

Поляризационные зависимости электролюминесценции и поглощения вертикально-коррелированных InAs/GaAs-квантовых точек

© М.М. Соболев[¶], И.М. Гаджиев, И.О. Бакшаев, В.Н. Неведомский, М.С. Буяло, Ю.М. Задиранов, Р.В. Золотарева, Е.Л. Портной

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 27 июня 2011 г. Принята к печати 11 июля 2011 г.)

Представлены результаты экспериментальных исследований оптической поляризационной анизотропии спектров электролюминесценции и поглощения систем с различным числом туннельно-связанных вертикально-коррелированных квантовых точек In(Ga)As/GaAs, встроенных в двухсекционный лазер с секциями одинаковой длины. Одной из этих систем являлась сверхрешетка квантовых точек, проявляющая эффект Ванье–Штарка. Был обнаружен эффект вовлечения основных состояний тяжелых дырок в оптические переходы света, поляризованного как в плоскости перпендикулярной оси роста ($X-Y$), так и вдоль направления роста структуры Z . Степень поляризационной анизотропии находится в зависимости от высоты вертикально-коррелированных квантовых точек и сверхрешетки квантовых точек: суммарной толщины всех слоев In(Ga)As квантовых точек и прослойки GaAs между квантовыми точками, которая связывается с Z -компонентой волновой функции основных состояний тяжелых дырок для вертикально-коррелированных точек и сверхрешетки квантовых точек.

1. Введение

Поляризация излучения и поглощения света является важной характеристикой полупроводника. В работе [1] было впервые показано, что оптические переходы между электронами в зоне проводимости и дырками в валентной зоне могут демонстрировать поляризационную анизотропию из-за двух различных типов дырок: тяжелых (hh) и легких (lh) дырок. Они различаются проекцией углового момента (J_z) на ось квантования (z) и равны $J_z = \pm 3/2$ и $J_z = \pm 1/2$ соответственно. В соединениях $A^{III}B^V$ экстремумы зон тяжелых и легких дырок соприкасаются и для наблюдения поляризационной анизотропии в излучении и поглощении необходимо снять это вырождение. Поляризованное рекомбинационное излучение в арсениде галлия впервые наблюдалось в работе [2], где в условиях туннелирования в электрическом поле удалось выделить рекомбинацию электронов с легкими дырками. Позднее поляризационная анизотропия была продемонстрирована в гетероструктурах с внутренними напряжениями в плоскости гетероперехода, приводящими к снятию вырождения в валентной зоне путем изменения симметрии кристалла [3].

В наногетероструктурах эффект размерного квантования приводит к разделению энергий легких и тяжелых дырок, отличающихся значениями эффективных масс. Чистые hh и lh состояния различных энергий реализуются в квантовых ямах, обеспечивая высокую степень поляризационной анизотропии, а перемешивание легких и тяжелых дырок имеет место только при больших k (волновых векторах) [4]. В квантовых проволоках (КП) и квантовых точках (КТ) может иметься некоторая степень перемешивания валентной зоны при малых k ,

поляризационная анизотропия уменьшается и в предельном случае полного перемешивания изотропной КТ исчезает [5,6]. КТ типа InAs/GaAs, выращенные в процессе самоорганизации имеют линзообразную форму и характеризуются более сильным ограничением в направлении роста КТ ([001]). Для КТ с такой симметрией ограничения основным состоянием валентной зоны будет hh. Оптический переход из этого состояния в состояние зоны проводимости поглощает только поперечную электрическую (TE) моду света, поляризованную в плоскости перпендикулярной оси роста [7]. Поперечная магнитная TM-мода света, которая поляризована вдоль направления роста, для линзообразной формы КТ практически отсутствует. В работе [5] теоретически была определена тенденция изменения оптических поляризационных свойств КТ в сторону КП, заключающаяся в усилении TM-мод поляризации при увеличении высоты КТ, направленной по оси Z . Было показано, что как только размер КТ по направлению оси Z увеличивается, низко лежащие состояния будут иметь главным образом $J_z = \pm 1/2$ (или lh) характер, обеспечивающий преимущество для перехода с Z -поляризацией, т.е. для длинной оси. Возбужденные состояния будут иметь главным образом $J_z = \pm 3/2$ (или hh) характер, для которого оптический переход с Z -поляризацией будет запрещен. Эту анизотропию в симметрии КТ наблюдали экспериментально, изучая оптическую поляризацию поглощения и люминесценции КТ [6–14]. В случае многослойных складированных InAs/GaAs-КТ исследовали изменения вклада TE- и TM-мод в оптические переходы в зависимости как от числа слоев, так и от толщины прослойки GaAs между InAs-КТ [2,14–19]. Наблюдали, что при туннельном связывании и увеличении числа слоев КТ происходит усиление TM-моды поляризации

[¶] E-mail: m.sobolev@mail.ioffe.ru

по сравнению с ТЕ-модой. Было дано объяснение наблюдаемых изменений в величинах мод поляризации, которые сводились, с одной стороны, к влиянию деформационного потенциала, а с другой — к изменению симметрии исследуемой системы с увеличением числа слоев КТ. В наших ранних работах при исследовании спектров поглощения и излучения массива КТ обнаруживались качественные различия между оптическими свойствами в структурах с большим и малым числом слоев КТ: десятью и тремя слоями КТ In(Ga)As/GaAs соответственно [20–22]. В структурах с тремя слоями КТ степень поляризации люминесценции примерно такая же, как в структурах с несвязанными КТ. Увеличение числа слоев туннельно-связанных КТ приводило к увеличению интенсивности излучения и коэффициента поглощения света с ТМ-поляризацией по сравнению со структурой с малым числом слоев КТ.

