

## МАГНИТНЫЙ РЕЗОНАНС И ЭФФЕКТ АНТИПЕРЕСЕЧЕНИЯ УРОВНЕЙ ЭКСИТОНОВ, ЛОКАЛИЗОВАННЫХ НА ПРОТИВОПОЛОЖНЫХ ИНТЕРФЕЙСАХ В СВЕРХРЕШЕТКАХ GaAs/AlAs ТИПА II

*Баранов П.Г., Машков И.В., Романов Н.Г., Гордон К.<sup>1)</sup>,  
Лаваллар Ф.<sup>1)</sup>, Планель Р.<sup>2)</sup>*

*Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН  
194021 Санкт-Петербург, Россия*

Поступила в редакцию 12 августа 1994 г.

Методом оптического детектирования магнитного резонанса селективно исследованы экситоны, локализованные на различных интерфейсах в сверхрешетках GaAs/AlAs типа II. Локализация экситонов на противоположных интерфейсах однозначно доказана измерениями антипересечения экситонных уровней по линейной поляризации люминесценции. Зарегистрированы экситоны, характеризующиеся обменными расщеплениями, соответствующими локализации электрона и дырки через период сверхрешетки.

В сверхрешетках (СР) GaAs/AlAs типа II, в которых экситон формируется из дырки в слое GaAs ( $\Gamma$ -максимум валентной зоны) и электрона в слое AlAs ( $X$ -минимум зоны проводимости), рекомбинационные процессы происходят на гетерограницах между слоями (интерфейсах) и могут быть эффективно использованы для изучения последних. В [1-4] были разработаны методы оптического детектирования магнитного резонанса (ОДМР) в СР GaAs/AlAs типа II и была однозначно установлена система энергетических уровней экситонов. Было показано [3,4], что обменные расщепления в экситоне определяются периодом СР, изменяются в пределах 0,5–50 мкэВ для СР с периодом 75–20 Å и практически не зависят от соотношения ширины слоев GaAs и AlAs внутри периода. Теоретическое объяснение этого эффекта предложено в [5]. На основании исследований ОДМР было показано [1], что симметрия экситонов в СР типа II ниже симметрии СР ( $D_{2d}$ ). При этом наблюдалось сосуществование в одной СР двух классов экситонов с близкими обменными расщеплениями и разными осями  $x$  и  $y$  типа  $\langle 110 \rangle$ . Было обнаружено расщепление излучательных уровней экситонов, отсутствующее в СР типа I. Величина этого расщепления, исследованного, помимо метода ОДМР [3,4], методом квантовых биений [6,7], составляет примерно 50% от изотропного обменного расщепления и также зависит от периода сверхрешетки. Для объяснения этих результатов необходимо учесть, что низкая по сравнению с симметрией СР симметрия идеальной гетерограницы  $C_{2v}$  приводит к полному снятию вырождения энергетических уровней локализованных экситонов, что можно продемонстрировать прямой диагонализацией матрицы полного гамильтониана экситона, включающей энергетические уровни тяжелой и легкой дырок. Следует также учесть, что направления кристаллических связей для противоположных интерфейсов составляют угол  $90^\circ$ .

<sup>1)</sup>C.Gourdon, P.Lavallard, Groupe de Physique des Solids, Université Paris-7, Tour 23, 2 Place Jussieu, F75251 Paris Cedex 05, France.

<sup>2)</sup>R.Planel, Laboratoire des Microstructures et Microélectronique, 196, avenue Henri Ravera, F92225 Bagneux Cedex, France.

Экситоны локализируются на случайных неоднородностях интерфейсов, при этом концентрация экситонов различна на интерфейсах GaAs/AlAs и AlAs/GaAs. До сих пор не удавалось селективно исследовать экситоны, локализованные на разных интерфейсах, поскольку их обменные расщепления были близки. В настоящей работе спектры ОДМР и антипересечения уровней были зарегистрированы для экситонов, локализованных на противоположных интерфейсах в короткопериодных СР GaAs/AlAs. Также наблюдались экситоны, характеризующиеся обменными расщеплениями, соответствующими локализации электрона и дырки через период СР.

