

ЭКСИТОНЫ В СВЕРХРЕШЕТКАХ GaAs/AlAs В ОБЛАСТИ ПЕРЕХОДА ТИП II – ТИП I

Н.Г.Романов, И.В.Машков, П.Г.Баранов, Ф.Лаваллар¹⁾, Р.Планель²⁾

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

Поступила в редакцию 14 мая 1993 г.

Переход тип II – тип I в сверхрешетках GaAs/AlAs исследован методами оптического детектирования магнитного резонанса и спектроскопии антипересечения уровней. В области перехода зарегистрировано три вида экситонов с различными обменными взаимодействиями и временем жизни. Измерено обменное расщепление экситонных уровней в сверхрешетках типа I. Регистрация нерезонансного воздействия СВЧ поля на люминесценцию сверхрешеток GaAs/AlAs позволила установить сложную структуру линии излучения.

Тонкая структура экситонных уровней в сверхрешетках (СР) GaAs/AlAs типа II, в которых экситон формируется из дырки в слое GaAs (Γ – максимум валентной зоны) и электрона в слое AlAs (X – минимум зоны проводимости) исследовалась методами оптического детектирования магнитного резонанса (ОДМР) [1-4], квантовых биений [5,6] и поляризованной люминесценции [7]. Представляет большой интерес изучение g -факторов и обменного взаимодействия экситонов в СР типа I, в которой Γ -электрон и Γ -дырка локализованы в одном слое GaAs, а также исследование перехода тип II – тип I, при котором изменяется соотношение энергий X -электрона в AlAs и Γ -электрона в GaAs. В настоящей работе приводятся первые результаты исследования ОДМР и антипересечения экситонных уровней в СР GaAs/AlAs в переходной области тип II – тип I и в СР типа I. Структура линии излучения СР GaAs/AlAs изучается методом регистрации нерезонансного воздействия СВЧ-поля на люминесценции.

ОДМР на частоте 35 ГГц и антипересечение, или антикроссинг (АК), экситонных уровней регистрировались при температуре 1,6 – 4,2 К по циркулярной поляризации люминесценции, которая возбуждалась несфокусированным светом аргонового лазера (488 или 514,5 нм, 0,5 – 10 мВт) и регистрировалась в направлении статического магнитного поля при помощи спектрометра ОДМР, описанного в [8]. СР GaAs/AlAs были выращены методом молекулярной пучковой эпитаксии. Образец E913 имел длину 23,4 мм и градиент состава GaAs/AlAs в плоскости решетки: от 20,8/12,2 Å при $x = 0$ до 22,8/11,2 Å при $x = 23,4$ мм. Оптические измерения показали, что в этом образце происходит переход от СР типа II к СР типа I в области $x = 13 – 20$ мм [6]. Образец мог перемещаться в вертикальном направлении так, что люминесценция возбуждалась и регистрировалась селективно в разных его участках. Исследовались также СР типа II, описанные в [4,5].

На рис.1 показаны зависимости циркулярной поляризации люминесценции от магнитного поля в разных участках образца E913 при последовательном

¹⁾P.Lavallard, Groupe de Physique des Solides, Universités Paris 6 et 7, Tour 23, 2 place Jussieu, F75251 Paris CEDEX 05, France.

²⁾R.Planel, Laboratoire des Microstructures et Microélectronique, 196 avenue Henri Rivera, F92225 Bagneux CEDEX, France.

