

Бозе-конденсация межъямных экситонов в латеральных ловушках: фазовая диаграмма

© А.А. Дремин, А.В. Ларионов, В.Б. Тимофеев

Институт физики твердого тела Российской академии наук,
142432 Черноголовка, Московская обл., Россия

E-mail: timofeev@issp.ac.ru

Исследована люминесценция межъямных экситонов в GaAs/AlGaAs-двойных квантовых ямах ($n-i-n$ -гетероструктурах), содержащих крупномасштабные флуктуации случайного потенциала. Изучались свойства экситонов, у которых фотовозбужденные электрон и дырка пространственно разделены между соседними квантовыми ямами, при изменении плотности и температуры вплоть до 0.5 К. Исследовались домены величины порядка микрона, играющие роль макроскопических ловушек для экситонов. При увеличении мощности резонансного лазерного возбуждения пороговым образом появляется очень узкая линия делокализованных экситонов (ее ширина менее 0.3 meV), которая с ростом накачки сильно увеличивается по интенсивности и сдвигается в сторону меньших энергий (примерно на 0.5 meV) в соответствии с накоплением экситонов в ближайшем состоянии в домене. С ростом температуры эта линия исчезает в спектре не активационным образом. Обнаруженное явление связывается с Бозе-конденсацией в квазидвумерной системе межъямных экситонов. В исследованном интервале температур (0.5–3.6 К) определены критические величины экситонной плотности и температуры и построена фазовая диаграмма, очерчивающая область экситонного конденсата.

Авторы благодарят Российский фонд фундаментальных исследований и Государственную научно-техническую программу по наноструктурам за частичную финансовую поддержку.

В последние годы ведется интенсивный поиск бозе-эйнштейновской конденсации экситонов в двумерных (2D) системах на основе полупроводниковых гетероструктур [1–16]. В квазидвумерных системах с пространственным ограничением Бозе-конденсация может происходить при конечных температурах. Пространственные ограничения в плоскости квантовых ям могут возникать из-за крупномасштабных флуктуаций случайного потенциала, связанных с вариациями ширины квантовых ям на гетерограницах. В областях с латеральным конфайнментом экситоны легче накопить, и плотность экситонов в таких областях может существенно превысить среднюю плотность [13]. Поэтому критические условия, соответствующие Бозе-конденсации межъямных экситонов, легче реализовать именно в латеральных доменах. С этой целью мы исследовали свойства межъямных экситонов при изменении их плотности и температуры в GaAs/AlGaAs-двойных квантовых ямах с крупномасштабными флуктуациями случайного потенциала, которые возникали благодаря использованию техники прерывания молекулярно-пучкового эпитаксиального роста (growth interruption technique) на гетерограницах квантовых ям [17].

На поверхность $n-i-n$ -структуры с описанной в [9] архитектурой наносилась металлическая маска (пленка алюминия) толщиной 100 nm. Затем в этой пленке средствами электронно-лучевой литографии протравливались круглые отверстия с минимальными размерами до 0.5 μm . Возбуждение и регистрация сигнала люминесценции велись через приготовленные таким образом отверстия. Результаты, свидетельствующие о конденсации экситонов, были получены при оптическом возбуждении образца через „окна“ диаметром менее одного микрона. Работа велась в условиях резонансного лазер-

ного возбуждения внутриямных экситонов на тяжелых дырках ($1s$ HH-экситонов) с помощью перестраиваемого Ti-сапфирового лазера.

При увеличении накачки ($\geq 50 \mu\text{W}$) на фиолетовом краю широкой полосы, связанной с локализованными экситонами, пороговым образом вырастает узкая линия (рис. 1). Интенсивность этой линии увеличивается с ростом накачки сверхлинейно (см. вставку на рис. 1), при этом сама линия несколько сужается и сдвигается примерно на 0.5 meV в сторону меньших энергий. Минимальная измеренная ширина этой линии составляет 350 μeV при спектральной ширине щели спектрометра (около 200 meV). При дальнейшем увеличении накачки (более 5 mW) узкая линия межъямного экситона начинает уширяться и затем, монотонно расширяясь, сдвигаться в сторону больших энергий.

