

ОБМЕННЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭКСИТОНОВ, ЛОКАЛИЗОВАННЫХ НА ПРОТИВОПОЛОЖНЫХ ИНТЕРФЕЙСАХ В СВЕРХРЕШЕТКАХ GaAs/AlAs ТИПА II: ОДМР И АНТИКРОССИНГ УРОВНЕЙ

П.Г.Баранов, Н.Г.Романов, А.Хофштеттер*, А.Шарманн*^{1,2)},
К.Шнорр*²⁾, Ф.Й.Алерс^{+ 2)}, К.Пирц^{+ 2)}

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

* *Physics Institute, University of Giessen*
D 35392 Giessen, Germany

+ *Physikalische-Technische Bundesanstalt*
Braunschweig, Germany

Поступила в редакцию 15 октября 1996 г.

В сверхрешетках GaAs/AlAs типа II одновременно зарегистрированы два типа экситонов, локализованных на противоположных интерфейсах и характеризующихся разными величинами обменных взаимодействий при одинаковых энергиях излучения. Показано, что дополнительная длинноволновая линия люминесценции в сверхрешетках, выращенных с прерываниями роста после слоев GaAs, обусловлена рекомбинацией экситона, локализованного на инвертированном интерфейсе в областях с увеличенной на монослой шириной квантовой ямы.

PACS: 73.20.-г; 76.70.Нв; 78.66.Fd

Совершенствование микроструктуры полупроводниковых интерфейсов остается одной из наиболее важных проблем как для физики низкоразмерных структур, так и для применений этих структур в полупроводниковых приборах. В сверхрешетках (СР) GaAs/AlAs типа II экситоны локализируются на интерфейсах (экситон образуется из X-электрона в слое AlAs и Г-дырки в слое GaAs) и, следовательно, несут существенную информацию о микроструктуре последних. Поскольку методы радиоспектроскопии – оптическое детектирование магнитного резонанса (ОДМР) и антикроссинга уровней (АКУ) – дают информацию об энергетических уровнях экситонов с субмикроскопическим разрешением [1–4], представляется перспективным их использование для разработки прецизионных методов контроля интерфейсов [4].

В настоящей работе в СР GaAs/AlAs типа II, выращенных как без прерывания, так и с прерыванием роста слоев AlAs или GaAs, обнаружены два типа экситонов, локализованных на противоположных интерфейсах и характеризующихся разными величинами обменных расщеплений. Показано, что величины обменных расщеплений и их спектральные зависимости в пределах линий люминесценции отражают особенности структуры интерфейсов и существенно зависят от методики роста СР.

Исследовались три СР, имеющие одинаковую номинальную структуру: 50 периодов, состоящих из 17.3Å GaAs и 26.5Å AlAs. Толщины слоев соответствовали наиболее изученному нами ранее образцу В223 [2, 3]. Выращивание

¹⁾ Почетный член Физико-технического института им. А.Ф.Иоффе РАН.

²⁾ A.Hofstaetter, A.Scharmann, C.Schnorr, F.J.Ahlers, K.Pierz.

проводилось методом молекулярной пучковой эпитаксии (МВЕ) на (001) подложке из полуизолирующего GaAs при температуре 600°C. Образец P90 был выращен без прерываний роста, P91 – с 50-секундными прерываниями роста после слоев AlAs, и P92 – с 50-секундными прерываниями роста после слоев GaAs. ОДМР и АКУ изучались при температуре 1.5–10 К по люминесценции, возбуждаемой аргоновым лазером и регистрируемой вдоль магнитного поля, направленного перпендикулярно плоскости (001) СР.

Линия люминесценции образца P90 приведена на рис.1а. Штриховой линией показана та же люминесценция, зарегистрированная с меньшим спектральным разрешением, при котором исследовались ОДМР и АКУ. Спектр ОДМР, полученный по циркулярной поляризации люминесценции на длине волны, отмеченной меткой 2, представлен на рис. 1б. Расщепление между двумя линиями ОДМР экситонов пропорционально обменному расщеплению, между этими линиями наблюдается слабый сигнал электронов. Сигналы ОДМР экситонов практически не изменялись при регистрации на других длинах волн в пределах линии люминесценции, что, по-видимому, свидетельствует о высоком качестве и однородности образца P90. Ранее в образце В223, характеризующемся более широкой линией люминесценции, наблюдалась существенная спектральная зависимость величин обменных расщеплений экситонов [2].

