

Фотолюминесцентные исследования двойных квантовых ям AlGaAs/GaAs/AlGaAs с тонким разделяющим AlAs-слоем

© Г.Б. Галиев, М.В. Карачевцева, В.Г. Мокеров, В.А. Страхов, Г.Н. Шкердин, Н.Г. Яременко¹

Институт радиотехники и электроники Российской академии наук,
103907 Москва, Россия

(Получена 22 мая 2002 г. Принята к печати 28 октября 2002 г.)

В диапазоне температур 77–300 К исследованы спектры фотолюминесценции системы из двух квантовых ям $\text{Al}_{0,21}\text{Ga}_{0,79}\text{As}/\text{GaAs}/\text{Al}_{0,21}\text{Ga}_{0,79}\text{As}$, разделенных тонким AlAs-барьером. Ширина ям менялась в пределах 65–175 Å, толщина AlAs-барьера составляла 5, 10 и 20 Å. При достаточно малой толщине AlAs-барьера (5, 10 Å) электронная связь между ямами заметно влияет на энергетический спектр квантовых состояний. Это приводит к смещению основной полосы фотолюминесценции, а на высокотемпературных спектрах — к появлению особенностей, обусловленных расщеплением уровней на симметричные и антисимметричные состояния. При толщине AlAs-барьера 20 Å структура представляет собой систему из двух изолированных асимметричных квантовых ям $\text{Al}_{0,21}\text{Ga}_{0,79}\text{As}/\text{GaAs}/\text{AlAs}$. Проведен расчет энергии уровней в двойных связанных ямах в зависимости от ширины ямы и толщины AlAs-барьера, и получено хорошее согласие наблюдаемых в эксперименте энергий оптических переходов с расчетными значениями.

1. Введение

Двойные квантовые ямы (ДКЯ), представляющие собой систему из двух квантовых ям, разделенных тонким (в несколько монослоев) слоем из другого материала, являются объектом экспериментальных и теоретических исследований на протяжении трех последних десятилетий. Проведение этих исследований первоначально было тесно связано с проблемой создания и использования полупроводниковых сверхрешеток, поскольку система из двух связанных ям может рассматриваться как простейшая ячейка сверхрешетки.

В последнее время интерес к таким системам усилился в связи с появлением работ, в которых предсказываются новые эффекты в ДКЯ и рассматриваются различные аспекты их применения в приборах микро- и оптоэлектроники: увеличение подвижности за счет уменьшения скорости электрон-фононного рассеяния; инверсия электронной населенности между квантовыми подзонами и связанная с этим стимулированная эмиссия [1,2].

Следует отметить, что большинство исследований выполнено на ДКЯ AlGaAs/GaAs/AlGaAs с тонким разделяющим AlGaAs-слоем того же состава, что и основные барьеры. Для этой системы достаточно хорошо изучены электрические и оптические свойства, в частности, исследованы спектры фотолюминесценции в зависимости от толщины AlGaAs-барьера и показано, что связь между волновыми функциями электронов в ямах сильно влияет на энергетический спектр локализованных состояний ДКЯ вплоть до толщин AlGaAs-барьера в 40 Å [3].

Гораздо менее изучена система ДКЯ AlGaAs/GaAs/AlGaAs, в которой в качестве разделяющего барьера используется тонкий AlAs-слой, непроницаемый для фононов. В этой системе предсказано заметное уменьшение электрон-фононного рассеяния и улучшение транспортных характеристик [4]. При этом

необходимо обеспечить, чтобы AlAs-барьер, являясь „фононной стенкой“, оставался туннельно-прозрачным для электронов. Поэтому при конструировании ДКЯ AlGaAs/GaAs/AlGaAs с AlAs-барьером важным этапом является изучение электронных состояний в зависимости от основных параметров структуры: толщины AlAs-слоя, ширины ям и высоты основных барьеров $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. Одним из наиболее информативных методов изучения особенностей энергетического спектра носителей в полупроводниках является фотолюминесцентная спектроскопия. Измерения спектров фотолюминесценции при низких температурах позволяют с большой точностью определить энергию основного состояния в квантовой яме, а при более высоких температурах — энергии возбужденных состояний.