При увеличении температуры интенсивность I -линии уменьшается, ее ширина при этом мало меняется, и при $T = 3.6$ К данная линия исчезает на фоне бесструктурного спектра локализованных экситонов, который при этом сохраняет свою форму (рис. 2). Очень существенно, что уменьшение интенсивности I -линии при увеличении температуры не носит активационного характера. Измерив температурную зависимость интенсивности I -линии при различных накачках, мы установили следующую закономерность ее температурного поведения: $I_T \propto [1 - (T/T_C)^\alpha]$, где I_T — интенсивность линии при температуре T ; T_C — критическая температура, соответствующая исчезновению этой линии в спектре при заданной фиксированной накачке; $\alpha \leq 1.5$.

Обнаруженное явление демонстрирует все черты фазового перехода, связанного с Бозе-конденсацией экситонов: при достижении критических величин плотности и температуры возникает новая, коллективная экситонная

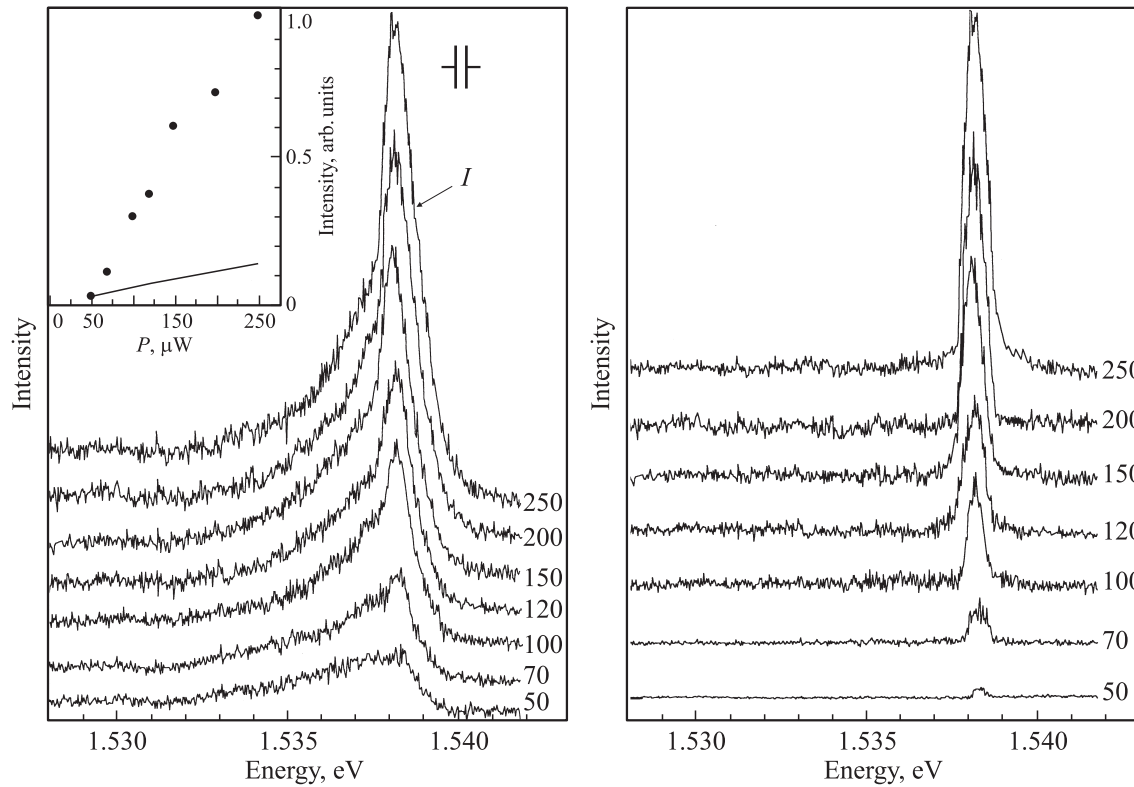


Рис. 1. Спектры фотолюминесценции межъямных экситонов I_{ex} при различных мощностях резонансного возбуждения прямого экситона. Числа около спектров — мощность возбуждения (в μW). Справа приведены спектры после вычитания бесструктурного континуума под линией. $T = 1.51\text{ K}$.

