

Конденсация экситонов в микрорезонаторах в условиях трехмерного квантования

© В.П. Кочерешко^{*†}, А.В. Платонов^{**}, П. Саввидис⁺, А.В. Кавокин^{+•}, Ж. Блез, А. Мариетт[≠]

^{*} Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

⁺ Лаборатория Оптики спина, Санкт-Петербургский государственный университет,

[•] Школа физики и астрономии, Университет Саутгемптона, Хайфилд, Саутгемптон, SO171BJ, Великобритания

[≠] Институт Нееля, CNRS, Гренобль, Франция

(Получена 22 апреля 2013 г. Принята к печати 30 апреля 2013 г.)

Исследовалась зависимость спектров поляризованной фотолюминесценции экситонов в микрорезонаторах в условиях трехмерного квантования от интенсивности оптического возбуждения. Наблюдалась каскадная релаксация поляритонов, происходящая между несколькими квантованными состояниями поляритонного бозе-конденсата.

1. Введение

Бозе-жидкости дают нам пример нового, необычного состояния вещества — квантовых жидкостей. Они обладают многими непривычными свойствами, такими как сверхтекучесть, образование квантовых вихрей, макроскопическая когерентность движения частиц и т.д. К сожалению, практически единственный пример бозе-жидкости, встречающийся в природе, — это жидкий гелий. Было бы заманчиво найти и другие примеры бозе-конденсированного состояния вещества. Несколько лет назад бозе-конденсацию наблюдали для атомов рубидия [1]. Однако это удалось осуществить в „экстремальных условиях“, при предельно низких температурах, в магнитных ловушках. Хорошим кандидатом для наблюдения бозе-конденсации является система экситонов в полупроводнике. Экситоны являются бозе-частицами, их эффективная масса мала и это позволило бы наблюдать конденсацию экситонов при легко достижимых температурах. Еще легче наблюдать явление бозе-конденсации для экситонных поляритонов — смешанных состояний экситона и фотона в микрорезонаторах. Их масса еще меньше, чем масса экситона и для них можно было бы наблюдать явление бозе-конденсации даже при комнатной температуре [2]. Дело, однако, осложняется тем, что, во-первых, поляритоны живут довольно короткое время и за время жизни могут не успеть термализоваться, а во-вторых, в двумерной системе бозе-конденсация вообще невозможна. Первую трудность преодолеть нельзя и приходится довольствоваться неравновесной конденсацией [3]. Чтобы преодолеть вторую трудность, для конденсации поляритонов используют резонаторы с трехмерным квантованием поляритонов [4].

2. Результаты и обсуждение

В данной работе исследовалась зависимость спектров поляризованной фотолюминесценции в микрорезо-

наторах с трехмерным (3D) квантованием поляритонов от интенсивности оптического возбуждения. Исследуемые структуры представляли собой мезы, изготовленные из микрорезонаторов. Микрорезонатор состоял из микрополости $5\lambda/2$ на основе GaAs, окруженной двумя брэгговскими зеркалами, состоящими из 32 слоев AlAs/Al_{0.15}Ga_{0.85}As. В микрополость помещались четыре квантовые ямы, расположенные в пучностях электромагнитного поля. Из таких микрорезонаторов был изготовлен набор мез диаметром от 1 до 40 мкм. Добротность микрорезонаторов достигала 20 000. В микрорезонаторах имел место режим сильной экситон-фотонной связи с расщеплением Рашбы порядка 10 мэВ. Спектры возбуждались импульсами Ti:Sa-лазера с длительностью импульса 100 фс и частотой повторения 100 МГц с энергией 1.62 эВ, что соответствует, с одной стороны, области прозрачности брэгговских зеркал, а с другой — области прозрачности барьерных слоев AlGaAs. Спектры возбуждались и регистрировались с помощью микроскопа, диаметр пучка составлял 1.5 мкм. Регистрировалось излучение, выходящее из образца в угле 90°.

