

17. Neumann, H. Tomlinson, R.D. Band-gap narrowing in n-type Cu-In-Se₂ singlecrystals / H. Neumann, R.D. Tomlinson // Solid State Commun. – 1986. – Vol. 57, № 8 – P. 591–594.
18. Neumann, H. Bulk Modulus-Volume Relationship in Ternary Chalcopyrite Compounds / H. Neumann // Phys. Stat. Sol. – 1986. – Vol. 96. – Iss. 2. – P. 121–125.
19. Raman spectra of the ordered vacancy compounds CuIn₃Se₅ and CuGa₃Se₅ / C. Rincon [et al] // Appl. Phys. Lett. – 1998. – Vol. 73. – № 4. – P. 441–443.
20. Photoluminescence, infrared reflectivity and Raman spectra of the ordered vacancy compound CuGa₃Se₅ / C. Rincon [et al] // J. Appl. Phys. – 2000. – Vol. 87. – № 5. – P. 2293–2296.

Материал поступил в редакцию 28.11.11

KUSCHNER T.L., CHUGUNOV S.V. Contributions of thermal expansion on the temperature dependence of the optical band gap in bulk crystals CuIn₃Se₅ and CuGa₃Se₅

The temperature dependence of the optical band gap E_g in bulk crystals CuIn₃Se₅ and CuGa₃Se₅ has been analyzed by separately considering the contributions due to electron-phonon interaction and thermal expansion. For the former contributions, we use an expression related to the mean frequency of phonons, defined by temperature Θ , that participate in the shift of the fundamental energy gap with temperature. For the latter, a term that explicitly takes into account the temperature variation of the thermal expansion coefficient and the pressure dependence of the band gap is employed.

УДК 535.337

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

ФОТОННЫЕ АТОМЫ С J-АГРЕГАТАМИ

Введение. В настоящее время наблюдается возрастающий интерес к созданию оптических структур микронных размеров для управления световыми потоками [1]. Много внимания при этом уделяется фотонным кристаллам и двумерным фотонным проволокам из-за возможности их использования для оптического переключения. Кроме того, ведутся работы по фотонным модам в сферических микрорезонаторах, перспективные как для изучения фундаментальных оптических свойств, так и практических применений [2]. Использование сферических микрорезонаторов может быть расширено за счет нелинейных оптических эффектов при малых интенсивностях накачки [3]. Показано также, что моды шепчущей галереи могут быть получены в фотонных атомах, покрытых линейным оптическим материалом или с добавлением люминесцирующих примесей. В данной работе представлены результаты интеграции резонатора мод шепчущей галереи, который является микросферой из меламина формальдегида, и оболочки из J-агрегатов цианинового красителя. J-агрегаты были использованы вследствие больших коэффициентов оптической нелинейности третьего порядка, предположительно наибольших среди органических веществ [4]. С этой точки зрения, высокая оптическая прозрачность, термическая и механическая стабильность меламина формальдегида делают такую систему потенциально привлекательной для оптических применений [5].

Методика эксперимента. Псевдоизоцианин для формирования J-агрегатов производства Sigma-Aldrich использовался без дальнейшей очистки. Сильно люминесцирующие J-агрегаты формировались за счет адсорбции псевдоизоцианина на пленке полистирена сульфата натрия (ПСС). На поверхность микросфер из меламина-формальдегидного латекса диаметром 11,93 нм производства Micro-particles GmbH методом послойного осаждения были помещены люминесцирующие J-агрегаты. Изначально микросферы имеют небольшой положительный заряд на поверхности, который притягивает отрицательно заряженный монослой ПСС. После этого комплексы J-агрегатов и наночастиц ПСС осаждаются на поверхность меламина-формальдегидных микросфер. 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 псевдоизоцианина.

Спектры разрешенной по времени фотолюминесценции регистрировались с помощью установки PicoQuant Microtime 200 с вре-

менным разрешением 150 пс. Спектры микрофотолюминесценции регистрировались в геометрии обратного рассеяния установкой для конфокальной рамановской микроскопии Alpha 300 фирмы WITec.

Результаты и обсуждение. В отличие от плавной полосы люминесценции в спектрах J-агрегатов, спектр излучения одиночной микросферы с J-агрегатами, в соответствии с рис. 1, представляет собой совокупность очень острых периодических пиков. Наблюдаемая экспериментально структура спектра является результатом связи электронных состояний в J-агрегатах и фотонных состояний в микросфере. Положение и расстояние между пиками мод шепчущей галереи определяются размерами и показателем преломления микросфер, а распределение интенсивности по спектру зависит от оптических параметров J-агрегатов. Из-за высокой квантовой эффективности фотолюминесценции J-агрегатов пики мод шепчущей галереи накладываются на фоновый сигнал эмиссии J-агрегатов, который никак не связан с модами шепчущей галереи микросферы. Данный фон вычитался из спектров для наблюдения более ясной структуры мод шепчущей галереи.

