

Вероятность отказа  $p$  рассчитывается по формуле  $p = \frac{K}{M+K}$ , где  $K$  – количество отброшенных задач,  $M$  – количество выполненных задач. Как показано выше, при количестве задач во входной очереди меньше  $N_{\text{входпороговое}}$ , вероятность отброса задачи равна 0, затем график вероятности растет линейно с ростом количества задач во входной очереди.

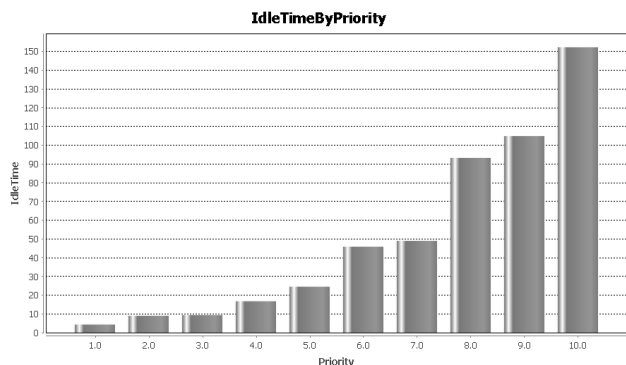


Рис. 7. Зависимость времени ожидания задачи от уровня приоритета задачи

Как видно из рис. 7, задачи с более высоким уровнем приоритета находятся в режиме ожидания меньше, чем задачи с низким приоритетом. Чем выше нагрузка системы, тем выше время ожидания для низкоприоритетных задач.

Созданная модель PrivateCloud системы реального времени доступна по адресу <https://github.com/sansherbina/RealTimeSchedulingSystemModel>. Моделирование проводилось в облачной инфраструктуре, что позволило справляться с высокими требованиями к вычислительным ресурсам и динамической нагрузкой.

Результаты моделирования показали, что Cloud система в нормальном режиме (с уровнем загрузки меньше 100%) удовлетворяет

требованиям реального времени. Как видно из рис. 6, вероятность отброса задачи приблизительно равна 0 до достижения системой пика загрузки. Также разработанная система приоритетов позволяет эффективно дифференцировать пользователей по уровню обслуживания. Как видно из рисунка 7, задачи с уровнем 1 (наиболее приоритетный уровень) имеет наиболее низкое время ожидания.

**Заключение.** В данной статье модифицирован для работы в Cloud системе реального времени алгоритм планирования выполнения задач  $A^*$ . Программный модуль выполняет функции распределения задач и балансировки нагрузки в частном облаке. При этом дополнительно возможно выбирать уровень безопасности, что позволяет защитить данные в момент выполнения задачи.

Для обеспечения необходимого уровня безопасности при передаче задач от пользователя в систему и результатов обратно использован алгоритм разделения секрета SSA. Задача и данные разделяются на части по алгоритму Shamir и передаются в Cloud систему по отдельным каналам, что позволяет повысить уровень безопасности при передаче.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. National Institute of Standards and Technology. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.nist.gov/index.html>. – Дата доступа: 10.04.2013.
2. Smart Computing in Real Time. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.real-timecloud.com>. – Дата доступа: 20.03.2013.
3. Cloud Computing Journal. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://cloudcomputing.sys-con.com>. – Дата доступа: 30.03.2013.
4. Muhammad Kafil and Ishfaq Ahmad // Optimal Task Assignment in Heterogeneous Distributed Computing Systems. The Hong Kong University of Science and Technology. 2011.
5. Bruce Schneier. Applied Cryptography. Protocols, Algorithms and Source Code in C. – М.: Триумф, 2002. – С. 589–816.
6. Shamir, Adi. How to share a secret // Communications of the ACM, 1979.

Материал поступил в редакцию 19.11.13

VOLOKITA A.N., VU DUK THIN, SHCHERBYNA A.V., ANDRESYUK B.E., BOYKIV T.V., PALAMARCHUK V.V. Model of multichannel secure service in Private Cloud

In this paper proposed an improvement of the scheduling algorithm  $A^*$  for using in Private Cloud real-time systems. Algorithm in conjunction with the algorithm of Shamir secret sharing allows static scheduling with the high level of security and the required response time for tasks. Ensured safety delivering tasks to the Cloud system, and the results back to the user.

УДК 535.337

Русаков К.И., Ракович Ю.П., Гладыщук А.А., Мельников Д.Г., Саватеева Д.И., Русакова З.В., Чузунов С.В.

## ОПТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В МИКРОРЕЗОНАТОРАХ С J-АГРЕГАТАМИ

**Введение.** Одним из основных направлений в оптике микрорезонаторов является создание эффективной связи электронных переходов в органических и неорганических наноструктурах с фотонными модами резонаторов. Диэлектрические микросферы являются трехмерными микрорезонаторами с большой добротностью и малым объемом мод, что приводит к возникновению в них сильной оптической обратной связи с резонатором [1]. Оптические резонансы этих резонаторов, называемые модами шепчущей галереи, возникают вследствие полного внутреннего отражения света от внутренней поверхности

сферы. Резонаторы мод шепчущей галереи (МШГ) представляют интерес как для изучения взаимодействия света с веществом [2], так и для разного рода практических применений, как низкочастотные лазеры [3], устройства динамического фильтрации в волоконной оптике [4] и оптические сенсоры [5]. Использование сферических микрорезонаторов может быть расширено за счет различных нелинейных оптических эффектов при малых интенсивностях накачки. Ранее были исследованы МШГ в стеклянных и полимерных микросферах, интегрированных с неорганическими люминесцирующими материалами [2].

Русаков Константин Иванович, профессор кафедры физики Брестского государственного технического университета.

Гладыщук Анатолий Антонович, заведующий кафедрой физики Брестского государственного технического университета.

Русак Зоя Витальевна, старший преподаватель кафедры физики Брестского государственного технического университета.

Чузунов Сергей Владимирович, старший преподаватель кафедры физики Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

Ракович Юрий Петрович, профессор-исследователь Центра физики материалов, Сан-Себастьян, Испания.

Мельников Дмитрий Георгиевич, научный сотрудник Центра физики материалов, Сан-Себастьян, Испания.

Саватеева Диана Игоревна, научный сотрудник Центра физики материалов, Сан-Себастьян, Испания.

Физика, математика, информатика

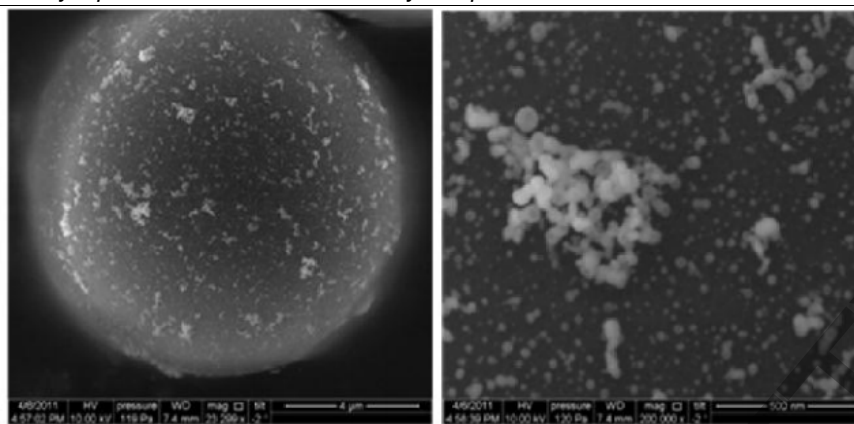


Рис. 1. Изображения МФ микроферы с гибридной цианиновой оболочкой с наночастицами серебра, полученные методом сканирующей электронной микроскопии (увеличение 23200 и 200000 соответственно)