В данной работе нами была поставлена задача провести температурные измерения спектров фотолюминесценции (ФЛ) ДКЯ $\text{Al}_{0,21}\text{Ga}_{0,79}\text{As}/\text{GaAs}/\text{Al}_{0,21}\text{Ga}_{0,79}\text{As}$ с различной толщиной AlAs-барьера в зависимости от ширины квантовых ям и сопоставить их с расчетом энергетического спектра локализованных состояний в этой системе. Ранее о фотолюминесцентных исследованиях подобных структур сообщалось в работах [5,6]. Однако в этих работах имеется значительное расхождение экспериментальных результатов с расчетом. Причиной этого расхождения, по-видимому, является то, что для простоты расчета квантовых уровней авторы использовали некоторые допущения, такие как постоянство эффективных масс во всех слоях [5] или бесконечность высоты AlAs-барьера [6]. В нашей работе сделана попытка провести более строгий расчет, учитывающий реальные параметры всех слоев, формирующих ДКЯ.

2. Эксперимент

Спектры ФЛ $I(h\nu)$ измерялись с помощью стандартной методики. Для возбуждения люминесценции использовался непрерывный аргоновый лазер с длиной волны

¹ E-mail: tg275@ms.ire.rssi.ru; spike@fryazino.net

излучения 488 нм; плотность мощности возбуждения менялась в диапазоне $10\text{--}10^3$ Вт/см². Образец находился в оптическом криостате, позволяющем изменять температуру образцов от температуры жидкого азота до комнатной. В качестве фотоприемника использовался фотоумножитель ФЭУ-62.

Исследованные структуры были выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках GaAs с ориентацией (100), на которую последовательно наносились нелегированные слои: буферный слой GaAs (0.5 мкм); нижний барьерный слой Al_{0.21}Ga_{0.79}As (310 Å); слой GaAs, служащий материалом квантовой ямы; верхний барьерный слой Al_{0.21}Ga_{0.79}As (310 Å); слой GaAs (80 Å) на поверхности структуры. Температура роста слоев GaAs и AlAs составляла 600°C, а слоев Al_{0.21}Ga_{0.79}As — 640°C; соотношение потоков мышьяка и галлия в зоне роста равнялось 30. Наряду с симметричными одиночными квантовыми ямами (ОКЯ) AlGaAs/GaAs/AlGaAs выращивались двойные квантовые ямы, которые отличались от одиночных наличием в центре GaAs-ямы тонкого AlAs-слоя, разделяющего ее на две асимметричные ямы AlGaAs/GaAs/AlAs равной ширины. Профиль дна зоны проводимости ДКЯ схематически изображен на вставке рис. 1. Исследовались структуры с различной шириной квантовых ям $L = 65\text{--}350$ Å и толщинами разделяющего AlAs-слоя $d = 5, 10$ и 20 Å. Параметры исследованных образцов с двойными и одиночными квантовыми ямами приведены в таблице.

3. Результаты расчета

В работе проведен расчет энергий электронных и дырочных уровней в ОКЯ и ДКЯ с теми же параметрами слоев, что и в исследованных структурах.