Согласно теории Ми, оптический резонанс наблюдается, когда поперечная электрическая (ТЕ) или поперечная магнитная (ТМ) мода доминирует в поле рассеянного излучения [6]. Одной из важнейших характеристик в этой теории является размерный параметр, связывающий радиус рассеивающей сферы a с длиной волны света в вакууме, падающей на сферу: $x = 2\pi a/\lambda$. Для моды шепчущей галереи с угловым модовым числом n и радиальным модовым числом l размерный параметр резонанса может быть обозначен x_n^l и асимптотически приближен с помощью выражения [7]:

$$n_s x_n^l = v + \frac{\alpha_l}{2^{1/3}} v^{1/3} - \frac{m p}{\sqrt{m^2 - 1}} + \frac{3\alpha_l}{10 \times 2^{2/3}} v^{-1/3} + \frac{m^3 p (2p^2 / 3 - 1) \alpha_l}{2^{1/3} (m^2 - 1)^{3/2}} v^{-2/3} + O(v^{-1}), \quad (1)$$

где $v = n + 1/2$, n_s – показатель преломления сферы, $m = n_s / n_e$ – относительный показатель преломления между сферой и окружающей средой с показателем преломления n_e , $p = l$

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.

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

Русаква Зоя Витальевна, старший преподаватель кафедры физики Брестского государственного технического университета. Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

для ТЕ-мод, $p=l/m^2$ для ТМ-мод и α_l является нулевым значением функции Эйри с номером l . Аналогия между формулами, описывающими атом водорода, и формулами теории Ми позволяет называть сферические микрорезонаторы с модами шепчущей галереи фотонными атомами.

Сравнивая результаты вычислений по уравнению (1) со спектральным положением мод шепчущей галереи, мы можем идентифицировать индексы n и l . Результаты такой идентификации представлены на рис. 1.

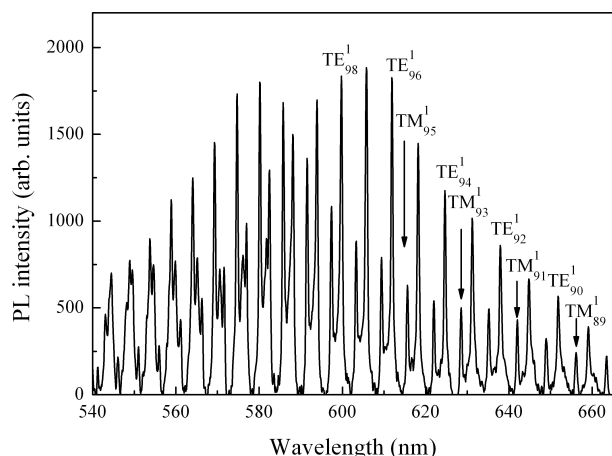


Рис. 1. Спектр фотолюминесценции одиночной сферы из меламина формальдегида, покрытой монослоем J-агрегатов, снятый при комнатной температуре

Фиттинг формы линий пиков фотолюминесценции позволяет нам оценить добротность мод шепчущей галереи в широкой спектральной области. Рис. 2 наглядно иллюстрирует нелинейную зависимость добротности: начальное возрастание величины добротности с угловым модовым числом затем сменяется быстрым спадом в коротковолновой спектральной области. Мы предполагаем, что наблюдаемое уменьшение добротности вызывается повышением поглощения J-агрегатами, сцепленными с соответствующими модами шепчущей галереи. Известно, что поглощение света, его усиление или изменение показателя преломления не только влияют на добротность резонатора, но и приводят к сдвигу положений резонансов, что затрудняет идентификацию мод в этой области спектра.

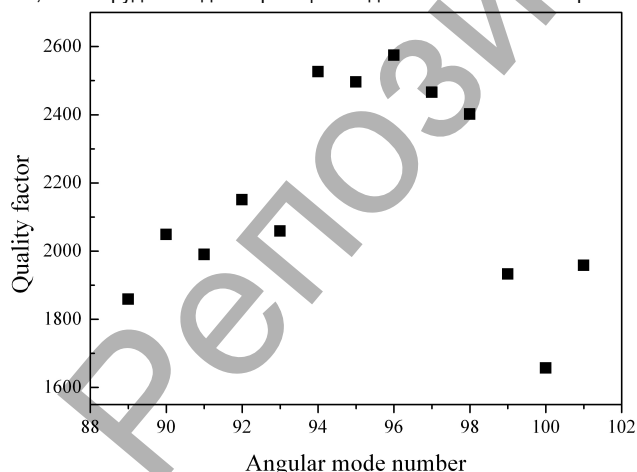


Рис. 2. Расчетная добротность мод шепчущей галереи микрорезонатора

Зная добротность, можно оценить среднее время жизни фотона в соответствующей моде: для пика моды шепчущей галереи с $n=92$ величина τ составляет приблизительно 3,7 пс, тогда как для пика $n=96$ среднее время жизни фотона возрастает до 5,8 пс.