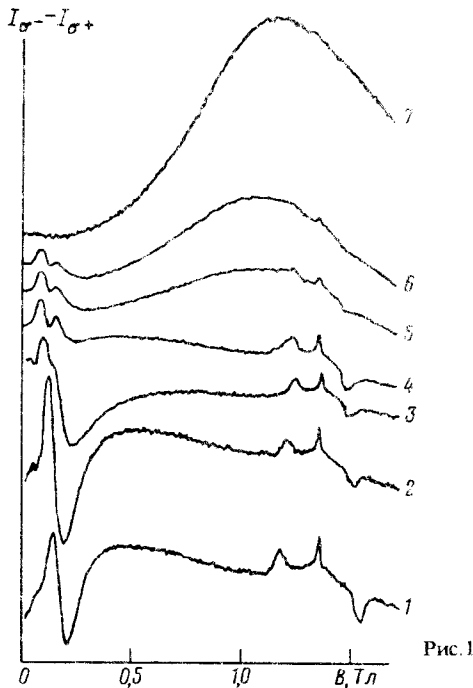


Рис.1

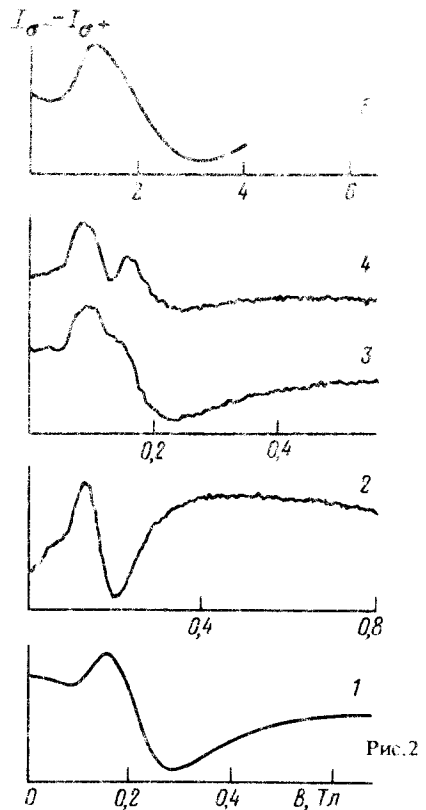


Рис.2

Рис.1. Зависимости сигнала циркулярной поляризации люминесценции от магнитного поля в СР GaAs/AlAs с градиентом состава в плоскости решетки (образец E913) при последовательном смещении возбуждающего луча по образцу из области типа II в область типа I: кривая 1 - $x = 0$, 2 - $x = 8$ мм, 3 - $x = 12$ мм, 4 - $x = 16$ мм, 5 - $x = 17,5$ мм, 6 - $x = 19$ мм, 7 - $x = 21$ мм, $T = 1,6$ К, $\mathbf{B} \parallel [001]$, $\nu = 35$ ГГц, $P = 500$ мВт

Рис.2. Сигналы антипересечения экситонных уровней, или АК, в образцах E219 (кривая 1), и E913 в области типа II (кривая 2), в участках, приближающихся к переходу тип II - тип I (кривые 3, 4) и в области СР типа I (кривая 5). Масштаб по магнитному полю нормирован на величину обменного расщепления ϵ_2 ; $T = 1,6$ К $\mathbf{B} \parallel [001]$

перемещении возбуждающего луча из области типа II (1) к области типа I (7). В спектрах наблюдаются типичные для СР типа II [1-4] линии ОДМР свободных электронов и пары линий экситонов (кривые 1-6, $B = 1,1 - 1,6$ Тл), а также сигналы АК при $B = 0 - 0,3$ Тл, не зависящие от СВЧ поля. Следует отметить, что линия ОДМР электронов с характерным для СР типа II g -фактором (около 1,9) наблюдается вплоть до области, соответствующей СР типа I.

ОДМР и АК экситонов может быть описан спин-гамильтонианом:

$$\hat{H} = \beta B \hat{g}_e S_e + \beta B \hat{g}_h S_h + S_h \hat{c} S_e, \quad (1)$$

где первые два члена - энергии зеемановского взаимодействия электрона и дырки в магнитном поле B , а последний член - их обменное взаимодействие, характеризуемое тензором \hat{c} ; β - магнетон Бора, $S_e = 1/2$, $S_h = 1/2$ - эффективный g -фактор дырки. Из-за низкой симметрии СР дырочные уровни

$J = \pm 3/2$ и $J = \pm 1/2$ расщеплены более чем на 10 мэВ, причем при 1,6К населен только уровень $J = \pm 3/2$.

При переходе от СР типа II к СР типа I наблюдается падение интенсивности сигналов ОДМР и низкопольных сигналов АК (кривые 3-6 на рис.1), в области перехода тип II - тип I изменяется форма АК (кривые 2-6). При приближении к области типа I в зависимости циркулярной поляризации люминесценции от магнитного поля появляются широкие сигналы в высоких магнитных полях (кривые 5-7).