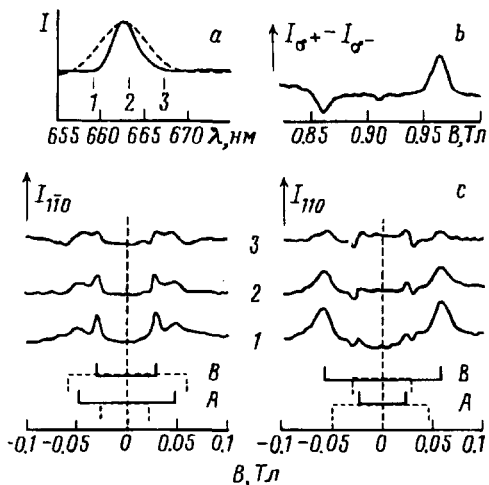


Рис.1. Спектры люминесценции (а) ОДМР (б) и антикроссинга уровней (с) в СР GaAs/AlAs (образец P90), полученной без прерываний роста. На а вертикальными линиями и цифрами обозначены длины волн, на которых регистрировались спектры АКУ; пунктирной линией показан спектр люминесценции со спектральным разрешением, соответствующим регистрации ОДМР и АКУ. ОДМР зарегистрирован по циркулярной поляризации, а АКУ – по интенсивности линейно поляризованных компонент люминесценции. "Прямые" АКУ отмечены сплошными линиями, "непрямые" – штриховыми линиями. $\nu = 24\text{ГГц}$, $T = 1.5\text{К}$, $B \parallel [001]$

Более информативными оказались спектры АКУ, зарегистрированные по интенсивности компонент люминесценции, линейно поляризованных вдоль осей $[1\bar{1}0]$ или $[110]$ СР. Спектры 1-3 на рис.1с получены на длинах волн, отмеченных метками 1-3 на рис.1а. Магнитное поле изменялось по величине от отрицательных значений (поле противоположно оси z, то есть направлению роста СР) до положительных (поле направлено по оси z). Как видно из рисунка, сигналы АКУ, зарегистрированные по компонентам люминесценции, поляризованным вдоль направлений $[1\bar{1}0]$ и $[110]$, резко отличаются. Наблюдается также существенная спектральная зависимость сигналов АКУ.

Чтобы понять полученные спектры АКУ, рассмотрим приведенную на рис.2а схему энергетических уровней экситона, локализованного на нормальном (AlAs на GaAs) интерфейсе. Символами Δ и δ обозначены расщепления между пара-

ми излучательных и безызлучательных уровней и расщепление излучательных уровней экситона, соответственно. Связь направления излучательного диполя, соответствующего нижнему излучательному уровню экситона, с определенным типом интерфейса была установлена ранее в [5] при исследовании специально рассчитанных асимметричных сверхрешеток .

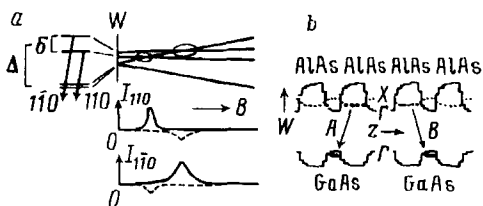


Рис.2. а) Схема энергетических уровней и сигналы АКУ для экситонов, локализованных на нормальном интерфейсе в СР GaAs/AlAs. "Прямые" сигналы АКУ показаны сплошной линией, "непрямые" - штриховыми линиями. б) Энергетическая структура СР, рассчитанная с использованием композиционного профиля из [8] и схема рекомбинации на нормальном (А) и инвертированном (В) интерфейсе