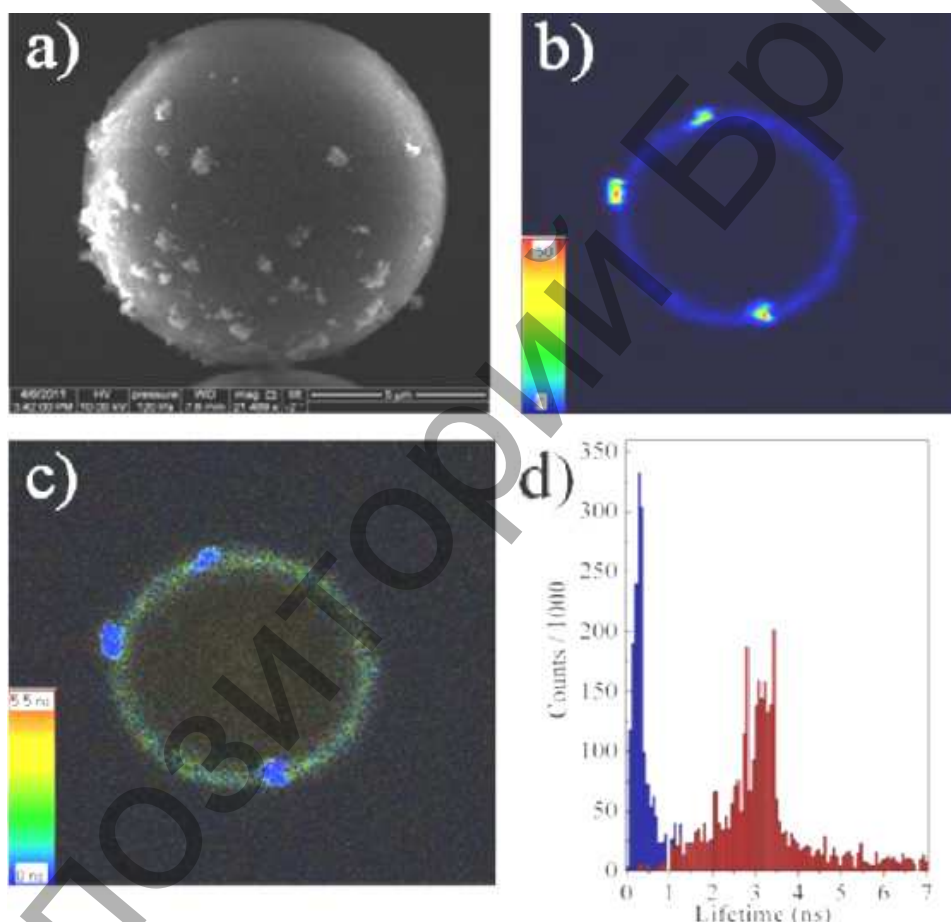


Рис. 2. МФ микрофера с оболочкой J-агрегатов: а) изображение СЭМ (увеличение 21400); б), с) изображения, полученные конфокальным сканирующим микроскопом; д) гистограммы времени жизни ФЛ

Однако органические вещества гораздо более удобны с точки зрения технологии нанесения на поверхность микрофер и при создании растворов разной концентрации.

В статье представлены результаты исследований оптических свойств резонатора мод шепчущей галереи – диэлектрической микроферы и оболочки из J-агрегатов органического красителя псевдоизоцианина. Вследствие высокой степени упорядоченности мономеров люминесцентных ассоциатов цианиновых красителей (J-агрегатов) при поглощении фотона электронное возбуждение оказывается делокализованным на десятки мономеров, в результате чего образуются молекулярные экситоны. Электромагнитное межмолекулярное взаимодействие в агрегате связывает оптические переходы различных молекул, а сила связи зависит от величин дипольных моментов молекул, их ориентации и расстояния между молекулами.

Использование цианиновых J-агрегатов обусловлено величинами коэффициентов оптической нелинейности третьего порядка, достаточно большими для органических соединений [4]. Кроме того, высокая оптическая прозрачность, термическая и механическая стабильность меламина формальдегида позволяют в перспективе создавать новые оптические системы за счет комбинирования указанных факторов [5, 6].

**Методика эксперимента.** Для формирования J-агрегатов использовался псевдоцианин производства Sigma-Aldrich. Кроме того, полиэлектролиты были также производства Sigma-Aldrich. Для всех растворов применялась дважды очищенная деионизированная вода. Вместо обычного химического соединения молекул красителя с микроферами или осаждения допированного красителем золь-гелевой пленки на поверхность микрофер из меламина-формальдегидного

латекса диаметром 11,93 нм производства Microparticles GmbH методом послойного осаждения были помещены молекулы псевдоизоцианина. Данный метод послойного осаждения ультратонких пленок позволяет лучше управлять толщиной и качеством тонкой пленки, что очень ценно для оптоэлектронной техники. При данной процедуре вначале микросферы имеют небольшой положительный заряд на поверхности, который притягивает отрицательно заряженный монослой полиэлектролита полиэтиленамина (PEI). После этого монослой красителя осаждается на поверхность слоя полиэлектролита. В наших экспериментах на микросферы наносился только один слой J-агрегатов. Между каждым этапом приготовления частицы промывались три раза в воде с целью удаления остатков полиэлектролита или молекул красителя.

Все подготовительные процедуры и измерения проводились при комнатной температуре. Чтобы предотвратить отбеливание J-агрегатов красителя из-за дополнительного окисления, все спектроскопические эксперименты были выполнены на образцах в водных растворах.

Коллоидные нанокристаллы серебра размером 30 нм были получены синтезом из  $\text{AgNO}_3$  в водном растворе после добавления  $\text{NaBH}_4$ .

