Письма в ЖЭТФ, том 103, вып. 5, с. 355 – 358

Управляемое переключение между квантовыми состояниями в экситон-поляритонном конденсате

В. А. Лукошкин[a,b1)], *В. К. Калевич*[a,b], *М. М. Афанасьев*[a,b], *К. В. Кавокин*[a,b], *С. И. Цинцос*[c,d2)], *П. Г. Саввидис*[c,e2)], *З. Хацопулос*[d2)], *А. В. Кавокин*[a,f,g]

[a] *Лаборатория оптики спина, С. Петербургский государственный университет, 198504 С. Петербург, Россия*

[b] *Физико-технический институт им. Иоффе РАН, 194021 С. Петербург, Россия*

[c] *IESL-FORTH, P.O. Box 1527, 71110 Heraklion, Crete, Greece*

[d] *CCQCN, Department of Physics, University of Crete, 71003 Heraklion, Crete, Greece*

[e] *Department of Materials Science and Technology, University of Crete, 71003 Heraklion, Crete, Greece*

[f] *Physics and Astronomy School, University of Southampton, Highfield, SO171BJ Southampton, United Kingdom*

[g] *CNR-SPIN, Tor Vergata, I-00133 Rome, Italy*

Поступила в редакцию 1 февраля 2016 г.

Экспериментально продемонстрировано оптически контролируемое переключение между модами поляритонного лазера, имеющими разную симметрию. Микроскопическое смещение пятна оптического возбуждения драматически меняет форму поляритонного конденсата, образуемого в микроцилиндре на основе планарного полупроводникового микрорезонатора. Переключение между кольцевым и лепестковым конденсатом достигается за счет нарушения цилиндрической симметрии эффективного потенциала, образованного боковой поверхностью микроцилиндра и облаком некогерентных экситонов, создаваемых оптической накачкой.

DOI: 10.7868/S0370274X16050052

Поляритонные состояния в полупроводниковых планарных микрорезонаторах определяются суперпозицией состояний внутрирезонаторной фотонной моды и экситона. В условиях сильной связи между фотонами и экситонами образуются новые квантовые состояния, называемые экситонными поляритонами. Эти состояния обладают характерным законом дисперсии, состоящим из двух ветвей – верхней и нижней. Экситонные поляритоны, являясь составными бозонами, подчиняются статистике Бозе–Эйнштейна и, в частности, могут макроскопически заполнять одно квантовое состояние. В этом состоянии все частицы имеют одни и те же энергию и волновой вектор и описываются единой волновой функцией [1]. Другими словами, при определенных условиях экситонные поляритоны образуют когерентный конденсат. Это явление было неоднократно продемонстрировано экспериментально, начиная с работ [2, 3]. В силу конечного времени жизни поляритона в микрорезонаторе экситон-поляритонный конденсат является неравновесным. В нем постоянно происходят процессы рождения и распада поляритонов, сопровождающиеся поглощением и испусканием фотонов. Излученные фотоны сохраняют память о своем состоянии в когерентном конденсате, оставаясь когерентными между собой. Таким образом, поляритонный конденсат проявляет себя как новый источник когерентного излучения, получивший название "поляритонный лазер" [1]. В отличие от обычного лазера, где для получения когерентного излучения требуется создание инверсной заселенности электронных состояний с последующим индуцированным излучением при релаксации электронов в основное состояние, в поляритонном лазере когерентное излучение генерируется при спонтанном распаде поляритонов в когерентном конденсате. Создание на основе планарных (2D-мерных) микрорезонаторов структур с латеральным (поперек оси роста) ограничением распространения фотонной моды, таких, как полученные путем травления микроцилиндры или создаваемые оптическими методами ловушки [4, 5], существенно изменяет свойства микрорезонатора. В таком 0-мерном микрорезонаторе фотоны оказывают-

1) e-mail: v.lukosh@mail.ioffe.ru
2) S.I. Tsintzos, P.G. Savvidis, Z. Hatzopoulos

ся замкнуты в вертикальном направлении брэгговскими зеркалами, а в латеральном – скачком коэффициента преломления, например на границе боковая поверхность микроцилиндра–вакуум, что создает трехмерную квантовую яму. Квантовая потенциальная яма обладает набором собственных разрешенных состояний, которые модулируют возможные состояния фотонных мод в микрорезонаторе. В результате в микроцилиндре возникают дискретные 0-мерные фотонные моды. В режиме сильной связи поляритоны образуются из суперпозиции каждой из этих 0-мерных фотонных мод и экситонов [6]. Сплошная дисперсионная кривая планарного поляритона претерпевает разрывы. Кроме потенциала, образованного стенками микроцилиндра, поляритоны взаимодействуют с экситонным резервуаром, который образуется в результате оптической накачки. Большое время жизни экситонов и их малый коэффициент диффузии позволяют создать в области возбуждения долгоживущее облако экситонов высокой концентрации, повторяющее пространственное распределение лазерного пятна. Это облако экситонов взаимодействует с поляритонами, точнее с их экситонной составляющей, отталкивая поляритоны от себя. Таким образом, экситонный резервуар образует эффективный потенциал для экситонных поляритонов, пространственный профиль которого повторяет пространственный профиль лазерного пятна, обычно близкий к гауссовому, с максимумом интенсивности в центре пятна возбуждения. В результате поляритоны оказываются под воздействием суммарного потенциала стенок микроцилиндра и экситонного облака. В настоящей работе мы используем возможность оптического управления формой локализующего потенциала для того, чтобы по выбору заселять одно из двух состояний поляритонного конденсата с наинизшими значениями орбитального момента (0 и 1). При этом направление излучения поляритонного лазера контролируемым образом переключается между параксиальным и наклонным (под углом ± 3 град).

Используемый подход основан на результатах нашей предыдущей работы [4], где наблюдалась трансформация поляритонного конденсата в микроцилиндрах диаметром 25–40 мкм из кольцевой (в том числе многокольцевой) формы в многолепестковую. Для реализации управляемого переключения между поляритонными состояниями с малым орбитальным моментом мы использовали микроцилиндр меньшего диаметра (16 мкм). Микроцилиндр был вытравлен из планарного $5\lambda/2$ AlGaAs микрорезонатора с распределенными брэгговскими зеркалами и измеренной добротностью $Q = 16000$. Четыре набора по три 10-нанометровых квантовых ямы в каждом были размещены в микрорезонаторе в пучностях электромагнитного поля для усиления экситон-фотонного взаимодействия [7]. Фотолюминесценция из микроцилиндра наблюдалась при нерезонансном возбуждении непрерывным Ti:сапфировым лазером на 110 мэВ выше уровня энергии экситона $E_X = 1.54$ эВ. Возбуждающий лазерный луч фокусировался в пятно диаметром 2 мкм с помощью микрообъектива с числовой апертурой 0.42. Этим же объективом собиралась фотолюминесценция из микроцилиндра. В зависимости от использованной оптической схемы на CCD-камеру для регистрации передавалось либо реальное изображение зоны люминесценции, либо ее изображение в k-пространстве (угловое распределение). На рис. 1 представлены изобра-

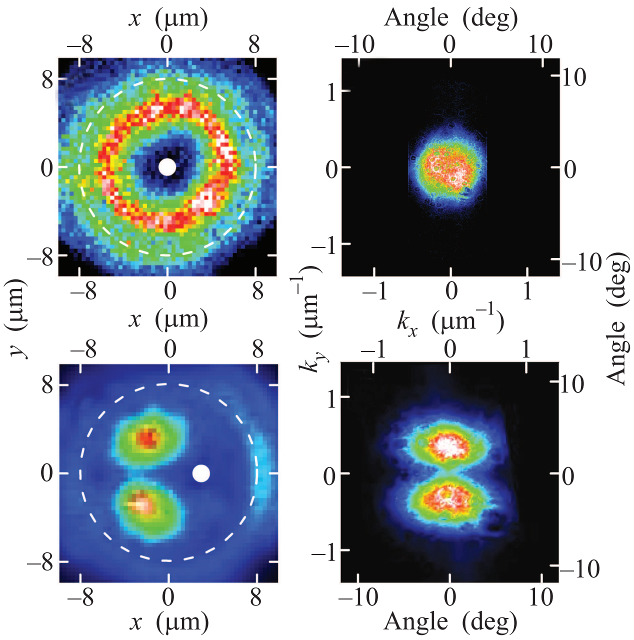

Рис. 1. (Цветной онлайн) Распределения интенсивности поляритонной фотолюминесценции в реальном пространстве при возбуждении в центр цилиндра (a) и в k-пространстве (b) (угловое распределение излучения), измеренные в микроцилиндре диаметром 16 мкм. Реальное изображение (c) и k-изображение (d), полученные при горизонтальном смещении пятна возбуждения от центра микроцилиндра вправо на 3 мкм. Штриховая окружность и белый кружок на панелях a и c показывают границу цилиндра и пятно возбуждения соответственно

жения поляритонной фотолюминесценции в реальном пространстве и в k-пространстве при мощности накачки выше порога образования поляритонного конденсата. Рис. 1a и b получены при возбуждении в центр микроцилиндра. На рис. 1a хорошо видна кольцевая форма зоны люминесценции, которая является проекцией на торцевую поверхность микроцилиндра области в объеме микрорезонатора, занятой поляритонным конденсатом. Диаметр кольца равен примерно 11 мкм, что существенно превосходит размер пятна накачки. Это свидетельствует о том, что поляритоны заселяют пространство вне зоны возбуждения. При этом цилиндрическая симметрия зоны люминесценции сохраняется и в k-пространстве (рис. 1b). В k-пространстве излучение заполняет круг с максимумом интенсивности при $k = 0$. Это указывает на то, что фотоны из кольцевого конденсата излучаются по нормали к торцу микроцилиндра. На рис. 1c лазерный луч сдвинут от центра микроцилиндра на 3 мкм. Реальное изображение области излучения трансформировалось из кольца в два пространственно-разделенных лепестка. При этом k-изображение также трансформировалось в два лепестка, указывая на изменение направления излучения поляритонного конденсата. Образовались два луча, выходящие под углами ± 3 град к нормали к торцу цилиндра (рис. 1d). В работе [5] интерферометрическими методами было показано, что лепестки являются частями единого когерентного поляритонного конденсата. Важно, что кольцевой конденсат и конденсат в виде лепестков представляют собой разные квантовые состояния поляритонной системы с разными энергиями и волновыми векторами [8]. В работе [9] показано, что в микрорезонаторах с 0-мерными фотонными модами при образовании поляритонного конденсата в первую очередь заполняются наиболее высоко лежащие энергетические состояния. Это подчеркивает отличие поляритонного конденсата от "классического" равновесного конденсата Бозе–Эйнштейна, где происходит макроскопическое заселение основного квантового состояния с минимальной энергией. Энергетический спектр квантовой ямы определяется ее геометрическими размерами. Меняя размер микроцилиндра или оптической ловушки, можно влиять на закон дисперсии поляритонов, варьировать энергию поляритонных состояний и тем самым создавать условия для конденсации поляритонов в предпочтительном энергетическом состоянии. Подчеркнем, что в настоящей работе поляритонный конденсат создавался при нерезонансной лазерной накачке и не мог наследовать ни энергетические характеристики, ни когерентность излучения накачки. Переключение между модами поляритонного конденсата проводилось изменением положения точки лазерного возбуждения, приводящим к изменению формы локализующего поляритоны потенциала и скоростей захвата фотовозбужденных экситонов в поляритонные состояния с различными азимутальными квантовыми числами. В этом состоит существенное отличие наших результатов от результатов работы [10], где использовалась резонансная лазерная накачка, позволявшая непосредственно задавать энергию и волновой вектор поляритонов, варьируя энергию и угол падения возбуждающего излучения. Таким образом, путем варьирования параметров некогерентной накачки нам удалось осуществить переключение между квантовыми состояниями поляритонного конденсата и управление диаграммой направленности когерентного излучения поляритонного лазера [11–13]. Это позволяет надеяться на реализацию аналогичного эффекта в поляритонных лазерах с электрической накачкой [14] с перспективой технических приложений в оптических системах обработки информации.