При антикроссинге безызлучательного уровня с излучательным изменяется интенсивность люминесценции, линейно поляризованной в направлении излучательного диполя этого излучательного уровня. Будем называть такой сигнал АКУ "прямым". Как видно из рис.2а, для экситона на нормальном интерфейсе эти направления - $[110]$ и $[1\bar{1}0]$ для первого и второго антикроссинга, соответственно. В магнитном поле, соответствующем антикроссингу одного из излучательных уровней, возможно изменение населенности второго излучательного уровня и, следовательно, изменение интенсивности излучения с ортогональной поляризацией. При этом появляется сигнал АКУ, который мы будем называть "непрямым". При нерезонансной накачке и при условии, что излучательное время жизни меньше безызлучательного, "прямой" АКУ соответствует увеличению, а "непрямой" - уменьшению интенсивности излучения. Это подтверждается также решением кинетических уравнений из работы [6]. На рис.2а сигналы "прямых" АКУ изображены сплошной линией, а "непрямых" - штриховой. Экситоны, локализованные на противоположных интерфейсах, имеют взаимно ортогональные поляризации излучающих диполей, поэтому схема энергетических уровней и сигналы АКУ для экситона, локализованного на инвертированном интерфейсе (GaAs на AlAs), получаются из схемы рис.2а заменой местами поляризаций $[1\bar{1}0]$ и $[110]$. Рекомбинация на противоположных интерфейсах схематически показана на рис.2б.

В приведенных на рис.1с спектрах АКУ наблюдаются по две линии, соответствующие увеличению интенсивности люминесценции и отличающиеся для двух направлений линейной поляризации как по положению в магнитном поле, так и по амплитуде. Поляризация сигналов "прямого" антикроссинга позволяет выделить в спектрах АКУ линии экситонов, локализованных на нормальном и на инвертированном интерфейсе (А и В на рис.1с). При этом экситоны В, локализованные на инвертированном интерфейсе, характеризуются существенно большим обменным расщеплением по сравнению с экситонами А, локализованными на нормальном интерфейсе. На коротковолновом краю линии люминесценции интенсивность сигналов АКУ экситонов типа А (I_A) намного меньше по сравнению с экситонами типа В (I_B), то есть $I_A/I_B < 1$. При возрастании длины волны отношение I_A/I_B увеличивается. На длинноволновом краю линии люминесценции усиливаются сигналы "непрямого" антикроссинга для каждого экситона. В спектре ОДМР (рис.1б) проявляется, главным

образом, экситон типа *B*, хотя асимметрия линий ОДМР свидетельствует о наличии также сигналов экситонов с меньшим обменным расщеплением.

Результаты исследования ОДМР и АКУ в СР Р91, выращенной с прерываниями роста после слоев AlAs, подобны приведенным для Р90, но линия люминесценции несколько уже и отношение I_A/I_B меньше, чем в Р90. Таким образом, как и следовало ожидать, прерывание роста после слоев AlAs не вызвало существенного изменения интерфейсов.

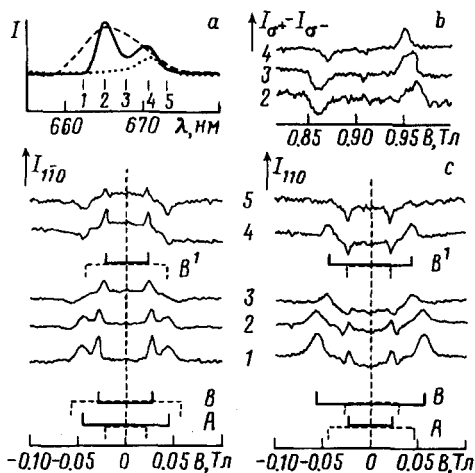


Рис.3. Спектры люминесценции, ОДМР и АКУ в образце Р92, выращенном с 50-секундными прерываниями роста после слоев GaAs. Обозначения и условия регистрации те же, что для рис.1. Точечной линией на рис.3а показан спектр люминесценции при температуре 10 К. Цифрами 1-5 обозначены длины волн, на которых регистрировались спектры ОДМР и АКУ

