

УДК 535.337

К.И. РУСАКОВ, А.А. ГЛАДЫЩУК, Ю.П. РАКОВИЧ, С.В. ЧУГУНОВ
Брест, БрГТУ

НАПРАВЛЕННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ 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 с точки зрения фундаментальных физических исследований. По сравнению с другими оптическими излучателями, диэлектрические прозрачные микросферы являются трехмерными сфериче-

скими микрополостями с высокой добротностью Q и малым объемом мод, что приводит к сильной оптической обратной связи в пределах полости. [1] Оптические резонансы, называемые модами шелчущей галереи (МШГ), вызваны полным внутренним отражением света от внутренней поверхности сферы. 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 орбиталям 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 направленной эмиссией [4–6]. Для получения оптимальных результатов, необходимо соблюдение ряда требований к системе, таких как симметрия фотонной молекулы с подобранными размерами микрополостей и оптимизация промежутка между сферами [6; 7]. Помимо фотонных молекул, большой интерес вызывают волноводные свойства цепей, состоящих из множества микросфер [8; 9]. 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 [10]. 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.

Методика эксперимента

Фотонные молекулы были сформированы на кремневой подложке. Используемые в наших экспериментах микросферы изготовлены из меламин-формальдегида (показатель преломления $n = 1,68$, диаметр $5,374 \pm 0,069$ мкм) согласно спецификации фирмы Micro Particles GmbH.

Все микросферы касаются друг друга так, что между ними нет промежутков. 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 (100x, 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.

Направленное излучение в треугольной фотонной молекуле

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

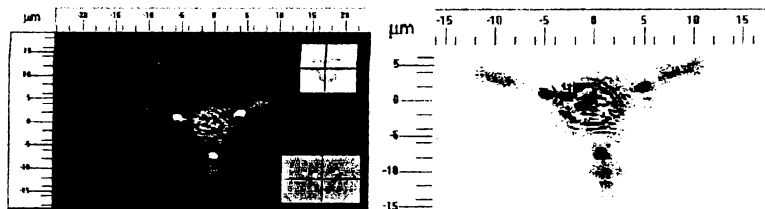


Рисунок 1 – Слева: фотонные нанопучки, генерируемые треугольной фотонной молекулой под действием лазерного излучения. Масштабная шкала по рамке изображения показывает размер в микрометрах. Верхняя вставка: изображение фотонной молекулы из трех сфер в белом свете. Нижняя вставка: пространственное распределение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

Дефокусированный луч способствует связи лазерного света во всей структуре, высоко опертурный объектив приводит к сильному расхожде-

нию 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 плоскости 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 $n=1,6$ [11].

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. 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.

Заключение

Нами было продемонстрировано направленное излучение от симметричных фотонных молекул треугольной формы, которое формируется за счет фотонного нанореактивного эффекта. Спектральный анализ рассеянного света выявил в нем наличие мод шепчущей галереи и признаков, указывающих на когерентную связь между сферами фотонной молекулы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Vahala, K.J. Optical microcavities / K.J. Vahala // *Nature*. – 2003. – Vol. 424. – P. 839–841.
2. Bayer, M. Optical modes in photonic molecules / M. Bayer [et al.] // *Phys. Rev. Lett.* – 1998. – Vol. 81. – P. 2582–2590.
3. 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.

4. 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.

5. 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.

6. Astratov, V.N. 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.

7. Moeller, B. Photons in coupled microsphere resonators / B. Moeller [et al.] // *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* – 2006. – Vol. 8. – P. 113–123.

8. Rakovich, Y.P. Fine structure of coupled optical modes in photonic molecules / Y.P. Rakovich [et al.] // *Phys. Rev.* – 2004. – Vol. 70. – P. 1801–1811.

9. Chen, Z. 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.

10. 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.

11. Itagi, A.V. Optics of photonic nanojets / A.V. Itagi, W.A. Challenger // *Opt. Soc. Am.* – 2006. – Vol. 22. – P. 2847–2852.