

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Гранисо Роман Эвелин Алехандра

**Гибридные системы на основе органических молекул,
помещенных в микрорезонаторы, оперирующие в режимах
сильной и слабой связи свет – вещество**

1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2026

Диссертация подготовлена в Международной лаборатории гибридных фотонных наноматериалов научного центра наноинженерии фотонных материалов для биомедицины и оптоэлектроники в Инженерно-физическом институте биомедицины Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ».

**Научный
руководитель** *Набиев Игорь Руфаилович*
доктор химических наук

**Официальные
оппоненты** *Баранов Александр Васильевич*
доктор физико-математических наук, профессор,
Национальный исследовательский университет ИТМО,
Международный научно-образовательный центр физики
наноструктур, профессор

Биленко Игорь Антонович
доктор физико-математических наук, доцент, МГУ имени
М.В. Ломоносова, кафедра физики колебаний физического
факультета, профессор

Маскевич Сергей Александрович
доктор физико-математических наук, профессор,
Белорусский государственный университет,
Международный государственный экологический
институт имени А.Д.Сахарова, Научно-исследовательский
сектор, главный научный сотрудник

Защита диссертации состоится «21» апреля 2026 года в 15-30 на заседании диссертационного совета МГУ.013.7 Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, д.1, стр.2, Физический факультет МГУ, ауд. Н-16.

E-mail: diss.sov.013.7@org.msu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/3830>

Автореферат разослан «__» _____ 20__ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук

И.Н.Карташов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Резонансное взаимодействие между молекулярным или атомным переходом и локализованным электромагнитным полем представляет собой пример широко известного эффекта связи свет – вещество, который играет важную роль в современной оптике, квантовой электронике и материаловедении. Количественной мерой такой связи служит параметр, называемый силой связи, который определяет энергию взаимодействия между светом и веществом: чем выше сила связи, тем значительнее влияние одного на другое. В зависимости от силы связи этот эффект можно разделить на слабую и сильную связь. В последние годы режим сильной связи привлекает особое внимание ученых, поскольку он позволяет контролировать и изменять оптические, химические и электронные свойства вещества на фундаментальном уровне.

На сегодняшний день эффекты сильной связи свет – вещество были продемонстрированы в самых различных системах: от одиночных квантовых излучателей до ансамблей молекул в плазмонных и фотонных нанорезонаторах, а также в биологических системах. Однако, несмотря на большой прогресс, до сих пор не существует универсального и комплексного подхода к определению ключевых параметров, необходимых для достижения сильной связи в различных практических приложениях. Это создает трудности при прогнозировании и управлении процессами, связанными с взаимодействием света и вещества.

Кроме того, для практического использования эффекта сильной связи во многих перспективных приложениях, таких как квантовые вычисления, нанофотоника, сенсоры, управление химическими реакциями и т. д., требуются дополнительные исследования. Для этого важно учитывать влияние различных факторов, включая геометрию и оптические свойства резонатора, а также другие условия, при которых устанавливается сильное взаимодействие света с веществом. Разработка новых методов оптимизации этих параметров значительно расширит область применения как эффектов сильной, так и слабой связи и откроет путь к новому поколению фотонных материалов и устройств.

Таким образом, актуальность этого исследования обусловлена необходимостью системного подхода к изучению и оптимизации параметров гибридных систем на основе органических молекул и микрорезонаторов, функционирующих в режимах слабой и сильной связи свет – вещество. Кроме того, важно найти новые способы управления взаимодействием между светом и веществом для применения в различных областях науки и техники.

Цель работы

Целью работы является разработка и исследование гибридных систем на основе органических молекул, помещенных в микрорезонаторы и функционирующих в режимах сильной и слабой связи свет – вещество.

Задачи работы

Для достижения поставленной цели должны быть решены следующие основные задачи:

- (1) Моделирование параметров оптических микрорезонаторов, оперирующих в режимах слабой или сильной связей свет - вещество;
- (2) Изготовление экспериментальных образцов микрорезонаторов с улучшенными свойствами;
- (3) Создание гибридных систем на основе флуорофоров, помещенных в микрорезонаторы и оперирующих в режимах сильной и слабой связи свет – вещество;
- (4) Изучение оптических и физико-химических эффектов образования сильной или слабой связи свет – вещество в созданных гибридных системах;
- (5) Применение эффектов сильной связи для управления параметрами флуоресценции, а эффектов слабой связи — для усиления колебательных спектров, управления переносом электронов и окислительно-восстановительными реакциями.

Методы исследования

В рамках диссертационной работы были использованы современные теоретические и экспериментальные методы, перечисленные ниже.

Теоретические модели

Приближение эффективной среды Бруггемана для прогнозирования эффективного показателя преломления на основе пористости и состава материала.

Метод матриц переноса, позволяющий моделировать распространение света через слоистые среды и рассчитывать их оптические характеристики.

Численное моделирование

Метод конечных элементов (МКЭ) для расчета электромагнитных полей в микрорезонаторах.

Экспериментальные методы

Оптическая спектроскопия: спектрофлуориметрия, спектроскопия оптического поглощения, спектроскопия комбинационного рассеяния.

Методы оптической микроскопии: конфокальная микроскопия.

Методы нанофабрикации: электрохимическое травление для создания структур из пористого кремния.

Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ).

Физико-химические методы: внедрение органических молекул в микрорезонаторы.

Статистические методы и анализ данных

Обработка экспериментальных данных с использованием программных пакетов MathCad и OriginLab.

Данный комплекс методов позволяет провести всестороннее изучение эффектов установления режимов сильной и слабой связи свет – вещество в гибридных микрорезонаторных системах и выявить ключевые закономерности их функционирования.

Объект исследования

Объектом исследования являются гибридные системы, состоящие из флуорофоров — органических молекул, помещенных в оптические микрорезонаторы, — и функционирующие в режимах сильной и слабой связи свет – вещество.

Предмет исследования

Предметом исследования являются физические механизмы и закономерности взаимодействия света с веществом в гибридных системах и возможности его практического применения, в том числе:

- условия возникновения сильной и слабой связи органических молекул с локализованным электромагнитным полем;
- влияние структуры микрорезонаторов на характеристики гибридных состояний;
- изменение оптических и физико-химических свойств органических молекул при помещении их в резонаторные структуры;
- применение гибридных систем, оперирующих в режиме взаимодействия между светом и веществом, для управления химическими реакциями и свойствами излучателей.

Научная новизна

Данное исследование посвящено эффекту взаимодействия света и вещества, который весьма актуален и играет фундаментальную роль в оптике, квантовой электронике и материаловедении. В настоящее время научное сообщество проявляет большой интерес к изучению фундаментальных физических механизмов взаимодействия света и вещества, включая слабую и сильную связь, оптимизации методов изготовления и сборки для улучшения условий взаимодействия света и вещества, разработке методов создания гибридных систем на основе плазмонных наноструктур, оптических резонаторов и молекул, а также исследованию потенциала этого эффекта для практических приложений, таких как управление химическими реакциями, фотокатализ, управление проводимостью материалов, перенос энергии в молекулярных системах и другие. Эти эффекты были изучены в различных системах, включая плазмонные нанорезонаторы, фотонные кристаллы и резонаторы на модах шепчущей галереи.

Однако, несмотря на успехи в этой области, исследования по-прежнему ограничены частными экспериментами, рассматривающими взаимодействие конкретных молекул, в частности поливинилацетат [1], 1-фенил-2-триметилсилилацетилен [2] и флуорофоры, среди которых, как правило, выделяют квантовые точки [3] и органические красители [4]. В результате, на текущий момент пока не удалось сформулировать универсальный подход к управлению силой связи свет–вещество в практических приложениях.

Таким образом, научная новизна данного исследования заключается в систематическом изучении условий реализации режимов сильной и слабой связи в гибридных системах на основе органических молекул и микрорезонаторов, а также в разработке новых методов управления этими

режимами и поиске перспективных приложений в науке и технике. Это позволит не только более детально изучать механизмы сильной и слабой связи, но и разработать новые стратегии управления оптическими свойствами органических молекул и окислительно-восстановительными процессами в биологических молекулах.

Теоретическая значимость исследования

- Данная работа вносит вклад в существующие модели и теории взаимодействия света и вещества, предлагая новые подходы к описанию гибридных состояний в микрорезонаторных системах, содержащих органические молекулы.
- Разработан метод прогнозирования параметров для достижения режима сильной связи на основе аналитических и численных моделей, который позволяет определять ключевые параметры резонатора и молекул, необходимые для получения гибридных состояний контролируемым образом.
- Данное исследование вносит вклад в обоснование новых принципов управления системами, работающими в режиме взаимодействия света с веществом, открывая новые возможности для нанофотоники, квантовой оптики и молекулярной инженерии.

Таким образом, данное исследование способствует как дальнейшему развитию фундаментальных основ оптики дисперсных систем и теории взаимодействия света с веществом, так и созданию новых практических приложений в области фотоники.

Практическая значимость исследования

Гибридные системы, созданные в процессе проведения исследования, представляют значительный интерес для различных направлений, включая нанофотонику, оптоэлектронику, химию, биохимию, энергетику и фотокаталитические процессы и медицину. В частности:

- В области нанофотоники и оптоэлектроники для создания новых типов фотонных устройств, таких как нанолазеры и сенсоры.
- В химической и биохимической областях, эффекты сильной и слабой связи могут быть использованы для детектирования химических реакций, изучения каталитических процессов и мониторинга биомолекул в реальном времени.
- В энергетике и фотокатализе для оптимизации процессов поглощения и передачи энергии в молекулярных системах, что может найти применение в органической фотовольтаике и солнечных элементах нового поколения.
- В медицине применение результатов работы позволит разработать методы управления оптическими и функциональными свойствами биомолекул для создания новых диагностических инструментов и средств терапии.

Таким образом, подобные исследования будут способствовать созданию и применению новых функциональных фотонных материалов и устройств для различных областей современной науки, и техники.

Достоверность полученных результатов и выводов диссертации

Достоверность полученных результатов и выводов диссертации подтверждается:

- теоретическим анализом и численным моделированием, выполненным с использованием современных вычислительных методов;
- сопоставлением полученных данных с результатами независимых экспериментов, опубликованных в ведущих научных журналах;
- совпадением результатов серии воспроизводимых экспериментов с гибридными системами в различных режимах связи свет – вещество, что подтверждает надежность измерений;
- использованием современных методов спектроскопии, включая фотолюминесцентный анализ;
- итогами обсуждения результатов на международных научных конференциях и публикациями в рецензируемых журналах.

Личный вклад автора

Все результаты, представленные в работе, получены автором лично либо при его непосредственном участии. Автор лично провела анализ существующих методов слабой и сильной связи света с веществом в оптических микрорезонаторах, разработала расчетные модели, а также изготовила и протестировала экспериментальные образцы микрорезонаторов и гибридных систем на их основе, что подтверждается результатами, представленными на конференциях и опубликованными в научных журналах.

Положения, выносимые на защиту

1. В гибридных системах, созданных на основе нестабильного резонатора Фабри–Перо, органического красителя и полимерной матрицы, реализуется эффект сильной связи свет–вещество, превосходящий характеристики ранее известных систем за счет оптимизированной структуры резонатора и состава матрицы, обеспечивающего ориентацию молекул родамина и предотвращающего их агрегацию, что приводит к эффективному взаимодействию с модами микрорезонатора. В результате наблюдается расщепление Раби с величиной $g \approx 94,6$ мЭВ.
2. Разработанная расчетная модель микрорезонаторов, основанная на сочетании приближения эффективной среды Бруггемана, метода матриц переноса и численного моделирования методом конечных элементов, позволяет с высокой точностью прогнозировать оптические свойства и параметры изготовления микрорезонаторов, обеспечивающие оптимальные условия реализации режимов сильной и слабой связи света с веществом.
3. Предложенная методика адаптивного травления пористого кремния, основанная на введении поправочных коэффициентов времени травления и пауз между формированием слоев, обеспечивает увеличение добротности микрорезонаторов из пористого кремния не менее чем в два раза, за счет улучшения соблюдения условия периодичности слоев с высоким и низким показателями преломления.

4. В полости микрорезонатора на основе пористого кремния впервые экспериментально реализуется эффект усиления комбинационного рассеяния света цитохромом С, помещенным в резонаторную полость, что демонстрирует возможность резонансного усиления спектроскопических сигналов биомолекул.
5. Интенсивность фотоиндуцированного восстановления цитохрома С в полости микрорезонатора на основе пористого кремния увеличивается вплоть до 15 раз по сравнению с контрольной системой, что подтверждает возможность управления эффективностью окислительно-восстановительных реакций с помощью микрорезонаторных структур.

Апробация результатов

Результаты, приведенные в диссертации, многократно докладывались на следующих профильных международных и российских конференциях и симпозиумах.

1. International Conference Laser Optics (ICLO), July 1–5, 2024, St. Petersburg, Russia. Стендовый доклад.
2. XVIII Encuentro de Física (Physics EPN 2023) October 16–20, 2023, Quito, Ecuador. Устный доклад.
3. EOS Annual Meeting (EOSAM 2023), September 11–15, 2023, Dijon, France. Стендовый доклад.
4. SPIE Optics + Optoelectronics 2023. SPIE – The International Society for Optics and Photonics. April 24–27, 2023, Prague, Czech Republic. Стендовый доклад.
5. VII International Symposium on Physics, Engineering and Technologies for Biomedicine. November 19–24, 2022, Moscow, Russia. Стендовый доклад.
6. Physics, Engineering and Technologies for Biomedicine (The 6-th International Symposium and Schools for Young Scientists on Physics, Engineering and Technologies for Biomedicine). November 20–24, 2021, Moscow, Russia. Стендовый доклад.
7. Международная конференция по фотонике и информационной оптике. Москва, 27–29 января 2021 года. Устный доклад.
8. 4th International Symposium and School for young scientists on Physics, Engineering and Technologies for Bio-Medicine (PhysBioSymp 2019). October 26–30, 2019, Moscow, Russia. Стендовый доклад.

Публикации

Основные результаты по теме диссертации изложены в 7 научных статьях в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности и отрасли наук.

Структура и объём работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, благодарностей, списка публикаций по теме исследования и списка литературы. Общий объём диссертации составляет 127 страниц, включая 51 рисунок и 6 таблицы. Список литературы содержит 141 наименование.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении кратко обосновывается актуальность темы исследования, сформулирована цель работы и поставленные для ее достижения задачи, описаны методы исследования, представлены объект и предмет исследования, объясняются научная новизна, теоретическая и практическая значимость исследования, обосновывается достоверность полученных результатов и выводов диссертационной работы, указывается личный вклад автора, приведены положения, выносимые на защиту, приведены результаты апробации работы и публикации.

Первая глава [А2, А4] представляет собой аналитический обзор литературы по теме диссертации. В начале рассматриваются основные типы микрорезонаторов, применяемых для реализации эффектов связи «свет-вещество», включая микрорезонаторы Фабри–Перо (ФП), микрорезонаторы на основе плазмонных материалов (например, плазмонные фотонно-кристаллические волокна (Photonic crystal fiber, PCF и плазмонные нанорезонаторы), а также микрорезонаторы с модами шепчущей галереи (МШГ), такие как микрокольцевые резонаторы. Кратко приводятся их основные характеристики, принцип работы и области применения. Кроме того, описываются оптические свойства микрорезонаторов.

Далее подробно рассматриваются микрорезонаторы Фабри–Перо — тип микрорезонаторов, состоящих из полости между двумя отражающими поверхностями. Эти поверхности позволяют концентрировать электромагнитные (ЭМ) волны внутри полости за счёт многократных отражений. Для возникновения резонанса оптический путь полости резонатора (то есть произведение расстояния между отражающими поверхностями на показатель преломления среды полости) должен быть целым кратным половине резонансной длины волны, что обеспечивает локализацию ЭМ волн определённых длин внутри полости.

В данной работе применяются две конфигурации микрорезонаторов Фабри–Перо: резонаторы с металлическими зеркалами и резонаторы на основе распределённых брэгговских отражателей (РБО) или брэгговских зеркал (Рисунок 1).

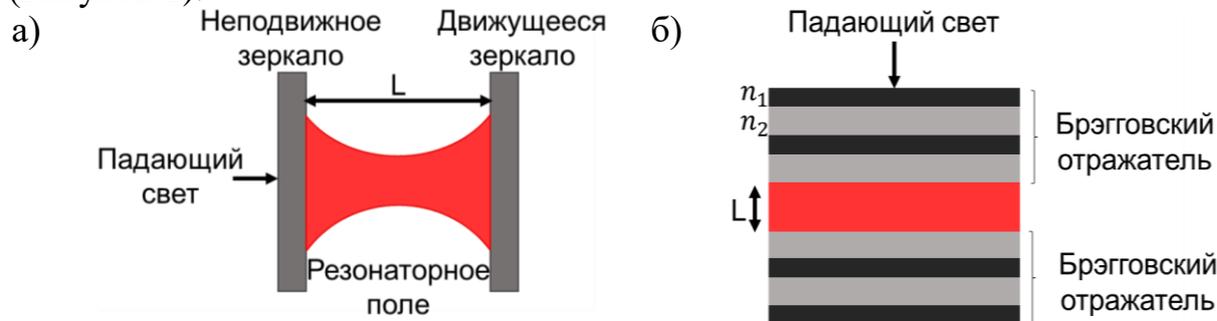


Рисунок 1. Микрорезонаторы Фабри–Перо, образованные металлическими зеркалами (а) и брэгговскими зеркалами (б). L — расстояние между двумя отражающими поверхностями, n_1 и n_2 — среды с высоким и низким показателями преломления, соответственно.

Брэгговские зеркала представляют собой одномерные фотонные кристаллы — периодические структуры с изменяющимся вдоль одного направления показателем преломления. Брэгговские зеркала могут быть изготовлены из различных материалов, включая пористый кремний, получаемый методом электрохимического травления кремниевых пластин.

Далее в тексте описываются основы взаимодействия света с веществом в микрорезонаторах Фабри–Перо. Взаимодействие между резонансными модами и веществом происходит, когда двухуровневая система (например, атом или молекула) имеет переход, находящийся в резонансе с локализованным электромагнитным полем. В этом случае можно выделить два режима взаимодействия света с веществом: слабую и сильную связь (Рисунок 2).

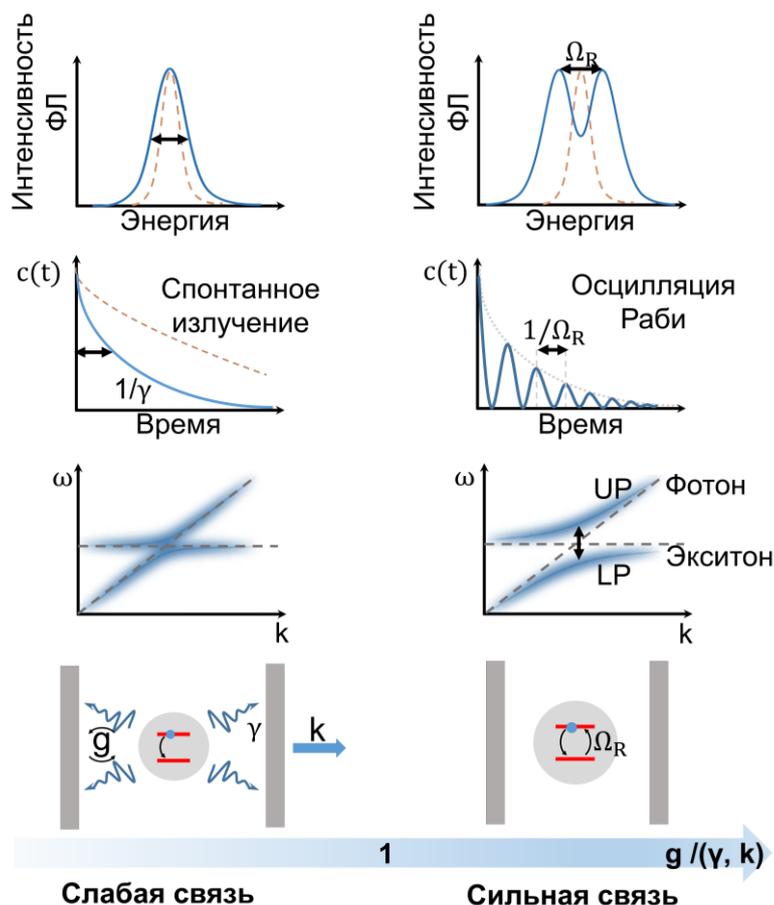


Рисунок 2. Схематическое представление слабой (слева) и сильной (справа) связи между светом и веществом (один двухуровневый атом). В режиме слабой связи скорость спонтанной эмиссии излучателя $c(t)$ увеличивается (эффект Парселла), при этом собственное состояние излучателя существенно не изменяется. При сильной связи наблюдаются осцилляция Раби и образование двух пиков в спектре фотолюминесценции (ФЛ), называемых поляритонами.

При этом для режима слабой связи между светом и веществом характерен эффект Парселла, заключающийся в увеличении скорости спонтанного излучения в резонаторе по сравнению со свободным пространством. Экспериментально данный эффект может наблюдаться в виде

сужения спектра люминесценции в резонаторе, что обусловлено повышением интенсивности люминесценции в узком спектральном диапазоне вблизи собственной моды резонатора и одновременным подавлением на других длинах волн. В свою очередь, для режима сильной связи между светом и веществом характерно образование гибридных поляритонных состояний, что может экспериментально наблюдаться в виде появления двух пиков в спектрах люминесценции или поглощения, а также антипересечения в дисперсионных кривых.

Когда скорость обмена энергией между резонатором и веществом меньше, чем скорости потерь, возбуждение рассеивается раньше, чем успевает передаться от двухуровневой системы к резонатору, что приводит к установлению режима слабой связи. Об этом режиме свидетельствует так называемый эффект Парселла, заключающийся в увеличении скорости спонтанной эмиссии, которое выражается фактором Парселла (F) следующим образом [5]:

$$F = \frac{3Q\lambda^3}{4\pi^2 V_0 n^3} \quad (1)$$

где Q — коэффициент добротности резонатора, λ — длина волны света, V_0 — модовый объем микрорезонатора, n — показатель преломления микрорезонатора.

Если же обмен энергией между двухуровневой системой и модой резонатора происходит быстрее, чем потери, система переходит в режим сильной связи. Этот режим характеризуется обратимым когерентным обменом энергией (известным как осцилляции Раби, Ω) между полем резонатора и электронными или колебательными состояниями помещенного в него вещества, что приводит к образованию двух поляритонных мод (P^+ и P^-), проявляющихся в виде двух отдельных максимумов в энергетическом спектре системы. Величина расщепления Раби выражается следующим образом:

$$\hbar\Omega_R = 2d\sqrt{N} \sqrt{\frac{\hbar\omega}{2\varepsilon_0 V}} \quad (2)$$

где d — дипольный момент перехода молекулы, N — количество двухуровневых систем, например, молекул, которые связаны с одной оптической модой, $\hbar\omega$ — энергия резонанса микрорезонатора или молекулярного перехода, ε_0 — электрическая постоянная, V — объём моды.

Далее проводится рассмотрение способов реализации эффектов сильной и слабой связи «свет-вещество» в гибридных системах, состоящих из органических молекул, помещенных внутри микрорезонатора Фабри–Перо. Так, один из примечательных примеров использования режима сильной связи был продемонстрирован в ряде работ по изучению кинетики химических реакций [6]. В частности, было показано, что относительное изменение скорости реакции в режиме КСС зависит от энергии расщепления Раби, которая, в свою очередь, пропорциональна квадратному корню из концентрации реагента. В цитируемой работе продемонстрировано изменение

химической активности молекул в режиме КСС, причем были описаны случаи как ее увеличения, так и снижения. Эти результаты демонстрируют большой потенциал практического применения эффекта сильной связи свет – вещество для регулирования скоростей химических реакций, управления процессами передачи энергии и для других практических целей за счет возможности контроля уровней энергии молекул без изменения их структуры.

Следует отметить, что наиболее часто в литературе эффекты сильной связи реализованы с использованием микрорезонаторов ФП, имеющих металлические зеркала. Одним из примеров таких работ является демонстрация возможности контроля скорости гидролиза сахарозы в микрофлюидном резонаторе ФП с отражающими поверхностями из золота в режиме сильной связи между модами резонатора и колебательными уровнями молекул растворителя (воды) [7]. В другой важной работе представлены приложения микрорезонаторов из пористого кремния (ПК) в качестве сенсоров, настраиваемых оптических фильтров или источников одиночных фотонов. Например, микрорезонаторы из ПК применяли для обнаружения β -лактоглобулина (β -LG) с использованием антител к нему, меченных углеродными квантовыми точками. Сигнал отражения регистрировался под разными углами до и после иммунного взаимодействия [8]. Аналогичным образом, анализ флуоресцентных изображений микрорезонаторов из ПК до и после иммунной реакции использовался также для идентификации гиббереллинов [9]. В работе [10] продемонстрировано ускорение спонтанной эмиссии и обужение спектра флуоресценции для флуорофоров, помещенных в микрорезонаторы из ПК. В других экспериментах была показана возможность создания настраиваемых оптических фильтров и бистабильных лазерных резонаторов. Такие системы были изготовлены на основе микрорезонаторов из ПК, заполненных нематическими фотохромными жидкими кристаллами на основе производного азобензола [11]. При воздействии УФ-излучения фотонная запрещённая зона смещалась приблизительно на 10 нм благодаря E–Z-изомеризации азобензола. Исследование показало, что этот процесс полностью обратим, причем его интенсивность можно увеличить во много раз видимым светом без деградации.

Таким образом, в первой главе представлена характеристика оптических микрорезонаторов и их ключевых особенностей. Особое внимание уделяется микрорезонаторам Фабри-Перо, включая варианты с металлическими зеркалами и распределёнными брэгговскими отражателями, а также гибридным системам с органическими молекулами. Рассматриваются как фундаментальные физические принципы, так и примеры практического применения таких систем, включая управление химической реактивностью и сенсоры, подчёркивая их потенциал в нано- и биофотонных технологиях.

Во второй главе [A1, A6] диссертационной работы рассматриваются моделирование микрорезонаторов Фабри-Перо в зависимости от их геометрии, материалов и функциональности. Для микрорезонаторов Фабри-

Перо на основе металлических зеркал была проанализирована модель, состоящая из отражающих поверхностей на основе алюминия, покрытых защитным слоем Al_2O_3 , одна из которых представляет собой массив цилиндров, а другая – непрерывный металлический слой. Были проанализированы различные параметры, чтобы найти оптимальную конфигурацию для запуска моделирования. Симуляции проводились с изменением только расстояния d между цилиндрами. Схематическое изображение микрорезонатора представлено на рисунке 3. Распределение электрического поля при длине волны 450 нм было проанализировано для случаев, когда расстояние d составляло 0,2; 0,5; 1,5 и 4 мкм. Анализ показал значительное усиление электрического поля при $d = 0,2$ мкм (Рисунок 4). Полученные результаты подтверждают перспективность использования данной структуры в разработке проточного микрофлюидного фотокаталитического реактора с микрорезонатором, работающего в режиме постоянного потока аналита. Такой подход основан на явлении сильной связи между светом и веществом, что открывает возможности для управления химическими реакциями, а также повышения эффективности катализа во много раз.

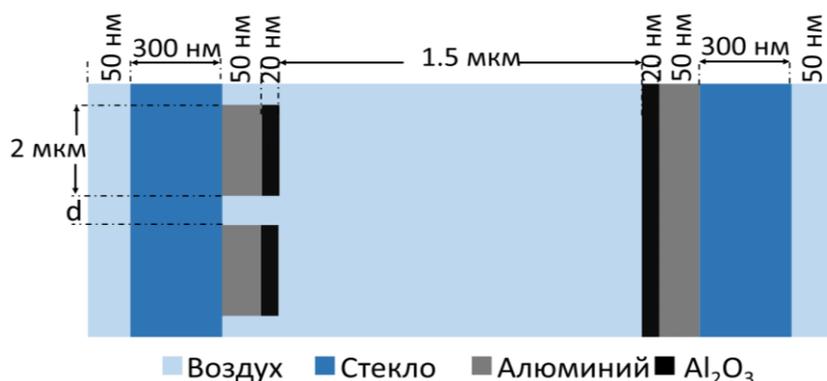


Рисунок 3. Схематическое изображение микрорезонатора, используемого в численном моделировании для анализа влияния расстояния между алюминиевыми цилиндрами на электрическое поле.

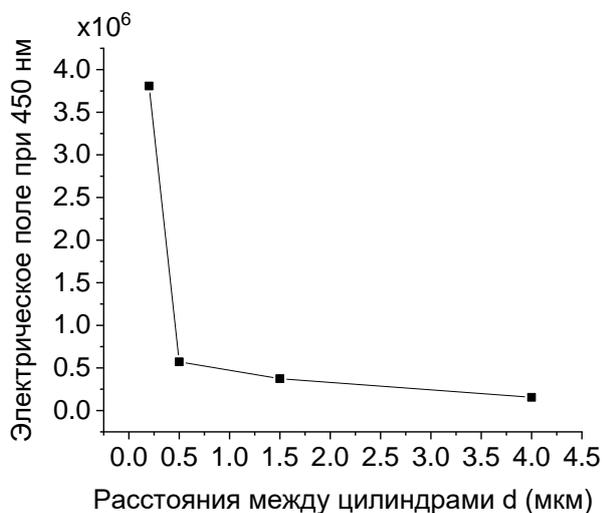


Рисунок 4. Интенсивность электрического поля на длине волны 450 нм для разного расстояния между цилиндрами.

Затем были проанализированы микрорезонаторы на основе серебряных и золотых зеркал. Микрорезонаторы на основе серебряных зеркал использовались для анализа поля в видимом диапазоне, в то время как для инфракрасного диапазона в качестве отражающей поверхности использовались зеркала на основе золота. Модель микрорезонатора схематически представлена на рисунке 5.

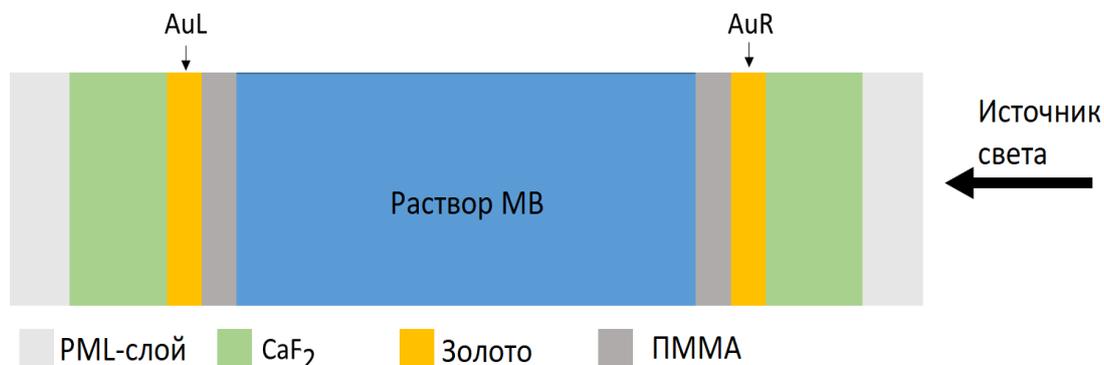


Рисунок 5. Геометрия расчетной модели проточного резонатора на основе металлических зеркал с раствором метиленового синего (МВ) в полости.

Для анализа материалов в полости резонатора сначала определялась его оптимальная длина (то есть, толщина слоя полости) с целью совпадения моды резонатора с пиком спектра экстинкции исследуемого вещества. Так, в качестве модельной среды полости резонатора был выбран краситель метиленовый синий, пик экстинкции которого приходится на 1469 см^{-1} . В результате моделирования наблюдались два пика в спектре пропускания. Их поведение было проанализировано для различных толщин полости резонатора, что позволило получить так называемое антипересечение, свидетельствующее об установлении режима сильной связи «свет-вещество» (Рисунок 6).

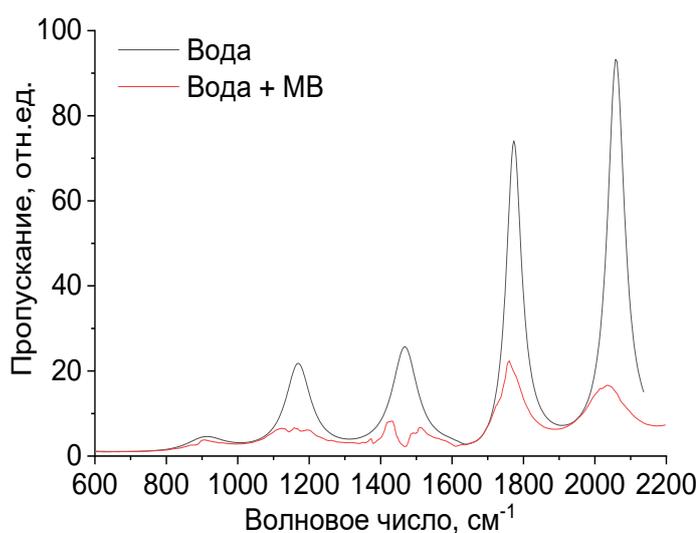


Рисунок 6. Спектр пропускания микрорезонатора в случае помещения в полость между зеркалами воды (черный) и водного раствора красителя метиленового синего (красный)

Далее была оптимизирована толщина отражающих поверхностей микрорезонатора. С помощью анализа интенсивности поля при 1951 см^{-1} было определено, что оптимальная толщина обоих металлических зеркал составляет около 5 нм (Рисунок 7). При увеличении толщины металлических зеркал коэффициент пропускания резонатора резко уменьшается, что затрудняет регистрацию сигнала.

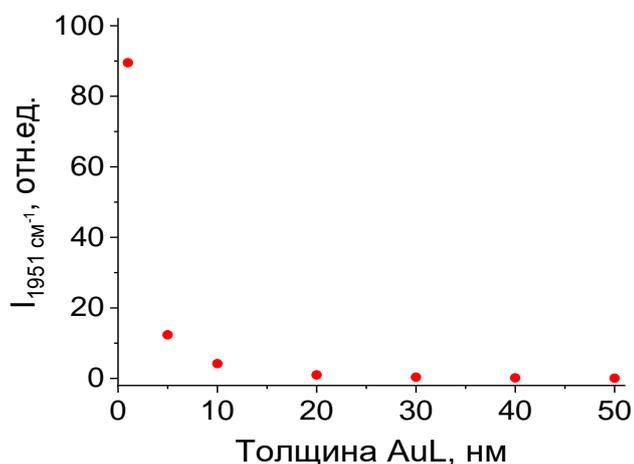
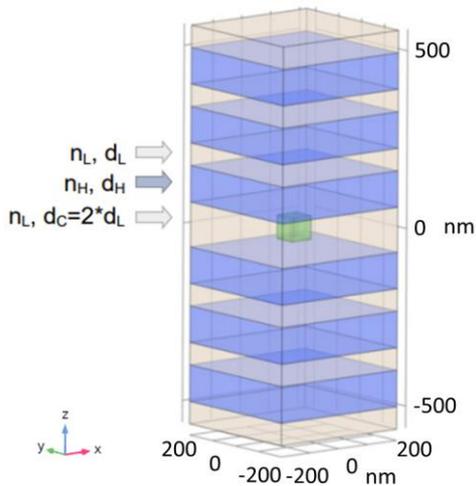


Рисунок 7. Расчетная интенсивность пропускаемого сигнала резонатора в собственной моде на 1951 см^{-1} в зависимости от толщины левого золотого зеркала. Толщина правого зеркала в данной модели составляла 5 нм.

Аналогичный результат был получен при варьировании толщины правого зеркала.

Затем был проведен анализ расчетной модели оптических плазмонных резонаторов, основанных на микрорезонаторах из ПК, предназначенных для взаимодействия свет-вещество с квантовыми точками. Расчетная модель состояла из микрорезонатора из ПК, образованного двумя распределёнными брэгговскими отражателями (РБО) с чередующимися слоями высокой и низкой пористости, а также полости между РБО. Показатели преломления и толщины слоев были рассчитаны с использованием модели эффективной среды Бруггемана, метода матриц переноса, а также калибровочных кривых пористости и скорости травления от тока травления. Так, для собственной моды резонатора при 540 нм получены значения показателей преломления $nH = 1,311$ и $nL = 2,138$ и толщин $dH = 103$ нм и $dL = 63$ нм для слоев высокой и низкой пористости, соответственно. Полость резонатора с индексом преломления $nL = 2,138$ и толщиной $dC = 126$ нм содержит серебряный нанокуб со стороной 70 нм. Для оценки влияния микрорезонатора и наночастицы на квантовую точку использовали электрический диполь, анализируя его мощность на разных расстояниях от «горячей точки» наночастицы, то есть области вблизи плазмонных наночастиц, где электромагнитное поле резко усиливается, например, вблизи острых краёв, углов или зазоров между наночастицами. На рисунке 8,а представлено схематическое изображение расчетной модели.

а)



б)

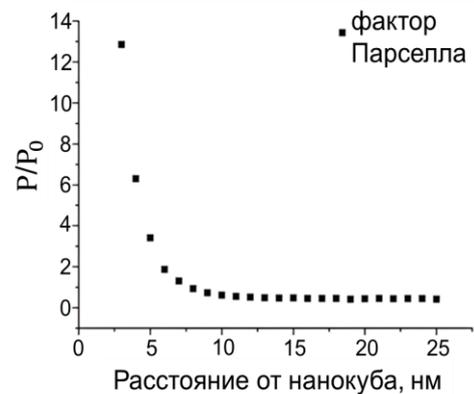


Рисунок 8. Геометрия элементарной ячейки, состоящей из двух распределенных брэгговских отражателей (РБО) с чередующимися слоями рSi с высокой и низкой пористостью, и полости между ними. Показатели преломления $n_H = 1,311$ и $n_L = 2,138$; толщина слоев $d_H = 103$ нм и $d_L = 63$ нм для слоев с высокой и низкой пористостью, соответственно. Полость между РБО представляет собой низкопористый слой двойной толщины: $n_L = 2,138$, $d_C = 126$ нм. Внутри слоя полости находится серебряный нанокуб со стороной 70 нм (а). Фактор Парселла, теоретически рассчитанный как отношение мощности, поглощенной нанокубами, к исходной дипольной мощности в отсутствие нанокубов (б).

Как результат, происходит ослабление плазмонного поля по мере удаления от одного из углов нанокуба («горячей точки») вдоль осей x , y и z . Точно так же дипольная мощность увеличивается в присутствии наночастицы, ослабляясь с расстоянием. Для диполя, расположенного вблизи «горячей точки», усиленное локальное электрическое поле усиливает возбуждение дипольного источника. Наибольшее усиление наблюдается на расстоянии до 7 нм от угла нанокуба (Рисунок 8,б). Аналогичным образом был проведен анализ расчетной модели с нанопластинами (Ag НПл). Дипольная мощность примерно одинаковая в микрорезонаторах из ПК и в контрольной системе (в монослое с тем же показателем преломления, что и полость микрорезонатора), она максимальна на расстоянии 1 нм от Ag НПл и быстро убывает с увеличением расстояния. Поскольку мощность диполя в обеих системах сопоставима, можно сделать вывод, что усиление флуоресценции в гибридной системе, включающей нанопластину Ag НПл и микрорезонатор ПК, в основном обусловлено усилением электрического поля вблизи Ag НПл.

Таким образом, во второй главе рассмотрены теоретические модели микрорезонаторов Фабри-Перо с различной геометрией, материалами и параметрами, которые влияют на реализацию эффектов сильного и слабого взаимодействия свет-вещество. Исследования показали, что выбор расстояния между элементами структуры и толщина зеркал существенно влияют на распределение электрического поля в полости резонатора и эффективность взаимодействия свет-вещество. Также были описаны результаты

моделирования систем на основе пористого кремния с встроенными металлическими наночастицами, в которых наблюдалось усиление мощности излучения диполя за счет плазмонного резонанса и микрорезонатора. Полученные результаты подчеркивают важность оптимизации геометрии резонатора и размещения наночастиц для создания высокоэффективных оптоэлектронных устройств и сенсоров.

В третьей главе [A1, A3, A5, A7] диссертационной работы представлено описание экспериментов с микрорезонаторами Фабри-Перо на основе металлических зеркал и брэгговских зеркал. Описана экспериментальная установка для создания микрорезонаторов Фабри-Перо на основе металлических зеркал, а также процедура электрохимического травления кремния для изготовления брэгговских зеркал.

Вначале описывается установка, использованная для создания микрорезонаторов Фабри-Перо на основе металлических зеркал. Рисунок 9 демонстрирует элементы данной экспериментальной установки.

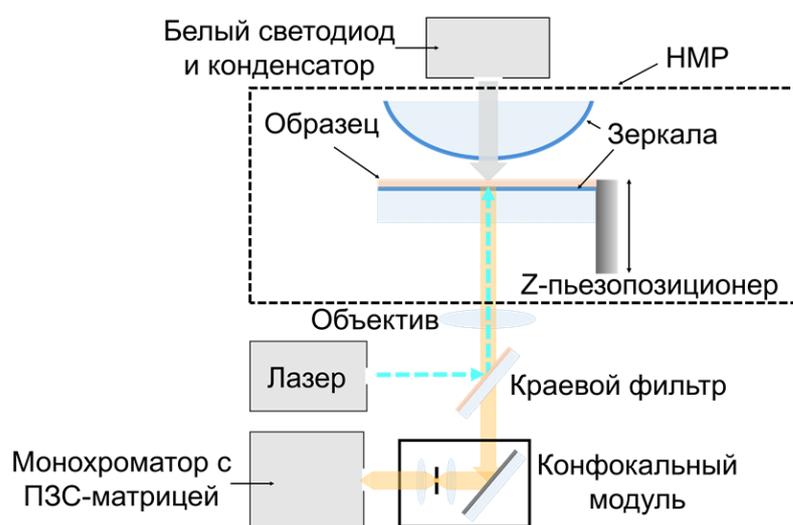


Рисунок 9. Схема экспериментальной установки настраиваемого микрорезонатора (НМР) Фабри – Перо, состоящего из плоского зеркала, встроенного в столик с пьезопозиционером, и выпуклого зеркала.

Микрорезонатор состоял из плоской отражающей поверхности и выпуклого зеркала, что позволяет минимизировать модовый объем, сохраняя при этом как минимум в одной точке условие плоскопараллельности. Ключевой особенностью данного типа микрорезонаторов являлась возможность регулирования их оптических свойств за счет изменения расстояния между отражающими поверхностями, что позволяет тонко настраивать резонансные условия для проведения дальнейших измерений. С этой целью использовался пьезопозиционер, закрепленный на нижнем зеркале резонатора, который позволяет регулировать толщину полости резонатора с шагом в несколько нанометров.

Усовершенствованный перестраиваемый микрорезонатор Фабри-Перо позволяет достичь оптимального для установления режима сильной связи «свет–вещество» расстояния между зеркалами микрорезонатора.

Нанометровая точность настройки длины оптического пути позволяет получить малые модовые объемы (порядка десятков $(\lambda/n)^3$) и, следовательно, изучать режимы как слабой, так и сильной связи свет–вещество между молекулами органических красителей и локализованным резонансным электромагнитным полем при комнатной температуре.

Для исследования возможности создания гибридной системы, оперирующей в режиме сильной связи «свет-вещество», использовали композитные пленки hBN–R6G–ПВП, в которых гексагональный нитрид бора (hBN) выполнял функцию матрицы для ориентированной иммобилизации молекул эмиттера — красителя родамина 6G (R6G), а полимер ПВП (поливинилпирролидон) выступал в роли стабилизатора раствора.

Затем подробно описана методология, используемая для изготовления микрорезонаторов на основе брэгговских зеркал. Для этого была использована техника электрохимического травления кремния, в процессе которого формировались чередующиеся слои с различными показателями преломления. На рисунке 10 показана установка, использованная для электрохимического травления. Кроме того, описана модель эффективной среды Бруггемана и модель матриц переноса для расчета оптимальных параметров для изготовления микрорезонаторов из ПК, а также их оптических свойств.

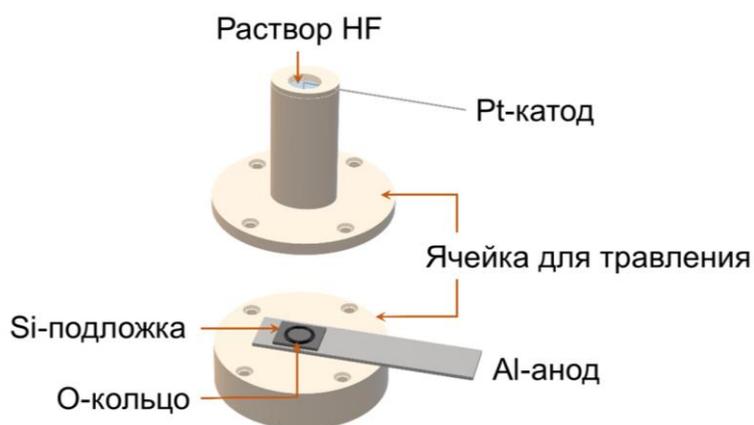


Рисунок 10. Схема установки для электрохимического травления структур на основе пористого кремния.

Таким образом, в третьей главе представлены экспериментальные методы создания микрорезонаторов Фабри-Перо на основе металлических зеркал и распределённых брэгговских отражателей. Подробно описаны экспериментальная установка, методология и материалы, необходимые для изготовления гибридных систем на основе двух типов микрорезонаторов Фабри-Перо.

В четвертой главе [A1, A3, A5, A7] диссертационной работы описаны полученные экспериментальные результаты. В случае микрорезонатора на основе металлических зеркал были исследованы моды резонатора и установлено оптимальное для создания резонансных условий расстояние между металлическими зеркалами, то есть при котором моды резонатора находились как можно ближе к максимуму спектра флуоресценции родамина

6G. Для этого была определена оптимальная концентрация компонентов hBN, R6G и ПВП, обеспечивающая как правильное расположение зеркал, так и целостность образца, что позволило достичь режима сильной связи «свет-вещество». В этих условиях при возбуждении лазером тонкой пленки hBN–R6G–ПВП, полученной при низкой концентрации ПВП (30 мг/мл) и объеме раствора 0,25 мл методом спин-коутинга при скорости вращения 2000 об/мин в течение 30 с, были обнаружены резонансные моды, характерные для установления режима сильной связи (Рисунок 11). В результате удалось получить режим сильной связи органического красителя с модами микрорезонатора Фабри-Перо, что видно в виде двух пиков флуоресценции оранжевого цвета с $g \approx 94.6$ мэВ.

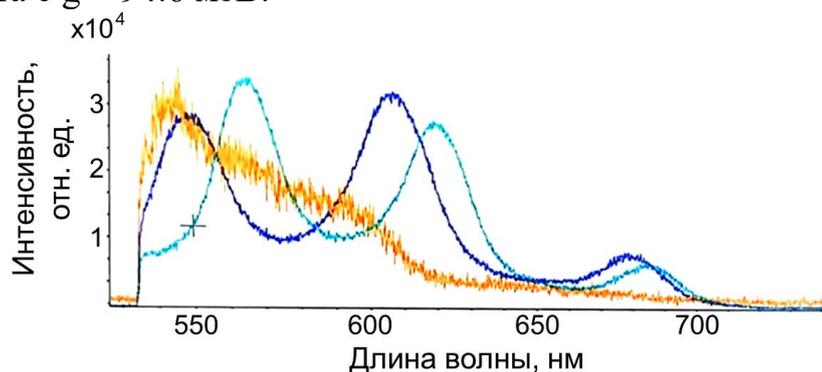


Рисунок 11. Резонансные моды тонкой пленки, полученной из раствора нитрида бора и родамина 6G (при концентрации ПВП в исходном растворе 30 мг/мл) на покрытом алюминием покровном стекле в настраиваемом микрорезонаторе Фабри — Перо (синяя и голубая линии). Флуоресценция родамина 6G в микрорезонаторе показана оранжевой линией.

Результаты химического травления микрорезонаторов из ПК включают калибровочные кривые пористости и скорости травления в зависимости от тока травления для подложек с различным удельным сопротивлением. Кроме того, в результате серии экспериментов с помощью СЭМ-снимков было зафиксировано изменение толщины слоев микрорезонатора по мере процесса травления, что снижает добротность образцов, отражающую их качество. Для выравнивания толщин слоев было определено отклонение каждого слоя от среднего значения, и рассчитаны таким образом необходимые поправки ко времени травления слоев. Кроме того, были дополнительно введены паузы в 5 секунд после травления каждого слоя, чтобы устранить блокировку поверхности кремния пузырьками водорода. В результате было зафиксировано увеличение добротности резонаторов почти в 2 раза и приближение спектра отражения образца (в частности, его формы) к теоретически рассчитанному, что позволило оптимизировать центрирование собственной моды резонатора на желаемой длине волны (Рисунок 12).

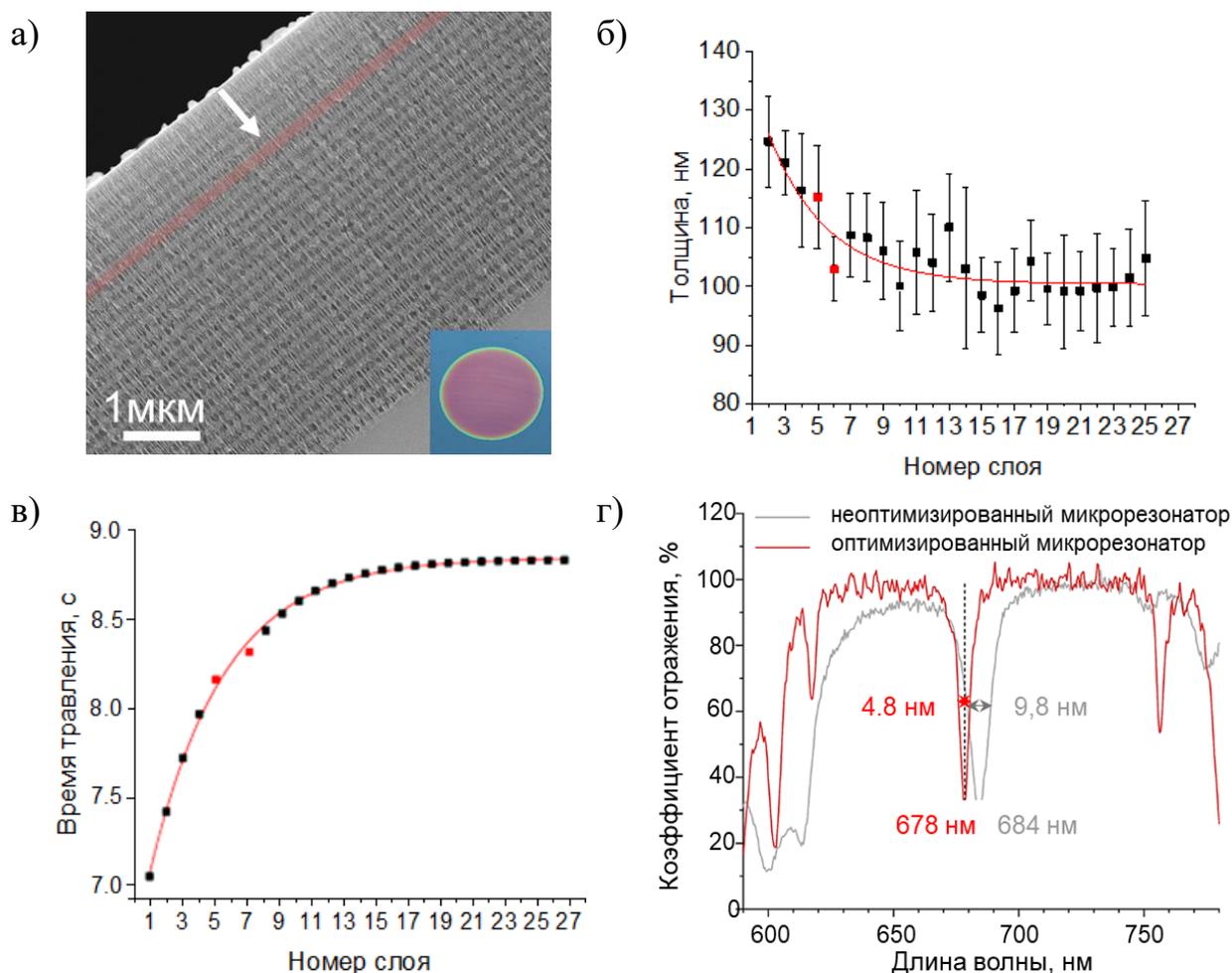


Рисунок 12. СЭМ-изображение поперечного среза микрорезонатора (MR). Стрелкой показано направление травления, красным выделена полость MR. На вставке показана фотография образца (а). Динамика изменения толщин слоев высокой пористости в микрорезонаторе ; красными точками отмечены слои, расположенные рядом со слоем полости MR (б). Кривая, иллюстрирующая поправки для времён травления при изготовлении оптимизированных микрорезонаторов (в). Экспериментальный спектр отражения оптимизированных MR (красная линия) в сравнении со спектром неоптимизированного MR (серая линия) (г).

Затем в MR были внедрены из раствора квантовые точки (КТ). В результате было замечено сужение спектра флуоресценции в 4,4 раза по сравнению с раствором КТ, что можно объяснить взаимодействием между экситонами КТ и собственными модами MR в режиме слабой связи «свет-вещество» (Рисунок 13). Кроме того, было продемонстрировано ускорение спонтанного излучения КТ в 3.7 раза в MR, по сравнению с раствором КТ. Вероятно, взаимодействие между компонентами представленной гибридной системы может быть дополнительно усилено за счет увеличения количества внедряемых эмиттеров и дальнейшего повышения добротности MR, что позволит преобразовывать начальные состояния комплексной системы в гибридизированные поляритонные состояния.

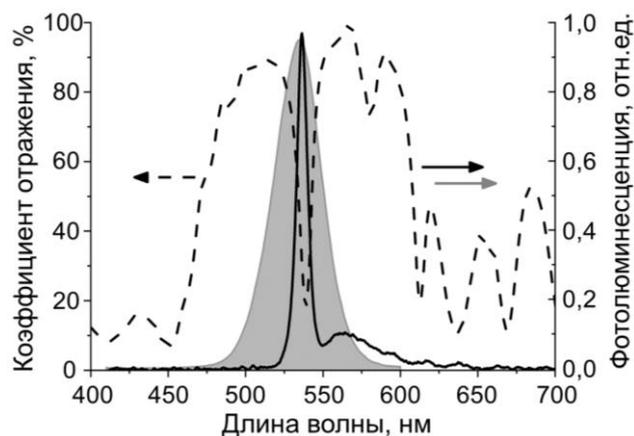


Рисунок 13. Спектр фотолюминесценции квантовых точек в растворе (серая область) и в микрорезонаторе (МР) из пористого кремния (черная сплошная кривая). Пунктирной линией обозначен спектр отражения МР.

Дополнительно представлены результаты использования МР на основе ПК в качестве подложки для детекции цитохрома С с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния. При использовании МР на основе ПК благодаря взаимодействию свет – вещество сигнал комбинационного рассеяния был усилен в 5–10 раз по сравнению с контрольным образцом (монослой ПК) (Рисунок 14). Кроме того, наблюдалось эффективное восстановление цитохрома С, выражающееся в увеличении соотношения интенсивности полос при 750 и 1633 см^{-1} , характерных для восстановленного и окисленного состояния цитохрома С, соответственно, как показано на Рисунке 15. Важно отметить, что эффективность восстановления цитохрома С в МР на основе ПК была в несколько раз выше (до 15 раз, в зависимости от мощности возбуждения), чем в контрольном образце.

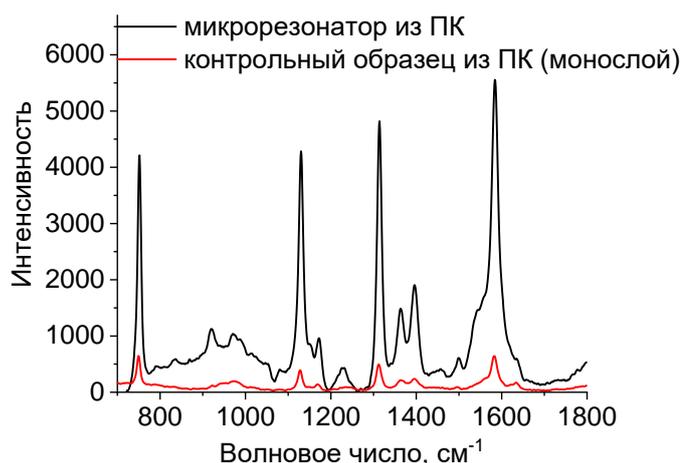


Рисунок 14. Сравнение абсолютной интенсивности спектров комбинационного рассеяния цитохрома С в микрорезонаторе из пористого кремния (ПК) (черная кривая) и в контрольном образце (красная кривая).

Принятое за степень восстановления цитохрома С отношение интенсивностей полос на 750 и 1633 см^{-1} , соответствующих восстановленному и окисленному состояниям цитохрома С, соответственно, в растворе оказалось

всего 0,5 (Рисунок 15). В то же время, для монослоя из ПК и МР оно составило 3,8 и 7,1 соответственно. Кроме того, была проанализирована зависимость степени восстановления цитохрома С от мощности возбуждения спектров комбинационного рассеяния. В растворе и монослое из ПК степень восстановления цитохрома С оставалась постоянной, в то время как в МР она увеличивалась по мере увеличения мощности возбуждения. Важно отметить, что в монослое из ПК степень восстановления цитохрома С была в 4,6 раза выше, чем в водном растворе, что означает, что восстановление в МР на основе ПК обусловлено не только структурой резонатора, но и самим материалом. Полученные результаты открывают путь к разработке новых биосенсоров, обладающих опцией контроля над окислительно-восстановительными реакциями.

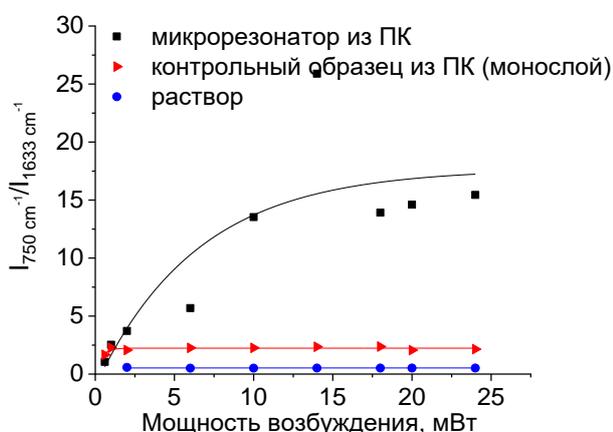


Рисунок 15. Степень восстановления цитохрома С в микрорезонаторе из пористого кремния (ПК) (черная кривая), в контрольном образце (красная кривая) и в растворе (синяя кривая) в зависимости от мощности возбуждения спектра комбинационного рассеяния.

Таким образом, в четвертой главе представлены экспериментальные результаты, подтверждающие возможность реализации режима сильной связи в МР ФП на основе металлических зеркал и распределённых брэгговских отражателей из ПК. Определены оптимальные параметры получения пленок hBN–R6G–ПВП, обеспечивающие резонансное взаимодействие родамина 6G с модами МР на основе металлических зеркал. Показано, что настройка геометрических характеристик МР позволяет существенно повысить добротность системы. В случае МР на основе ПК улучшение спектральных и оптических характеристик достигалось за счет управления процессом электрохимического травления и устранения технологических дефектов. Кроме того, добавление флуорофоров в МР на основе ПК привело к сужению спектра ФЛ по сравнению со спектром ФЛ раствора и ускорению спонтанного излучения, что указывает на эффективное взаимодействие света с веществом в режиме слабой связи. Кроме того, продемонстрирована возможность использования МР на основе ПК для усиления сигнала комбинационного рассеяния и управления степенью восстановления цитохрома С, что открывает перспективы использования таких структур в сенсорике и биомедицине.

Заключение

Проведённые теоретические и экспериментальные работы позволили получить новые научные данные, подтверждающие возможность реализации эффектов сильной и слабой связи в гибридных системах на основе микрорезонаторов.

1. Изготовлены гибридные фотолюминесцентные системы на основе микрорезонаторов Фабри – Перо и молекул органического красителя, либо неорганических квантовых точек, в качестве люминофоров. Это стало возможным благодаря использованию перестраиваемого нестабильного $\lambda/2$ -микрорезонатора Фабри – Перо, состоящего из плоского и выпуклого зеркал и микрорезонаторов из пористого кремния на основе брэгговских зеркал. Данные системы позволяют управлять оптическими свойствами флуорофоров и демонстрируют установление связи с модами микрорезонатора и образование гибридной системы свет – вещество.
2. Создана расчетная модель, позволяющая прогнозировать оптические свойства и параметры изготовления микрорезонаторов, необходимые для оптимальных условий реализации сильной и слабой связи света с веществом. Модель включает теоретические расчеты на основе приближения эффективной среды Бруггемана, которое позволяет рассчитать показатель преломления слоев с высокой и низкой пористостью, модель матрицы переноса, которая позволяет получить спектральные параметры, и численное моделирование с помощью метода конечных элементов, которое позволяет моделировать более сложные системы и визуализировать распределение электрического поля. Эта расчетная модель обеспечивает большую точность при разработке систем на основе микрорезонаторов.
3. Разработана методика адаптивного травления пористого кремния, позволившая увеличить добротность изготавливаемых микрорезонаторов из пористого кремния как минимум в два раза. Данная методика основана на введении поправочных коэффициентов для времен травления, что позволяет улучшить соблюдение периодичности слоев с низким и высоким показателем преломления. Кроме того, методика включает в себя паузы после травления каждого слоя резонатора, что способствует высвобождению пузырьков водорода, блокирующих поверхность кремния и препятствующих процессу травления. Улучшенные характеристики резонаторов открывают новые возможности для их использования в сенсорных и оптических устройствах.
4. Впервые экспериментально продемонстрирован эффект усиления комбинационного рассеяния света цитохромом С, белком дыхательной цепи митохондрий, помещённом в полость микрорезонатора на основе пористого кремния. Этот эффект может быть использован для усовершенствования методов спектроскопического анализа биологических молекул.

5. Установлено, что фотоиндуцированное восстановление цитохрома С усиливается в полости микрорезонатора на основе пористого кремния вплоть до 15 раз по сравнению с контрольной системой, и показана возможность управления эффективностью окислительно-восстановительных реакций. Это открывает перспективы для разработки новых биофотонных систем и изучения динамических процессов в биологических молекулах.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации, в которых отражены основные результаты диссертации в изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационных советах МГУ по специальности 1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики:

A1. Granizo E., Kriukova I.S., Knysh A.A., Sokolov P.M., Samokhvalov P.S., Nabiev I.R. Enhanced Light–Matter Interaction in Porous Silicon Microcavities Structurally Optimized Using Theoretical Simulation and Experimental Validation //Nanomaterials. – 2025. – Vol. 15. – №. 23. – P. 1808. — Импакт-фактор 4.3 (JIF). Авт. вклад 1.65 п.л. из 2.29 п.л. — EDN: XDYJLH.

A2. Granizo E., Samokhvalov P., Nabiev I. Functionalized optical microcavities for sensing applications //Nanomaterials. – 2025. – Vol. 15. – №. 3. – P. 206. — Импакт-фактор 4.3 (JIF). Авт. вклад 1.75 п.л. из 1.95 п.л. — EDN: BPMQAU.

A3. Гранисо Роман Э.А., Крюкова И.С., Набиев И.Р., Самохвалов П.С. Оптимизация параметров электрохимического травления для повышения добротности микрорезонаторов на основе пористого кремния //Письма в Журнал технической физики. – 2025. – Т. 51. – №. 5. – С. 7-10. — Импакт-фактор 0,485 (РИНЦ). Авт. вклад 0.29 п.л. из 0.37 п.л. EDN: ZSRFHE.

A4. Granizo E., Kriukova I., Escudero-Villa P., Samokhvalov P., Nabiev I. Microfluidics and Nanofluidics in Strong Light–Matter Coupling Systems //Nanomaterials. – 2024. – Vol. 14. – №. 18. – P. 1520. — Импакт-фактор 4.3 (JIF). Авт. вклад 3.87 п.л. из 4.19 п.л. — EDN: HZPGRK.

A5. Kriukova I.S., Granizo E.A., Knysh A.A., Samokhvalov P.S., Nabiev I.R. Controlling the Luminescence of Quantum Dots in Hybrid Structures Based on Porous Silicon //Physics of Atomic Nuclei. – 2024. – Vol. 87. – №. 11. – P. 1750-1753. — Импакт-фактор 0.4 (JIF). Авт. вклад 0.11 п.л. из 0.38 п.л. — EDN: AWEFIR. [Крюкова И.С., Гранисо Э.А., Кныш А.А., Самохвалов П.С., Набиев И.Р. Управление люминесценцией квантовых точек в гибридных структурах на основе пористого кремния //Ядерная физика и инжиниринг. – 2025. – Т. 16 – №. 5 – С. 710-714. — Импакт-фактор 0,141 (РИНЦ). Авт. вклад 0.11 п.л. из 0.38 п.л. EDN: VCDZIX].

A6. Granizo E., Knysh A., Sokolov P., Samokhvalov P., Nabiev I. Polaritonic Photocatalysis and Polariton-Driven Control of Energy Relaxation Pathways in a Tunable Microcavity //Physics of Atomic Nuclei. – 2023. – Vol. 86. – №. 11. – P. 2454-2458. — Импакт-фактор 0.4 (JIF). Авт. вклад 0.11 п.л. из 0.36 п.л. — EDN: CNPJJP. [Гранисо Э.А., Кныш А.А., Соколов П.М., Самохвалов П.С., Набиев И.Р. Поляритонный фотокатализ и управление путями энергетической

релаксации с помощью поляритонов при использовании перестраиваемого микрорезонатора // Ядерная физика и инжиниринг. – 2025. – Т. 16 – №. 3 – С. 328-333. — Импакт-фактор 0,141 (РИНЦ). Авт. вклад 0.11 п.л. из 0.36 п.л. — EDN: MOIGEB].

A7. Granizo E.A., Samokhvalov P.S., Nabiev I.R. Tunable Fabry–Perot Microcavity Based on Boron Nitride and Rhodamine 6G // Physics of Atomic Nuclei. – 2023. – Vol. 86. – №. 9. – P. 2091-2095. — Импакт-фактор 0.4 (JIF). Авт. вклад 0.32 п.л. из 0.44 п.л. — EDN: JDZMBF. [Гранисо Э.А., Самохвалов П.С., Набиев И.Р. Настраиваемый микрорезонатор фабри–перо на основе нитрида бора и родамина 6G // Ядерная физика и инжиниринг. – 2025. – Т. 16 – №. 3 – С. 338-343. — Импакт-фактор 0,141 (РИНЦ). Авт. вклад 0.32 п.л. из 0.44 п.л. — EDN: XUUPLC].

Список цитированной литературы:

1. Takele W.M. и др. Scouting for strong light–matter coupling signatures in Raman spectra // Phys. Chem. Chem. Phys. 2021. Т. 23, № 31. С. 16837–16846.
2. Thomas A. и др. Ground-State Chemical Reactivity under Vibrational Coupling to the Vacuum Electromagnetic Field // Angewandte Chemie. 2016. Т. 128, № 38. С. 11634–11638.
3. Santhosh K. и др. Vacuum Rabi splitting in a plasmonic cavity at the single quantum emitter limit // Nat Commun. 2016. Т. 7, № 1. С. ncomms11823.
4. Schwartz T. и др. Polariton Dynamics under Strong Light–Molecule Coupling // ChemPhysChem. 2013. Т. 14, № 1. С. 125–131.
5. Purcell E.M. Spontaneous Emission Probabilities at Radio Frequencies // Confined Electrons and Photons / под ред. Burstein E., Weisbuch C. Boston, MA: Springer US, 1995. Т. 340. С. 839–839.
6. Lather J. и др. Cavity Catalysis by Cooperative Vibrational Strong Coupling of Reactant and Solvent Molecules // Angew Chem Int Ed. 2019. Т. 58, № 31. С. 10635–10638.
7. Bai J. и др. Vibrational coupling with O–H stretching increases catalytic efficiency of sucrase in Fabry–Pérot microcavity // Biochemical and Biophysical Research Communications. 2023. Т. 652. С. 31–34.
8. Bai L. и др. Detection of β -Lactoglobulin by a Porous Silicon Microcavity Biosensor Based on the Angle Spectrum // Sensors. 2022. Т. 22, № 5. С. 1912.
9. Li H. и др. Gibberellins Detection Based on Fluorescence Images of Porous Silicon Microcavities // IEEE Sensors J. 2023. Т. 23, № 9. С. 9049–9057.
10. Kriukova I.S. и др. Controlling the Luminescence of Quantum Dots in Hybrid Structures Based on Porous Silicon // Phys. Atom. Nuclei. 2024. Т. 87, № 11. С. 1750–1753.
11. Bobrovsky A. и др. Photocontrollable Photonic Crystals Based on Porous Silicon Filled with Photochromic Liquid Crystalline Mixture // Advanced Optical Materials. 2020. Т. 8, № 22. С. 2001267.