Спектры поглощения и фотолюминесценции снимались установками Cary 50 (Varian) и FP6600 (Jasco) соответственно. Спектры микрофотолюминесценции регистрировались в геометрии обратного рассеяния установкой для конфокальной рамановской микроскопии Alpha 300 фирмы WITec (длина волны возбуждения 532 нм).

Спектры разрешенной по времени фотолюминесценции регистрировались с помощью установки PicoQuant Microtime 200 с микроскопом Olympus IX71. Образцы возбуждались пикосекундными импульсами лазерной головки PicoQuant LDH 485, управляемой драйвером Sepia II. Временное разрешение системы составляло примерно 100 пс. Картинки двумерного распределения среднего времени затухания фотолюминесценции вычислялись для каждого пикселя. Сканирующая электронная микроскопия была проведена с помощью установки Helios NanoLab Dual Beam и микроскопа Quanta 250 FEG.

**Результаты и обсуждение.** Используемые методы подготовки образцов позволяют эффективно управлять толщиной и качеством осаждаемой тонкой пленки псевдоизоцианина. Изображения (рис.1) микросферы, покрытой наночастицами серебра и J-агрегатами, полученные методом сканирующей электронной микроскопии, демонстрируют присутствие фракталоподобных металлических кластеров, так называемых "горячих точек", что является следствием возбуждения плазмонов и взаимодействия между наночастицами. Эти точки - пространственные области наноразмерного масштаба высокоинтенсивных оптических полей, которые обеспечивают существенное усиление комбинационного рассеяния и фотолюминесценции.

Наблюдавшееся резкое усиление свечения можно объяснить совместным действием двух факторов: увеличением интенсивности электромагнитного поля за счет резонанса поверхностных плазмонов, и ограничением света в микрорезонаторе.

В наших экспериментах мы проверили возможность увеличения интенсивности излучения J-агрегатами, закрепленными на поверхности сферического микрорезонатора. Для этого было использовано взаимодействие экситонов в J-агрегатах с локальными полями, образованными кластерами металлических наночастиц. Результат формирования кластеров наночастиц серебра на поверхности МФ сферы проиллюстрирован на рис. 2 (а).

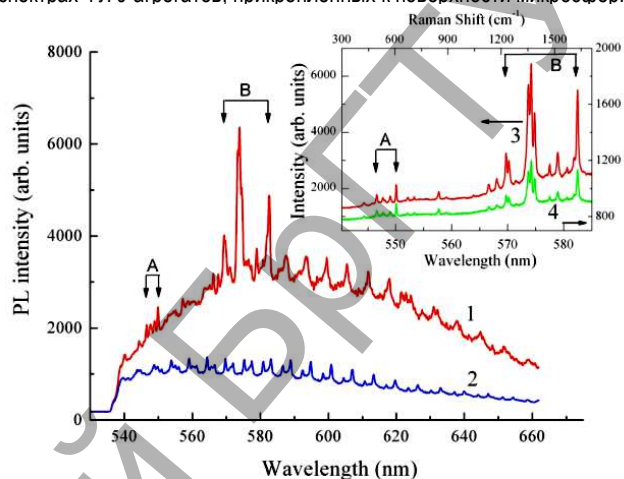
При формировании «горячих точек» мы использовали дополнительную процедуру, которая позволила нам изменить свойства прослойки из полиэлектролита. Перед тем, как микросферы с оболочками из полиэлектролита покрывались слоем наночастиц серебра, мы выдерживали их в течение 1–2 дней в растворе  $\text{NaCl}$  (0,2 моль). Эта обработка незначительно снижает прочность слоя полиэлектролита, что приводит к образованию более структурированной оболочки.

В отличие от микросфер с монослоем из J-агрегатов, конфокальное изображение микросфер, покрытых слоем из наночастиц серебра, и J-агрегатов, показывает наличие очень ярких пятен на поверхности микросфер (рис. 2,б), которые мы связываем с повышенной (до 50 раз) фотолюминесценцией J-агрегатов, адсорбированных на кластерах серебра.

Кроме того, время жизни фотолюминесценции J-агрегатов в комбинации с кластерами серебра в 2,5 раза меньше, чем в случае, когда на поверхность микросфер нанесен слой, состоящий только из

J-агрегатов. Сокращение времени жизни ФЛ (наряду с увеличением интенсивности ФЛ) характерно для усиления поверхностной люминесценции, которое происходит, когда молекулы адсорбируются на металлических наночастицах. Таким образом, мы считаем, что яркие участки возникают в силу возрастания поверхностной ФЛ.