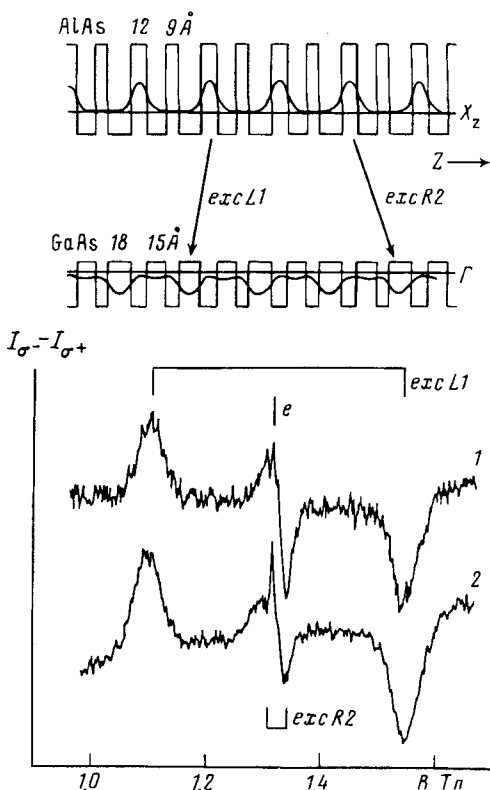


Рис.1. Спектры ОДМР на частоте 35 ГГц, зарегистрированные в образце К115 по циркулярной поляризации люминесценции. Интенсивность возбуждающего света 1 мВт (1) и 20 мВт (2);  $T = 1,6 \text{ K}$   $B \parallel [001]$ .

В верхней части рисунка показана структура этой СР с рассчитанными волновыми функциями для  $X_z$ -электрона и  $\Gamma$ -дырки, а также рекомбинационные процессы, соответствующие двум типам экситонов  $excL1$  и  $excR2$ . Ось  $z$  совпадает с направлением роста структуры

Эксперименты проводились на специально рассчитанных и изготовленных асимметричных СР, в которых предполагалось, что экситоны будут локализованы на одном определенном интерфейсе. Расчет и изготовление СР производились во Франции, эксперименты были проведены в ФТИ им. А.Ф.Иоффе. Были изготовлены две СР, которые различались только порядком расположения

слоев GaAs и AlAs внутри периода, состоящего из четырех слоев. СР имели следующую структуру: буферный слой  $1000\text{\AA}$  GaAs  $n^+$ , 336 периодов СР, защитный слой  $100\text{\AA}$  GaAs  $n^+$ . Каждый период СР K111 состоял из слоев:  $15\text{\AA}$  GaAs,  $12\text{\AA}$  AlAs,  $18\text{\AA}$  GaAs и  $9\text{\AA}$  AlAs. В СР K115 последовательность слоев была изменена:  $18\text{\AA}$  GaAs,  $12\text{\AA}$  AlAs,  $15\text{\AA}$  GaAs и  $9\text{\AA}$  AlAs.

В верхней части рис.1 показана структура СР K115, а также рассчитанные волновые функции для  $X_z$ -электрона в барьере AlAs и  $\Gamma$ -дырки в яме GaAs. Видно, что и электрон, и дырка локализируются в наиболее широких слоях СР, что и определяет локализацию экситона на определенном, "левом", интерфейсе (если считать направление роста СР совпадающим с осью  $z$ ). Экситон, локализованный на таком интерфейсе, обозначен на рис.1 как *excL1*.

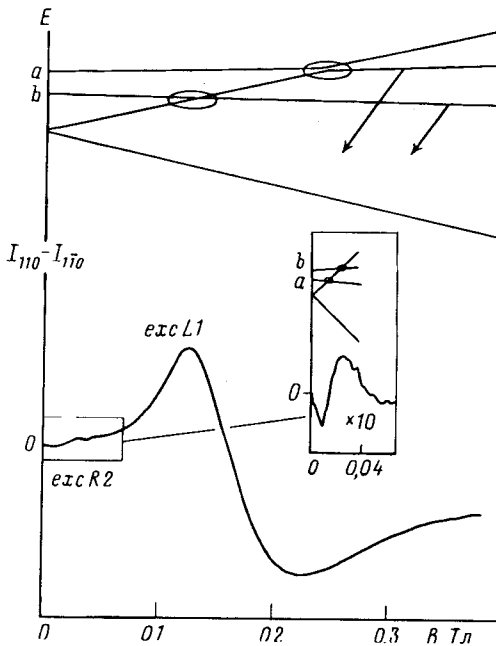


Рис.2. Система энергетических уровней экситонов в области антикроссинга (АК) и сигналы АК, зарегистрированные по линейной поляризации люминесценции в образце K115. На вставке показаны АК и система энергетических уровней для экситона *excR2*;  $T = 1,6\text{K}$ ,  $B \parallel [001]$