Как было нами показано в работах [23,24], увеличение числа слоев вертикально-коррелированных КТ (ВККТ) In(Ga)As, разделенных тонкими барьерами GaAs шириной несколько нанометров, в результате кулоновского взаимодействия и туннельного связывания состояний электронов КТ может привести к формированию сверхрешеток квантовых точек (СРКТ), проявляющих эффект Ваннье–Штарка [23,24]. Волновые функции электронов в СРКТ из-за сильного связывания между КТ должны локализоваться, а их энергии распределиться, формируя мини-зоны, симметрия такой системы должна измениться, приводя к существенной модификации энергетической структуры и поляризационно-оптических свойств.

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований оптической поляризационной анизотропии спектров электролюминесценции (ЭЛ) и поглощения систем с одним слоем КТ, с тремя туннельно-связанными ВККТ и СРКТ In(Ga)As/GaAs, встроенных в двухсекционный лазер с секциями одинаковой длины.

2. Экспериментальные образцы

Образцы, содержащие несвязанные и туннельно-связанные ВККТ, были выращены методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложках n^+ -GaAs с ориентацией (001). Массивы КТ были сформированы в режиме роста Странского–Крастанова. Эпитаксиальные структуры состояли из n -легированного буферного слоя GaAs, n -легированного нижнего слоя $Al_{0.35}Ga_{0.75}As$ толщиной 1.5 мкм, нелегированного слоя GaAs толщиной 480 нм, содержащего от трех до десяти слоев In(Ga)As-КТ, p -легированного верхнего слоя $Al_{0.35}Ga_{0.75}As$ толщиной 1.5 мкм и p^+ -легированного контактного слоя GaAs. Таким образом, слои самоорганизованных In(Ga)As-КТ были встроены в центре нелегированной GaAs-матрицы. Массивы КТ были выращены посредством 3- и 10-кратного осаждения 2.3 монослоев In(Ga)As. Толщины слоев GaAs между КТ (d_{GaAs}) были соответственно

для системы из десяти несвязанных КТ $d_{GaAs} = 30$ нм, для туннельно-связанных ВККТ $d_{GaAs} = 3$ нм и для СРКТ 6 нм. Показатель преломления верхнего и нижнего слоя $Al_{0.35}Ga_{0.75}As$ отличался от центрального слоя, таким образом, обеспечивая ограничение света в центре нелегированной области, содержащей ВККТ. Вертикальное выстраивание КТ наблюдали с помощью просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) [20–24]. ПЭМ изображения демонстрировали, что средний латеральный размер и высота КТ были соответственно ≈ 20 и 4 нм, и по направлению складирования КТ эти размеры изменяются незначительно [20–24]. Из трех структур были изготовлены полосковые одномодовые двухсекционные лазеры, которые припаивались к теплоотводу и накачивались постоянным током при комнатной температуре. Подобный дизайн обычно используется для импульсной генерации лазера в режиме синхронизации мод [25]. Структура с десятью несвязанными слоями In(Ga)As/GaAs-КТ является стандартной [21–23]. Относительно большое количество слоев (десять) было выбрано для увеличения эффекта поглощения. Эта структура фактически по своим физическим свойствам ведет себя как структура с одним слоем КТ, и мы ее будем в дальнейшем называть однослойной. Структура с тремя туннельно-связанными слоями In(Ga)As/GaAs-КТ также была описана в работах [21,22]. Структура с десятью туннельно-связанными слоями In(Ga)As/GaAs-КТ, как было показано в работах [23,24], проявляет эффект Ваннье–Штарка и является СРКТ.

3. Эксперимент и обсуждение результатов

Измерения ЭЛ и поглощения в системах InAs/GaAs ВККТ, встроенных в двухсекционный лазер с секциями одинаковой длины, проводились при комнатной температуре и при волноводном распространении света в плоскости, перпендикулярной направлению роста структуры (рис. 1). Методика эксперимента и ее особенности впервые были подробно описаны нами в работах [20–23]. Секции электрически изолированы разрывом в контакте, но излучение из одной секции проникает в другую практически без потерь по волноводу лазера. На одну секцию подается прямое смещение ниже порогового, при этом она является источником излучения в диапазоне 1100–1300 нм, на вторую подается обратное напряжение от 0 до 9 В, и она является секцией поглощения. Излучение из секций эмиссии и поглощения пропусклось через поляризатор, попадало на щель монохроматора и регистрировалось охлаждаемым фотодиодом.