В.А.Л., В.К.К., М.М.А., К.В.К. и А.В.К. благодарят за частичную финансовую поддержку РФФИ (проект # 15-52-12018) в рамках совместного российско-германского проекта ICRC TRR160. S.I.T., Z.H. и P.G.S. благодарят за финансовую поддержку программы POLATER и EU FP7-REGPOT-2013-1 GA 316165.

1. A. Imamoglu, R. J. Ram, S. Pau, and Y. Yamamoto, Phys. Rev. A **53**, 4250 (1996).
2. H. Deng, G. Weihs, C. Santori, J. Bloch, and Y. Yamamoto, Science **298**, 199 (2002).
3. J. Kasprzak, M. Richard, S. Kundermann, A. Baas, P. Jeambrun, J. M. J. Keeling, F. M. Marchetti, M. H. Szymańska, R. André, J. L. Staehli, V. Savona, P. Littlewood, B. Deveaud, and L. S. Dang, Nature **443**, 409 (2006).
4. V. K. Kalevich, M. M. Afanasiev, V. A. Lukoshkin, D. D. Solnyshkov, G. Malpuech, K. V. Kavokin, S. I. Tsintzos, Z. Hatzopoulos, P. G. Savvidis, and A. V. Kavokin, Phys. Rev. B **91** 045305 (2015).
5. F. Manni, K. G. Lagoudakis, T. C. H. Liew, R. André, and B. Deveaud-Plédran, Phys. Rev. Lett. **107**, 106401 (2011).
6. D. Bajoni, P. Senellart, E. Wertz, I. Sagnes, A. Miard, A. Lemaître, and J. Bloch, PRL **100**, 047401 (2008).
7. P. Tsotsis, P. S. Eldridge, T. Gao, S. I. Tsintzos, Z. Hatzopoulos, and P. G. Savvidis, New J. Phys. **14**, 023060 (2012).
8. L. Ferrier, E. Wertz, R. Johne, D. D. Solnyshkov, P. Senellart, I. Sagnes, A. Lemaître, G. Malpuech, and J. Bloch, Phys. Rev. Lett. **106**, 126401 (2011).
9. arXiv:1411.4579v2 [cond-mat.quant-gas] (2015).
10. R. Cerna, D. Sarchi, T. K. Paraïso, G. Nardin, Y. Léger, M. Richard, B. Pietka, O. El Daif, F. Morier-Genoud,

V. Savona, M. T. Portella-Oberli, and B. Deveaud-Plédran, Phys. Rev. B **80**, 121309 (2009).

11. G. Grosso, S. Trebaol, M. Wouters, F. Morier-Genoud, M. T. Portella-Oberli, and B. Deveaud, Phys. Rev. B **90**, 45307 (2014).
12. A. Dreismann, P. Cristofolini, R. Balili, G. Christmann, F. Pinsker, N.G. Berloff, Z. Hatzopoulos, P. G. Savvidis, and J. J. Baumberg, Proc. Natl. Acad. Sci. **111**, 8770 (2014).
13. G. Tosi, G. Christmann, N. G. Berloff, P. Tsotsis, T. Gao, Z. Hatzopoulos, P. G. Savvidis, and J. J. Baumberg, Nat. Phys. **8**, 190 (2012).
14. C. Schneider, A. Rahimi-Iman, N. Y. Kim, J. Fischer, I. G. Savenko, M. Amthor, M. Lermer, A. Wolf, L. Worschech, V. D. Kulakovskii, I. A. Shelykh, M. Kamp, S. Reitzenstein, A. Forchel, Y. Yamamoto, and S. Höfling, Nature **497**, 348 (2013).