В нижней части рис.1 показаны спектры ОДМР на частоте 35 ГГц, зарегистрированные в СР K115 по циркулярной поляризации люминесценции, возбуждаемой несфокусированным светом аргонового лазера ( $488\text{nm}$ ) и регистрируемой в направлении статического магнитного поля. Спектрометр ОДМР описан в работе [8]. Спектры 1 и 2 соответствуют мощностям лазера 1 и 20 мВт. В спектрах наблюдаются типичные для экситонов в СР типа II [1-4] пары линий ОДМР с противоположными знаками, обусловленные переходами с переориентацией электронного спина, а также узкие одиночные линии между

ними, соответствующие несвязанным электронам. Ширина сигналов и их поведение по линии люминесценции практически не отличаются от наблюдаемых в ранее изученных СР типа II. Расстояние между сигналами ОДМР экситонов пропорционально величине обменного взаимодействия  $\Delta$ . В соответствии с приведенной в [3,4] зависимостью  $\Delta$  от периода СР, полученное значение  $\Delta = 23,8$  мкэВ соответствует периоду  $26\text{\AA}$ , что меньше расчетного локального периода для  $\text{exc}L1$  в исследуемой СР на величину порядка толщины одного монослоя. Вывод об этом различии в периодах расчетной и реальной СР подтвержден также анализом спектров комбинационного рассеяния, в результате которого получено близкое значение локального периода  $27\text{\AA}$ .

Неожиданным результатом является наблюдение наряду с сигналами ОДМР экситона  $\text{exc}L1$  второй пары экситонных линий ( $\text{exc}R2$  на рис.1) с существенно меньшим расщеплением ( $\Delta = 2,1$  мкэВ). Поскольку это расщепление соответствует периоду СР  $52\text{\AA}$  [4], то можно предположить, что моделью наблюдаемого экситона является экситон, локализованный на "правом" интерфейсе, в котором дырка локализована на расстоянии примерно двойного локального периода от электрона ( $\text{exc}R2$ , показанный в верхней части рис.1). В спектре 2 на рис.1, зарегистрированном при большей мощности оптического возбуждения, отчетливо видно относительное увеличение интенсивности сигнала электронов и изменение относительных интенсивностей сигналов экситонов  $\text{exc}L1$  и  $\text{exc}R2$ .

Для доказательства локализации экситонов  $\text{exc}L1$  и  $\text{exc}R2$  на противоположных интерфейсах были исследованы сигналы антипересечения экситонных энергетических уровней, или антикроссинг (АК). Высокая информативность спектроскопии АК отмечалась нами в [4,9]. Сигналы АК не зависят от СВЧ поля и могут наблюдаться по изменению интенсивности, циркулярной или линейной поляризации люминесценции. Последнее возможно только в случае, когда существует различие в концентрации или обменных расщеплениях  $\Delta$  экситонов, локализованных на противоположных интерфейсах. На рис.2 показана система энергетических уровней экситонов в области АК, а также сигналы АК, зарегистрированные по линейной поляризации люминесценции. Экситоны, локализованные на противоположных интерфейсах, характеризуются излучательными подуровнями ( $a$  и  $b$  на рис.2), дипольно активными в направлениях  $[110]$  и  $[\bar{1}\bar{1}0]$ , причем порядок расположения этих уровней различен для противоположных интерфейсов. Таким образом, сигналы АК в линейной поляризации должны иметь противоположные знаки. Именно такая ситуация наблюдается на рис.2: знаки сигналов АК противоположны для экситонов  $\text{exc}L1$  (большое  $\Delta$ ) и  $\text{exc}R2$  (малое  $\Delta$ ). Сигнал АК и система энергетических уровней для  $\text{exc}R2$  показаны на вставке на рис.2. Необходимо отметить, что поскольку на интенсивность сигналов АК не должны оказывать влияния времена рекомбинационных процессов, соотношение интенсивностей сигналов АК  $\text{exc}L1$  и  $\text{exc}R2$  отражает соотношение концентраций этих экситонов в СР. На рис.2 видно, что концентрация  $\text{exc}L1$  превышает концентрацию  $\text{exc}R2$  более чем на порядок величины. В то же время близкие интенсивности сигналов ОДМР этих двух экситонов свидетельствуют о гораздо большем времени жизни экситонов  $\text{exc}R2$ .