На рис.2 приведены сигналы АК экситонов в образце E219 (18/12Å) - СР, близкой к переходу тип II - тип I (кривая 1), а также в различных участках образца E913, соответствующих СР типа II (кривая 2) и последовательно приближающихся к области перехода (кривые 3 и 4). Масштаб по магнитному полю для каждого спектра обратно пропорционален константе изотропного обменного расщепления экситонов c_x , полученной из соответствующих спектров ОДМР. Показан также АК в области СР типа I (кривая 5).

Для образца E219 величина изотропного обменного расщепления $c_x/2$ "экситонов II", полученная из спектров ОДМР, равна 17мкэВ. Для образца E913 $c_x/2 = 20$ мкэВ при $x = 0$ и 14мкэВ при $x = 16$ мм. Эти результаты согласуются с измеренными методами квантовых биений величинами расщепления между излучательными уровнями экситонов $(c_x + c_y)/2$ в этих образцах (9,3мкэВ для E219 и 6,5мкэВ для участка $x = 15,5$ мм образца E913) [6].

Сигналы АК в СР типа II вдали и вблизи от перехода тип II-тип I существенно различаются. Это видно из сравнения спектров 1 и 2 на рис.2, полученных в образцах E219 и E913 ($x = 0$), в которых величины c_x близки. В переходной области II-I образца E913 наблюдается дополнительное расщепление сигналов АК. Как следует из оптических измерений, в переходной области образца E913 ($x = 14-19$ мм) излучательное время жизни τ изменяется от 20 до 0,3нс, для образца E219 $\tau = 10$ нс. Для наблюдения ОДМР требуется большее излучательное время жизни (обычно более 100нс). В СР типа II, исследованных в [4,5], это время равно 1-10мкс. Ограничения связаны с условием $\gamma H_1 \geq \tau$, где γ - гиромагнитное отношение для электрона, H_1 - амплитуда микроволнового поля на образце. Для регистрации сигналов АК такие ограничения отсутствуют. Как видно из рис.1 и 2, в области перехода тип II-тип I появляются особенности в спектрах АК, которые могут быть объяснены сосуществованием "экситонов II" и характерных для переходной области "экситонов II-I" с большим обменным расщеплением и меньшим временем жизни. Сигналы ОДМР "экситонов II-I" не наблюдаются, по-видимому, из-за малого времени жизни.

Форма широких сигналов в полевой зависимости циркулярной поляризации люминесценции в СР типа I подобна форме сигналов АК в СР типа II. Такие сигналы наблюдались нами и в других СР типа I. Можно предположить, что они принадлежат АК "экситонов I" с намного большим обменным расщеплением, и оценить его величину. При этом следует учесть, что в СР типа I отсутствует обменное расщепление между двумя излучательными уровнями экситонов и существенно изменяется g -фактор электронов g_e ; g -фактор дырок $g_h = 2,6$ в образце E913 был определен из экспериментов по квантовым биениям и оптической ориентации, что хорошо согласуется с полученной в [5] общей зависимостью g_h от толщины слоя GaAs. Расчеты с использованием спин-гамильтониана (1) дают оценки обменного расщепления ($c_x/2 \approx 150$ мкэВ)

и g -фактора $g_e \approx 0,9$, и объясняют наблюдаемые ориентационные зависимости сигналов АК. Полученная оценка g_e для СР с ямой 21 \AA находится в разумном соответствии с результатами [9].

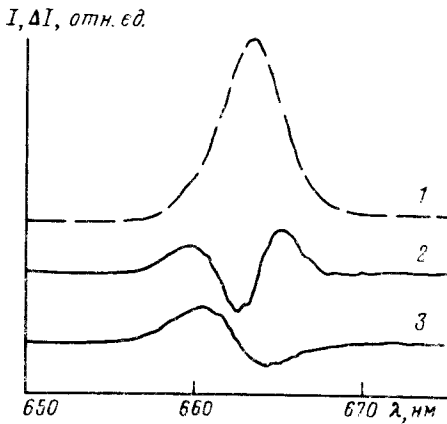


Рис.3. Спектр люминесценции (1) и спектральные зависимости сигнала, соответствующего нерезонансному воздействию СВЧ поля на интенсивность σ^- компоненты люминесценции, в СР GaAs/AlAs типа II (17,4/26Å) при интенсивности возбуждающего света 10 мВт (2) и 0,5 мВт (3); $B = 1 \text{ Тл}$, $\nu = 35 \text{ ГГц}$, $P = 500 \text{ мВт}$, $f = 280 \text{ Гц}$, $T = 1,6 \text{ К}$