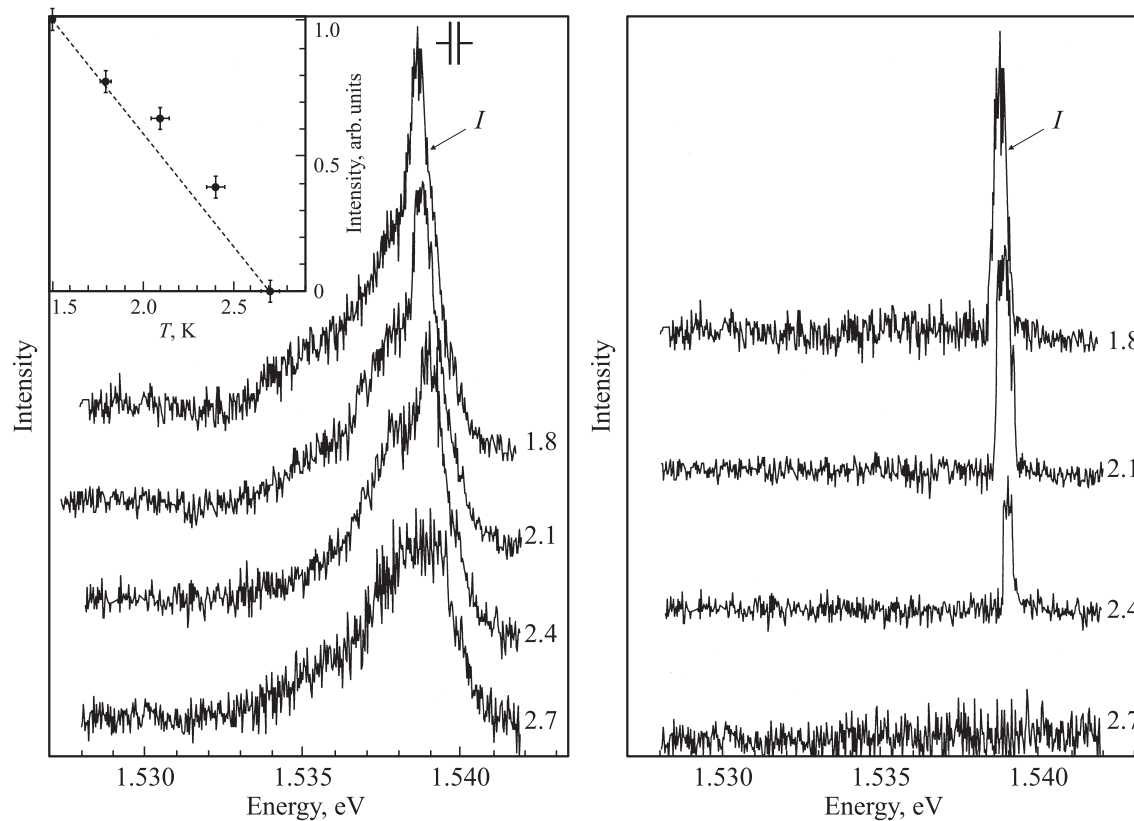


Рис. 2. Температурная зависимость интенсивности узкой линии фотолюминесценции при мощности возбуждения $150\mu\text{W}$. Числа около спектров — температура (в K). Справа приведены спектры после вычитания бесструктурного континуума под линией.

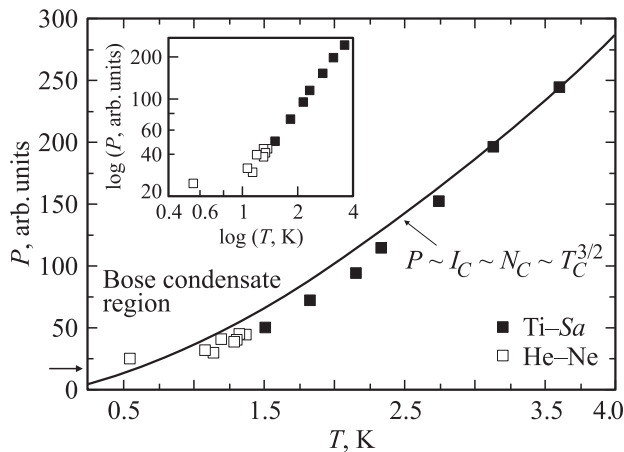


Рис. 3. Фазовая диаграмма Бозе-конденсации межъямных экситонов в температурном интервале 0.5–3.6 К.

