

Влияние толщины прослойки GaAs на квантовое связывание и оптическую поляризацию вертикально-коррелированной 10-слойной системы квантовых точек InAs/GaAs

© М.М. Соболев[¶], И.М. Гаджиев, М.С. Буяло, В.Н. Неведомский, Ю.М. Задиранов, Р.В. Золотарева, А.П. Васильев, В.М. Устинов

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

(Получена 18 декабря 2013 г. Принята к печати 25 декабря 2013 г.)

Представлены результаты экспериментальных исследований поляризационной оптической анизотропии электролюминесценции и поглощения 10-слойной системы вертикально-коррелированных квантовых точек (ВККТ) InAs/GaAs, встроенной в двухсекционный лазер с секциями одинаковой длины и с толщиной прослойки GaAs между квантовыми точками InAs 8.6 нм. Установлено, что поляризационная анизотропия электролюминесценции и поглощения для такой системы меньше по сравнению с аналогичными величинами для систем с одним рядом квантовых точек и молекул квантовых точек, но больше, чем для сверхрешетки квантовых точек. Кроме того, представлены результаты исследований дифференциального поглощения в зависимости от приложенного к исследуемой структуре электрического поля. Измерена зависимость темпа изменения смещения Штарка от внешнего электрического поля, что позволило экспериментально выявить наличие контролируемого квантового связывания двух соседних квантовых точек в 10-слойных системах ВККТ InAs/GaAs с толщиной прослойки GaAs 8.6 и 30 нм. Измеренные поляризационные зависимости показали, что они определяются эффектом вовлечения основных состояний тяжелых дырок в оптические переходы и природа этого эффекта определяется двумерностью исследуемой системы.

1. Введение

В настоящее время хорошо известно, что самоорганизованные квантовые точки (КТ) являются полупроводниковыми наноструктурами, в которых реализуется трехмерное ограничение носителей [1]. Пространственное ограничение электронных состояний в КТ способствует их квантованию. Сформированные таким образом КТ можно, следовательно, определять как искусственные атомы. В структурах, содержащих число n слоев КТ InAs ($n = 1, 2, 3$ и т.д.), разделенных тонкими барьерами GaAs шириной несколько нанометров, КТ из-за эффекта распределения напряжения стремятся вырасти одна выше другой, что может привести к формированию ряда складированных КТ, упорядоченных в вертикальном направлении. В такой системе из-за кулоновского взаимодействия и туннельного связывания электронных состояний КТ InAs, разделенных тонким барьером GaAs, может произойти формирование искусственной молекулы [2–7] или сверхрешетки квантовых точек (СРКТ) [8–11]. Проведенные нами с помощью нестационарной спектроскопии глубоких уровней (DLTS) [12,13] и дифференциального поглощения [14] исследования 10-слойной системы InAs/GaAs туннельно-связанных вертикально-коррелированных квантовых точек (ВККТ) в $p-n$ -гетероструктуре позволили получить экспериментальные доказательства возможности формирования искусственной СРКТ в таких системах. КТ InAs в исследуемых гетероструктурах с ВККТ были разделены тонкими барьерами GaAs, шириной 3 и 6 нм. Было выявлено, что исследуемые структуры характеризуются