В настоящей работе впервые исследовано влияние СВЧ поля на люминесценцию СР GaAs/AlAs. На рис.3 приведены спектр люминесценции СР типа II (кривая 1), а также спектральные зависимости сигнала, соответствующего изменению интенсивности люминесценции при модуляции СВЧ мощности, полученные при разном уровне оптического возбуждения (кривые 2,3). Такие нерезонансные фоновые сигналы, наблюдаемые обычно в ОДМР полупроводников и связанные с действием электрической компоненты СВЧ поля, используются в последнее время для исследования природы люминесценции и оптической регистрации циклотронного резонанса [11,12]. Различное воздействие СВЧ поля на разные области линии излучения СР и его зависимость от интенсивности возбуждения свидетельствуют о различной природе излучения. Уменьшение интенсивности люминесценции под действием СВЧ поля объясняют обычно ударной ионизацией связанных экситонов [12], которая приводит к увеличению интенсивности излучения свободных экситонов и рекомбинации с участием свободных электронов. Выяснение корреляции полученных зависимостей со спектральными зависимостями ОДМР и магнитной циркулярной поляризации люминесценции требует дополнительных исследований.

Таким образом, особенности поведения ОДМР и АК позволили обнаружить три вида экситонов с параметрами, характерными для СР типа II, типа I и переходной области. В СР типа II электрон и дырка локализованы в разных слоях, поэтому экситон характеризуется большим (более 1 пкс) временем жизни и малым обменным взаимодействием. В области II-I энергии дна зоны проводимости в барьере (AlAs) и яме (GaAs) вырываются, что может привести к туннелированию электрона между барьерами через яму. При этом уменьшается время жизни и увеличивается обменное взаимодействие. Локализация электрона и дырки в одном слое GaAs в СР типа I приводит к малому (менее 1 нс) времени жизни и намного большему (более, чем на порядок) обменному взаимодействию. Насколько нам известно, величина обменного взаимодействия в СР типа I измерена в настоящей работе впервые.

Авторы благодарны Е.Л.Ивченко и В.Ф.Сапеге за полезные дискуссии и

1. H.W.van Kesteren, E.C.Cosman, W.A.J.A. van der Poel, and C.E.Foxon, *Phys. Rev.* **B41**, 5283 (1990).
2. J.M.Trombetta, T.A.Kennedy, D.Farmon, et al. *Material Science Forum* **83-87**, 1361 (1991).
3. P.G.Baranov, P.Lavallard, R.Pianel and N.G.Romanov, *Superlattices and Microstructures* **12**, 327 (1993).
4. P.G.Baranov, I.V.Mashkov, N.G.Romanov, et al. *Solid State Commun.* (1993), in press (accepted 04.1993).
5. W.A.J.A. van der Poel, A.L.G.J. Severens and C.T.Foxon, *Optics Commun.* **76**, 116 (1990).
6. C.Gourdon and P.Lavallard, *Phys. Rev.* **B46**, 4644 (1992).
7. E.L.Ivchenko, V.P.Kochereshko, A.Yu.Naurov, et al. *Superlattices and Microstructures* **10**, 497 (1991).
8. P.G.Baranov and N.G.Romanov, *Appl. Magh. Resonance*, **2**, 361 (1992).
9. Е.Л.Ивченко, А.А.Киселев, *ФТП* **26**, 1471 (1992).
10. И.Г.Баранов, Ю.П.Вещунов, Р.А.Жигников и др. *Письма в ЖЭТФ*, **26**, 369 (1977).
11. A.Moll, C.Wetzel, B.K.Meyer, et al., *Phys. Rev.* **B45**, 1504 (1992).
12. H.Weman, M.Godlevski, and B.Monemar, *Phys. Rev.* **B38**, 12525 (1988).