

Для того, чтобы оценить средний размер наночастиц  $\bar{r}$  и установить соответствие между наблюдаемыми полосами поглощения и электронной структурой нанокристаллов, было проведено моделирование измеренных спектров поглощения, согласно формуле

$$\alpha(\hbar\omega) = A \sum_{ln} (2l+1) \left( \frac{\mu \bar{r}}{\hbar^2 k_{ln}^2} \right) \left( \frac{2\mu(\hbar\omega - E_g)}{\hbar^2 k_{ln}^2} \right)^{\frac{3}{2}} P\left(\frac{r}{\bar{r}}\right), (1)$$

где  $A$  – константа,  $k_{ln} = \varphi_{ln}/r$ ,  $\varphi_{ln}$  – корни функции Бесселя, соответствующие значениям орбитального и главного квантовых чисел,  $\mu$  – приведенная эффективная масса электронно-дырочного состояния,  $E_g$  – ширина запрещенной зоны,  $P(r/\bar{r})$  – функция распределения нанокристаллов по размерам (распределение Гаусса). Величины  $E_g$  и  $\bar{r}$  были использованы как параметры в процедуре фиттинга. Результаты моделирования и идентификации оптических переходов представлены на рис. 8. Установлено также, что величина однородного уширения полос поглощения не превышает 20 мэВ.

**Заключение.** Атомно-силовая микроскопия поверхности нанокристаллов CdSe и CdS позволила обнаружить сильное влияние начальной ориентации нанокристаллов на процессы самосборки кристаллов размером порядка сотни нанометров. Нанокристаллы меньшего размера имеют форму, близкую к сферической, что уменьшает степень самоорганизации поверхности наноструктур.

*Работа выполнена в результате исследований по теме: «Новые самоорганизованные кристаллические и молекулярные структуры (коллоидные кристаллы, нанокристаллы, металлические наночастицы) для разработки высокочувствительных методов анализа состава вещества и высокоэффективных источников оптического излучения» (ГКПНИ «Кристаллические и молекулярные структуры»).*

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Binnig G., Quate C.F., Gerber Ch. Atomic force microscope // Phys. Rev. Lett. 1986. – Vol. 56. – P. 930–935.
2. Murray C.B., Norris D.J., Bawendi M.G. Synthesis and characterization of nearly monodisperse CdE (E = sulfur, selenium, tellurium) semiconductor nanocrystallites // J. Am. Chem. Soc., 1993. – Vol. 115, Iss. 19. – P. 8706–8715.

*Материал поступил в редакцию 27.10.09*

#### RUSAKOV K.I., PFEFFER M. Research of surfaces of structures with nanocrystals CdS and CdSe by a method atomic-power microscopy

The formation and ordering of CdS nanocrystals and agglomeration of the thin single crystalline CdS layer in polymeric film has been investigated using atomic force microscopy. The formation of multi-structure „core-shell” CdSe/ZnS in polymeric film has been investigated using atomic force microscopy.