На рис. 2 показаны спектры электролюминесценции и поглощения света из секций эмиссии и поглощения с одним слоем In(Ga)As/GaAs-КТ (рис. 2, *a*), с тремя туннельно-связанными слоями In(Ga)As/GaAs-КТ (рис. 2, *b*) и In(Ga)As/GaAs-СРКТ (рис. 2, *c*). Спектры были измерены для двух направлений поляриза-

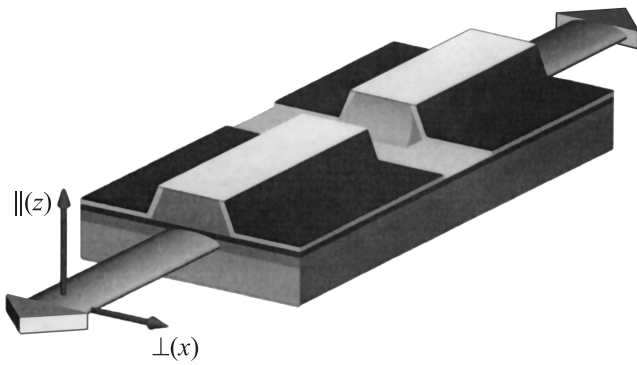


Рис. 1. Схема двухсекционной конструкции лазера с усиливающими и поглощающими секциями, используемая для измерения спектров электролюминесценции, резонансного и дифференциального поглощения при двух направлениях поляризации света: в плоскости, перпендикулярной оси роста (\perp) (плоскость $X-Y$), и вдоль направления роста (\parallel) (ось Z) структуры.

ции: в плоскости, перпендикулярной оси роста (плоскость $X-Y$), вдоль направлений роста (ось Z) структуры. Обычно под этими направлениями поляризации понимаются ТЕ- и ТМ-моды соответственно. Однако авторы этой статьи в силу необычных оптических поляризационных свойств, проявляемых туннельно-связанными ВККТ, предпочли приведенные выше наименования: перпендикулярная (\perp) и параллельная (\parallel) поляризации. Как видно из рис. 2, $a-c$, пики ЭЛ с перпендикулярными и параллельными поляризациями для всех исследуемых структур существенно ниже ширины запрещенной зоны GaAs матрицы и, следовательно, люминесценции могут быть связаны с оптическими переходами КТ. Из-за электрического разделения секций ЭЛ из секции эмиссии не зависит от напряжения обратного смещения в секции поглощения. Кроме того, ЭЛ с перпендикулярной поляризацией и пиком при 0.997 эВ (рис. 2, a) из секции эмиссии структуры с одним слоем КТ представляет собой линию излучения с шириной на половине максимума около ≈ 40 мэВ. Это типично для неоднородного уширения ансамбля КТ, связанного с оптическими переходами, идущими через основные состояния электронов и дырок КТ [26–27]. При изменении ЭЛ с параллельной поляризацией интенсивность излучения существенно уменьшилась \approx в 45 раз по сравнению с интенсивностью излучения с перпендикулярной поляризацией. Произошло небольшое смещение пика ЭЛ в сторону больших энергий 1.001 эВ. Спектр поглощения света с перпендикулярной поляризацией в отличие от поглощения с параллельной поляризацией демонстрирует наличие максимумов, соответствующих оптическим переходам между основными и возбужденными состояниями, обозначенным как $E_0 = 1.010$ эВ и $E_1 = 1.067$ эВ (рис. 2, a) [26,27]. При измерении спектров поглощения с параллельной поляризацией наблюдалось существенное уменьшение величины коэффициента поглощения для оптического

перехода между основными состояниями и чуть меньшее между возбужденными состояниями электронов и дырок КТ (рис. 2, a). Наблюдаемые закономерности в