Наблюдаемое повышение скорости рекомбинации в значительной степени связано с эффективным взаимодействием экситонов в J-агрегатах с поверхностными плазмонами в кластерах из наночастиц серебра. Большая плотность оптических мод в системе экситон-плазмон обеспечивает более интенсивное излучение. Кроме того, наличие кластеров серебра вызывает серьезные изменения в спектрах ФЛ J-агрегатов, прикрепленных к поверхности микросфер.



**Рис. 3.** Спектр микро-ФЛ от МФ микросферы, покрытой J-агрегатами и наночастицами серебра (1), и микросферы, покрытой только J-агрегатами (2). На вставке: спектры комбинационного рассеяния МФ микросферы, покрытой наночастицами серебра и J-агрегатами (3), и стеклянной микросферы идентичного размера с такой же оболочкой (4)

Существенное увеличение интенсивности ФЛ от микросферы, покрытой оболочкой J-агрегатов и адсорбированными наночастицами серебра, представлено на рис.3. В области длин волн, больших 590 нм, спектр ФЛ (рис. 3, кривая 1) демонстрирует структуру пиков, аналогичных модам шепчущей галереи в случае, если на поверхности микросферы отсутствуют наночастицы серебра. Между тем наблюдается уширение пиков ФЛ, что может быть связано с возбуждением поверхностных плазмонов в наночастицах серебра и ослаблением рассеяния. В результате добротность снижается в 6-7 раз по сравнению с микросферами без наночастиц.

На кривой 1 (рис. 3), помимо вышеупомянутых мод шепчущей галереи, также наблюдается ряд дополнительных спектральных структур: четыре пика расположены между 546,6 нм и 549,9 нм (группа пиков А) и три четко выраженных пика на 569,4 нм, 573,8 нм и 582,6 нм (группа В). Стоит отметить, что в случае сферы без наночастиц Ag эти спектральные линии не были обнаружены (рис. 3, кривая 2), причем условия возбуждения и регистрации не изменялись. Для подтверждения того, что эти пики являются хорошо известными линиями комбинационного рассеяния J-агрегатов псевдоизоцианина, были проведены измерения спектров комбинационного рассеяния высокого разрешения (рис. 3, кривая 3 на вставке) для стеклянной микросферы того же размера с оболочкой из наночастиц серебра и J-агрегатов, в которой не поддерживаются моды шепчущей галереи (рис. 3, кривая 4). Обе кривые 3 и 4 имеют такие же наборы пиков, что и кривая 1.

Кроме того, из-за лучшего спектрального разрешения спектров комбинационного рассеяния, кривые 3 и 4 демонстрируют тонкую структуру пиков при 569,4 и 573,9 нм, которая не наблюдается на кривой 1. Важным моментом является то, что расположение всех пиков в спектрах 3 и 4 точно совпадает с положением пиков комбинационного рассеяния J-агрегатов псевдоизоцианина. Три линии, образующие группу В в этих спектрах, обусловлены симметрией в плоскостях деформации отдельных фенил- и пиридил- колец, которые являются составными частями молекул псевдоизоцианина. Эти деформации дают основной вклад в оптический спектр комбинационного рассеяния J-агрегатов псевдоизоцианина, и, следовательно, эти моды наиболее



ярко выражены. Четыре линии, которые образуют группу А, связаны с различными деформациями фенил- и пиридил-колец.

Спектры, представленные на рис. 3, ясно показывают, что одновременно происходят два процесса. Во-первых, ФЛ микросфер усиливается наночастицами Ag. Это можно увидеть, сравнивая интенсивности ФЛ в спектрах мод шепчущей галереи (кривая 1) сфер с наночастицами Ag и без них. Во-вторых, усиление поля наночастицами Ag выявляет линии комбинационного рассеяния J-агрегатов (кривая 1), которые не видны на кривой 2. Очевидно, что возрастание КР сильнее, чем увеличение ФЛ, что может быть объяснено тем фактом, что интенсивность комбинационного рассеяния в четыре раза больше интенсивности локального поля. Поэтому линии комбинационного рассеяния появляются на верхней части спектра ФЛ (кривая 1).

Рис. 3 ясно показывает, что дополнительные пики на кривой 1 (группы А и В) являются линиями комбинационного рассеяния J-агрегатов, адсорбированных на наночастицах Ag. Кроме того, интенсивность этих линий в спектре 3 выше интенсивности линий комбинационного рассеяния стеклянной микросферы (кривая 4). Из чего можно заключить, что МШГ могут дополнительно усилить сигнал КР.

Данное предположение подтверждается тем фактом, что пики группы В в спектре ФЛ (569,4 нм, 573,8 нм и 582,6 нм) полностью соответствуют спектральным положениям  $TM^{103}_1$ ,  $TM^{102}_1$ ,  $TM^{101}_1$  мод. Это соответствие имеет определяющее значение для усиления ФЛ и КР в результате эффекта локального расширения электрического поля из-за МШГ резонансов и локализованных плазмонов.

Таким образом, наш анализ спектров фотолюминесценции позволяет объяснить наблюдавшиеся оптические особенности взаимодействием плазмонов металлических наночастиц и экситонных состояний J-агрегатов с локальным полем микрорезонатора, что может быть использовано для управления плотностью и добротностью мод, а также другими параметрами излучения в связанной гибридной системе, состоящей из МФ микрорезонатора с оболочкой из J-агрегатов цианиновых красителей и наночастиц серебра.

Помимо резонансных процессов, в микросферах наблюдаются и нерезонансные, например формирование узкого пучка, когда микросфера используется в качестве линзы. Мы получили фотонный пучок от такой же микросферы, помещенной в воду, и провели численное моделирование этого явления методом конечных элементов. Результаты эксперимента и моделирования практически совпадают, что свидетельствует о возможности компьютерного моделирования устройств с фотонными пучками (рис. 4 и рис. 5). В качестве исходных данных для моделирования были выбраны микросферы радиусом 12 мкм с показателем преломления 1,68, помещенные в воду, поскольку ранее были получены экспериментальные данные в виде фотографий фотонных пучков, создаваемых микросферами при освещении их сфокусированным лазерным пучком.

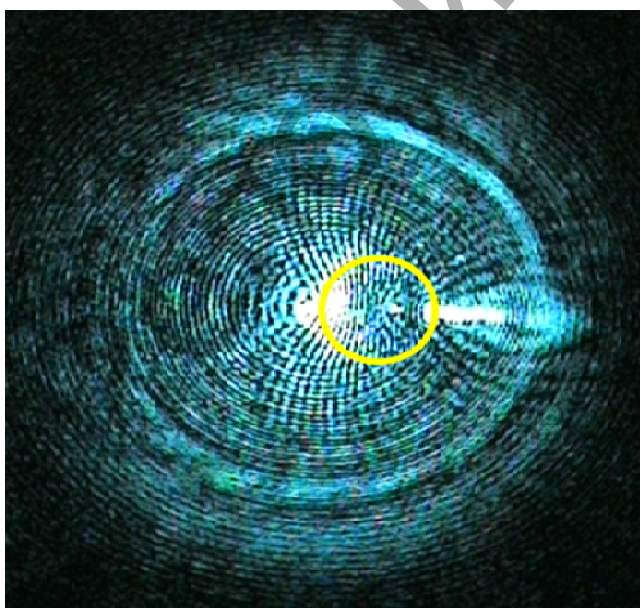


Рис. 4. Микрофотография меламина-формальдегидной сферы в воде, слева на нее сфокусирован лазерный пучок с длиной волны 532 нм

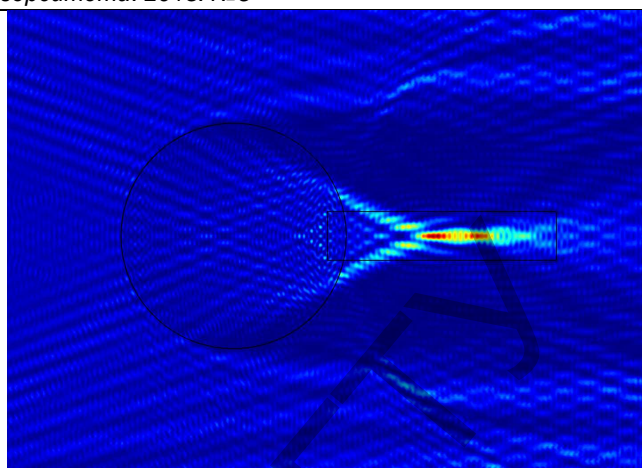


Рис. 5. Результат моделирования микролинзового эффекта методом конечных элементов для сферы диаметром 12 мкм (фотонный пучок выделен прямоугольной рамкой)

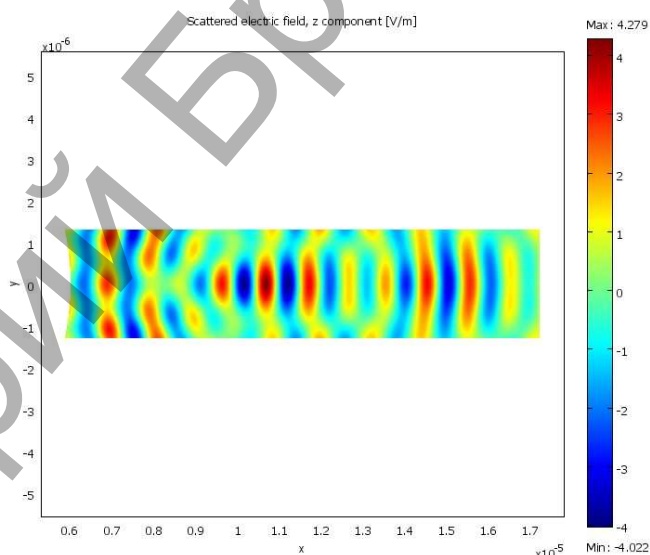


Рис. 6. Структура фотонного пучка, сформированного диэлектрической микросферой диаметром 12 мкм ( $n=1,68$ ), помещенной в водную среду

С точки зрения практического применения фотонных нанопучков наиболее важными характеристиками являются интенсивность и длина пучка. Меняя размерный параметр  $x=2\pi Rn/\lambda$ , мы одновременно фактически изменяем длину волны или относительный показатель преломления.

Численное моделирование выявило две различные тенденции в поведении интенсивности и длины фотонного пучка: интенсивность повышается с ростом размерного параметра примерно до 35 по сравнению с интенсивностью падающей плоской волны, а затем опять снижается. Длина пучка возрастает и достигает 13 мкм при  $x \sim 35$  (рис.6), а затем уменьшается и превращается в точку при больших значениях размерного параметра. Следовательно, при моделировании необходимо находить такую величину размерного параметра, чтобы длина пучка и интенсивность удовлетворяли требованиям конкретной задачи.

В результате численного моделирования продемонстрировано, что распределение рассеянного излучения существенно изменяется с изменением возбуждающей длины волны или относительного показателя преломления, хотя фотонные нанопучки не являются результатом резонансного эффекта. Выявленные зависимости позволяют подобрать такие диаметры преломляющих цилиндров или сфер, при которых происходит усиление интенсивности центрального дифракционного максимума и уменьшение интенсивности других дифракционных максимумов, а также уменьшение ширины фотонного пучка.

**Заключение.** Проведено исследование микрорезонатора мод шелпущей галереи с тонкой оболочкой J-агрегатов молекул псевдо-изоцианина и нанокристаллами серебра. Экспериментальные результаты подтверждают сильную оптическую связь J-агрегатов с модами резонатора и плазмонами металлических наночастиц. Подтверждена возможность управления оптическими характеристиками подобных гибридных систем в сочетании с применением фотонных пучков. Показана возможность создания новых устройств, использующих как резонансные, так и нерезонансные процессы в системах из оптически связанных микросфер.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Joannopoulos, J. D. Photonic crystals: putting a new twist on light / J.D. Joannopoulos, P.R. Villeneuve, S. Fan // Nature. – 1997. – Vol. 386. – No 6621. – P. 143–149.
2. Vahala, K.J. Optical microcavities / K.J. Vahala // Nature. – 2003. – No 6950. – Vol. 424. – P. 839–846.

3. Matsko, A.B. Optical hyperparametric oscillations in a whispering-gallery-mode resonator: Threshold and phase diffusion / A.B. Matsko, A.A. Savchenkov, D. Strekalov, V.S. Ilchenko, L. Maleki. // Phys. Rev. A. – 2005. – Vol. 71. – No 3. – P. 033804-1/10.
4. Spano, F.C. Nonlinear susceptibilities of molecular aggregates: Enhancement of  $\chi(3)$  by size / F. C. Spano, S. Mukamel // Phys. Rev. A. – 1989. – Vol. 40. – No 5783. – P. 5783–5801.
5. Rakovich, Y.P. Whispering Gallery Mode Emission from a Composite System of CdTe Nanocrystals and a Spherical Microcavity / Y.P. Rakovich, L. Yang, E.M. McCabe, J.F. Donegan, T. Perova, A. Moore, N. Gaponik, A. Rogach // Sem. Sci. Techn. – 2003. – Vol. 18. – No 11. – P. 914–918.
6. Melnikau, D. Whispering gallery mode resonators with J-aggregates / D. Melnikau, D. Savateeva, A. Chuviilin, R. Hillenbrand, Y.P. Rakovich // Opt Express. – 2011. – Oct 24. – Vol. 19. – No 22. – P. 22280–22291.

Материал поступил в редакцию 03.03.14

#### RUSAKOV K.I., RAKOVICH Y.P., GLADYSHCHUK A.A., MELNIKAU D.G., SAVATEEVA D.I., RUSAKOVA Z.V., CHUGUNOV S.V. Optical properties of microcavities with shell of J-aggregates

We report on development of active whispering-gallery microcavities integrated with shell of organic dye TTBC molecules in a J-aggregate state and Ag nanocrystals. We demonstrate that the emission intensity can be further enhanced by depositing a hybrid layer of J-aggregates and Ag nanoparticles onto the spherical microcavity. Owing to the concerted action of WGMs and plasmonic hot spots in the Ag aggregates, we observe an enhanced Raman signal from the J-aggregates. Microcavities covered by J-aggregates and plasmonic nanoparticles could be thus useful for a variety of photonic applications in basic science and technology.

УДК 536 (075.8)

Гладковский В.И., Пинчук А.И.

### ЛЕКЦИОННАЯ ДЕМОНСТРАЦИЯ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ПРИРОДЫ РАДИОМЕТРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА

**Введение.** Как известно, радиометрическим эффектом называют явление спонтанного движения твердых тел, находящихся в атмосфере разреженных газов и имеющих разную температуру поверхностей. Джеймс Клерк Максвелл, проводя анализ радиометрического эффекта, обнаруженного в 1874 году английским физиком и химиком Вильямом Круксом [1], выдвинул гипотезу, заключающуюся в том, что одной из возможных причин этого эффекта могут быть температурные напряжения [2].

Радиометрический эффект имеет место в том случае, когда одна сторона твердого тела имеет более высокую температуру, чем другая. Неравенство температур обеих сторон одного и того же твердого тела достигается, как правило, путем нанесения на него светлого и темного покрытия. В результате, темная сторона обладает большей поглощательной способностью, чем светлая. Таким образом, темная сторона лопасти крыльчатки радиометра Крукса имеет более высокую температуру по сравнению со светлой стороной.

**Природа радиометрического эффекта.** Радиометрический эффект имеет чисто молекулярно-кинетическую природу. Молекулы разреженного газа, отскакивающие от более нагретой поверхности твердого тела, получают при этом больший импульс, чем молекулы, отражающиеся от менее нагретой стороны. Поэтому, в соответствии с законом сохранения импульса, твердое тело движется в противоположном направлении. Действительно, при воздействии электромагнитного излучения на крыльчатку оно поглощается обеими сторонами. Но так цвет у разных сторон разный, то эти стороны, обладающие разной поглощательной способностью, нагреваются различным образом. При этом темная сторона нагревается сильнее

светлой. Так как температура темной стороны крыльчатки больше температуры светлой стороны, то темная сторона передает молекулам окружающего воздуха больший суммарный импульс, чем светлая. В результате действия закона сохранения импульса сама крыльчатка при этом получает больший импульс, направленный в противоположную сторону. В результате возникает закручивающий момент приблизительно в 1000 раз больше закручивающего момента, обусловленного световым давлением (что не было вначале учтено Максвеллом).

Еще одной причиной, вызывающей возникновение радиометрических сил, является движение приповерхностного слоя газа в направлении к более нагретой поверхности. Вязкость газа способствует распространению этого движения в отдаленные слои газа. В соответствии с законом сохранения импульса, твердое тело также движется в противоположном направлении [3]. В качестве подтверждающей иллюстрации этого явления можно упомянуть ситуацию, когда пыль собирается на более холодных сторонах отопительных систем. Но в случае разреженного газа этим явлением можно пренебречь. В случае же устройств, в которых присутствует температурный градиент, данным эффектом пренебрегать нельзя [4].

Если поместить пластину с различными температурами в атмосферу разреженного газа, то на нее действует сила  $F$ , равная

$$F = \frac{\rho A}{2} \left( \sqrt{\frac{\alpha_E T_H + (1 - \alpha_E) T_G}{T_G}} - \sqrt{\frac{\alpha_E T_C + (1 - \alpha_E) T_G}{T_G}} \right),$$

где  $\rho$  – давление газа,  $T_H$  и  $T_C$  – температуры горячей и холодной

Гладковский В.И., доцент кафедры физики Брестского государственного технического университета.

Пинчук А.И., доцент кафедры физики Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

Физика, математика, информатика