проявлением эффекта Ванье–Штарка в сверхрешетке InAs/GaAs, в которой наличие внешнего электрического поля приводит к подавлению связывания волновых функций состояний электронов минизоны и образованию серии дискретных уровней. Были проведены также экспериментальные исследования оптической поляризационной анизотропии спектров электролюминесценции (ЭЛ) и поглощения систем с различным числом туннельно-связанных ВККТ InAs/GaAs, встроенных в двухсекционный лазер с секциями одинаковой длины [14,15]. Для системы, состоящей из 3 туннельно-связанных КТ InAs с толщиной прослойки GaAs между ними 4 нм, было определено, что она является молекулой КТ (МКТ). Было обнаружено, что оптические переходы в этой системе, как внутри одной КТ, так и между соседними КТ, характеризуются проявлением эффекта Штарка [14,15]. Был обнаружен эффект вовлечения основных состояний тяжелых дырок в оптические переходы при воздействии светом, поляризованным как в плоскости (xy), перпендикулярной оси роста, так и вдоль направления роста структуры (z) [15]. Степень поляризационной анизотропии находилась в зависимости от высоты МКТ и СРКТ: суммарной толщины всех слоев КТ InAs и прослоек GaAs между КТ, которая связывается с z -компонентой волновой функции основных состояний тяжелых дырок для МКТ и СРКТ. Для СРКТ степень оптической поляризационной анизотропии поглощения была минимальной и составляла величину ~ 0.29 , для МКТ она была равна ~ 0.63 , для ряда одиночных КТ ~ 0.81 . В связи с этим представляется интересным оценить предельную толщину прослойки GaAs, при которой наблюдается туннельное связывание состояний КТ, проявляющих эф-

[¶] E-mail: m.sobolev@mail.ioffe.ru

фект Штарка, и степень поляризационной оптической анизотропии такой системы ВККТ.

В данной работе представлены результаты наших экспериментальных исследований поляризационной оптической анизотропии ЭЛ и поглощения 10-слойной системы ВККТ InAs/GaAs, встроенной в двухсекционный лазер с секциями одинаковой длины и с толщиной прослойки GaAs между КТ InAs 8.6 нм. Кроме того, представлены результаты наших исследований дифференциального поглощения в зависимости от приложенного к структуре электрического поля.

2. Экспериментальные образцы

Образцы, содержащие 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 в результате 10-кратного осаждения 2.1 монослоя InAs с прослойкой GaAs толщиной $d = 9.0$ нм. Эпитаксиальные структуры состояли из легированного буферного слоя n -GaAs, легированного нижнего слоя n -Al_{0.35}Ga_{0.75}As толщиной 1.5 мкм, нелегированного слоя GaAs толщиной 480 нм, содержащего 10 слоев КТ In(Ga)As, легированного верхнего слоя p -Al_{0.35}Ga_{0.75}As толщиной 1.5 мкм и легированного контактного слоя p^+ -GaAs. Таким образом, слои самоорганизованных КТ InAs были встроены в центре нелегированной GaAs-матрицы. Показатель преломления верхнего и нижнего слоев Al_{0.35}Ga_{0.75}As отличался от показателя преломления центрального слоя, таким образом обеспечивая ограничение света в центре нелегированной области, содержащей ВККТ. Вертикальное выстраивание КТ наблюдали с помощью просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ). ПЭМ-

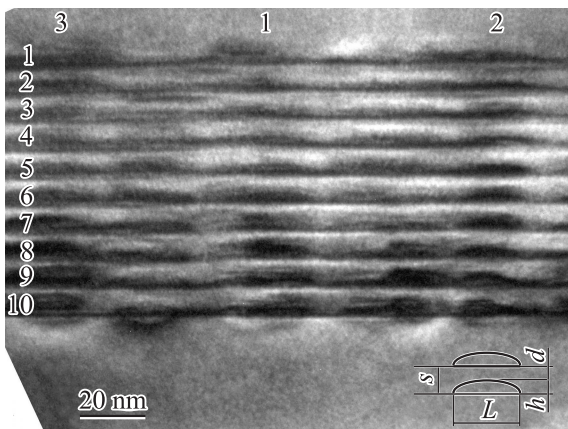


Рис. 1. Темнопольное изображение поперечного сечения образца с $g = (002)$. Числа слева (1–10) — нумерация слоев КТ, числа сверху — нумерация стеков КТ, которые использовались для измерений. В правом нижнем углу — схема обозначений измеряемых параметров: L — латеральный размер КТ, h — высота, d — толщина прослойки GaAs.