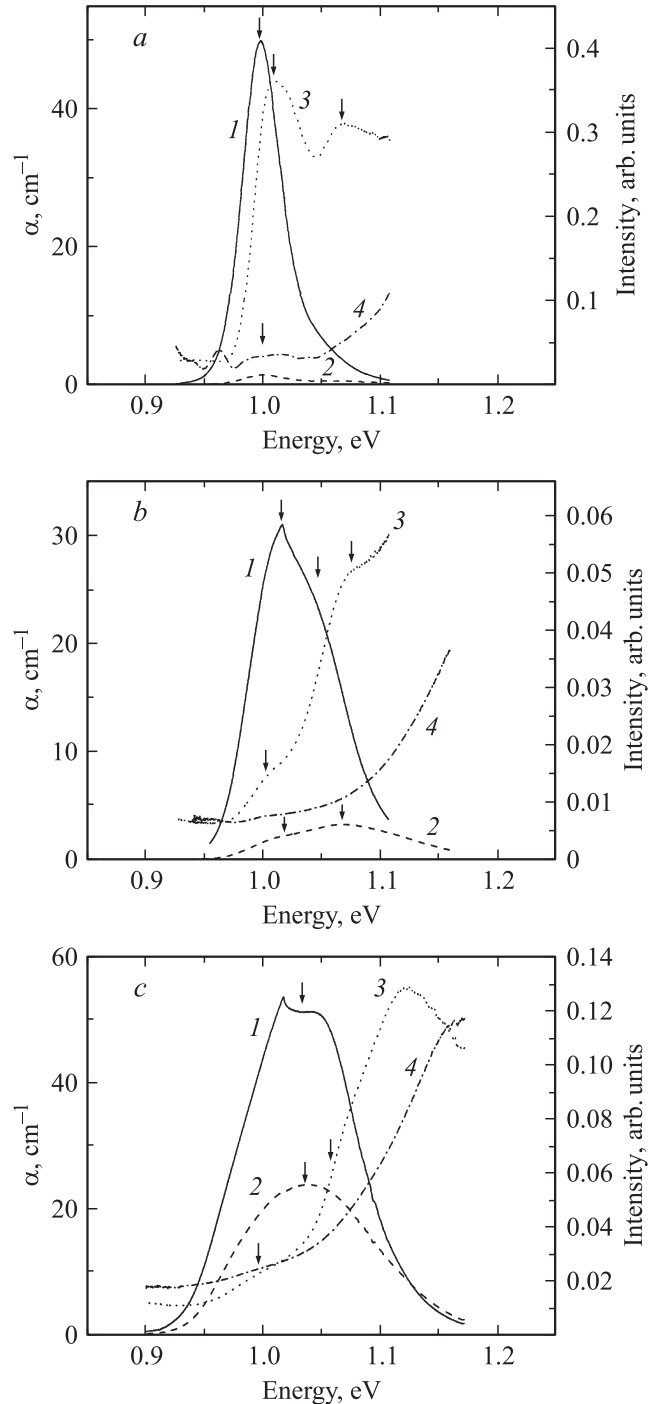


Рис. 2. Спектры ЭЛ (1 — перпендикулярная поляризация, 2 — параллельная поляризация) и поглощения (3 — перпендикулярная поляризация, 4 — параллельная поляризация) для структуры InAs/GaAs-КТ. a — с десятью слоями несвязанных КТ, b — с тремя слоями туннельно-связанных КТ, c — с десятью слоями туннельно-связанной сверхрешетки КТ. Вертикальными стрелками показаны максимумы спектров ЭЛ и поглощения.

исследуемых спектрах были ожидаемы для структуры с одним слоем $\text{In}(\text{Ga})\text{As}/\text{GaAs}$ КТ. Проведенные с помощью ПЭМ высокого разрешения исследования показали, что форма КТ представляет собой усеченную пирамиду с сильным ограничением в направлении роста КТ (Z) и с латеральным размером ≈ 20 нм, высотой КТ ≈ 4 нм и их соотношение $1 : 5$ [20–23,28]. Для КТ с такой формой основными состояниями валентной зоны, участвующими в оптических переходах с перпендикулярной поляризацией (TE-поляризация), будут чистые hh состояния, волновые функции которых расположены в плоскости XY , перпендикулярной направлению Z . Никаких переходов в спектрах ЭЛ и поглощения с участием легких дырок (TM-поляризация), чьи состояния находятся вблизи с краем зоны в GaAs и отстоят от состояний тяжелых дырок на ≈ 200 мэВ [26,27], не наблюдалось (рис. 2, *a*). Ранее в работе [7] на основании результатов, аналогичных нашим, был сделан вывод о том, что направление роста в напряженной $\text{In}(\text{Ga})\text{As}/\text{GaAs}$ -КТ является главным направлением квантования, в то время как поперечное ограничение не должно оказывать значительного влияния на пространственную симметрию волновой функции основного состояния валентной зоны для структур с одним слоем КТ.

В случае структур с тремя слоями туннельно-связанных ВККТ произошло увеличение спектральной ширины излучения ЭЛ на половине максимума до ≈ 80 мэВ (рис. 2, *b*). В такой системе с близко расположенными слоями КТ, в результате туннельного связывания основных состояний электронов трех КТ, происходит их гибридизация с расщеплением основного состояния электронов на связанные и антисвязанные. Волновые функции электронов уже не являются локализованными в каждой из КТ, они делокализуются и расширяются в пределах трех КТ. Эта система уже является новым объектом: молекулой $\text{In}(\text{Ga})\text{As}/\text{GaAs}$ КТ [29,30]. Высота молекулы КТ определяется суммой высот трех InAs КТ и шириной спейсера GaAs , которая оказывается равной 12 нм, и с таким же, как и для структуры с одним слоем КТ латеральным размером ≈ 20 нм. В этом случае, как было предположено в работе [7], латеральное ограничение будет играть более важную роль и изменять пространственную симметрию волновой функции дырок в отличие от структуры с одним слоем КТ, где вертикально ограниченные основные состояния тяжелых дырок были чувствительны только к возбуждению с перпендикулярной поляризацией света. В молекуле КТ усиливается влияние латерального квантования, которое приводит теперь к дополнительной Z -компоненте в волновой функции тяжелых дырок, которые будут чувствительны к возбуждению с параллельной поляризацией света. Это позволяет предположить, что в одном и том же спектральном диапазоне должны наблюдаться оптические переходы с участием связанных и антисвязанных основных состояний электронов и тяжелых дырок молекулы КТ для перпендикулярных и параллельных поляризаций света. При измерении ЭЛ