Чтобы получить лучшее представление о пространственном распределении времени жизни фотолюминесценции в одиночной микро-

сфере, был использован метод FLIM, то есть динамика фотолюминесценции оценивалась с помощью двумерной карты распределения изменений времени затухания фотолюминесценции (рис. 3).

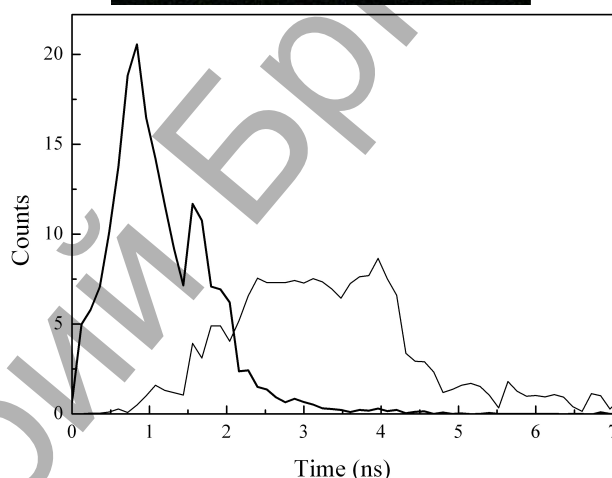
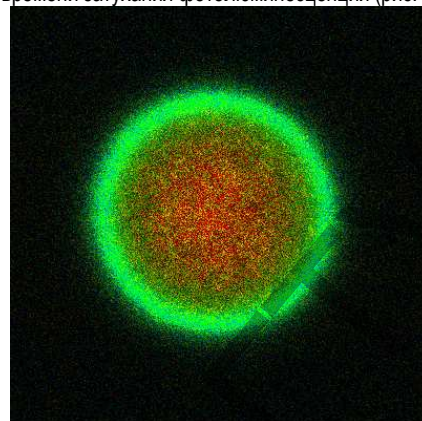


Рис. 3. Картина распределения среднего времени затухания флуоресценции в одиночной микросфере с оболочкой J-агрегатов (слева) и соответствующая гистограмма среднего времени жизни фотолюминесценции (справа)

Каждый пиксель на этой FLIM – картине соответствует определенным координатам (x, y), что позволяет наблюдать весь спектр фотолюминесценции. Картина времени жизни фотолюминесценции одиночной микросферы с оболочкой J-агрегатов (рис. 3) ясно демонстрирует особенности распределения излучения по поперечному сечению микросферы, причем доминирует эмиссия от оболочки. Гистограмма времени жизни люминесценции характеризуется двумя максимумами на 0,7 и 4 нс. Менее длительная компонента характеризует излучение J-агрегатов [8], а более длительная – эмиссию меламина-формальдегидной микросферы.

Заключение. Проведено исследование микрорезонатора мод шепчущей галереи с тонкой оболочкой J-агрегатов молекул органического красителя псевдоизоцианина. Результаты микрофотолюминесцентной спектроскопии высокого разрешения подтверждают сильную оптическую связь J-агрегатов с модами резонатора и демонстрируют особенности эмиссии на краях микросферы. Дальнейшие исследования подобных фотонных структур позволяют разработать высокоэффективные устройства, использующие функциональное разнообразие органических соединений и сильную взаимозависимость линейных и нелинейных оптических процессов в микрорезонаторах с модами шепчущей галереи.

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.

- Vahala, K.J. Optical microcavities / K.J. Vahala // Nature. – 2003. – No 6950. – Vol. 424. – P. 839–846.
- 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.
- 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.
- 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.
- Bohren, C.F. Absorption and scattering of light by small particles / C.F. Bohren, D.R. Huffman – New York: Wiley, 1983. – P. 313–323.
- Lam, C.C. Explicit asymptotic formulas for the positions, width and strength of resonances in Mie scattering / C.C. Lam, P.T. Leung, K. Young // J. Opt. Soc. Am. B. – 1992. – Vol. 9. – No 9. – P. 1585–1592.
- Van Burgel, M. The dynamics of one-dimensional excitons in liquids / M. van Burgel, D.A. Wiersma, K. Duppen // J. Chem. Phys. 1995. – Vol. 102. – No 1. – P. 20–33.