изображения показали, что латеральный размер КТ варьировался в пределах $L \approx (25.0–33.0)$ нм, а высота в пределах $h \approx (3.0–4.5)$ нм (рис. 1). Профиль легирования формировал $p-i-n$ -переход, который позволял варьировать вертикальное электрическое поле в ВККТ, изменяя приложенное электрическое напряжение между n - и p -контактами. Из этой структуры были изготовлены полосковые одномодовые двухсекционные лазеры, которые припаивались к теплоотводу и накачивались постоянным током при комнатной температуре. Подобная конструкция обычно используется для импульсной генерации лазера в режиме синхронизации мод [16,17].

3. Результаты и обсуждение

Измерения ЭЛ и поглощения в 10-слойной системе ВККТ InAs/GaAs с толщиной прослойки GaAs между КТ InAs 8.6 нм, встроенной в двухсекционный лазер с секциями одинаковой длины, проводились при комнатной температуре и при волновом распространении света в плоскости, перпендикулярной направлению роста структуры. Методика эксперимента и ее особенности впервые были подробно описаны нами в работах [8,9,14]. 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 длин волн 1100–1330 нм, на вторую подается обратное напряжение от +0.5 до –15.0 В, и она является секцией поглотителя. Излучение из секций эмиссии и поглощения пропускать через поляризатор, попадало на щель монохроматора и регистрировалось охлаждаемым фотодиодом. На рис. 2 показаны спектры ЭЛ (кривые 1, 2) для секции эмиссии, когда на нее подается прямое смещение, и поглощения света (кривые 3, 4) для секции поглотителя при приложенном к ней напряжении обратного смещения. Спектры были измерены для двух направлений поляризации: в плоскости, перпендикулярной оси роста (плоскость xu , кривые 1, 3) и вдоль направления роста структуры (ось z , кривые 2, 4). Обычно под этими направлениями поляризации понимаются ТЕ- и ТМ-моды соответственно. Ранее уже отмечалось [9,15], что, поскольку пики ЭЛ для ТЕ- и ТМ-мод поляризации существенно ниже по энергии ширины запрещенной зоны в матрице GaAs, люминесценция может быть связана с оптическими переходами в КТ. ЭЛ с перпендикулярной поляризацией и пиками при энергиях $E_0 = 1.0582$ эВ и $E_1 = 1.0101$ эВ (рис. 2, кривая 1), соответствующих оптическим переходам между основными и возбужденными состояниями из секции эмиссии структуры с 10 слоями КТ, представляет собой линию излучения с шириной на половине высоты максимума ~ 44 мэВ. Это типично для неомогенного уширения ансамбля КТ, связанного с оптическими переходами, идущими через основные состояния электронов и дырок КТ [18,19]. Это

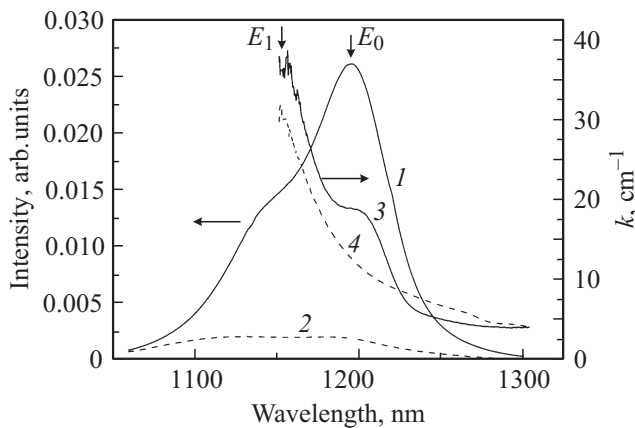


Рис. 2. Спектры ЭЛ (1, 2) и коэффициента поглощения k (3, 4) 10-слойной системы ВККТ InAs/GaAs с толщиной прослойки GaAs между КТ InAs 8.6 нм. 1, 3 — перпендикулярная поляризация, 2, 4 — параллельная. Вертикальными стрелками показаны максимумы спектров ЭЛ и поглощения.