Дополнительным подтверждением нашего вывода о локализации экситонов на разных интерфейсах служат результаты экспериментов на СР K111, структура которой изображена в верхней части рис.3. Как видно из рис.3, знак

сигналов антипересечения уровней для СР К111 противоположен знаку АК в образце К115, то есть экситон с большим обменным взаимодействием локализован на "правом" интерфейсе -  $excR1$ , тогда как экситон с меньшим обменным взаимодействием локализован на "левом" интерфейсе -  $excL2$ . Сигнал АК для экситона  $excL2$  не виден на рис.3 из-за его малой интенсивности. Величина  $\Delta$  для  $excR1$  в СР К111 (19 мкэВ) несколько меньше, чем для  $excL1$  в СР К115, что, по-видимому, связано с вышеупомянутой неполной эквивалентностью толщин слоев в этих СР. Из спектров ОДМР и АК были найдены также величины расщепления излучательных уровней экситонов. Эти расщепления составляют 12; 1,1; 9 и 1,2 мкэВ для экситонов  $excL1$ ,  $excR2$ ,  $excR1$  и  $excL2$ , соответственно.

Таким образом, в настоящей работе селективно наблюдались два класса экситонов, локализованных на противоположных интерфейсах. Определены параметры спин-гамильтониана этих экситонов. Показано, что регистрация антипересечения экситонных уровней по линейной поляризации люминесценции позволяет однозначно идентифицировать интерфейс, на котором локализуется

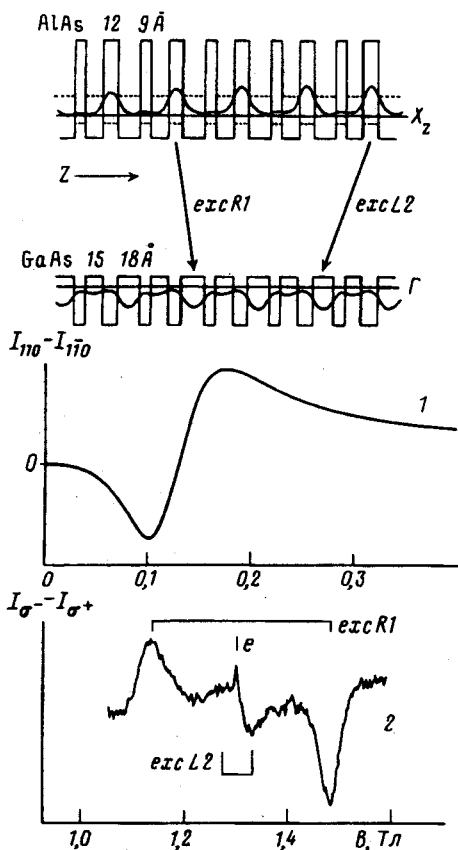


Рис.3. Сигнал антикроссинга, зарегистрированный по линейной поляризации люминесценции (1) и спектр ОДМР на частоте 35 ГГц, зарегистрированный по циркулярной поляризации люминесценции (2), в образце К111;  $T = 1,6$  К,  $B \parallel [001]$ . Структура образца и рекомбинационные процессы показаны в верхней части рисунка

экситон. Исследования в ФТИ им. А.Ф.Иоффе РАН частично поддержаны Фондом Фольксвагена (проект 1/68517) и Российским фондом фундаментальных исследований (проект Г 03-02-2603).

- 
1. H.W.van Kesteren, E.C.Cosman et al., *Phys. Rev.* **B41**, 5283 (1990).
  2. J.M.Trombetta, T.A.Kennedy, W.Tseng, and D.Gammon, *Phys. Rev.* **B43**, 2458 (1991).
  3. P.G.Baranov, P.Lavallard, R.Planel, and N.G.Romanov, *Superlattices and Microstructures* **12**, 327 (1992).
  4. P.G.Baranov, I.V.Mashkov, N.G.Romanov et al., *Solid State Communs.* **87**, 649 (1993).
  5. E.L.Ivchenko, A.Yu.Kaminskii, and I.L.Aleiner, *JETP* **77**, 609 (1993).
  6. W.A.J.A. van der Poel, A.L.G.J.Severens, and C.T.Foxon, *Optics Communs.* **76**, 116 (1990).
  7. G.Gourdon and P.Lavallard, *Phys. Rev.* **B46**, 4644 (1992).
  8. P.G.Baranov and N.G.Romanov, *Appl. Magn. Resonance* **2**, 361 (1992).
  9. N.G.Romanov, I.V.Mashkov, P.G.Baranov et al., *Solid State Electronics* **37**, 911 (1993).