Материал поступил в редакцию 08.11.11

RUSAKOV K.I., RAKOVICH Y.P., GLADYSHCHUK A.A., MELNIKAU D.G., SAVATEEVA D.I., RUSAKOVA Z.V., CHUGUNOV S.V. Photonic atoms with J-aggregates

We report on development of active whispering-gallery microcavities integrated with shell of organic dye molecules in a J-aggregate state. Results of high-resolution micro-photoluminescence spectroscopy and photoluminescence lifetime imaging confirm strong coupling of J-aggregate emission to whispering gallery modes of spherical microcavity. Highly efficient luminescence from J-aggregate/microcavity system suggests that such photonic structures will find use as both microsensors and microlasers.

УДК 669.046:539.4.019.3

Пинчук А.И., Шаврей С.Д.

ПОВЕДЕНИЕ ГРАНИЦ РАЗДЕЛА ДВОЙНИК-МАТРИЦА В КРИСТАЛЛАХ ВИСМУТА ПРИ ОДНОВРЕМЕННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ СОСРЕДОТОЧЕННОЙ НАГРУЗКИ И ПОСТОЯННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Введение. В последнее время возрос интерес к изучению влияния внешних энергетических воздействий на пластическую деформацию различных материалов. Одним из видов немеханического воздействия на материал является магнитное поле (МП), влияние которого на пластическую деформацию различных материалов получило название «магнитопластический эффект» (МПЭ). В значительной степени это явление изучено для ионных кристаллов, полупроводников и металлов, где пластическая деформация осуществляется скольжением [1–9]. Большинство исследователей склоняется к выводу, что слабое МП создает условия для открепления дислокаций от локальных магниточувствительных дефектов, а дальнейшее их движение обуславливается полями действующих внутренних напряжений кристалла. Несмотря на значительное число публикаций по данной проблематике, влияние МП на пластическую деформацию часто подвергается сомнению.

На этом фоне практически не изученным остается вопрос магниточувствительности такого важнейшего вида кристаллографического формоизменения, как двойникование. Важным фактором, определяющим несомненную актуальность исследований в данной области, является то, что скольжение и двойникование являются взаимосвязанными процессами. Это дает возможность изучать влияние МП на оба процесса одновременно. Кроме этого, экспериментальное изучение воздействия МП на металлы, где пластическая деформация реализуется перемещением как полных, так и частичных дислокаций, может способствовать углублению представлений о физических механизмах МПЭ.

Трудности управления пластической деформацией двойникованием сдерживают применение некоторых технически перспективных материалов, таких как Ti, Be, Zn, сплавов на их основе, поэтому изучение особенностей двойникования кристаллов в МП целесообразно с точки зрения практического применения исследуемого явления для разработки новых возможностей и способов управления физико-механическими свойствами двойникующихся материалов, а также для прогнозирования поведения таких материалов при эксплуатации в условиях наложения МП. Как показывают многочисленные исследова-

ния, определяющее влияние на эксплуатационные характеристики оказывает структура и свойства поверхностных слоев материала и непосредственно качество поверхности. В связи с этим изучение характеристик, позволяющих судить о структурном состоянии и свойствах локальных объемов материала в поверхностных слоях с помощью метода микроиндентирования, используемого в данной работе, имеет практическое значение.

Методы исследования. Удобным материалом для изучения пластической деформации двойникованием является висмут. Монокристаллические образцы висмута химической чистоты 99,97% имели форму прямоугольных призм и размеры $5 \times 5 \times 15$ мм. Для достижения однородности МП, образцы закреплялись с помощью специального устройства, изготовленного из ферромагнитных металлов, в геометрическом центре сердечника электромагнита на высоте 10 см от стального столика микротвердомера ПМТ-3. Непосредственные измерения, выполненные с помощью датчика Холла, показали, что неоднородность МП вдоль образца не превышала 2%. С целью устранения инструментальных эффектов, стальные детали ПМТ-3, находившиеся в МП (оправка стандартной пирамиды Виккерса, грузы на штоке индентора), заменялись деталями, изготовленными из ферромагнитных металлов. Сосредоточенная нагрузка прикладывалась перпендикулярно свежесколотой плоскости спайности (111) кристаллов висмута. При таком способе нагружения возникают линзовидные двойники системы $\{110\} \langle 001 \rangle$, которые легко прорастают вглубь кристалла под действием внешней силы и при выходе на свободную поверхность имеют форму клина. Усреднение проводилось по результатам измерений размеров двойников не менее 20 отпечатков.

Результаты и обсуждение. В работе [10] впервые обнаружено, что комбинированное приложение МП и сосредоточенной нагрузки приводит к частичному падению размеров двойников и снижению их количества вокруг отпечатка. Приложение и отключение МП после микроиндентирования не меняет картину пластической деформации

Шаврей Сергей Дмитриевич, ассистент кафедры физики и методики преподавания физики Мозырьского государственного педагогического университета имени И.П. Шамякина.

Беларусь, МГПУ, 247760, Гомельская область, г. Мозырь, ул. Студенческая, 28.