является одной из причин, почему связывание КТ в спектрах ЭЛ при комнатных температурах не обнаруживается. В спектре поглощения света с перпендикулярной поляризацией наблюдается один ярко выраженный пик с энергией $E_0 = 1.0582$ эВ, связанный с основным состоянием, и второй пик, определяемый как пик возбужденного состояния с энергией $E_1 = 1.1020$ эВ (рис. 2, кривая 3) [18,19]. При измерении ЭЛ и поглощения с параллельной поляризацией интенсивность излучения и величина коэффициента поглощения для оптического перехода между основными состояниями электронов и дырок существенно меньше по сравнению с тем, что наблюдалось для оптических переходов с перпендикулярной поляризацией света (рис. 2). Поляризационная анизотропия ЭЛ и поглощения, определяемая соотношениями $P_I = (I_{\perp} - I_{\parallel}) / (I_{\perp} + I_{\parallel})$ и $P_k = (k_{\perp} - k_{\parallel}) / (k_{\perp} + k_{\parallel})$ (где I_{\perp} и I_{\parallel} — интенсивности ЭЛ, а k_{\perp} и k_{\parallel} — коэффициенты поглощения для перпендикулярной и параллельной компонент поляризации соответственно) [15], были равны $P_I \approx 0.85$ и $P_k \approx 0.45$. Эти величины были меньше, чем аналогичные величины поляризационной анизотропии в случаях структур с одним рядом КТ и МКТ, но больше, чем в случае СКРТ [15].

Спектры поглощения, измеренные при комнатной температуре, характеризуются смещением пиков на крае поглощения излучения лазера в длинноволновую область спектра с увеличением напряжения обратного смещения (рис. 3) [15]. В структурах с ВККТ наблюдается сильное перекрытие широких оптических пиков, что делает затруднительным определение параметров оптических переходов из экспериментальных спектров поглощения. Поэтому для исследования поведения поглощения под действием внешнего электрического поля, как и в работах [8,9,14], мы использовали метод дифференциальной спектроскопии поглощения, который позволяет измерять производную коэффициента погло-

щения от приложенного напряжения и обладает высокой чувствительностью к изменению поглощения. В этом случае подстройка уровней энергий оптических переходов ВККТ в резонанс с энергией квантов от лазера, облучающего секцию поглотителя с непрерывной интенсивностью, осуществляется управлением смещением Штарка уровней энергии электронов и дырок ВККТ с помощью приложенного модулированного электрического поля и длиной волны излучения лазера. На рис. 4 показаны спектры дифференциального поглощения (DA) в зависимости от величины напряжения обратного смещения, приложенного к 10-слойной системе ВККТ InAs/GaAs с толщиной прослойки GaAs между КТ InAs 8.6 нм. В спектрах, приведенных на рис. 4, можно наблюдать один четкий максимум, два минимума и одну точку, обозначаемую как А, где дифференциальное поглощение равняется нулю при изменении его знака от положительного к отрицательному значению. Темп изменения положения этой точки зависит от величины приложенного к ВККТ напряжения обратного смещения. При этом нулевому значению DA в этой точке А соответствует максимум в спектре поглощения в 10-слойной системе ВККТ InAs/GaAs, который образуется при соответствующих настройках длин волны излучения из сектора эмиссии и величине электрического поля в секторе поглощения, управляющего смещением Штарка уровней энергии ВККТ. Тонкой настройкой достигалось резонансное поглощение излучения лазера в поглощающей секции, при этом происходило заселение электронами и дырками состояний ВККТ. Точка нулевого значения DA позволяют оценить энергии оптических переходов E_n в присутствии электрического поля и проследить за темпом изменения их положения под влиянием внешнего электрического поля F . Для этой