В линейном режиме при малой интенсивности возбуждения, меньшей 2 мВт/см², спектр фотолюминесценции мез представлял собой довольно широкую полосу, простирающуюся от 1.530 до 1.550 эВ, практически независимо от диаметра мезы. При превышении интенсивности возбуждения некоторого порогового значения (переходе в нелинейный режим) на коротковолновом крыле этой полосы появляется один узкий пик полушириной менее 1/2 мэВ (рис. 1, а). Интенсивность этого пика сначала очень быстро, сверхлинейно, нарастает с ростом интенсивности возбуждения, а затем стабилизируется. При дальнейшем возрастании интенсивности возбуждения в коротковолновой области последовательно появляются другие пики. Их число и энергетическое расстояние между ними зависят от латерального размера мезы. Так, в мезах диаметром 40 мкм наблюдалась всего одна линия, а в мезах диаметром 5 мкм наблюдалось до 6 линий (рис. 1, б). Интенсивность этих линий растет

[†] E-mail: Vladimir.Kochereshko@mail.ioffe.ru

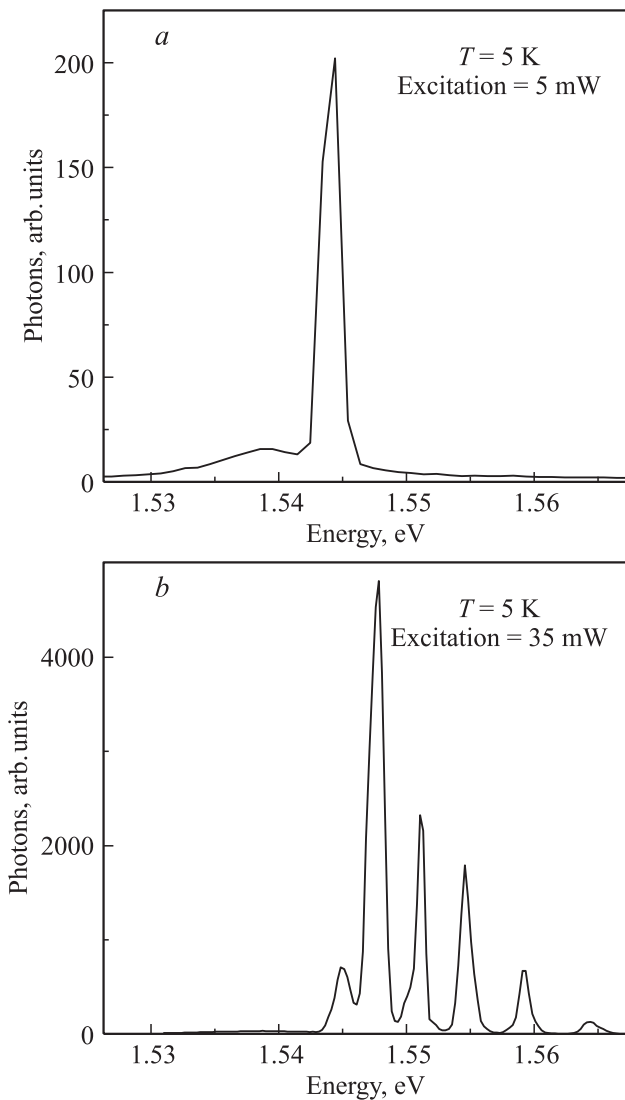


Рис. 1. *a* — спектр фотолюминесценции мезы диаметром 5 мкм при оптическом возбуждении на энергии 1.62 эВ с интенсивностью 5 мВт/см²; *b* — спектр фотолюминесценции той же мезы при оптическом возбуждении с интенсивностью 35 мВт/см².

сверхлинейно с ростом интенсивности возбуждения. Эти узкие линии, очевидно, связаны с латеральным квантованием экситонных поляритонов в мезах. Поляритонная природа узких линий фотолюминесценции подтверждается зависимостью степени циркулярной поляризации излученного света от магнитного поля, характерной для экситонов.

В то же время природа широкой полосы фотолюминесценции представляется загадочной. Действительно, в мезах малого диаметра, в несколько микрон, все поляритонные состояния должны испытывать латеральное квантование и проявляться только в виде набора узких линий независимо от интенсивности возбуждения.

Мы считаем, что появление широкой полосы фотолюминесценции в линейном режиме связано с тем,

что добротность микрорезонатора для латеральных мод очень мала. Действительно, коэффициент отражения от боковой поверхности мезы составляет менее 30%, т.е. фотон может находиться в мезе в течение примерно 0.05 пикосекунды, что соответствует затуханию фотонной моды 20 мэВ. В спектре фотолюминесценции в линейном режиме мы и наблюдаем полосу шириной порядка 20 мэВ, с максимумом на энергии 1.539 эВ, что соответствует дну поляритонной зоны (рис. 2), так как излучение из этой моды направлено перпендикулярно основной поверхности мезы и потери для этой моды минимальны.

При большой интенсивности возбуждения в нелинейном режиме, когда усиление уже достаточно велико и компенсирует потери за счет выхода излучения через боковые поверхности мезы, наблюдаются собственные моды нашего трехмерного резонатора.