Уровни энергии в ямах получены с помощью решения уравнений Шредингера (трех для ОКЯ и пяти для ДКЯ) с учетом непрерывности на гетерограницах волновых функций и их первых производных. При расчете использовалось приближение изотропной параболической

Параметры структур и энергии максимума в спектре фотолюминесценции $h\nu_{\max}$

Структура	$L, \text{Å}$	$d, \text{Å}$	$h\nu_{\max}, \text{эВ}$
ОКЯ 61	65		1.552
ДКЯ 55	65	20	1.565
ДКЯ 62	65	5	1.552
ОКЯ 54	130		1.523
ДКЯ 46	130	20	1.528
ДКЯ 50	130	10	1.524
ДКЯ 56	130	5	1.520
ОКЯ 45	260		1.510
ДКЯ 52	90	20	1.546
ОКЯ 51	180		1.514
ДКЯ 59	175	20	1.516
ОКЯ 58	350		1.507

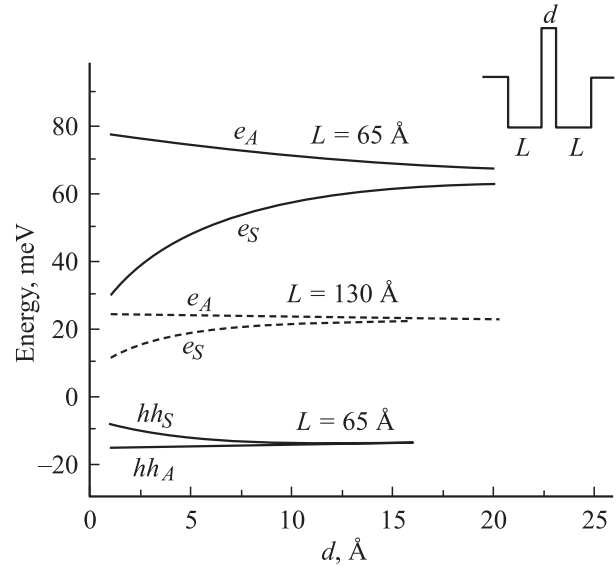


Рис. 1. Расчетные энергии электронных (e_s, e_A) и дырочных (hh_s, hh_A) уровней относительно краев запрещенной зоны GaAs в зависимости от толщины d AlAs-барьера в ДКЯ Al_{0.21}Ga_{0.79}As/GaAs/Al_{0.21}Ga_{0.79}As с шириной квантовых ям $L = 65$ Å (сплошные кривые) и $L = 130$ Å (штриховые). На вставке — профиль дна зоны проводимости.

зависимости энергии электронов и дырок от волнового вектора; соотношение разрывов зоны проводимости и валентной зоны $\Delta E_c/\Delta E_v$ принималось равным 0.6/0.4.

Для ОКЯ с асимметричными барьерами уровни энергии (E_n) для электронов и дырок определялись численным решением уравнения

$$\frac{(ik - \gamma_1 k_1)(ik - \gamma_2 k_2)}{(ik + \gamma_1 k_1)(ik + \gamma_2 k_2)} - \exp(2ikL) = 0,$$

где i — мнимая единица, $k = \sqrt{2mE_n}/\hbar$, $k_1 = \sqrt{2m_1(V_1 - E_n)}/\hbar$, $k_2 = \sqrt{2m_2(V_2 - E_n)}/\hbar$, V_1, V_2 — высоты барьеров AlGaAs и AlAs соответственно; m, m_1, m_2 — эффективная масса в яме GaAs, в барьере AlGaAs, в барьере AlAs соответственно; L — ширина квантовой ямы; $\gamma_1 = m/m_1$, $\gamma_2 = m/m_2$.

Для симметричных ОКЯ $k_2 = k_1$.

В случае ДКЯ после упрощений уравнение для расчета уровней имеет вид

$$\left[\left(\beta + \frac{ik}{\gamma_2 k_2} \right) / \left(\beta - \frac{ik}{\gamma_2 k_2} \right) \right]^2 - \exp(-2k_2 d) = 0,$$

где

$$\beta = \frac{\alpha \exp(-ikd/2) + \exp(ikd/2)}{\alpha \exp(-ikd/2) - \exp(ikd/2)},$$

$$\alpha = \frac{ik + \gamma_1 k_1}{ik - \gamma_1 k_1} \exp[ik(2L + d)],$$

L — ширина каждой из асимметричных ям, формирующих ДКЯ; d — толщина AlAs-барьера.