Совершенно иная ситуация реализуется в случае прерывания роста после слоев GaAs. На рис.3 приведены спектры люминесценции (а), ОДМР (b) и АКУ (с), полученные в образце Р92, выращенном с прерываниями после слоев GaAs. В спектре люминесценции наряду с линией, практически совпадающей с линией люминесценции в образцах Р90 и Р91, появляется вторая линия люминесценции, смещенная в длинноволновую область. Важно подчеркнуть, что длинноволновая линия люминесценции видна и при повышении температуры, тогда как коротковолновая линия исчезает уже при температуре 10 К (см. спектр люминесценции, обозначенный точечной линией на рис.3а). Поведение и параметры спектров ОДМР и АКУ, зарегистрированных в пределах коротковолновой линии люминесценции в Р92, подобны рассмотренным для Р90 и Р91, однако отношение I_A/I_B заметно больше, и в спектре ОДМР наблюдаются сигналы как экситонов *B*, так и экситонов *A*. При увеличении длины волны и переходе к длинноволновой линии люминесценции происходит скачкообразное уменьшение обменного расщепления экситонов типа *B* и исчезновение сигналов ОДМР и АКУ экситонов типа *A*. Двойная линия люминесценции и скачок обменных расщеплений в спектрах ОДМР СР, выращенных с прерываниями роста после GaAs, наблюдались ранее в [4].

Анализ спектров ОДМР и АКУ с использованием спин-гамильтониана экситона [2], дает следующие параметры.

Образец Р90, люминесценция 663 нм, экситон *A*: $g_e = 1.88$, $g_h = 2.8$, $\Delta = 4.7$ мкэВ, $\delta = 2.7$ мкэВ, экситон *B*: $g_e = 1.88$, $g_h = 2.8$, $\Delta = 5.6$ мкэВ, $\delta = 3.2$ мкэВ, где g_e и g_h — электронный и дырочный g -факторы, Δ и δ — показанные на рис.2а обменные расщепления, расщепление между безызлуча-

тельными уровнями мало. Величины и соотношение обменных расщеплений экситонов A и B для образца P91 близко к полученному для P90.

Образец P92, линия люминесценции 665 нм, экситон A : $g_e = 1.88$, $g_h = 2.8$, $\Delta = 4.4$ мкэВ, $\delta = 2.2$ мкэВ, экситон B : $g_e = 1.88$, $g_h = 2.8$, $\Delta = 5.5$ мкэВ; $\delta = 3.2$ мкэВ, линия 670 нм, экситон B^1 : $g_e = 1.88$, $g_h = 2.8$, $\Delta = 4.35$ мкэВ, $\delta = 2.3$ мкэВ.

Таким образом, для близких по длине волны линий люминесценции в P90, P91 и коротковолновой линии в P92 параметры экситонов также близки. Для длинноволновой линии люминесценции в P92 величины обменных расщеплений экситонов типа B уменьшены примерно на 20%.

Для объяснения различия обменных расщеплений экситонов, локализованных на противоположных интерфейсах, были проведены расчеты волновых функций электронов и дырок с учетом различия композиционных профилей интерфейсов (изменения средней концентрации Al), которое возникает вследствие преимущественной поверхностной сегрегации галлия в процессе роста CP [7,8]. Расчеты проводились методом огибающей волновой функции с использованием программы ECA4 [9] и композиционных профилей интерфейсов из [8] для CP, в которых локализация экситона на определенном интерфейсе достигалась выбором модельных асимметричных структур подобно работе [5]. Рассчитанная зонная структура CP приведена на рис.2b. Расчет показал, что переходы $X_z - \Gamma$ между уровнями X_z -электрона в AlAs и Γ -дырки в GaAs для случаев A и B имеют одинаковую энергию, а квадраты интегралов перекрытия $\langle X_z | \Gamma \rangle^2$, которые примерно пропорциональны обменному расщеплению Δ , приблизительно на 20% больше для инвертированного интерфейса, чем для нормального. Это изменение близко к наблюдаемому в эксперименте соотношению значений Δ экситонов A и B . При увеличении толщины GaAs на монослой значение $\langle X_z | \Gamma \rangle^2$ для экситонов типа B уменьшается, причем это уменьшение соответствует полученному в эксперименте уменьшению Δ экситонов B^1 по сравнению с экситонами B . При этом энергия перехода $X_z - \Gamma$ уменьшается на величину, близкую к расщеплению линий в P92.