Наблюдение собственных мод резонатора еще ничего не говорит о том, какая экситон-фотонная связь реализована в нашем микрорезонаторе — слабая или сильная. Для того чтобы это выяснить, мы изучили спектры фотолюминесценции в зависимости от температуры.

На рис. 2, *a* представлена зависимость спектров фотолюминесценции от температуры. С ростом температуры все линии в спектре смещаются в сторону меньших энергий, что и следует ожидать из-за зависимости ширины запрещенной зоны нашего полупроводника от температуры. Однако величина смещения линий в спектре намного меньше самого уменьшения ширины запрещенной зоны. Так как энергетическое положение чисто фотонных мод вообще не должно зависеть от температуры, это указывает на смешанный экситон-фотонный характер наблюдаемых особенностей, когда моды сформированы как из экситонной, так и из фотонной составляющих.

Из рисунка видно, что помимо длинноволнового сдвига с ростом температуры в спектре возникают новые линии фотолюминесценции, соответствующие все более высоким состояниям латерального квантования поляритонов. Наибольшее число линий проявляется при температуре 60 К. Это позволяет достаточно надежно установить взаимное расположение фотонной и экситонной мод в данном микрорезонаторе. Дисперсионные кривые, рассчитанные для данного образца при температуре 5 К, показаны на рис. 2, *b*. На этом рисунке точками показаны собственные моды нашей мезы. Видно, что рассчитанная энергия мод и энергетическое положение пиков в спектре фотолюминесценции хорошо соответствуют друг другу. С ростом температуры расстройка фотонной и экситонной мод меняется, что приводит к изменению дисперсионных кривых. Дисперсионные кривые поляритонов, рассчитанные для температуры 60 К, показаны на рис. 2 *c*. Видно, что сдвиг собственных мод с температурой гораздо меньше сдвига экситонной зоны и хорошо согласуется с наблюдаемым. Таким образом, температурная зависимость подтверждает факт, что экситонная мода расположена на 5 мэВ выше фотонной моды по энергии.