УДК 539.23; 539.216.1

**Ракович Ю.П., Русаков К.И., Гладыщук А.А., Чугунов С.В.**

### ОСОБЕННОСТИ НАПРАВЛЕННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В СИММЕТРИЧНЫХ ФОТОННЫХ МОЛЕКУЛАХ

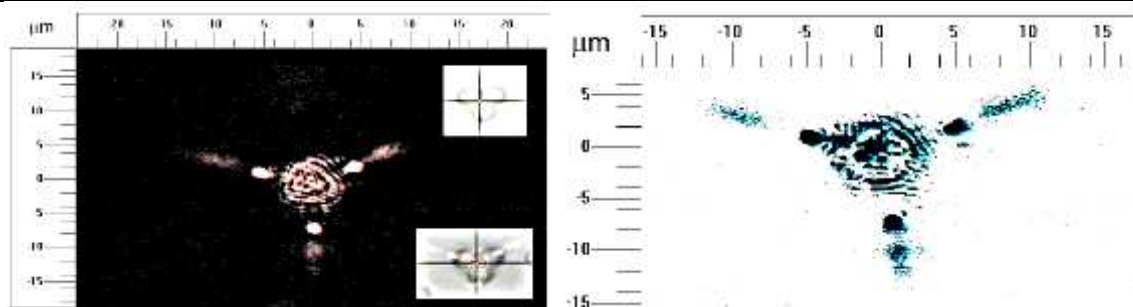
**Введение.** В последние годы вырос интерес к изучению электромагнитных мод в твердых сферических микрорезонаторах, не только с точки зрения потенциальных применений, но и в качестве фундаментальных физических исследований. По сравнению с другими оптическими излучателями, диэлектрические прозрачные микросферы являются трехмерными сферическими микрополостями с высокой добротностью  $Q$  и малым объемом мод, что приводит к сильной оптической обратной связи в пределах полости. [1] Оптические резонансы, называемые модами шепчущей галереи (МШГ), вызваны полным внутренним отражением света от внутренней поверхности сферы. Поскольку электромагнитное поле не ограничено полностью в пределах сферы, а является затухающим в среде, окружающей сферическую частицу, этот факт предоставляет уникальные возможности для взаимодействия оптических резонансов с окружающей средой или с объектами, находящимися в непосредственной близости от полости. Между двумя и более микросферами, расположенными близко друг к другу, наблюдается оптическое сцепление мод, которое приводит к сложной перестройке структуры мод в режиме сильной связи, аналогично электронным молекулярным орбиталам в химической молекуле. По этой причине когерентно связанные микросферы называют фотонными молекулами (ФМ) [2, 3]. Экспериментально показано, что оптические моды во взаимодействующих системах микрополостей расщепляются на связанные и несвязанные моды. Таким образом, МШГ в фотонной молекуле, которые занимают весь объем взаимодействующих микрополостей, можно назвать супермоды.

Структуры фотонных молекул, состоящие из трех и более микрополостей, были теоретически изучены различными научными группами относительно супермод в системах с резко увеличивающейся добротностью  $Q$ , лазерах с низким порогом излучения и на-

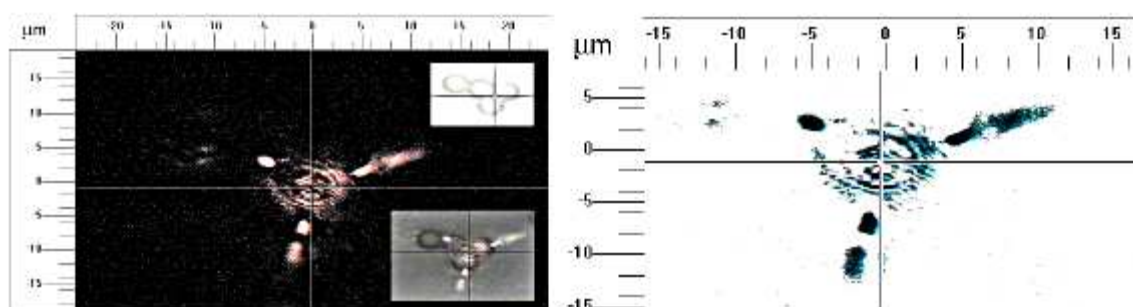
правленной эмиссией [4–7]. Для получения оптимальных результатов, необходимо соблюдение ряда требований к системе, таких как симметрия фотонной молекулы с подобранными размерами микрополостей и оптимизация промежутка между сферами [7, 8]. Помимо фотонных молекул, большой интерес вызывают волноводные свойства цепей, состоящих из множества микросфер [9, 10]. В недавних исследованиях фотонных молекул, образованных из микросфер, были изучены оптические связи бисферической системы. Недавно мы наблюдали тонкую структуру когерентно связанных невырожденных мод [2]. Их оптическое сцепление приводит к расщеплению азимутальных резонансов.

В данной работе исследованы оптические свойства симметрично расположенных микросфер по отношению к направленной узкой эмиссии пучка за счет фотонного нанореактивного эффекта [11]. Появление нанореактивных пучков является результатом микролинзового эффекта. Пучки возникают на теневой стороне поверхности диэлектрической микрополости. Характерной особенностью нанореактивного эффекта является направленность луча, суженная часть которого меньше, чем предел дифракции, вследствие чего луч распространяется в пределах нескольких длин волн без существенного расхождения. Нанореактивный эффект наблюдался в оптически связанных цепочках микросфер [12]. В структурах треугольной формы, состоящих из 5 и из 7 сфер, наблюдалась сильно направленная эмиссия дальнего поля, которая является неотъемлемым признаком фотонного нанореактивного эффекта. Направленная эмиссия из фотонной молекулы соответствует симметрии структуры. Система, состоящая из 7 сфер, дополнительно имеет шестиугольное распределение интенсивности в пределах структуры. Помимо наблюдения направленной эмиссии, был проведен спектральный анализ рассеянного света от структур, состоящих из нескольких сфер. Параллельно исследованиям фотонного нанореактивного эффекта,