В CP, выращенных с прерыванием роста после GaAs, изменяется только нормальный интерфейс, причем предполагается, что появляются области, в которых средняя толщина GaAs увеличена примерно на монослой. Инвертированный интерфейс остается без изменения. При этом линия излучения экситона сдвигается в длинноволновую область (вторая линия люминесценции на рис.3a) и обменное расщепление уменьшается, поскольку период решетки в месте локализации экситона увеличивается на один монослой GaAs. Возможное изменение g -фактора дырки лежит в пределах экспериментальной ошибки. Спектры АКУ (4,5 на рис.3c) показывают, что экситоны остаются на инвертированном интерфейсе и практически пропадают на нормальном. Следует добавить, что такая локализация экситона энергетически выгодна, о чем свидетельствует температурная зависимость спектра люминесценции: при повышении температуры наблюдается только длинноволновая линия люминесценции, то есть экситоны локализуются главным образом именно на инвертированном интерфейсе в области CP с увеличенным периодом. Возможно, отсутствие корреляции при росте последовательных слоев CP приводит к тому, что над областью с увеличенной на монослой толщиной GaAs толщина слоя AlAs уменьшена. Уменьшение вероятности локализации экситона на нормальном интерфейсе в этих областях может быть также связано с улучшением качества

нормального интерфейса. При низкой температуре сосуществуют экситоны, локализующиеся в областях СР, не претерпевших существенных изменений в результате прерывания роста слоя GaAs (соответствующие коротковолновой линии люминесценции), и экситоны, локализованные на инвертированном интерфейсе в измененных частях СР.

Согласно спектральным зависимостям сигналов ОДМР и АКУ (рис.1 и 3), в пределах линии люминесценции наблюдается некоторое перераспределение экситонов, локализованных на противоположных интерфейсах: с увеличением длины волны увеличивается относительная концентрация экситонов, локализованных на нормальном интерфейсе. На длинноволновом краю линии люминесценции более выражены "непрямые" АКУ, что свидетельствует об изменении соотношений между излучательными временами и временами релаксационных процессов между уровнями. По-видимому излучательное время увеличивается, тогда как времена релаксационных процессов не изменяются.

Авторы выражают благодарность Б.П.Захарчене и Б.К.Майеру (В.К.Мейер) за полезные дискуссии и интерес к работе. Исследования в ФТИ им.А.Ф.Иоффе частично поддержаны Фондом Фольксвагена (проект I/70958) и Российским фондом фундаментальных исследований (проект 96-02-16927).

-
1. H.W.van Kesteren, E.C.Cosman, W.A.J.A. van der Poel, and C.T.Foxon, *Phys.Rev.* **B41**, 5283 (1990).
 2. P.G.Baranov, I.V.Mashkov, N.G.Romanov et al., *Solid State Commun.* **87**, 649 (1993).
 3. P.G.Baranov and N.G.Romanov, *Proc. 22nd Int. Conf. on the Physics of Semiconductors (Vancouver, Canada, 1994)*, Ed. D.J.Lockwood, World Scientific, 1994, v.2, p.1400.
 4. П.Г.Баранов, Н.Г.Романов, И.В.Машков и др., *ФТТ* **37**, 2991 (1995).
 5. П.Г.Баранов, И.В.Машков, Н.Г.Романов и др., *Письма в ЖЭТФ* **60**, 429 (1994).
 6. Е.Л.Ивченко, А.Ю.Каминский, *ФТТ* **37**,1418 (1995).
 7. M.H.Bode and A.Ourmarzd, *J. Vac. Sci. Technol.* **10**, 1787 (1992).
 8. B.Jusserand and F.Mollot, *Appl. Phys. Lett.* **61**, 423 (1992).
 9. R.Tessier, *Thèse de Doctorat de l'Université Paris VI*, 1992.