с перпендикулярной поляризацией было выделено два пика с энергиями $h\nu = 1.015$ и 1.047 эВ, за которые были ответственны связанные и антисвязанные состояния электронов и состояния тяжелых дырок соответственно. Эти оптические переходы наблюдались и при измерении спектров ЭЛ и поглощения с параллельной поляризацией (рис. 2, *b*). Пики ЭЛ с параллельной поляризацией были при $h\nu = 1.006$ и 1.067 эВ, но смещенными по отношению к пикам с перпендикулярной поляризацией в красную область спектра. Отношения интенсивностей излучения ЭЛ с перпендикулярными и параллельными поляризациями света были равны 9.2. В спектрах поглощения с перпендикулярной поляризацией обнаруживалось также наличие двух максимумов, соответствующих оптическим переходам с участием связанных и антисвязанных состояний электронов и тяжелых дырок, энергии которых были $E_b = 1.002$ эВ и $E_{ab} = 1.075$ эВ соответственно. Положение максимумов поглощения было другим, нежели пиков ЭЛ, из-за проявления эффекта Штарка, так как к секции поглощения было приложено напряжение обратного смещения, а к секции излучения — прямое [20–22]. При измерении спектров поглощения с параллельной поляризацией хорошо разрешался переход E_b , а E_{ab} на фоне монотонного роста поглощения определить было затруднительно. Вывод, который следует из этих результатов, состоит в том, что оптические переходы с перпендикулярными и параллельными поляризациями света вовлечены в основные состояния тяжелых дырок, волновые функции которых помимо X - и Y -компонент имеют и Z -компоненту. Наличие этой компоненты связывается с увеличением высоты системы вертикально-связанных КТ при неизменной латеральной их длине, и она определяет появление спектров ЭЛ и поглощения с параллельной поляризацией света в том же диапазоне, что и с перпендикулярной поляризацией (рис. 2, *b*).

В случае структуры с десятью близко расположенными слоями $\text{In}(\text{Ga})\text{As}/\text{GaAs}$ -КТ, туннельное связывание основных состояний электронов КТ способствует уже образованию мини-зоны СРКТ [23,24]. Оптические переходы с участием мини-зоны основного состояния СРКТ определяют еще большее уширение спектра ЭЛ с перпендикулярными и параллельными поляризациями (рис. 2, *c*). Спектральная ширина излучения ЭЛ на половине максимума достигает ≈ 120 мэВ. При этом, как и в предыдущем примере с молекулой КТ, спектры ЭЛ для перпендикулярных и параллельных поляризаций света будут подобными. Однако интенсивность излучения ЭЛ с перпендикулярной поляризацией света все еще больше, чем с параллельной поляризацией света, но отношение это уменьшилось до 2.2 раз. Помимо этого происходит также красное смещение пиков в спектрах ЭЛ в сторону больших энергий при переходе от одного ряда КТ к молекуле КТ и далее к СРКТ (рис. 3). Подобные зависимости для изменения положения пиков ЭЛ в зависимости от числа слоев КТ ранее уже наблюдали и были представлены в ряде публикаций [28,30].

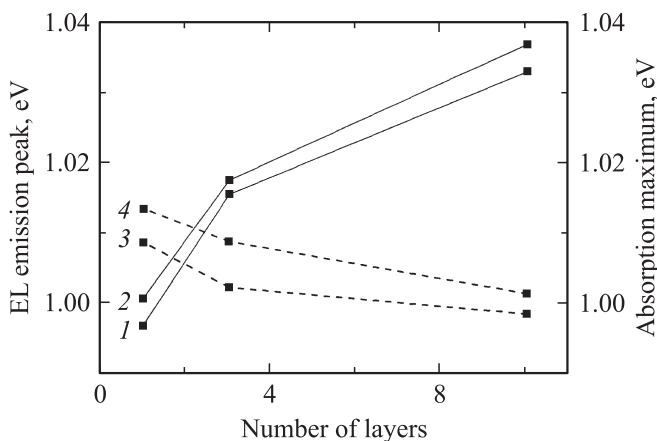


Рис. 3. Зависимость пиков электролюминесценции (1 — перпендикулярная поляризация, 2 — параллельная поляризация) и максимумов (3 — перпендикулярная поляризация, 4 — параллельная поляризация) от числа слоев КТ.