фаза. Мы попытались установить, как выглядит фазовая диаграмма в условиях Бозе-конденсации межъямных экситонов. С этой целью при каждой заданной температуре в интервале 0.5–3.6 К исследовалась зависимость спектров фотолюминесценции от мощности накачки и определялась пороговая величина мощности P_C , при которой начинает проявляться (исчезать) в спектре узкая линия. Фазовая диаграмма строилась в координатах P_C – T , для ее построения использовалась линейная область зависимости интенсивности узкой линии от мощности накачки. Результирующая фазовая диаграмма изображена на рис. 3 в линейных и логарифмических координатах.

Исследуемое явление Бозе-конденсации наблюдается в шкале экситонных концентраций в ограниченных пределах: $N_{\text{loc}} < N_{\text{ex}} < N_{\text{I-M}}$. Нижний предел обусловлен эффектами сильной экситонной локализации на дефектах. Оцениваемая нами плотность локализованных состояний в исследованных структурах $N_{\text{loc}} \leq 3 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-2}$. Именно локализованные состояния определяют столь необычный вид фазовой диаграммы при низких температурах. Верхний предел обусловлен разрушением экситонов вследствие перехода изолятор–металл: $N_{\text{I-M}} \leq 10^{11} \text{ cm}^{-2}$. Этой плотности соответствует безразмерный параметр $r_S = 1/\sqrt{\pi N_{\text{I-M}} a_B} \leq 2$.

Список литературы

- [1] Yu.E. Lozovik, V.I. Yudson. JETP Lett. **22**, 274 (1975).
- [2] T. Fukuzawa, E.E. Mendez, J.M. Hong. Phys. Rev. Lett. **64**, 3066 (1990).
- [3] L.V. Butov, A. Zrenner, G.A. Abstreiter et al. Phys. Rev. Lett. **73**, 304 (1994); L.V. Butov. In: Proc. of the 23rd Int. Conf. on Physics of Semiconductors. Berlin (1996).
- [4] V.B. Timofeev, A.V. Larionov, A.S. Ioselevich et al. JETP Lett. **67**, 613 (1998).
- [5] V.V. Krivolapchuk, E.S. Moskalenko, A.L. Zhmodikov et al. Solid State Commun. **111**, 49 (1999).

- [6] L.V. Butov, A. Imamoglu, A.V. Mintsev et al. Phys. Rev. B **59**, 1625 (1999).
- [7] A.V. Larionov, V.B. Timofeev, J.M. Hvam et al. JETP **90**, 1093 (2000).
- [8] L.V. Butov, A.V. Mintsev, Yu.E. Lozovik et al. Phys. Rev. B **62**, 1548 (2000).
- [9] A.V. Larionov, V.B. Timofeev, J.M. Hvam et al. JETP Lett. **75**, 200 (2002).
- [10] L.V. Butov, C.W. Lai, A.L. Ivanov, A.C. Gossard, D.S. Chemla. Nature **417**, 47 (2002).
- [11] L.V. Butov, A.C. Gossard, D.S. Chemla. Nature **418**, 751 (2002).
- [12] D. Yoshioka, A.H. MacDonald. J. Phys. Soc. Jpn. **59**, 4211 (1990); X.M. Chen, J.J. Quinn. Phys. Rev. Lett. **67**, 895 (1991).
- [13] Xuejun Zhu, P.L. Littlewood, M.S. Hybersten, T. Rice. Phys. Rev. Lett. **74**, 1633 (1995).
- [14] J. Fernandez-Rossier, C. Tejedor. Phys. Rev. Lett. **78**, 4809 (1997).
- [15] Yu.E. Lozovik, O.L. Berman. JETP **84**, 1027 (1997).
- [16] Yu.E. Lozovik, I.V. Ovchinnikov. JETP Lett. **74**, 288 (2001).
- [17] S.W. Brown, T.A. Kennedy, D. Gammon et al. Phys. Rev. B **54**, R17 339 (1996).