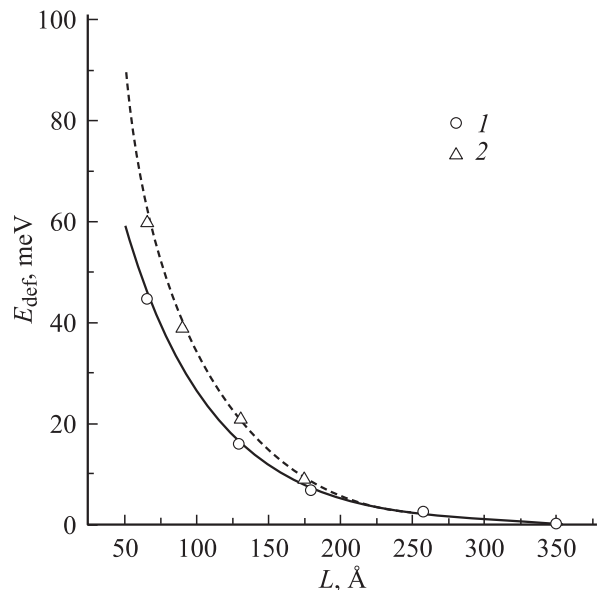


Рис. 2. Расчетные зависимости величины $E_{\text{def}} = h\nu_{\text{max}} - E_{\text{GaAs}}$ от ширины ямы для одиночных квантовых ям: сплошная линия — симметричные ОКЯ AlGaAs/GaAs/AlGaAs, штриховая — асимметричные ОКЯ AlGaAs/GaAs/AlAs. Точки — экспериментальные значения E_{def} для симметричных ОКЯ (1) и для ДКЯ с AlAs-барьером толщиной $d = 20 \text{ \AA}$ (2).

Результаты расчета для ДКЯ с ширинами ям $L = 65$ и 130 \AA приведены на рис. 1. При достаточно больших d , когда отсутствует связь между ямами в ДКЯ расчет дает значения энергии первого уровня в изолированной одиночной яме шириной L с асимметричными барьерами AlGaAs/GaAs/AlAs; с уменьшением толщины разделяющего барьера связь между ямами усиливается и происходит расщепление уровней на симметричные (e_S, hh_S) и антисимметричные (e_A, hh_A) состояния. В пределе при $d = 0$ ДКЯ становится одиночной симметричной ямой AlGaAs/GaAs/AlGaAs размером $2L$, а расщепленные состояния переходят в уровни $1e$ и $2e$ ($1hh$ и $2hh$) в этой яме. В промежутке между крайними случаями расчетные кривые описывают электронный спектр системы двух связанных асимметричных ям шириной L каждая. Видно, что связь между электронными волновыми функциями сильнее проявляется в ДКЯ с более узкими ямами. В системе ДКЯ с шириной ям $L = 130 \text{ \AA}$ уровни e_A и e_S сливаются, т.е. ямы перестают быть связанными, при толщинах AlAs-барьера $d \gtrsim 15 \text{ \AA}$. В квантовых ямах шириной $L = 65 \text{ \AA}$ при $d = 20 \text{ \AA}$ еще имеется небольшое расщепление электронных уровней ($\sim 5 \text{ мэВ}$). Расчет показывает, что дырочный уровень расщепляется значительно слабее, чем электронный; при $L = 130 \text{ \AA}$ расщепление практически отсутствует, поэтому кривые на рисунке не приводятся.

На рис. 2 приведены расчетные зависимости энергии максимума ФЛ ($h\nu_{\text{max}}$), соответствующего переходу $1e-1hh$, от ширины ямы для одиночных квантовых ям с симметричными и асимметричными ба-

рьерами: AlGaAs/GaAs/AlGaAs и AlGaAs/GaAs/AlAs. По оси ординат отложены дефициты энергии относительно ширины запрещенной зоны GaAs (E_{GaAs}), $E_{\text{def}} = h\nu_{\text{max}} - E_{\text{GaAs}}$, как это обычно принято при изучении спектра локализованных состояний в полупроводниковых квантово-размерных системах. Такое представление позволяет с большей точностью проводить сравнение эксперимента и расчетных энергий, чем при сравнении абсолютных значений. Кроме того, оно исключает температурную зависимость ширины запрещенной зоны GaAs и дает возможность сопоставлять спектры, измеренные при разных температурах.

Как видно из рис. 2, в асимметричных ямах энергия перехода $1e-1hh$ больше, чем в симметричных. Различие уменьшается с увеличением ширины ямы, и при $L > 150 \text{ \AA}$ становится несущественным.

4. Обсуждение результатов

На рис. 3, *a, b* представлены экспериментальные спектры ФЛ $I(h\nu)$, измеренные при температуре $T = 77 \text{ К}$. На каждом рисунке сравниваются спектры двух ДКЯ с одинаковой шириной ям L , отличающиеся толщиной AlAs-барьера (5 и 20 \AA), и спектр симметричной ОКЯ шириной $2L$. Спектры всех исследованных структур

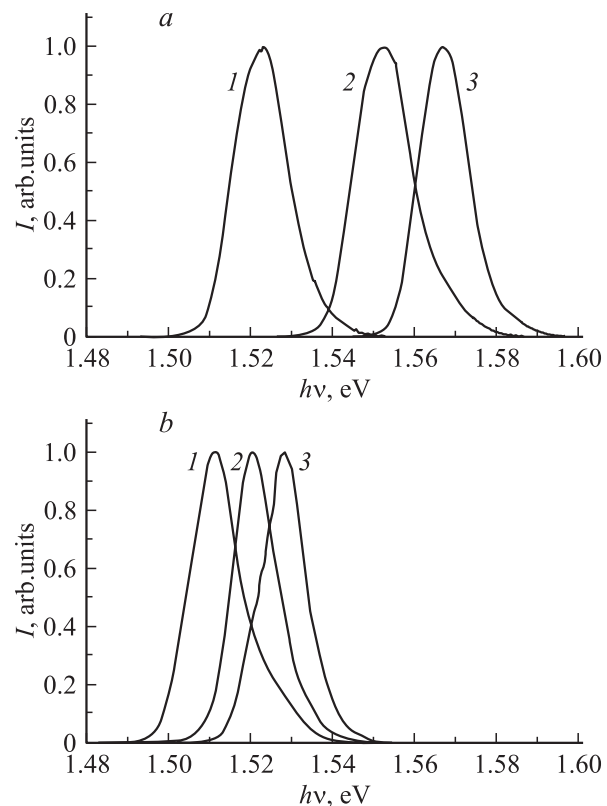


Рис. 3. Спектры фотолуминесценции при $T = 77 \text{ К}$ различных структур. *a*: 1 — $L = 130 \text{ \AA}$ (ОКЯ 54); 2 — $L = 65 \text{ \AA}$, $d = 5 \text{ \AA}$ (ДКЯ 62); 3 — $L = 65 \text{ \AA}$, $d = 20 \text{ \AA}$ (ДКЯ 55). *b*: 1 — $L = 260 \text{ \AA}$ (ОКЯ 45); 2 — $L = 130 \text{ \AA}$, $d = 5 \text{ \AA}$ (ДКЯ 56); 3 — $L = 130 \text{ \AA}$, $d = 20 \text{ \AA}$ (ДКЯ 46).

с двойными и одиночными ямами содержат интенсивную полосу, соответствующую переходу между основными состояниями: в ОКЯ — это переход $1e-1hh$, в ДКЯ — e_S-hh_S (экспериментальные значения энергии максимума $h\nu_{\max}$ основной полосы приведены в таблице). Форма этой полосы близка к симметричной, полуширина характерна для нелегированных квантовых ям (13–15 мэВ). Важно отметить, что спектры ДКЯ не отличаются по форме и полуширине от спектров ОКЯ и не содержат никаких особенностей, что подтверждает хорошее качество выращенных структур: резкость гетерограниц и равенство ширины ям, составляющих ДКЯ.

Для большинства структур при $T = 77$ К и высоких уровнях возбуждения кроме основной полосы в высокоэнергетической области спектра присутствовали очень слабые полосы, отстоящие от основной на 90–100 мэВ. По энергетическому положению эти полосы можно объяснить только переходами с участием виртуально связанных носителей — электронов и дырок в континууме, энергия которых близка к высоте основных барьеров ΔE_c и ΔE_v соответственно. Возможность люминесценции, обусловленная резонансным увеличением вероятности захвата на такие уровни, рассматривалась в работах [7,8]. В структурах с $L = 65$ Å энергия этих слабых полос (1.660 ± 0.003) эВ соответствует переходу между электронами в виртуально связанном состоянии и дырками на уровне $1hh$; в структурах с $L = 130$ Å они наблюдались при (1.610 ± 0.003) эВ, что соответствует переходам между виртуально связанными дырками и электронами на уровне $1e$. При высоких температурах эти полосы не наблюдались вследствие сильного температурного гашения люминесценции.

Для одиночных квантовых ям экспериментальные значения энергии максимумов $h\nu_{\max}$ спектральной интенсивности ФЛ согласуются с расчетом для ОКЯ с симметричными барьерами (сплошная кривая на рис. 2). Энергии $h\nu_{\max}$ спектров всех ДКЯ с толщиной AlAs-барьера $d = 20$ Å хорошо ложатся на расчетную кривую для асимметричных ОКЯ (штриховая кривая). Даже для ДКЯ с наименьшей шириной ям $L = 65$ Å, в которой, согласно расчету, еще сохраняется незначительное расщепление электронных уровней, энергия перехода отличается от расчетной энергии в асимметричной ОКЯ того же размера не более чем на 1–2 мэВ. Таким образом, можно считать, что при толщине AlAs-слоя $d = 20$ Å в исследованном диапазоне ширины ям 65–175 Å все ДКЯ представляют собой систему из двух изолированных асимметричных ям.

По мере уменьшения толщины AlAs-барьера ($d = 10$ и 5 Å) его туннельная прозрачность возрастает и в спектрах ФЛ наблюдаются изменения, вызванные усилением связи между электронными волновыми функциями в ДКЯ. Максимумы спектров сдвинуты относительно спектров ДКЯ с $d = 20$ Å в сторону более низких энергий. При высоких температурах проявляются особенности, связанные с расщеплением низших электронных и дырочных уровней. В соответствии с расчетом

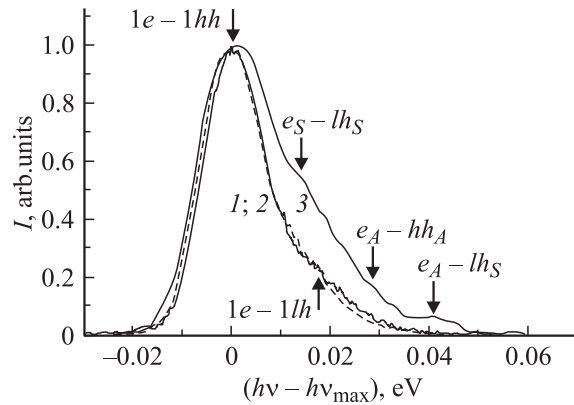


Рис. 4. Совмещенные по положению максимума спектры фотолуминесценции при $T = 180$ К для структур с шириной квантовых ям $L = 65$ Å: 1 (штриховая линия) — ОКЯ 61, 2 (сплошная линия) — ДКЯ 55 с $d = 20$ Å, 3 — ДКЯ 62 с $d = 5$ Å.

связь сильнее влияет на спектры ФЛ более узких ям: при $d = 5$ Å сдвиг спектрального максимума для ям шириной 65 и 130 Å составляет 15 и 8 мэВ соответственно (рис. 3, *a, b*). Эти значения хорошо согласуются с расчетной зависимостью энергии первого электронного уровня от толщины AlAs-барьера в связанных ямах, приведенной на рис. 1.

С ростом температуры максимум основной полосы ФЛ всех исследованных структур смещается в соответствии с температурным изменением ширины запрещенной зоны арсенида галлия и на ее коротковолновом фронте проявляются переходы, связанные с заполнением более высоких подуровней. Число и энергетическое положение этих переходов зависит от ширины ям, а в случае ДКЯ и от степени туннельной прозрачности разделяющего AlAs-барьера.

В узких ямах, в которых энергетическое расстояние между первым и вторым электронными уровнями велико, высокоэнергетические переходы могут быть обусловлены только заполнением более высоких дырочных состояний. На рис. 4 приведены совмещенные по положению максимумов спектры структур с одинаковой шириной квантовых ям $L = 65$ Å: ОКЯ и двух ДКЯ с разной толщиной AlAs-барьера. В спектрах ДКЯ с $d = 20$ Å, так же как и в спектре ОКЯ, с ростом температуры проявляется один и тот же переход $1e-1hh$, отстоящий на 18–19 мэВ от основной полосы, что совпадает с расчетом для изолированных ям. В спектре связанных ДКЯ с толщиной AlAs-барьера $d = 5$ Å, в которых расстояние между симметричными и антисимметричными состояниями, возникшими вследствие расщепления первого электронного уровня, составляет 26 мэВ, увеличение температуры позволило выявить переходы с участием этих состояний. Стрелками на рисунке показаны расчетные значения энергий этих переходов. В спектре довольно отчетливо проявляется переход между антисимметричным электронным и симметричным дырочным уровнями

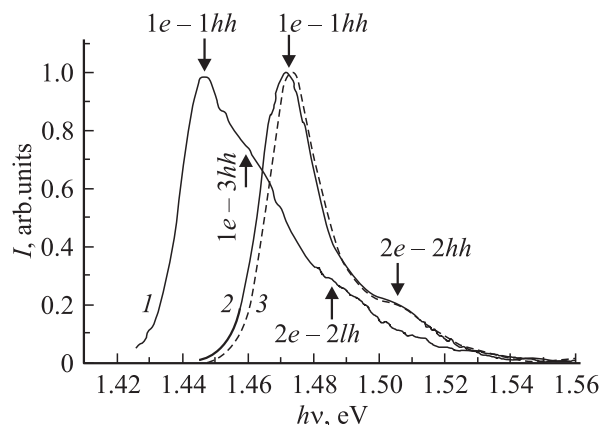


Рис. 5. Спектры фотолуминесценции: 1 — ОКЯ 45, $L = 260 \text{ \AA}$, $T = 250 \text{ K}$; 2 — ОКЯ 51, $L = 180 \text{ \AA}$, $T = 210 \text{ K}$; 3 — ДКЯ 59, $L = 175 \text{ \AA}$, $d = 20 \text{ \AA}$, $T = 210 \text{ K}$.

$e_A - lh_S$, запрещенный в идеально прямоугольной яме. Наблюдение этого перехода можно объяснить наличием встроенного поля, в присутствии которого правила отбора снимаются. Такое поле существует даже в нелегированных структурах за счет фоновой примеси [9].

В широких ямах становится возможным температурное заполнение второго электронного уровня. Переходы с этого уровня проявляются в высокотемпературных спектрах ФЛ структур с шириной ям 175 и 260 \AA (рис. 5).

5. Заключение

Проведенные исследования показали, что при введении AlAs-барьера достаточно малой толщины (5, 10 \AA) в центр квантовой ямы $\text{Al}_{0.21}\text{Ga}_{0.79}\text{As}/\text{GaAs}/\text{Al}_{0.21}\text{Ga}_{0.79}\text{As}$ электронная связь между ямами в ДКЯ заметно влияет на энергетический спектр квантовых состояний, что приводит к смещению основной полосы ФЛ, а в высокотемпературных спектрах — к появлению особенностей, обусловленных расщеплением уровней на симметричные и антисимметричные состояния. При толщине AlAs-барьера 20 \AA во всем исследованном диапазоне ширины ям ДКЯ представляет собой систему из двух изолированных ям с асимметричными барьерами AlGaAs/GaAs/AlAs. Отсутствие связи между ямами подтверждается полным совпадением спектров ФЛ со спектрами одиночных ям того же размера. Получено хорошее согласие наблюдаемых в эксперименте энергий оптических переходов с расчетными значениями.

Список литературы

- [1] J. Pozela, V. Juciene, K. Pozela. *Semicond. Sci. Technol.*, **10**, 1076 (1995).
- [2] Z. Moussa, P. Boucaud, F.H. Julien, Y. Lavon, A. Sa'ar, V. Berger, J. Nagle, N. Coron. *Electron. Lett.*, **31**, 912 (1995).

- [3] H. Kawai, J. Kaneko, N. Watanabe. *J. Appl. Phys.*, **58** (3), 1263 (1985).
- [4] K. Pozela, J. Pozela, V. Juciene. *9th Int. Symp. „Nanostructures: Physics and Technology“* (St. Petersburg, Russia, 2001) p. 18.
- [5] J. Leburton, T. Schmiedel, B.D. McCombe, A. Petrou, M. Dutta, P.G. Newman. *J. Appl. Phys.*, **72**, 4753 (1992).
- [6] M. Bayer, V.B. Timofeev, F. Faller, T. Gudbrod, A. Forchel. *Phys. Rev. B*, **54**, 8799 (1996).
- [7] G. Bastard, U.O. Ziemelis, C. Delalande, M. Voos, A.C. Gosard, W. Wiegmann. *Sol. St. Commun.*, **49**, 671 (1984).
- [8] С.В. Козырев, А.Я. Шик. *ФТП*, **19**, 1667 (1985).
- [9] А.В. Гук, В.Э. Каминский, В.Г. Мокеров, Ю.В. Федоров, Ю.В. Хабаров. *ФТП*, **31**, 1367 (1997).

Редактор Л.В. Шаронова

A study of photoluminescence spectra of AlGaAs/GaAs/AlGaAs double quantum wells separated by a thin AlAs layer

G.B. Galiev, M.V. Karachevtseva, V.G. Mokerov, V.A. Strakhov, G.N. Shkerdin, N.G. Yaremenko

Institute for Radioengineering and Electronics, Russian Academy of Sciences, 103907 Moscow, Russia

Abstract Photoluminescence spectra at (77–300) K of pairs of $\text{Al}_{0.21}\text{Ga}_{0.79}\text{As}/\text{GaAs}/\text{Al}_{0.21}\text{Ga}_{0.79}\text{As}$ quantum wells separated by a thin AlAs-barrier (double quantum wells) have been investigated. The well widths varied from 65 to 175 \AA , AlAs-barrier thicknesses were 5, 10 and 20 \AA . The AlAs-barrier being sufficiently thin (5, 10 \AA) and the well width sufficiently narrow, the coupling between quantum wells effect markedly on the subband energies. This leads to shifting the photoluminescence main peak and to the appearance on the high temperature spectra particular features, associated with ground state splitting into symmetrical and antisymmetrical states. Double quantum wells with 20 \AA AlAs-barrier are defined as uncoupled asymmetrical quantum wells $\text{Al}_{0.21}\text{Ga}_{0.79}\text{As}/\text{GaAs}/\text{AlAs}$. The subband energies in the coupled double quantum wells were calculated as functions of the well width and the AlAs-barrier thickness; good agreement between theoretical and experimental results was obtained.