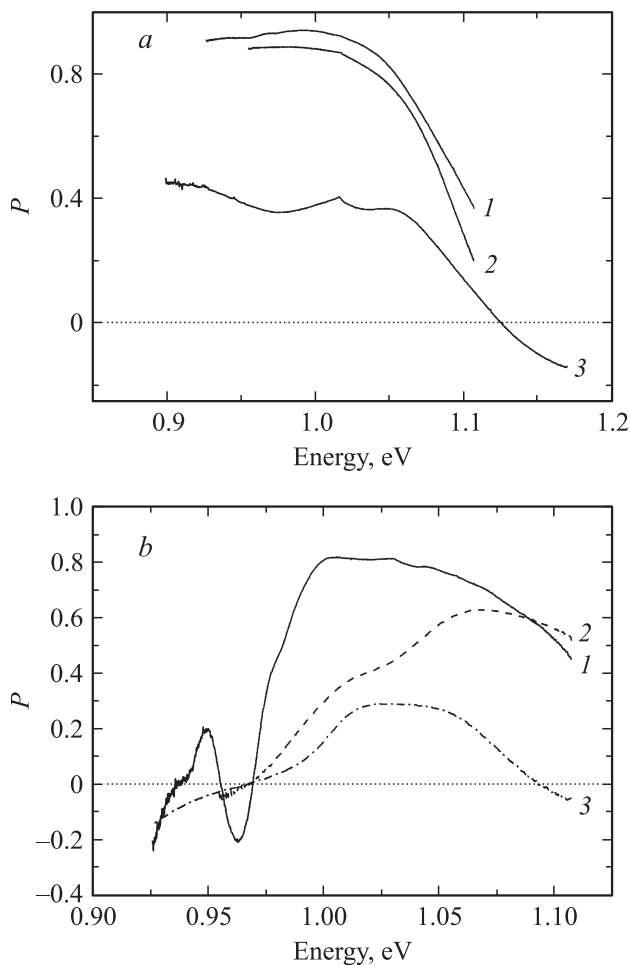


Рис. 4. Зависимость поляризационных анизотропий: *a* — от энергии излучения ЭЛ и *b* — от поглощения для структуры InAs/GaAs КТ. 1 — с десятью слоями несвязанных КТ, 2 — с тремя слоями туннельно-связанных КТ, 3 — с десятью слоями туннельно-связанной сверхрешетки КТ.

Спектры поглощения с увеличением числа слоев КТ демонстрируют голубое смещение положения их максимумов (рис. 3). Для In(Ga)As/GaAs-СРКТ применимы те же рассуждения, что мы применили для трех слоев туннельно-связанных ВККТ. Высота СРКТ определяется уже суммой высот десяти слоев InAs-КТ и шириной спейсера GaAs, которая оказывается равной 55.8 нм, и с таким же, как и для структуры с одним КТ, латеральным размером ≈ 20 нм. Из этих измерений следует, что увеличение высоты системы туннельно-связанных ВККТ и СРКТ при их неизменной латеральной длине способствует усилению оптических переходов с параллельной поляризацией света, идущих с участием основных состояний электронов и тяжелых дырок.

На рис. 4, *a, b* показаны зависимости поляризационных анизотропий для трех исследуемых структур от энергии излучения ЭЛ и поглощения. Поляризационная анизотропия определяется соотношением $P = (I_{\perp} - I_{\parallel}) / (I_{\perp} + I_{\parallel})$ и $P = (\alpha_{\perp} - \alpha_{\parallel}) / (\alpha_{\perp} + \alpha_{\parallel})$, где I_{\perp} и I_{\parallel} — интенсивности ЭЛ, а α_{\perp} и α_{\parallel} — коэффициенты поглощения для компонент перпендикулярной и параллельной поляризаций соответственно [2–15]. Видно, что поляризационная анизотропия ЭЛ (рис. 4, *a*) существенно уменьшается, примерно в 2.4 раза, для структур с десятью слоями ВККТ по сравнению со случаем одного слоя КТ и становится равной $P \approx 0.4$. Общим для кривых всех трех структур является слабая зависимость от энергии излучения ЭЛ в диапазоне ≈ 0.9 – 1.04 эВ и резкое уменьшение анизотропии при энергиях больше ≈ 1.05 эВ. В случае поляризационной анизотропии поглощения кривые, показанные на рис. 4, *a*, существенно отличаются от кривых на рис. 4, *b*. Для них характерен рост от отрицательных значений P к положительным с прохождением через нуль при $h\nu \approx 0.96$ эВ и выходом на насыщение. Положение точек перегиба кривых поляризационной анизотропии зависит от числа слоев КТ и смещается в сторону больших энергий по мере роста числа этих слоев. Для структуры с СРКТ величина поляризационной анизотропии в области насыщения оказывается равной $P \approx 0.29$, что меньше, чем аналогичная величина для ЭЛ.

4. Заключение

В ходе экспериментальных исследований оптической поляризационной анизотропии спектров ЭЛ и поглощения систем с различным числом туннельно-связанных ВККТ и СРКТ In(Ga)As/GaAs были обнаружены качественные различия между оптическими свойствами в структурах с большим и малым числом слоев КТ. В структурах с тремя слоями туннельно-связанных КТ, которые образовывали молекулу КТ, было установлено, что степень поляризационной анизотропии люминесценции и поглощения уменьшается в сравнении со структурой несвязанных КТ. Еще больше поляризационная анизотропия уменьшается для СРКТ, достигая 0.4 для ЭЛ

и 0.29 для поглощения. Кроме того, было обнаружено появление спектров ЭЛ и поглощения для света, поляризованного в плоскости, перпендикулярной оси роста ($X-Y$), в том же диапазоне, что и для света, поляризованного вдоль направления роста структуры (Z). Никаких переходов в спектрах ЭЛ и поглощения с участием легких дырок не наблюдалось. Выявленное поведение измеряемых сигналов позволило сделать заключение, что в оптические переходы со светом, поляризованным в плоскости, перпендикулярной оси роста, и в плоскости вдоль направления роста структуры, вовлечены основные состояния тяжелых дырок, волновые функции которых помимо X - и Y -компонент имеют и Z -компоненту. Наличие этой компоненты связывалось с увеличением высоты системы вертикально-связанных КТ (суммарная толщина всех слоев In(Ga)As-КТ и прослойки GaAs между КТ) при неизменной латеральной их длине. Она определяет появление спектров ЭЛ и поглощения с поляризацией света вдоль направления роста структуры в том же диапазоне, что и с поляризованных в плоскости, перпендикулярной оси роста.

Список литературы

- [1] Л.В. Келдыш, О.В. Константинов, В.И. Перель. ФТП, **3**, 1042 (1969).
- [2] Ж.И. Алфёров, Д.З. Гарбузов, Е.П. Морозов, Е.Л. Портной. ФТП, **3**, 1054 (1969).
- [3] Д. Ахмедов, Н.П. Бежан, Н.А. Портной, С.Г. Конников, В.И. Кучинский, В.А. Мишурный, Е.Л. Портной. Письма ЖТФ, **33** (?), 28 (2007).
- [4] E.A. Avrutin, I.E. Chebunina, I.A. Eliachevitch, S.A. Gurevich, M.E. Portnoi, G.E. Shtengel. Semicond. Sci. Technol., **8**, 80 (1993).
- [5] T. Tanaka, J. Singh, Y. Arakawa, P. Bhattachatya. Appl. Phys. Lett., **62**, 756 (1993).
- [6] F. Vouilloz, D.Y. Oberli, M.-A. Dupertuis, A. Gustafsson, F. Reinhardt, E. Kapon. Phys. Rev. B, **57**, 12378 (1998).
- [7] L. Chu, M. Arzberger, A. Zrenner, A. Zrenner, G. Böhm, G. Abstreiter. Appl. Phys. Lett., **75**, 2247 (1999).
- [8] P. Yu, W. Langbein, K. Leosson, J.M. Hvam, N.N. Ledentsov, D. Bimberg, V.M. Ustinov, A.Yu. Egorov, A.E. Zhukov, A.F. Tsatsul'nikov, Yu.G. Musikhin. Phys. Rev. B, **60**, 16680 (1999).
- [9] C. Cortez, O. Krebs, P. Voisin, J.M. Gérard. Phys. Rev. B, **63**, 233306 (2001).
- [10] Yu.I. Mazur, S. Noda, G.G. Tarasov, V.G. Dorogan, G.J. Salamo, O. Bierwagen, W.T. Masselink, E.A. Decuir, jr., M.O. Manasreh. J. Appl. Phys., **103**, 054314 (2008).
- [11] K.F. Karlsson, V. Troncale, D.Y. Oberli, A. Malko, E. Pelucchi, A. Rudra, E. Kapon. Appl. Phys. Lett., **89**, 251113 (2006).
- [12] M. Schardt, A. Winkler, G. Rurimo, M. Hanson, D. Driscoll, S. Quabis, S. Malzer, G. Leuchs, G.H. Döhler, A.C. Gossard. Physica E, **32**, 241 (2006). endpaper
- [13] Henini, M.S. Sanguinetti, S.C. Fortina, E. Grilli, M. Guzzi, G. Panzarini, L.C. Andreani, M.D. Upward, P. Moriarty, P.H. Beton, L. Eaves. Phys. Rev. B, **57**, R6815 (1998).
- [14] A.M. Adawi, E.A. Zibik, L.R. Wilson, A. Lemaître, W.D. Sheng, J.W. Cockburn, M.S. Skolnick, J.P. Leburton, M. Hopkinson, G. Hill, L. Liew, A.G. Cullis. Phys. Status Solidi B, **238**, 341 (2003).
- [15] K.Y. Chuang, C.Y. Chen, T.E. Tzeng, J.Y. Feng, T.S. Lay. Physica e, **40**, 1882 (2008).
- [16] Tomoya Inoue, Masaki Asada, Nami Yasuoka, Osamu Kojima, Takashi Kita, Osamu Wada. J. Appl. Phys., **96**, 211906 (2010).
- [17] Toshio Saito, Hiroji Ebe, Yasuhiko Arakawa, Takaaki Kakitsuka, Mitsuru Sugawara. Phys. Rev. B, **77**, 195318 (2008).
- [18] P. Jayavel, H. Tanaka, T. Kita, O. Wada, H. Ebe, M. Sugawara, J. Tatebayashi, Y. Arakawa, Y. Nakata, T. Akiyama. Appl. Phys. Lett., **84**, 1820 (2004).
- [19] T.T. Chen, Y.F. Chen, J.S. Wang, Y.S. Huang, R.S. Hsiao, J. F. Chen, C.M. Lai, J.Y. Chi. Semicond. Sci. Technol., **22**, 1077 (2007).
- [20] Е.Л. Портной, И.М. Гаджиев, А.Е. Губенко, М.М. Соболев, А.Р. Ковш. Письма ЖТФ, **33** (?) 28 (2007).
- [21] М.М. Соболев, И.М. Гаджиев, И.О. Бакшаев, В.С. Михрин, В.Н. Неведомский, М.С. Буяло, Ю.М. Задиранов, Е.Л. Портной. ФТП, **43**, 512 (2009).
- [22] V.V. Nikolaev, N.S. Averkiev, M.M. Sobolev, I.M. Gadzhiev, I.O. Bakshaev, M.S. Buyalo, E.L. Portnoi. Phys. Rev. B, **80**, 205304 (2009).
- [23] М.М. Соболев, И.М. Гаджиев, И.О. Бакшаев, В.Н. Неведомский, М.С. Буяло, Ю.М. Задиранов, Е.Л. Портной. ФТП, **45**, 1095 (2011).
- [24] М.М. Соболев, А.П. Васильев, В.Н. Неведомский. ФТП, **44**, 790 (2010).
- [25] A. Gubenko, D. Livshits, I. Krestnikov, S. Mikhrin, A. Kozhukhov, A. Kovsh, N. Ledentsov, A. Zhukov, E. Portnoi. Electron Lett., **41**, 1124 (2005).
- [26] M. Grundmann, N.N. Ledentsov, O. Stier, J. Böhrer, D. Bimberg, V.M. Ustinov, P.S. Kop'ev, Zh.I. Alferov. Phys. Rev. B, **53**, R10509 (1996).
- [27] F. Adler, M. Geiger, A. Bauknecht, F. Scholz, H. Schweizer, M.H. Pilkuhn, B. Ohnesorge, A. Forchel. J. Appl. Phys., **80**, 4019 (1996).
- [28] N.N. Ledentsov, V.A. Shchukin, M. Grundmann, N. Kirstaedter, J. Böhrer, O. Schmidt, D. Bimberg, V.M. Ustinov, A.Yu. Egorov, A.E. Zhukov, P.S. Kop'ev, S.V. Saitsev, N.Yu. Bordeev, Zh.I. Alferov, A.I. Borovkov, A.O. Kosogov, S.S. Ruvimov, P. Werner, U. Gösele, J. Heidenreich. Phys. Rev. B, **54**, 743 (1996).
- [29] М.М. Соболев, Г.Э. Цырлин, Ю.Б. Самсоненко, Н.К. Поляков, А.А. Тонких, Ю.Г. Мусихин. ФТП, **39**, 131 (2005).
- [30] М.М. Соболев, А.Е. Жуков, А.П. Васильев, Е.С. Семенова, В.С. Михрин, Г.Э. Цырлин, Ю.Г. Мусихин. ФТП, **40**, 84 (2004).
- [31] D. Bimberg, M. Grundmann, N.N. Ledentsov. *Quantum Dot Heterostructures* (Wiley, Chichester, 1998).

Редактор Л.В. Беляков

Polarization dependent electroluminescence and absorption of InAs/GaAs vertically correlated quantum dots

*M.M. Sobolev, I.M. Gadzhiyev, I.O. Bakshaev,
V.N. Nevedomskiy, M.S. Buyalo, Yu.M. Zadiranov,
R.V. Zolotareva, E.L. Portnoi*

loffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract Electroluminescence and absorption optical polarization anisotropy spectra of systems with varied quantity of tunnel coupled vertically correlated quantum dots and quantum dots superlattice are investigated. All these systems were active medium in two sectional laser diodes with equal length sections. The ground states of heavy holes are involved in optical transitions, polarized both in planes, normal ($X-Y$) and along Z growth directions. The degree of anisotropy polarization is in dependence of height of vertically correlated quantum dots and quantum dots superlattice: total thickness of all In(Ga)As quantum dots layers and binding with Z -component of heavy hole ground state wave function GaAs barrier between quantum dots of vertically correlated quantum dots and quantum dots superlattice.