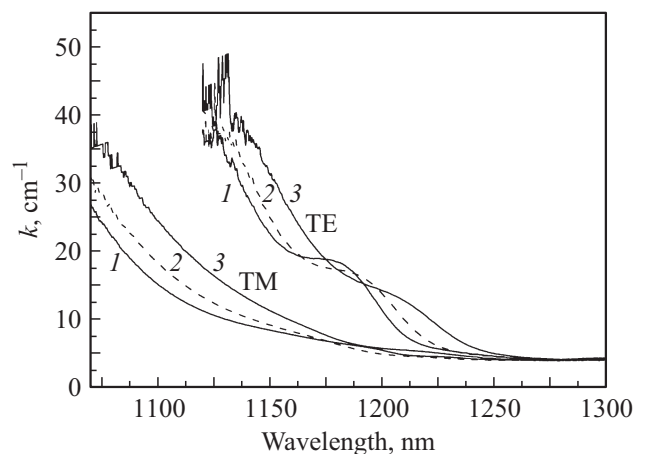


Рис. 3. Спектры коэффициента поглощения k 10-слойной системы ВККТ InAs/GaAs с толщиной прослойки GaAs между КТ InAs 8.6 нм для двух направлений поляризации: TE — в плоскости, перпендикулярной оси роста (плоскость xy), ТМ — вдоль направления роста (ось z). Напряжения смещения $U_0 = +0.5$ (1), -7.0 (2), -15 В (3).

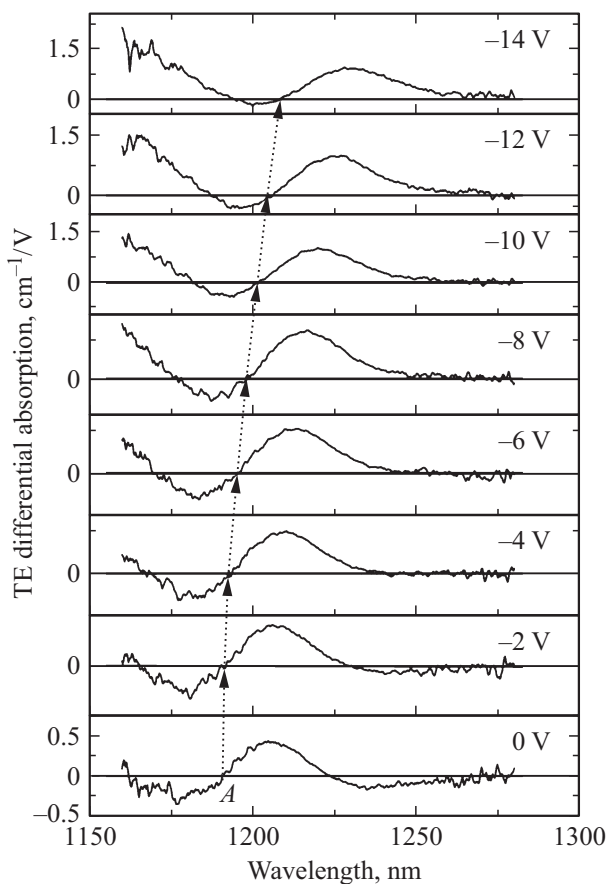


Рис. 4. Спектры дифференциального поглощения (DA) 10-слойной системы ВККТ InAs/GaAs с толщиной прослойки GaAs между КТ InAs 8.6 нм при различных значениях приложенного к поглощающей секции напряжения смещения. Направления изменения нулевого значения дифференциального сигнала показаны точечной линией со стрелками.

структуры была построена зависимость изменения спектрального положения точки A и максимума DA от величины приложенного напряжения (рис. 5), которые характеризуются влиянием эффекта Штарка на исследуемые оптические переходы. Как можно видеть из рис. 5, измеренное спектральное положение точки A (и максимума DA) испытывает слабое красное смещение при низких значениях приложенного электрического поля F , изменяющегося в диапазоне от 25 до 155 кВ/см, с существенным увеличением темпа смещения при более высоких полях F . В соответствии с результатами полного расчета спектра DA, полученного в работе [9], следует, что медленный участок темпа смещения точки A может быть обусловлен вкладом прямых оптических переходов, связанных с уровнями энергий основных состояний носителей внутри КТ. Ранее было показано [3,9], что для прямого оптического перехода внутри одной КТ зависимость от поля для смещения Штарка является квадратичной. Экспериментально наблюдаемое увеличение темпа смещения точки A может быть объяснено смешанной природой перехода, который трансформиру-

ется от предпочтительно внутриточечного при низком поле в непрямой межточечный при высоком поле F . Это также подтверждается в уменьшении значения максимума пика DA с увеличением поля (рис. 5), которое обусловлено падением силы осциллятора внутриточечного перехода [9]. При высоком приложенном поле F энергии прямых и непрямых переходов уменьшаются с увеличением поля. Эта спектральная картина межточечного характера смещения Штарка при высоких приложенных полях F в диапазоне от 175 до 321 кВ/см является наблюдаемым экспериментально доказательством квантового связывания двух соседних КТ в 10-слойной системе ВККТ InAs/GaAs с толщиной прослойки GaAs между КТ InAs 8.6 нм. Известно [5,9], что смещение Штарка для пространственно непрямого оптического перехода будет пропорционально соотношению $(\mathbf{F} \times \mathbf{s})$, где \mathbf{s} — вектор расстояния между центрами двух связанных КТ. В нашем случае $s = 8.6$ нм. Линейный участок изменения темпа смещения Штарка для системы ВККТ с $s = 8.6$ нм был равен ~ 0.076 мэВ · см/кВ. Ранее в работе [8] мы исследовали 10-слойную систему ВККТ InAs/GaAs с толщиной прослойки GaAs между КТ InAs 30 нм с помощью DA-спектроскопии в зависимости от величины приложенного электрического поля. Для этой системы была получена зависимость изменения спектрального положения точки нулевого значения DA (A_1) от величины приложенного электрического поля F , которая показана на рис. 5. Для этой системы наблюдалось небольшое отличие по сравнению с 10-слойной системой ВККТ InAs/GaAs с $s = 8.6$ нм. В диапазоне изменения электрического поля от 51 до 112 кВ/см наблюдался линейный участок изменения темпа смещения Штарка, который был равен 0.35 мэВ · см/кВ и мог быть связан с межточечными оптическими переходами. Для этого перехода смещение Штарка пропорционально соотношению $(\mathbf{F} \times \mathbf{s})$. При дальнейшем увеличении поля темп

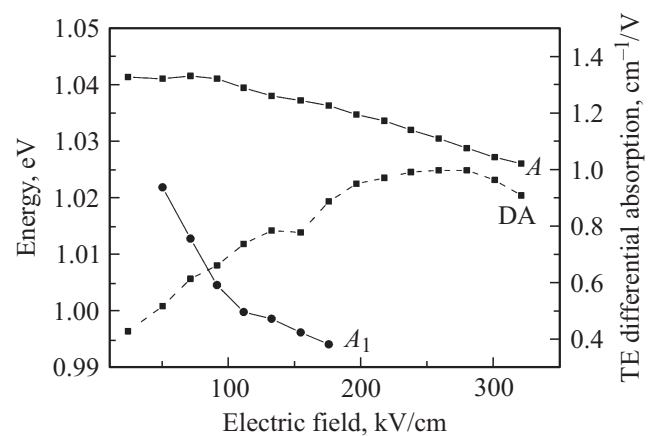


Рис. 5. Смещение точки нулевого дифференциального сигнала поглощения с ростом величины электрического поля в 10-слойных системах ВККТ InAs/GaAs с толщинами прослойки GaAs между КТ InAs 8.6 (A) и 30.0 нм (A_1) и значения максимума пика DA (см. рис. 4).

смещения замедлялся и становился слабым, что, по-видимому, обусловлено сильным смещением соседних КТ друг относительно друга в сильных электрических полях. Связывание КТ уже невозможно, и оптические переходы становятся предпочтительно прямыми. Для двух систем ВККТ с $s = 8.6$ и 30 нм были оценены отношения толщин прослойки и темпов смещения Штарка (линейных участков) от величины поля, которые оказались равными соответственно ~ 3.5 и 4.6. Эти величины различаются незначительно. Отсюда можно заключить, что предложенное нами объяснение, основанное на полученных экспериментальных данных по ДА-спектроскопии и предполагающее контролируемое электронное связывание между соседними КТ в 10-слойных системах ВККТ InAs/GaAs с толщинами прослойки GaAs между КТ InAs 8.6 и 30 нм, непротиворечиво. Следствием такого связывания может быть изменение симметрии исследуемой системы от нульмерной к двумерной [15–20]. В этом случае помимо латеральной длины КТ необходимо учитывать суммарную толщину двух слоев КТ InAs и прослойки GaAs между ними. Отсюда становятся понятными наблюдаемые нами экспериментально значения поляризационной анизотропии ЭЛ и поглощения 10-слойной системы ВККТ InAs/GaAs с толщинами прослойки GaAs 8.6 нм. Они определяются проявлением эффекта вовлечения основных состояний тяжелых дырок в оптические переходы для света, поляризованного как в плоскости (xy), перпендикулярной оси роста, так и вдоль направления роста структуры (z), которое связано с двумерностью исследуемой системы.

4. Заключение

В ходе экспериментальных исследований поляризационных зависимостей спектров ЭЛ и поглощения 10-слойной системы ВККТ InAs/GaAs с толщиной прослойки GaAs между КТ InAs 8.6 нм было установлено, что значения поляризационной анизотропии ЭЛ и поглощения равны соответственно $P_l \approx 0.85$ и $P_k \approx 0.45$. Это оказалось меньше аналогичных величин поляризационной анизотропии для структур с одним рядом КТ и МКТ, но больше, чем для СРКТ. Далее были измерены спектры дифференциального поглощения в зависимости от величины напряжения обратного смещения, приложенного к 10-слойной системе ВККТ InAs/GaAs с толщиной прослойки GaAs 8.6 нм, которые позволили выявить точку нулевого значения ДА и оценить изменения энергии оптических переходов E_n в присутствии электрического поля. Эти измерения позволили также проследить за темпом изменения энергии смещения Штарка под влиянием внешнего электрического поля F и экспериментально выявить наличие контролируемого квантового связывания двух соседних КТ в 10-слойных системах ВККТ InAs/GaAs с толщиной прослойки GaAs 8.6 и 30 нм. Эти результаты, как и данные по поляризационной анизотропии, позволяют подтвер-

дить сделанные нами в работе [15] выводы о проявлении эффекта вовлечения основных состояний тяжелых дырок в оптические переходы света, поляризованного как в плоскости (xy), перпендикулярной оси роста, так и вдоль направления роста структуры (z). Природа этого эффекта определяется двумерностью исследуемой системы.

Работа выполнена при частичном финансировании из проектов РФФИ № 12-02-00388-а и президиума РАН № 24.

Список литературы

- [1] D. Bimberg, M. Grundmann, N.N. Ledentsov. *Quantum Dot Heterostructures* (Wiley, Chichester, 1998).
- [2] M. Bayer, P. Hawrylak, K. Hinzer, S. Fafard, M. Korkusinski, Z.R. Wasilewski, O. Stern, A. Forchel. *Science*, **291**, 451 (2001).
- [3] W. Sheng, J.-P. Leburton. *Phys. Rev. Lett.*, **86** (16), 167 401 (2002).
- [4] G. Ortner, I. Yugova, G. