Письма в ЖЭТФ, том 109, вып. 1, с. 12 – 18

Спектральные и пространственные характеристики мод электромагнитного поля в перестраиваемой оптической микрорезонаторной ячейке для исследования гибридных состояний "свет–вещество"

Д. С. Довженко[+], *И. С. Васкан*[+*×], *К. Е. Мочалов*[*], *Ю. П. Ракович*[+°], *И. Р. Набиев*[+∇1)]

[+]*Лаборатория нано-биоинженерии и лаборатория гибридных фотонных наноматериалов, Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ (Московский инженерно-физический институт), 115409 Москва, Россия*

[*]*Лаборатория молекулярной биофизики, Институт биоорганической химии им. академиков М.М. Шемякина и Ю.А. Овчинникова РАН, 117997 Москва, Россия*

[×]*Московский физико-технический институт (государственный университет), 141700 Долгопрудный, Россия*

[°]*Center for Materials Physics and University of the Basque Country, Paseo Manuel de Lardizabal 5, 20018, Donostia – San Sebastián, Spain*

[∇]*Laboratoire de Recherche en Nanosciences, LRN-EA4682, 51 rue Cognacq Jay, Université de Reims Champagne-Ardenne, 51100 Reims, France*

Поступила в редакцию 8 ноября 2018 г.
После переработки 12 ноября 2018 г.
Принята к публикации 12 ноября 2018 г.

Исследование резонансного взаимодействия между веществом и локализованным электромагнитным полем в резонаторе является областью повышенного интереса в современных исследованиях, поскольку с его помощью открываются перспективы управляемого воздействия на фундаментальные свойства материи. Однако, несмотря на большое количество подобных исследований, до настоящего времени не разработано универсального подхода, который позволял бы изучать серии различных образцов с возможностью широкого варьирования основных экспериментальных параметров оптических мод. В данной работе мы представляем анализ основных оптических параметров разработанной нами ранее универсальной перестраиваемой микрорезонаторной ячейки: добротности, модового объема и их зависимости от используемых зеркал и расстояния между ними. Полученные результаты значительно расширят диапазон практических применений резонансного взаимодействия света с веществом: усиления комбинационного рассеяния, резонансного безызлучательного переноса энергии на большие расстояния и модификации скорости химических реакций.

DOI: 10.1134/S0370274X1901003X

1. Введение. Изучение резонансного взаимодействия света с веществом в локализованном электромагнитном поле является интенсивно развивающейся областью исследований. В результате связывания возбужденных состояний в веществе с собственными модами электромагнитного поля образуются новые гибридные энергетические состояния, которые могут быть описаны с помощью соответствующих квазичастиц–поляритонов. В частности, резонансные уровни энергии фотона и экситона в веществе расщепляются на два поляритонных уровня, отличающихся по энергии. Свойства поляритонов существенно отличаются от свойств как фотона в резонаторе, так и от свойств возбужденного состояния в веществе: в зависимости от условий эксперимента поляритоны отличаются энергией, временем жизни, вероятностью переноса энергии. Эти свойства могут быть использованы для усиления комбинационного рассеяния, резонансного безызлучательного переноса энергии на большие расстояния, модификации скорости химических реакций [1–3]. Наиболее распространенный способ достижения связывания – помещение ансамбля атомов или молекул в оптический микрорезонатор [4]. В такой системе связывание света с веществом регистрируется по изменениям спектрального отклика системы, который определяется силой связи между молекулами вещества и модами резонатора. Сила связи в системе харак-

1)e-mail: igor.nabiev@gmail.com

теризует вероятность переноса энергии между возбужденным состоянием вещества и собственной модой резонатора. Ключевым критерием, определяющим образование связанных состояний, является соотношение между силой связи и суммарными необратимыми потерями энергии, обоснованными временем жизни фотона в пустом микрорезонаторе и временем жизни возбужденного состояния в веществе. В зависимости от силы связи выделяют так называемые режимы "слабой" и "сильной" связи. В режиме слабой связи [5] связывание происходит, однако потери энергии доминируют. Этот режим может быть использован для усиления или ослабления спонтанного излучения, изменения его спектра и кинетики [6, 7]. Особый интерес представляет режим сильной связи, при котором скорость обмена энергией между светом и веществом превосходит потери энергии в системе, что приводит к формированию двух новых гибридных энергетических состояний системы. Экспериментально это проявляется в расщеплении резонансных пиков спектров пропускания или излучения – Раби-сплиттинге. В этом режиме фундаментальные свойства вещества, а именно спектральные и временные характеристики возбужденных состояний изменяются, что может быть применено для решения множества практических задач в фотонике, химии и биологическом сенсинге, а также для создания новых когерентных источников света.

В последние годы достижения в разработке и создании новых микрорезонаторов [8] оказали значительное влияние на развитие исследований взаимодействия света с веществом. Различные виды микрорезонаторов применялись для получения режима сильной связи, сопровождающегося модификацией свойств связанного вещества с различными значениями Раби-сплиттинга [9]. Однако, несмотря на многочисленные исследования, до настоящего времени не было продемонстрировано комплексного и удобного подхода, позволяющего получать режим сильной связи для большого количества различных образцов в широком спектральном диапазоне без необходимости каждый раз конструировать микрорезонатор под характеристики конкретного образца. Другим важным недостатком применяемых оптических микрорезонаторов является преимущественно невысокие значения Раби-сплиттинга, характеризующие силу связи, что также затрудняет практические приложения эффектов. В основном это связано с относительно большим модовым объемом, наблюдаемым в оптических микрорезонаторах, по сравнению с плазмонными наночастицами. С другой стороны, плазмонные наночастицы имеют низкие значения добротности собственных мод, что значительно увеличивает потери энергии в системе. Для преодоления этих недостатков нами было разработано универсальное устройство, основанное на перестраиваемом неустойчивом микрорезонаторе Фабри–Перо, сочетающим в себе следующие преимущества: универсальность, малый модовый объем, а также возможность плавного изменения добротности и модового объема в процессе работы с одним образцом. Последнее свойство особенно важно для получения дисперсионных зависимостей поляритонных ветвей в исследуемых образцах и непосредственного измерения силы связи. Особенности конструкции делают это устройство универсальным инструментом, который позволяет, варьируя параметры оптических мод, получать режимы слабой и сильной связи, отслеживать постепенный переход связанной системы от одного состояния к другому. Это обеспечивает простой поиск оптимальных условий для взаимодействия света с веществом практически для любых образцов как в видимом, так и в инфракрасном диапазоне длин волн. Таким образом, устройство позволяет наблюдать связь как с электронными, так и с колебательными уровнями энергии. В данной работе исследуются оптические характеристики разработанной микрорезонаторной ячейки, и проводится их сравнение с результатами теоретического моделирования, а также с соответствующими параметрами существующих оптических резонаторов. Полученные данные демонстрируют, что предложенная оптическая конфигурация позволяет добиваться значительного увеличения силы связи, что является важным шагом на пути к широкому практическому применению эффектов сильной связи.

2. Связь основных характеристик микрорезонатора с силой связи и режимом сильной связи. Согласно теоретическому рассмотрению на основе модели Джейнса–Каммингса, сила связи ансамбля двухуровневых систем с локализованным электромагнитным полем определяется следующим выражением [10, 11]:

$$\Omega = 2g\sqrt{N} = 2F_{\text{geom}}d\sqrt{\frac{\omega N}{\varepsilon_0 \hbar V_m}}, \tag{1}$$

$$\Omega \propto \sqrt{C}, \tag{2}$$

где g – коэффициент связи, N – число двухуровневых систем в ансамбле, F_{geom} – параметр, зависящий от взаимного положения дипольного момента и его ориентации относительно распределения моды, d – дипольный момент перехода, $\hbar$ – постоянная Дирака, ω – частота электромагнитного поля, ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума, V_m – модовый объем, C – концентрация двухуровневых систем. Ключевой является зависимость величины связи от модового объема, дипольного момента и концентрации двухуровневых систем. Таким образом, можно сделать вывод, что в эксперименте для увеличения силы связи ансамбля молекул с модой оптического резонатора необходимо минимизировать модовый объем, а также увеличить концентрацию молекул в пределах моды.

Реализация режима сильной связи ансамбля молекул в резонаторе определяется выполнением следующего критерия [12]:

$$2\Omega > \frac{\gamma + k}{2}, \tag{3}$$

$$\gamma = 2\pi\Delta\nu, \tag{4}$$

$$k = 2\pi\frac{c}{LQ}, \tag{5}$$

где γ и k – обратные времена жизни возбужденного состояния молекулы (или другой двухуровневой системы) и фотона в пустом резонаторе соответственно, $\Delta\nu$ – ширина на полувысоте линии перехода из возбужденного в основное состояние молекулы, c – скорость света, L – длина резонатора, Q – добротность.

Из представленных уравнений следует, что увеличение добротности резонатора значительно снижает потери энергии системы, упрощая достижение режима сильной связи. В свою очередь, добротность в случае плоскопараллельного резонатора связана с коэффициентами отражения его зеркал [13]:

$$Q = \frac{2\pi nd}{\lambda}\frac{\sqrt[4]{R_1R_2}}{1-\sqrt{R_1R_2}}, \tag{6}$$

где n – показатель преломления, d – расстояние между зеркалами, λ – длина волны резонанса, R_1 и R_2 – показатели отражения зеркал резонатора.

Из приведенных качественных зависимостей следует, что правильный выбор конструкции и материала элементов, образующих резонатор, позволяет, с одной стороны, посредством увеличения добротности, уменьшить потери энергии в системе, а с другой стороны, непосредственно увеличить силу связи путем минимизации модового объема. В ряде работ по исследованию сильной связи в качестве элементов, образующих резонатор, используются распределенные брэгговские отражатели (РБО) [14–16], поскольку их применение позволяет получать коэффициенты отражения более 99 %, что значительно повышает добротность. Однако это достигается за счет отражения света от границ между многочисленными слоями брэгговской структуры, что существенно увеличивает эффективный модовый объем за счет проникновения поля внутрь РБО. Одновременно с этим, из формулы (3) следует, что при времени жизни фотона в резонаторе, значительно превышающем время жизни возбужденного состояния молекулы, дальнейшее увеличение добротности перестает влиять на выполнение критерия сильной связи. Экстремально высокие значения добротности в таком случае необходимы только для работы с охлажденными одиночными атомами или молекулами. По этой причине для получения сильной связи мод резонатора с ансамблем молекул основной целью становится минимизация модового объема. Отметим, что именно на этом принципе основаны впечатляющие результаты, полученные с использованием плазмонных наночастиц вместо оптических резонаторов [9]. Таким образом, для создания оптического микрорезонатора с минимальным модовым объемом вместо РБО следует использовать металлические зеркала, обеспечивающие большую локализацию электромагнитной моды. Для их изготовления применяется напыление на стеклянную подложку слоя алюминия, толщиной порядка десятков нанометров, и дальнейшее покрытие тонким слоем диоксида кремния для защиты от деградации. Контролируемый процесс напыления алюминия позволяет в широких пределах варьировать коэффициенты отражения таких зеркал. В сочетании с возможностью точного изменения расстояния между зеркалами разработанная микрорезонаторная ячейка позволяет подробно исследовать зависимость образования гибридных состояний “свет–вещество” от спектральных и пространственных характеристик собственных мод электромагнитного поля.

3. Конструкция микрорезонаторной ячейки. Подробно конструкция разработанной нами микрорезонаторной ячейки была описана ранее в работе [17]. Основным элементом ячейки является неустойчивый микрорезонатор Фабри–Перо, состоящий из перемещаемых относительно друг друга вдоль оси резонатора плоского и выпуклого металлических зеркал. Преимущество такой конфигурации заключаются в том, что она обязательно обеспечивает условие плоскопараллельности зеркал в области наибольшего сближения их поверхностей. Кроме того, за счет малых размеров области плоскопараллельности зеркал (диаметр не более двух микрон) обеспечивается существование мод, преимущественно направленных вдоль оси резонатора и минимизация их сечения в латеральной плоскости. Указанные обстоятельства существенно снижают модовый объем резонатора, что важно для повышения силы связи между образцом и электромагнитным полем.

На рисунке 1 представлена схема микрорезонаторной ячейки. В качестве верхнего выпуклого зер-

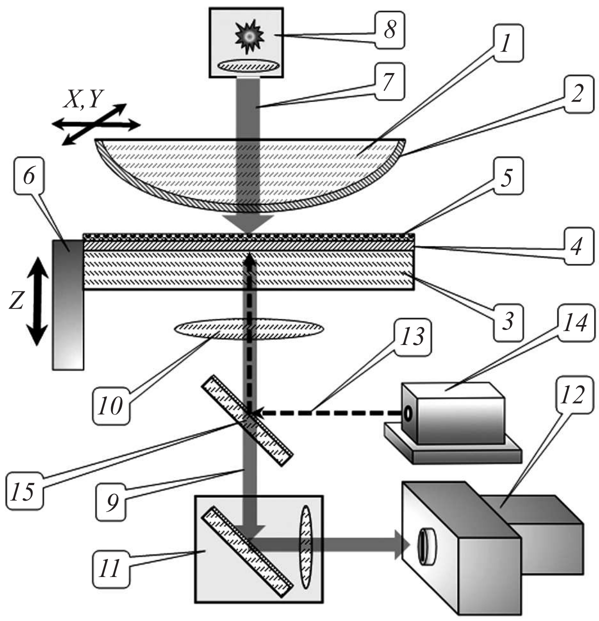

Рис. 1. Схема микрорезонаторной ячейки. *1* – Плоско-выпуклая линза – основа верхнего зеркала; *2* – алюминиевое покрытие верхнего зеркала; *3* – покровное стекло – основа нижнего зеркала; *4* – алюминиевое покрытие нижнего зеркала; *5* – образец; *6* – столик одноосного пьезопозиционера; – широкополосное излучение; *8* – блок, содержащий "белый" светодиод и оптический коллиматор; *9* – прошедшее через резонатор излучение; *10* – объектив инвертированного микроскопа; *11* – оптическая система сбора излучения; *12* – монохроматор, оборудованный ПЗС; *13* – возбуждающее лазерное излучение; *14* – лазер; *15* – юстируемый оптический НЧ-фильтр

кала используется плоско-выпуклая линза (*1*) с нанесенным алюминиевым покрытием с защитным слоем SiO_2 (*2*). Линза находится в съемной каретке, что дает возможность легко менять линзы с разными коэффициентами пропускания/отражения прямо в ходе эксперимента. Каретка закреплена в микрометрическом позиционере, позволяющем прецизионно совмещать область плоскопараллельности зеркал и исследуемый образец. Основой для нижнего зеркала служит стандартное покровное стекло (*3*), на которое также нанесен слой алюминия с защитным покрытием (*4*). Нижнее зеркало служит подложкой для нанесения исследуемого образца (*5*) и может легко меняться в ходе эксперимента, существенно повышая производительность всей работы. Нижнее зеркало с образцом закреплено на столике одноосного пьезопозиционера (*6*), позволяющего плавно менять расстояние между зеркалами в диапазоне от 100 нм до 10 мкм с шагом в несколько нанометров. Взаимное комбинирование коэффициентов отражения зеркал при возможности плавного изменения расстояния между ними на большой ход и с малым шагом дает возможность широкого варьирования основных параметров проведения экспериментов по исследованию резонансного взаимодействия между ансамблем молекул и локализованным электромагнитным полем. Основными варьируемыми параметрами являются добротность, модовый объем и отношение между ними. В частности, возможности разработанной ячейки позволяют добиться высоких значений добротности при сохранении минимального модового объема, что может быть использовано для увеличения силы связи в экспериментах по достижению гибридных состояний "свет–вещество". Кроме того, широкий диапазон изменения расстояний между зеркалами резонатора позволяет, при соответствующей адаптации оптических компонентов, использовать ячейку в широкой спектральной области – от видимого до ближнего инфракрасного (ИК) диапазона оптического спектра. Широкий оптический диапазон, в свою очередь, дает возможность исследования как электронного, так и колебательного резонансного взаимодействия вещества и электромагнитного поля. Непосредственно микрорезонаторная ячейка устанавливается на инвертированный оптический микроскоп, являющийся частью уникальной научной установки (УНУ, "Система Зондово-Оптической 3D Корреляционной Микроскопии", http://ckp-rf.ru/usu/486825/) [18]. Освещение ячейки широкополосным излучением (*7*) осуществляется со стороны верхнего зеркала с помощью блока, содержащего "белый" светодиод и оптический коллиматор (*8*). Соответственно, прошедшее через резонатор и подлежащее спектральному анализу излучение (*9*) собирается объективом инвертированного микроскопа (*10*) и с помощью оптической системы (*11*), включающей конфокальный модуль, передается на монохроматор, оборудованный прибором с зарядовой связью (ПЗС-матрицей) (*12*). Для исследования свойств флуоресценции или комбинационного рассеяния образцов, находящихся в микрорезонаторной ячейке, возбуждающее излучение (*13*) лазера (*14*) заводится со стороны нижнего зеркала при помощи юстируемого оптического фильтра низких частот (НЧ-фильтра) (*15*).

4. Спектральные и пространственные характеристики мод электромагнитного поля в микрорезонаторной ячейке. Одним из ключевых преимуществ разработанной установки является ее универсальность и возможность работы с зеркалами, имеющими разные коэффициенты отражения, что позволяет изменять добротность, модовый объ-

Таблица 1. Связь между основными характеристиками микрорезонаторной ячейки

Отражение зеркал, %	Расстояние между зеркалами (L), нм	Добротность (Q)	Модовый объем (V_m), мкм^3	Эффективный модовый объем (V_{eff}), $(\lambda/n)^3$
87	206	17	5	73
	2189	170	5927	94012
67	398	13	12	189
	1110	50	262	5178
	2283	95	2284	41624

ем и соотношение между ними. Для экспериментальной демонстрации оптических свойств резонаторной ячейки были изготовлены два типа зеркал, отличающихся толщиной алюминиевого слоя. Стоит отметить, что при напылении слоя алюминия большей толщины происходит рост как отражения, так и поглощения. Таким образом, при приближении к высоким значениям отражения (на уровне 90 %) существенно падает величина пропускания. Как следствие, измерение спектров пропускания резонаторной ячейки значительно усложняется. Толщина алюминиевого слоя зеркал первого типа была подобрана таким образом, чтобы при пропускании, достаточном для регистрации спектров пропускания ячейки – не менее 1 %, зеркала имели максимальное возможное отражение – 87 %. Отражение второго типа зеркал было выбрано на уровне 67 % при пропускании порядка 10 %. Толщины алюминиевого слоя в зеркалах первого и второго типов составили 45 и 35 нм соответственно. Для предотвращения деградации поверхности зеркал слой алюминия был покрыт слоем кремниевого диоксида толщиной 20 нм.

На рисунке 2 представлены измеренные экспериментально и рассчитанные теоретически спектры пропускания микрорезонатора, состоящего из зеркал первого типа с отражением 87 % для разных значений расстояния между зеркалами. Расстояния определялись с помощью приближения экспериментальных спектров теоретической моделью, подробно описанной в [17].

Аналогичные спектры для микрорезонатора с зеркалами, имеющими коэффициенты отражения 67 %, представлены на рис. 3. Видно, что расчетные спектры находятся в достаточно хорошем соответствии с полученными экспериментально. Расхождение обусловлено спектральной зависимостью коэффициентов отражения и пропускания зеркал, а также выпуклой формой поверхности одного из зеркал. С помощью полученных экспериментально спектров и параметров теоретической модели, использованной для приближения, были получены значения расстояний между зеркалами, добротностей и модово-

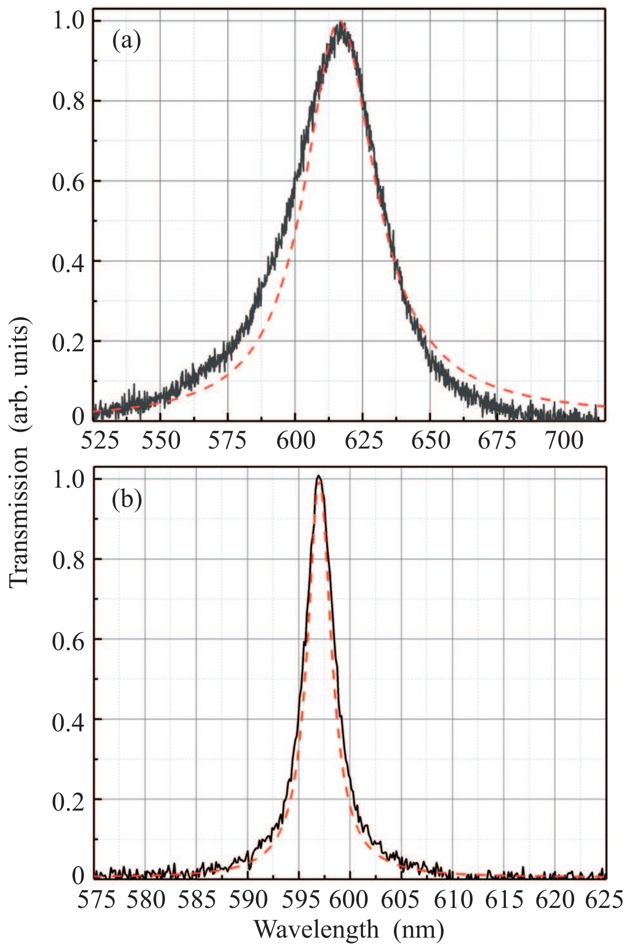

Рис. 2. (Цветной онлайн) Экспериментальные (черная сплошная линия) и теоретические (красная пунктирная линия) спектры пропускания микрорезонатора с зеркалами с коэффициентами отражения 87 % и расстоянием между их поверхностями 206 (a) и 2189 (b) нм

го объема. Результаты приведены в табл. 1. Стоит отметить, что расчетные величины модового объема наиболее точны в области относительно низких значений, при малом расстоянии между зеркалами, где кривизна одного из зеркал вносит наименьшие отклонения. По мере увеличения расстояния между зеркалами и увеличения радиуса моды в латераль-

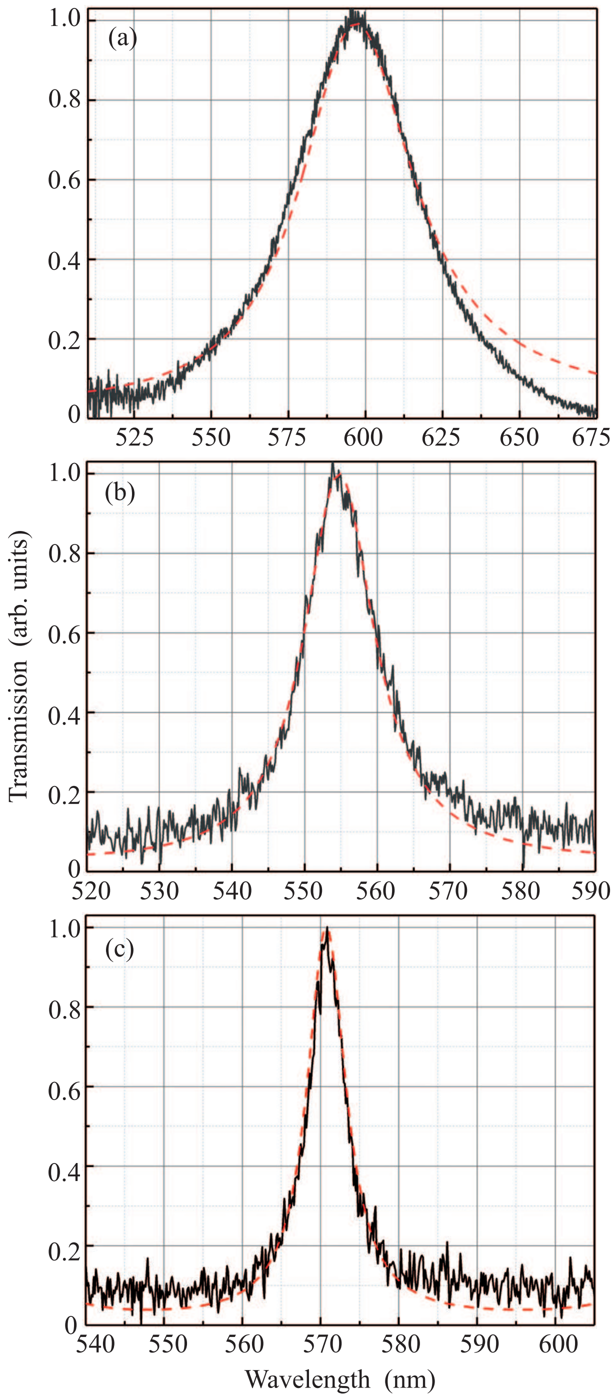

Рис. 3. (Цветной онлайн) Экспериментальные (черная сплошная линия) и теоретические (красная пунктирная линия) спектры пропускания микрорезонатора с зеркалами с коэффициентами отражения 67 % и расстоянием между их поверхностями 398 (a), 1110 (b) и 2283 (c) нм

ной плоскости реальные экспериментальные величины модового объема будут меньше расчетных, полученных в приближении плоских зеркал.

Представленные данные демонстрируют, что оптические параметры микрорезонаторной ячейки, в частности добротность и модовый объем, могут варьироваться в широких пределах. Добротность менялась от 17 до 170, что позволяет эффективно работать с большим количеством молекул, ширина энергетического перехода в которых должна по порядку величины соответствовать ширине линии резонатора. В противном случае один из каналов потери энергии начинает доминировать и наблюдение гибридных состояний затрудняется. Однако ключевым параметром резонатора является модовый объем, непосредственно влияющий на силу связи. В проведенных экспериментах минимальный модовый объем составил порядка 5 мкм^3, что соответствовало эффективному значению на уровне 73 в единицах $(\lambda/n)^3$. При этом типичные значения эффективного модового объема в оптических микрорезонаторах составляют $\sim 10^5$ [9]. В силу обратной зависимости силы связи от корня квадратного из модового объема применение разработанного нами микрорезонатора позволит более чем на порядок увеличить силу связи. Качественное уменьшение модового объема позволяет существенно снизить требования, предъявляемые к концентрации молекул в ансамбле, ориентации и величине их дипольного момента, а также ширине линии перехода. В результате значительно упростится достижение режима сильной связи в широком спектре систем [9].

5. Заключение. Ранее нами была разработана и описана конструкция перестраиваемой оптической микрорезонаторной ячейки и выполнены предварительные теоретические расчеты, демонстрирующие потенциальные принципиальные преимущества предложенной конструкции [17]. В настоящей работе представлены впервые полученные результаты экспериментальных исследований спектральных и пространственных характеристик мод электромагнитного поля в разработанной ячейке и проведено их сравнение с результатами более точного, чем в работе [17], теоретического моделирования. Кроме этого, полученные в настоящей работе результаты соотнесены с соответствующими параметрами оптических резонаторов, традиционно используемых для реализации режима сильной связи между ансамблем молекул и локализованным электромагнитным полем.

В частности, в настоящей работе измерены спектры пропускания ячейки при разных коэффициентах отражения зеркал, сделаны аппроксимации и на основе полученных данных проанализированы зависимости ключевых параметров микрорезонатора, добротности и модового объема, от свойств зеркал и расстояния между ними. В результате были продемонстрированы существенные преимущества разработанной ячейки по сравнению с традиционно применяющимися методами. Показано, что минимизация расстояния между зеркалами в резонаторе более чем на порядок увеличивает силу связи. Как следствие, существенно ослабляются требования, накладываемые на концентрацию молекул, а также величину и ориентацию дипольного момента молекул в исследуемом ансамбле, что может существенно расширить спектр систем, в которых реализуется режим сильной связи. Возможность плавного изменения модового объема и добротности в широком диапазоне открывает новые возможности для исследования промежуточной связи при переходе из режима слабой в режим сильной связи. Полученные результаты могу найти применение в фотонике, химии и биологическом сенсинге, а также для создания новых когерентных источников света.

Настоящая работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, договор # 4.Y26.31.0011.

1. A. Shalabney, J. George, H. Hiura, J. A. Hutchison, C. Genet, P. Hellwig, and T. W. Ebbesen, Angewandte Chemie International Edition **54**(27), 7971 (2015).
2. D. M. Coles, N. Somaschi, P. Michetti, C. Clark, P. G. Lagoudakis, P. G. Savvidis, and D. G. Lidzey, Nature Materials **13**(7), 712 (2014).
3. J. A. Hutchison, T. Schwartz, C. Genet, E. Devaux, and T. W. Ebbesen, Angewandte Chemie International Edition **51**(7), 1592 (2012).
4. F. Schleifenbaum, K. Elgass, M. Steiner, J. Enderlein, S. Peter, and A. J. Meixner, Proc. SPIE **7185**, 718504 (2009).
5. M. Pelton, Nature Photon. **9**(7), 427 (2015).
6. S. Noda, M. Fujita, and T. Asano, Nature Photon. **1**(8), 449 (2007).
7. D. Dovzhenko, E. Osipov, I. Martynov, P. Linkov, and A. Chistyakov, Physics Procedia **73**, 126 (2015).
8. S. Bar, A. Chizhik, R. Gutbrod, F. Schleifenbaum, A. Chizhik, and A. J. Meixner, Anal. Bioanal. Chem. **396**(1), 3 (2010).
9. D. S. Dovzhenko, S. V. Ryabchuk, Y. P. Rakovich, and I. R. Nabiev, Nanoscale **10**(8), 3589 (2018).
10. E. Jaynes and F. Cummings, Proc. IEEE **51**, 89 (1963).
11. P Torma and W. L. Barnes, Rep. Prog. Phys. **78**(1), 013901 (2014).
12. G. Khitrova, H. Gibbs, M. Kira, S. Koch, and A. Scherer, Nat. Phys. **2**, 81 (2006).
13. N. Ismail, C. C. Kores, D. Geskus, and M. Pollnau, Opt. Express **24**(15) 16366 (2016).
14. R. Tao, M. Arita, S. Kako, K. Kamide, and Y. Arakawa, Appl. Phys. Lett. **107**(10), 101102 (2015).
15. H. Fernandez, S. Russo, and W. Barnes, Frontiers in Optics, JW3A-59 (2017).
16. S. Schwarz, S. Dufferwiel, F. Withers, A. A. Trichet, F. Li, C. Clark, K. S. Novoselov, J. M. Smith, M. S. Skolnic, D. N. Krizhanovskii, and A. I. Tartakovskii, Nano Lett. **14**(12), 7003 (2014).
17. K. E. Mochalov, I. S. Vaskan, D. S. Dovzhenko, Y. P. Rakovich, and I. Nabiev, Rev. Sci. Instrum. **89**(5), 053105 (2018).
18. K. E. Mochalov, A. A. Chistyakov, D. O. Solovyeva, A. V. Mezin, V. A. Oleinikov, I. S. Vaskan, M. Molinari, I. I. Agapov, I. Nabiev, and A. E. Efimov, Ultramicroscopy **182**, 118 (2017).