*Чугунов Сергей Владимирович, преподаватель кафедры физики Брестского государственного технического университета. Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.*



**Рис. 1.** Слева: Фотонные нанопучки, генерируемые треугольной фотонной молекулой под действием лазерного излучения. Масштабная шкала по рамке изображения показывает размер в микрометрах. Верхняя вставка: изображение фотонной молекулы из трех сфер в белом свете. Нижняя вставка: пространственное распределение излучения данной структуры в белом свете и лазерном пучке. Справа: изображение в инвертированном цвете. Темный цвет соответствует высокой интенсивности



**Рис. 2.** Слева: треугольная фотонная молекула и приставленная к ней сфера. Справа: изображение в инвертированном цвете. Темный цвет соответствует высокой интенсивности

рассматривалось распространение мод шепчущей галереи в пределах многосферных структур. Наблюдались как несвязанные, так и когерентно связанные моды, которые присутствуют в фотонной молекуле.

**Методика эксперимента.** Фотонные молекулы различной конфигурации были сформированы на кремниевой подложке. Используемые в наших экспериментах микросферы изготовлены из меламина-формальдегида (показатель преломления  $n=1.68$ , диаметр  $5,374 \pm 0,069$  мкм согласно спецификации фирмы Micro Particles GmbH). На поверхность микросфер был осажден флуоресцирующий краситель Родамин 6Ж. Этот краситель используется как широкополосный источник излучения, при исследовании спектров оптических резонансов фотонных молекул. Все микросферы касаются друг друга так, чтобы не было между ними никакого промежутка. Изображения поля излучения и другие спектральные измерения были проведены с использованием спектрального комплекса RENISHAW и CCD-камеры. В этой установке лазерный пучок сфокусирован перпендикулярно подложке и проходит через объектив микроскопа с высоким разрешением ( $100\times$ ,  $NA=0,9$ ), расположенного над структурой. Рассеянный свет собирается тем же самым объективом и направляется к спектрометру и CCD камере. Система собирает весь рассеянный свет в пределах светового конуса в фокальной плоскости объектива. Направленное излучение фотонной молекулы распространяется параллельно подложке. Отражение луча, падающего на подложку, также идет в CCD - камеру, что позволяет наблюдать направленную эмиссию дальнего поля фотонной молекулы и распределение света в пределах фотонной молекулы.

На рис. 1 представлено направленное излучение треугольной фотонной молекулы. На верхней вставке рисунка 1 показана точка фокусировки лазерного излучения (перекрестие), расположенная выше кремниевой подложки на 7 мкм в направлении оси z.

Дефокусированный луч способствует связи лазерного света во всей структуре, высокоапертурный объектив приводит к сильному расхождению сфокусированного луча. Положение фокуса регулировалось с учетом оптимальной оптической связи и проверялось CCD - камерой. Область перекрытия показывает положение, где локализовано излучение в пределах треугольной фотонной молекулы. Поскольку положение точки фокуса лазерного пучка и фокальной плос-

кости CCD камеры в установке микрофотолюминесценции невозможно регулировать отдельно, изображения нанопучков не находятся точно в центре. Однако качество изображения достаточно, чтобы рассмотреть детально рассеянное излучение. Радиусы отдельных сфер составляют порядка 8λ. Согласно вычислениям, основанным на теории Ми, субволновые нанопучки на поверхности микросферы могут быть получены от сфер, радиус которых приблизительно равен 5λ и с коэффициентом преломления  $n=1,6$ . [13] Нанопучки также могут быть сформированы от сфер большего диаметра ( $R > 20 \lambda$ ), но с  $n \approx 2$ . Таким образом, для рассматриваемых микросфер с показателем преломления  $n=1,68$  выполняются условия получения нанопучков на поверхности сфер. Изображение на рисунке 1 ясно показывает направленную эмиссию от всех трех микросфер на внешней поверхности отдельных сфер в структуре. Наиболее заметными являются участки эмиссии с высокой интенсивностью, локализованными вблизи поверхности сфер (см. нижнюю вставку). Отражение нанопучков от подложки ясно демонстрирует направление распространения лучей. На инвертированном изображении рис. 1 справа, представлены особенности внутреннего распределения интенсивности в пределах фотонной молекулы. Картина рассеянного света в пределах фотонной молекулы напоминает типичное распределение электромагнитного поля для нанопучков в микросфере, которая представляет собой последовательные минимумы и максимумы интенсивности круглой формы. Наблюдаемая картина интенсивности показывает хорошее согласие с расчетами полей, выполненными в [13, 14]. В этих статьях было показано, что нанопучки могут быть получены освещением микросфер плоской волной.

Наши эксперименты демонстрируют, что направленная эмиссия в горизонтальной плоскости в трех точно установленных направлениях в структуре треугольной формы возможна при условии перпендикулярного освещения фотонной молекулы дефокусированным лазерным лучом.

При этом наблюдаются фотонные нанопучки, хотя была использована техника возбуждения не вертикальной плоской волной [7], помимо этого, свет может быть направлен вдоль цепи соприкасающихся связанных микросфер нанопучками с малыми потерями распространения [9, 12].

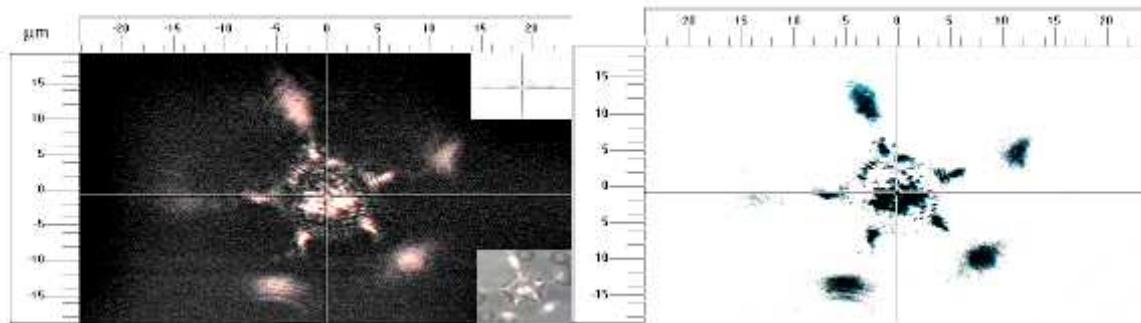


Рис. 3. Слева: фотонная молекула кольцеобразной формы, состоящая из 5 сфер. Справа: изображение в инвертированном цвете. Темный цвет соответствует высокой интенсивности

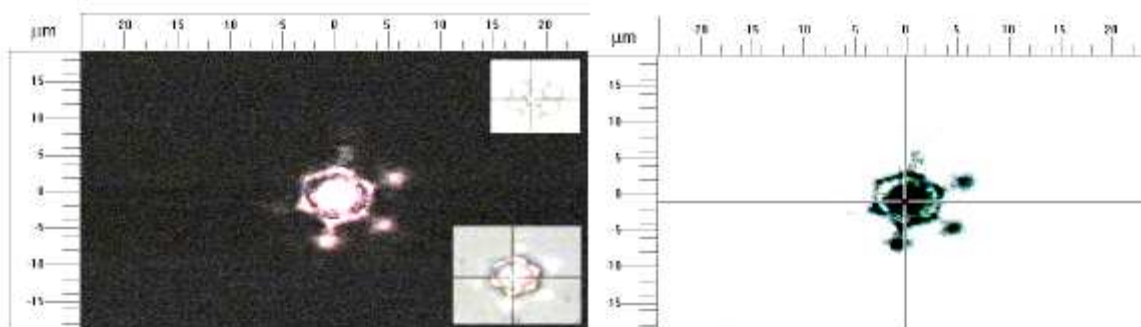


Рис. 4. Слева: бензолподобная фотонная молекула, состоящая из 7 сфер. Справа: изображение в инвертированном цвете. Темный цвет соответствует высокой интенсивности

Изображение микросферы, присоединенной к одному концу треугольной фотонной молекулы, показано на рис. 2. Луч от нанопучка верхней левой микросферы переходит в присоединенную микросферу. Слабая эмиссия связанного света видима на противоположном конце приложенной сферы.

Капитонов и Астратов определили затухание вблизи возбужденной микросферы радиуса  $R=5$  мкм порядка 5 dB/сферу [12]. В более длинных цепочках ослабление (затухание), приходящееся на сферу, уменьшается с увеличением расстоянием до сферического источника. Эксперимент показал, что фотонная молекула, состоящая из трех симметрично расположенных микросфер, может перераспределить одиночный пучок возбуждения в три строго ориентированных пучка.

Чтобы изучить возможность симметричной эмиссии нанопучков в разнообразных направлениях, были сформированы фотонные молекулы, состоящие из 5 и 7 сфер, образующие кольцо. Как показано на рис. 3, кольцо из 5 сфер также испускает 5 симметричных фотонной молекуле нанопучков.

В этой структуре лазер фокусировался в перекрестии выше Si-подложки на 6,5 мкм. Отраженные нанопучки от подложки появляются на расстоянии порядка 3 – 4 мкм от микросфер. На поверхности каждой сферы наблюдается яркое пятно высокой интенсивности в местах, где фотонные нанопучки выходят симметрично за пределы структуры. Наблюдаемая направленная эмиссия предполагает возможность применения этих фотонных структур в качестве разделителя луча (сплиттера) с числом каналов, равным числу сфер, использованных в фотонной молекуле. Фотонные нанопучки могут осуществить световую связь между одной фотонной молекулой и другой фотонной микро - или наноструктурой, аналогично соединенным резонансно оптическим волноводам или наноструктурам, таким как нанокоаксиальные кабели [15], которые являются субдлинноволновыми оптическими волноводами. Это дает возможность достигнуть не только пространственной точности, не превышающей длины волны, но и экстремально высокой интенсивности по сравнению с типичным субдлинноволновым сцеплением волн, использующимся в сканирующей микроскопии ближнего поля.

Наиболее важной фотонной молекулой в этой работе является система, состоящая из семи микросфер. Шесть из них образовали кольцо, в то время как одна сфера была помещена в центр. Освещенная структура показана на рис. 4.

По аналогии с фотонными молекулами, рассмотренными ранее, мы наблюдали эмиссию нанопучков от каждой внешней сферы. Отраженные от Si-подложки лучи имеют круглую и менее удлинненную форму по сравнению с фотонной молекулой, состоящей из 5 микросфер. Наиболее характерной особенностью этой структуры является интенсивность поля внутри фотонной молекулы. Регистрируемая световая структура имеет шестиугольную форму и напоминает облако распределения в химической молекуле бензола электронной плотности.

Явно видно, что ровная шестиугольная световая кромка окружает кольцо. Центр структуры был освещен дефокусированным лучом с фокусом в точке, находящейся выше подложки на 8 мкм. Спектральный анализ рассеянного света должен показать, наблюдается ли сильная оптическая связь между сферами при освещении фотонной молекулы. Исследования спектров фотонной молекулы бензола, основанного на связи дефектов в фотонном кристалле, были выполнены Лин [16] и другими учеными [17]. Орбитали молекулы подобны связанным и несвязанным модам в когерентно взаимодействующих (связанных) микрополостях. Проведенные вычисления для фотонной молекулы бензола [15] показывают наличие спектральных частот, подобных химическим  $\pi$  и  $\sigma$ -молекулярным орбиталиям. Оптические резонансы показывают наличие невырожденных и вырожденных мод в спектре когерентно связанных резонаторов [16]. Спектральный анализ структуры, состоящей из 7 микросфер, мог бы прояснить, связано ли шестиугольное распределение интенсивности с супермодами. Для этого необходимо использовать метод *картографии* моды [10], где пространственное и спектральное фильтрование позволяет изучить пространственное распределение интенсивности в пределах фотонной молекулы для специфических (отдельных) мод. Нами выполнен предварительный спектральный анализ, который показывает спектр рассеянного света фотонной молекулы. Данный спектр позволяет дать общую оценку оптическим резонансам в различных структурах фотонных молекул относительно связанных и несвязанных мод.

Мы также выполнили спектральные измерения, осуществляя возбуждение окрашенных сфер и регистрацию спектра фотолуминесценции треугольной фотонной молекулы и кольцеобразных молекул, состоящих из 5-и с 7-и сфер. Спектры отдельной (одиночной) сферы и связанных структур показаны на рис. 5.

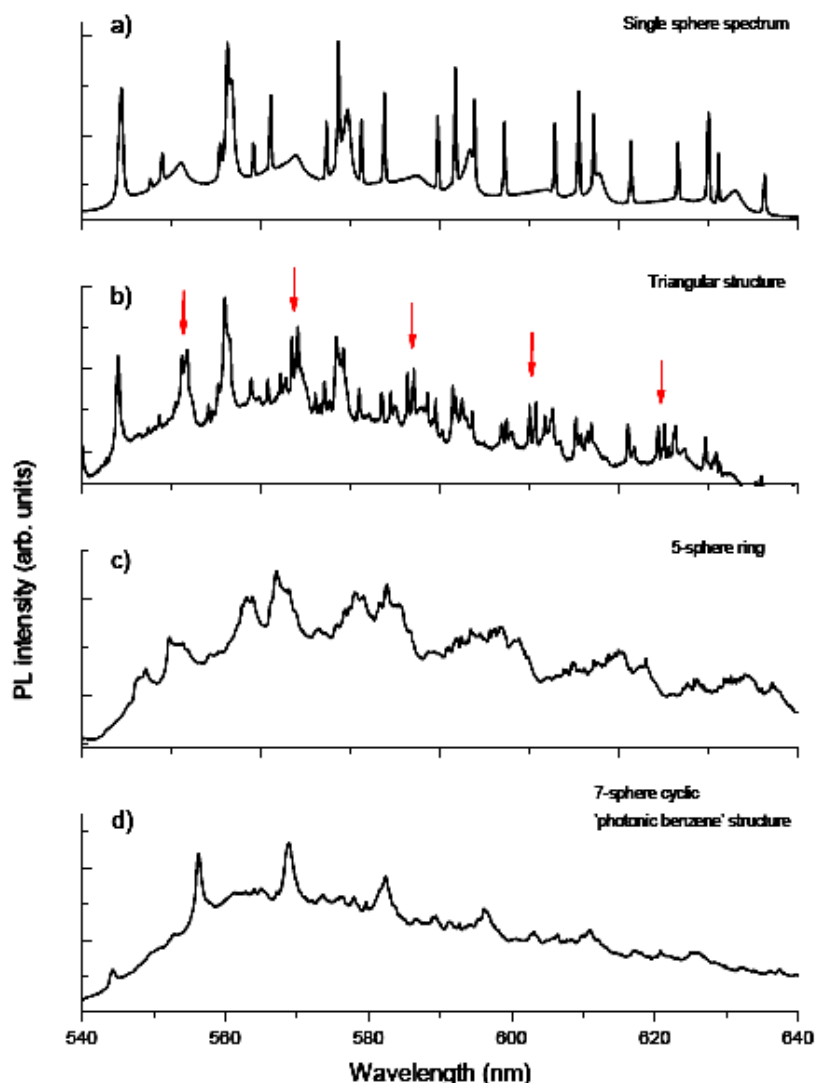


Рис. 5. Спектры излучения от а) одиночной микросферы структуры треугольной формы, б) кольцеобразных фотонных молекул, состоящих с) из пяти сфер, д) из семи сфер

Спектр на рис. 5 а) демонстрирует резонансные пики TE и TM мод одиночной микросферы с номинальным диаметром 5,374 мкм. Подробный анализ структуры мод в таких единичных микросферах представлен в работе [18]. Самыми острыми и самыми сильными резонансами являются TE моды. Ширина пика в спектре отдельной сферы составляет 0,2 нм по шкале длин волн, что соответствует добротности Q, приблизительно равной 2900. Заметим, что при определении добротности величина Q значительно недооценена из-за ограничения разрешения спектрометра ( $> 1 \text{ см}^{-1}$ ). Кроме того, расширению спектральной линии способствует контакт системы с подложкой [19]. Окрашенная поверхность сферы также уменьшает добротность Q из-за рассеяния и поглощения на этой поверхности [20]. Спектр треугольной структуры показан на рис. 5 б). Распределение резонансных мод в этой системе довольно сложное, так как резонансы всех трех сфер немного смещены друг относительно друга главным образом по причине высокого порядка мод и различия в размерах микросфер. На спектре можно увидеть серию дополнительных тонких пиков (двойные пики отмечены стрелками на рис. 5 б)), частично сгруппированными или перекрывающимися друг с другом с шириной линии, равной резонансам отдельной сферы. В спектре также присутствуют резонансы, которые могут принадлежать модам от единичной сферы. Дополнительные резонансы указывают на связанные моды, которые образовались в структуре фотонной молекулы. Спектр кольцеобразной структуры состоящей из 5 сфер, показан на рис. 5 с). Здесь наблюдается перестройка мод, в

сравнении со спектром от треугольной структуры. Вместо узких резонансов преобладают широкие несформированные пики. Нет никаких острых пиков, которые могут быть приписаны спектру отдельной сферы. График на рис. 5 д) показывает спектр фотонной молекулы, состоящей из 7 сфер. Широкие пики являются более заметными и имеют более гладкую форму. Пики обладают шириной линии около 2 нм. Это означает, что добротность Q на порядок меньше, чем у мод единичной сферы. Из-за разброса размера всех 7 сфер, ширина линии неоднородно расширяется в результате наложения резонансов. Отдельные моды также расширены в результате прямого контакта между сферами. Чем больше сфер содержит фотонная молекула, тем больше областей контакта между сферами, что приводит к понижению добротности Q оптических резонансов. Самой важной особенностью системы, состоящей из 7 сфер, является то, что моды в спектре расположены периодически, явно указывая, что в пределах фотонной молекулы наблюдается связь когерентных мод.

**Заключение.** Нами было продемонстрировано направленное излучение от симметричных фотонных молекул различной формы, которое мы приписываем формированию фотонного нанореактивного эффекта. Фотонные молекулы освещались дефокусированным лазерным лучом перпендикулярно плоскости, в которой они находились. Излучение дальнего поля, наблюдаемое в этих симметричных фотонных молекулах, включало спектр бензолподобной структуры. Спектральный анализ рассеянного света определил в спектре нали-

чие мод шепчущей галереи, признаки наложения несвязанных мод и образование широких пиков, указывающих на когерентную связь между сферами фотонной молекулы.

Работа выполнена в результате исследований по теме: «Разработка технологии интегрированных наноэлектронных элементов и устройств переключения на основе связанных микрорезонаторов и фотонных нанореактивных структур» в рамках комплексного научно-исследовательского проекта Министерства образования РБ.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- Vahala, K. J. Optical microcavities / K. J. Vahala // Nature. – 2003. Vol. 424. – P. 839–841.
- Fine structure of coupled optical modes in photonic molecules / Y. P. Rakovich [et al.] // Phys. Rev. – 2004. Vol. 70 – P. 1801–1811.
- Optical modes in photonic molecules / M. Bayer [et al.] // Phys. Rev. Lett. – 1998. Vol. 81 – P. 2582–2590.
- Boriskina, S. V. Theoretical prediction of a dramatic Q-factor enhancement and degeneracy removal of whispering gallery modes in symmetrical photonic molecules / S. V. Boriskina // Opt. Lett. – 2006. Vol. 31 – P. 338–346.
- Smotrova, E. I. Threshold reduction in a cyclic photonic molecule laser composed of identical microdisks with whispering-gallery modes / E. I. Smotrova, A. I. Nosich // Opt. Lett. - 2006. Vol. 31 – P. 921–928.
- Boriskina, S. V. Spectrally engineered photonic molecules as optical sensors with enhanced sensitivity: a proposal and numerical analysis / S. V. Boriskina // J. Opt. Soc. Am. B – 2006. Vol. 23 – P. 1565–1574.
- Optical coupling and transport phenomena in chains of spherical dielectric microresonators with size disorder / V. N. Astratov [et al.] // Appl. Phys. Lett. – 2004. Vol. 85 – P. 5508–5516.
- Photons in coupled microsphere resonators / B. Moeller [et al.] // J. Opt. A: Pure Appl. Opt. - 2006. Vol. 8 – P. 113–123.
- Photonic nanojet enhancement of backscattering of light by nanoparticles: a potential novel visible-light ultramicroscopy technique / Z. Chen [et al.] // Opt. Exp. – 2004. – Vol. 12 – P. 1214–1219.
- Kapitonov, A. M. Observation of nanjet-induced modes with small propagation losses in chains of coupled spherical cavities / A.M. Kapitonov, V.N. Astratov // Opt. Lett. – 2007. Vol. 32 – P. 409–421.
- Itagi, A. V. Optics of photonic nanojets / A. V. Itagi, W. A. Challenger // Opt. Soc. Am. – 2006. – Vol. 22 – P. 2847–2852.
- Properties of a three-dimensional photonic jet / S. Lecler [et al.] // Opt. Lett. – 2005. – Vol. 30 – P. 2641–2647.
- Photonic molecules made of matched and mismatched microcavities: new functionalities of microlasers and optoelectronic components / S. V. Boriskina [et al.] // Proceedings of SPIE Laser Resonators and Beam Control IX – 2007. – P. 6452–6455.
- Thio, T. Coaxing light into small spaces / T. Thio // Nature Nanotechnology – 2007. – Vol. 2 – P. 136–144.
- Lin, B. S. Variational analysis for photonic molecules: Application to photonic benzene waveguides / B. S. Lin // Phys. Rev. – 2003. – Vol. 68 – P. 611–622.
- 3D Wire Mesh Photonic Crystals / D. F. Sievenpiper [et al.] // Phys. Rev. Lett. – 1996. – Vol. 76 – P. 2480–2487.
- Whispering Gallery Mode Emission from a Composite System of CdTe Nanocrystals and a Spherical Microcavity / Y. P. Rakovich [et al.] // Sem. Sci. Tech. – 2003. – Vol. 18 – P. 914–921.
- Effect of a dielectric substrate on whispering-gallery-mode sensors / N. Le Thomas [et al.] // J. Opt. Soc. Am. - 2006. – Vol. B 23 – P. 2361–2368.
- Absorption effects on microdroplet resonant emission structure / P. Chylek // Opt. Lett. - 1991. – Vol. 16 – P. 1723–1729.

Материал поступил в редакцию 17.09.09

#### RAKOVICH Yu.P., RUSAKOV K.I., GLADYSHCHUK A.A., CHUGUNOV S.V. Features of the directed radiation in symmetric photonic molecules

Symmetric directional emission of light from multisphere photonic molecules is experimentally shown in this work. The photonic molecules are illuminated in the vertical direction with a defocused laser beam. The emission is attributed to photonic nanojets generated in the structure. Furthermore, spectral analysis exhibit whispering gallery mode resonances of coupled and uncoupled modes. A benzene molecule-like structure consisting of a 7-microspheres cyclic photonic molecule shows a field emission pattern similar to the spatial distribution of the orbitals of the benzene molecule.

УДК 621.315.592

Кушнер Т.Л., Янусик И.С.

### ФОТОПЛЕОХРОИЗМ В ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ $\text{CuIn}_3\text{Se}_5$

**Ведение.** Фотоплеохроизм – это явление, состоящее в зависимости амплитуды фототока в полупроводниках от ориентации электрического вектора световой волны поляризованного излучения, падающей на образец. Это явление характерно для анизотропных полупроводников и обусловлено изменением концентрации фотогенерированных носителей заряда. Фотоплеохроизм можно наблюдать и в изотропных полупроводниковых кристаллах. Для этого в них предварительно нужно вызвать искусственную анизотропию с помощью механического сжатия (растяжения), а также воздействуя на образцы внешним электрическим или магнитным полем. Таким образом, установились два самостоятельных понятия: естественный и наведенный фотоплеохроизм. Наведенный фотоплеохроизм можно вызвать также изменением стереометрической ориентации поверхности полупроводника относительно направления падающего на кристалл излучения.

В настоящее время основные закономерности фотоплеохроизма в полупроводниках можно считать установленными. Создаются высокочувствительные поляриметрические фотодетекторы, которые находят широкое применение в науке и технике. Наиболее актуальным становится изучение физики фотоплеохроизма, анизотропии

процессов переноса носителей заряда и фотоактивного поглощения в неоднородных системах, например, в гетероструктурах на основе уже изученных полупроводников. В этом направлении исследований имеется целый ряд физических проблем, требующих своего теоретического и экспериментального решения. В данной статье приведены результаты исследований фотоплеохроизма в фоточувствительных поверхностно-барьерных структурах  $n\text{-ZnO:Al/p-CuIn}_3\text{Se}_5$ .

**Методика проведения измерений.** Принципиальная схема экспериментальной установки для поляризационных измерений фоточувствительности полупроводников изображена на рис. 1. Основу методики составляют измерения поляризационных индикатрис фототока  $i_p$  в зависимости от длины волны линейно поляризованного излучения, которое падает на образец вдоль нормали к освещаемой поверхности. Для постановки таких измерений используется излучение со степенью линейной поляризации  $\approx 100\%$ . Эти требования обычно удовлетворяются с помощью монохроматора 2 и поляризационного фильтра 4 с постоянной степенью поляризации в излучаемом спектральном диапазоне. За монохроматором располагается модулятор интенсивности излучения 3. Положение плоскости поляризации относительно осей

Кушнер Татьяна Леонидовна, к.ф.-м.н., доцент кафедры физики Брестского государственного технического университета.

Янусик Ирина Семёновна, старший преподаватель кафедры физики Брестского государственного технического университета. Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.