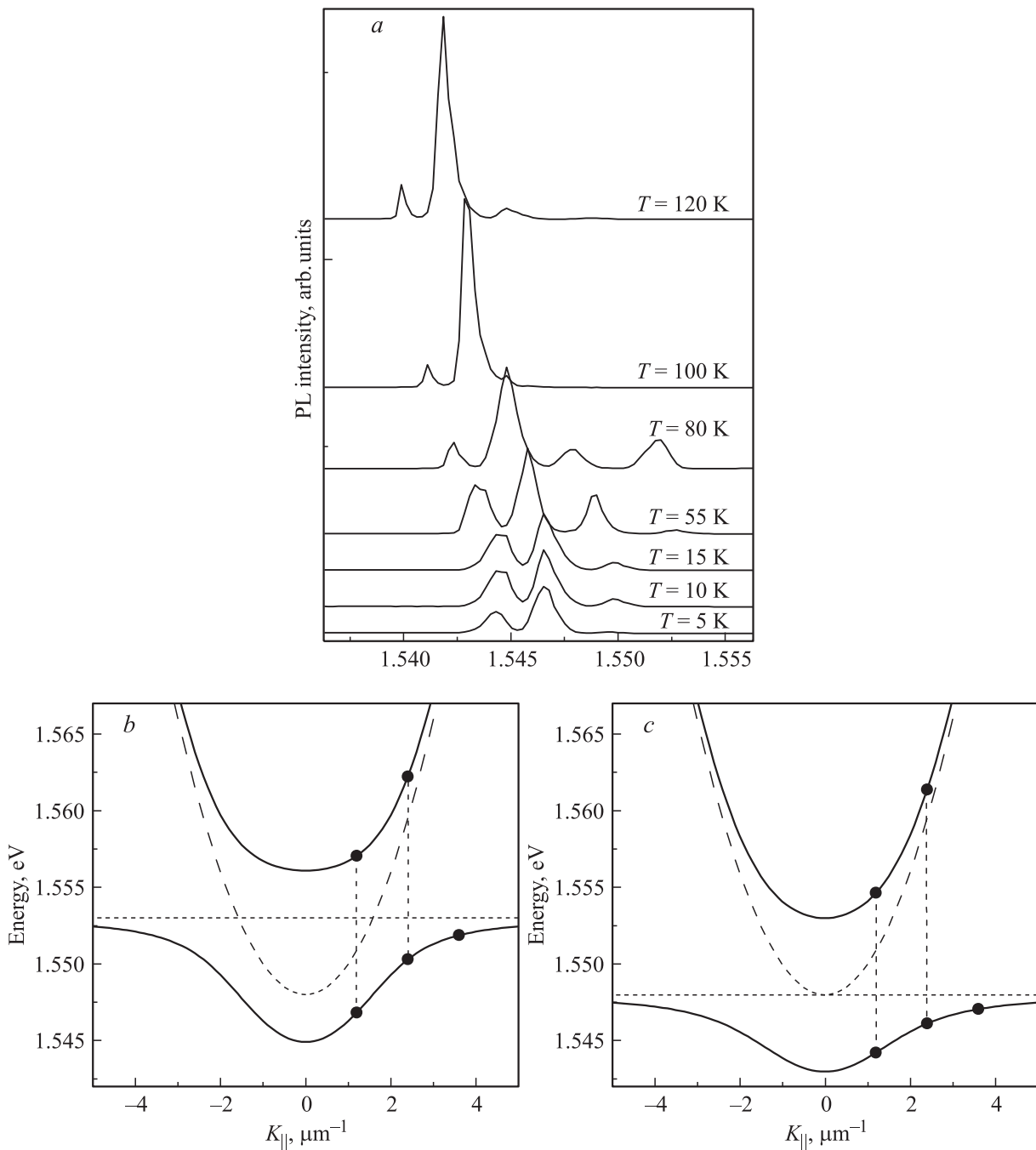


Рис. 2. *a* — зависимость спектров фотолюминесценции мезы диаметром 5 мкм от температуры. Интенсивность возбуждения для всех температур составляла 7 мВт/см^2 . *b* — дисперсионные кривые поляритонов для данного образца, рассчитанные при температуре 5 К. Точки — собственные моды резонатора. *c* — дисперсионные кривые поляритонов, рассчитанные при температуре 60 К.

Экспериментально было обнаружено, что время спада широкой полосы фотолюминесценции в линейном режиме составляло около сотни пикосекунд. Такое большое время спада определяется временем спада экситонной заселенности, так как время ухода фотонов из резонатора очень мало.

В нелинейном режиме времена спада фотолюминесценции на всех линиях составляли порядка несколько

десятков пикосекунд, что существенно короче типичных времен спада чисто экситонной люминесценции и также указывает на смешанный, экситон-фотонный характер этих состояний.

Исследование кинетики фотолюминесценции показало, что наблюдаемые в спектре пики изменяются во времени по-разному. Из рис. 3 видно, что эти линии возникают и затухают со временем последовательно.

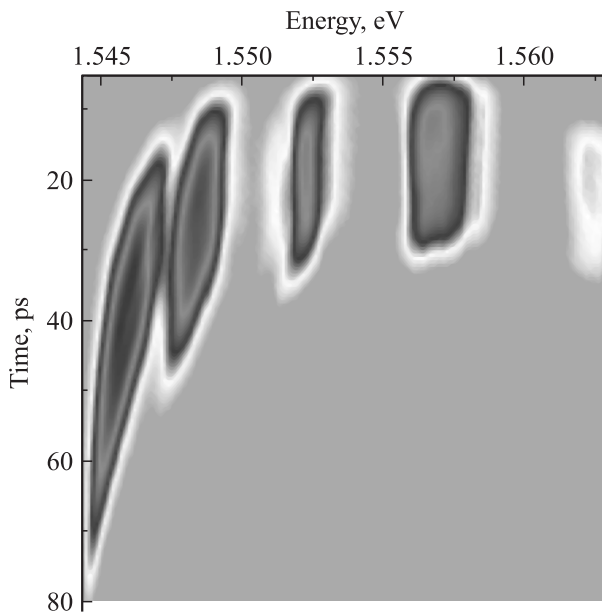


Рис. 3. Временные зависимости спектров фотолюминесценции, измеренные на мезе диаметром 5 мкм.

Этот факт указывает на то, что имеет место каскадная релаксация поляритонов по энергии между несколькими квантованными состояниями поляритонного бозе-конденсата.

