметим следующие замечания, возникшие в ходе ознакомления с работой:

1. Во второй главе диссертации теоретическое рассмотрение фотопоглощения отдельных молекулярных агрегатов красителей проводится на квантовом языке в терминах делокализованных экситонов Френкеля. В последующих двух главах J-агрегаты красителей используются в качестве внешней оболочки гибридных наночастиц и описываются с помощью макроскопической диэлектрической функции. Однако переход от квантовомеханического описания к классическому описанию не обсуждается.

2. Во второй главе на Рисунке 2.11 (б) приводится сравнение экспериментального спектра коэффициента поглощения ориентированных в одном направлении молекулярных агрегатов PIC(псевдоизоцианин)-Br со спектром, полученным с помощью развитой теории в диссертационной работе. Однако в работе не описаны механизмы выравнивания всех агрегатов вдоль одной оси, так чтобы имелась возможность ориентировать поляризацию падающего света вдоль и перпендикулярно оси агрегата.

3. Во второй главе диссертации мало внимания уделяется обсуждению эффектов уширения пиков экситонных переходов, которые играют важную роль при воспроизведении формы спектральных полос, полученных экспериментально.

4. В третьей главе при выводе формулы для частот двух экситонных мод полой оболочки не учитывалось наличие внутреннего ядра. Стоит пояснить как влияет наличие ядра на спектральное положение двух экситонных мод?

5. В третьей главе рассмотрено взаимодействие локализованного поверхностного плазмона с двумя экситонными модами в оболочке через две константы связи. Насколько оправдано предположение об отсутствии взаимодействия между двумя экситонными модами?

6. В четвертой главе сделан ряд выводов о зависимости величин сечений поглощения, рассеяния и экстинкции света от параметров исследуемых гибридных трехслойных частиц. Следовало бы также указать, какие из исследованных зависимостей позволяют наиболее эффективно управлять спектральными свойствами исследованных в диссертации наночастиц.

Отмеченные замечания не влияют на общую положительную оценку работы и не снижают ценность полученных результатов. Они имеют лишь дискуссионный характер, направлены на уточнение отдельных частей работы и не умаляют высокой научной и практической значимости полученных соискателем результатов.

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, Моритака Сергей Сэидзирович, безусловно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6 – Оптика.

Доклад Моритаки Сергея Сэидзировича по материалам диссертации заслушан на заседании кафедры нанофотоники Физического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (МГУ) «10» июля 2026 г.

Отзыв на диссертацию составлен научным сотрудником кафедры нанофотоники Физического факультета МГУ, к.ф.-м.н., Фроловым Александром Юрьевичем, телефон 89670493773, email: frolovay@my.msu.ru. Отзыв одобрен на заседании кафедры нанофотоники Физического факультета МГУ «25» сентября 2026 г. (протокол № 11 от «25» сентября 2026 г.)

Адрес: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (физический факультет), 119991, Москва, Ленинские горы, дом 1, строение 2.

Телефон: +7 (495) 939-10-00,

E-mail: info@rector.msu.ru

Сайт: https://msu.ru

Руководитель семинара кафедры нанофотоники,

к. ф.-м. н., научный сотрудник Фролов Александр Юрьевич

Ученый секретарь кафедры нанофотоники,

к. ф.-м. н., доцент Мусорин Александр Игоревич

И.о. декана физического факультета МГУ

д. ф.-м. н., профессор Белокуров Владимир Викторович

Список основных работ сотрудников ведущей организации Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (МГУ) по теме защищаемой диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. Maxim Rakhlin, Timofey V. Antipov, Alexandra D. Gartman, Dmitry N. Gulkin, Lyubov Kotova, Aidar Galimov, Bogdan Borodin, Ilya Eliseyev, Alexander S. Shorokhov and Andrey A. Fedyanin, "Mie-resonant silicon waveguide for efficient coupling with excitonic emitters in InSe", Journal of Materials Chemistry C 14, 336 (2026).

2. Arseny Yu. Gladkikh, Aleksandr Yu. Frolov, Valentina V. Utochnikova, "Molecular photonics meets OLED technology: The untapped potential of lanthanide emitters", Optical Materials 174, 117906 (2026).

3. Maxim Andreevich Kiryanov, Ilya Alekseevich Novikov, Aleksandr Yurievich Frolov, Tatyana Viktorovna Dolgova, and Andrey Anatolyevich Fedyanin, "Surface-Plasmon-Assisted Control of Ultrafast Optical Relaxation Traces", Laser & Photonics Reviews 19, 2500053 (2025).

4. Aleksandr Yu. Frolov, Arseny Yu. Gladkikh, Matvey P. Belov, Vladimir V. Popov, Valentina V. Utochnikova, and Andrey A. Fedyanin, "Plasmonic Enhancement and Angular Control of Narrow-Emitting Europium-Based Luminescence", The Journal of Physical Chemistry Letters 16, 11590 – 11596 (2025).

5. Arlen R. Bekirov, Zengbo Wang, Boris S. Luk'yanchuk, and Andrey A. Fedyanin, "Dielectric microparticles for enhanced optical imaging: an FDTD analysis of contrast and resolution", Journal of the Optical Society of America A 42 1, 45 – 50 (2025).

6. Denis M. Zhigunov, Daniil A. Shilkin, Vladimir O. Bessonov, Ilya M. Antropov, Dmitry A. Chermoshentsev, Sergey V. Semin, Alexey V. Kimel, Andrey A. Fedyanin, "Linear and nonlinear optical response of Mie-resonant Si nanoparticles and its modification induced by femtosecond irradiation post-treatment", Optical Materials 154, 115616 (2024).

7. Igor V. Minin, Oleg V. Minin, Song Zhou, Boris S. Luk'yanchuk, "High order Fano resonance in the time domain for a freezing water microdroplet", Scientific Reports 14, 24118 (2024).

8. Arlen R. Bekirov, Boris S. Luk'yanchuk, Ekaterina I. Elyas, and Andrey A. Fedyanin, "Half-space invisible states in dielectric particles", Optics Express 31 22/23, 37074 – 37081 (2023).

9. A. R. Bekirov, "On superresolution in virtual image in a transparent dielectric sphere", Optics and Spectroscopy 131 3, 388–395 (2023).

10. Anna A. Popkova, Ilya M. Antropov, Gleb I. Tselikov, Georgy A. Ermolaev, Igor Ozerov, Roman V. Kirtaev, Sergey M. Novikov, Andrey B. Evlyukhin, Aleksey V. Arsenin, Vladimir O. Bessonov, Valentyn S. Volkov, and Andrey A. Fedyanin, "Nonlinear Exciton-Mie Coupling in Transition Metal Dichalcogenide Nanoresonators", Laser & Photonics Reviews 16, 2100604 (2022).

11. D. A. Shilkin, and A. A. Fedyanin, "Optical Levitation of Mie-Resonant Silicon Particles in the Field of Bloch Surface Electromagnetic Waves", JETP Letters 115 3, 157–162 (2022).

12. B. S. Luk'yanchuk, A. R. Bekirov, Z. B. Wang, I. V. Minin, O. V. Minin, and A. A. Fedyanin, "Optical Phenomena in Dielectric Spheres Several Light Wavelengths in Size: A Review", Physics of Wave Phenomena 30 4, 217–241 (2022).

13. B. S. Luk'yanchuk, A. R. Bekirov, Z. B. Wang, I. V. Minin, O. V. Minin, and A. A. Fedyanin, "Optical Phenomena in Mesoscale Dielectric Spheres and Immersion Lenses Based on Janus Particles: A Review", Physics of Wave Phenomena 30 5, 283–297 (2022).