Самая длинноволновая линия возникает, и исчезает в спектре позже остальных по времени. Кроме того, она имеет и наиболее длинную кинетику спада фотолюминесценции порядка 60 пс. Эту линию мы приписываем основному состоянию поляритонного конденсата. Самая коротковолновая линия в спектре на энергии 1.5625 эВ имеет наименьшую интенсивность и возникает позже трех более длинноволновых линий. Появление этой линии может быть связано с параметрическим рассеянием поляритонов. Действительно, симметрично этой линии по энергии относительно интенсивной линии на энергии 1.557 эВ имеется очень слабая линия на энергии 1.5515 эВ, на длинноволновом крыле интенсивной линии 1.5525 эВ. Эта слабая линия не соответствует никакому реальному состоянию квантования поляритонов. Происхождение линии 1.5515 эВ связано с параметрическим рассеянием поляритонов [4,5] при их аннигиляции, когда поляритон на уровне 1.557 эВ аннигилирует, а другой поляритон с этого же уровня возбуждается на уровень с энергией 1.5625 эВ. В результате излученный фотон должен иметь энергию, равную 1.5515 эВ. Очевидно, что для этого поляритоны должны достаточно эффективно взаимодействовать друг с другом, т.е. образовывать конденсат. Этот процесс в точности аналогичен так называемым шейк-ап (*shake-up*) процессам при рекомбинации трионов [6]. Наличие таких процессов также подтверждает утверждение о том, что имеет место бозе-конденсация экситонных поляритонов в условиях их латерального квантования.

Примечательно поведение самой длинноволновой линии квантования поляритонов. Эта линия возникает в спектре на временах, когда другие линии уже исчезли, и имеет очень длинное время спада фотолюминесценции, достигающее 60-80 пс. Очевидно, что эта линия должна соответствовать основному состоянию поляритонного конденсата, когда поляритоны успевают термализоваться в нижнем энергетическом состоянии.

Оказалось, что все линии в спектре фотолюминесценции линейно поляризованы. Степень поляризации различалась для разных линий от 20 до 60%. Направление линейной поляризации также немного различалось для разных линий. Степень этой спонтанной поляризации определяется плотностью поляритонного конденсата и коррелирует с интенсивностью самих линий.

3. Заключение

В спектрах фотолюминесценции мез, изготовленных из микрорезонаторов, наблюдались пики, связанные с модами латерального квантования поляритонов. Эти пики проявлялись в нелинейном режиме, при превышении интенсивности возбуждения некоторого порога, последовательно начиная с самого длинноволнового пика. Во времени пики фотолюминесценции мод исчезали также последовательно, начиная с самого коротковолнового пика. Последним исчезал самый длинноволновый пик. Эти пики смещались во времени в сторону меньших энергий, что отражает уменьшение поляритон-поляритонного взаимодействия при спаде концентрации экситонов. У некоторых пиков наблюдались сателлиты, связанные с параметрическим рассеянием.

Авторы благодарны за частичную финансовую поддержку грантов РФФИ, Отделения физических наук РАН, гранта СПбГУ № 11.37.646.2013 и гранта Министерства образования и науки Российской Федерации No.11.G34.31.0067.

Список литературы

- [1] Э.А. Корнелл, К.Э. Виман. УФН, **172** (12), 1320 (2003).
- [2] A. Trichet, L. Sun, G. Pavlovic, N.A. Gippius, G. Malpuech, W. Xie, Z. Chen, M. Richard, Le Si Dang. Phys. Rev. B, **83**, 041 303 (2011).
- [3] A. Imamoglu, R.J. Ram, S. Pau, Y. Yamamoto. Phys. Rev. A, **53**, 4250 (1996).
- [4] M. Maragkou, A.J.D. Grundy, E. Wertz, A. Lemaître, I. Sagnes, P. Senellart, J. Bloch, P.G. Lagoudakis. Phys. Rev. B, **81**, 081 307R (2010).
- [5] C. Ciuti, P. Schwendimann, A. Quattropani. Semicond. Sci. Technol., **18**, S279 (2004).
- [6] D.R. Yakovlev, V.P. Kochereshko, R.A. Suris, H. Schenk, W. Ossau, A. Waag, G. Landwehr, P.C.M. Christianen, J.C. Maan. Phys. Rev. Lett., **79**, 3974 (1997).

Редактор Т.А. Полянская

Exciton condensation in microcavity at three dimensional quantization

V.P. Kochereshko^{*+}, *A.V. Platonov*^{*+}, *P. Savvidis*⁺,
A.V. Kavokin^{+•}, *J. Bleuse*, *H. Mariette*[≠]

* Ioffe Physicotechnical Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

+ Spin-Optics Laboratory,
Saint Petersburg State University,
198504 St. Petersburg, Russia

• School of Physics and Astronomy,
University of Southampton Highfield,
Southampton, SO171BJ, UK

≠ Institut Neel, CNRS,
Grenoble, France

Abstract Intensity dependence of polarized photoluminescence spectra in microcavity at three dimensional quantization was studied. A cascade relaxation of polaritons between quantized states of polariton condensate was found.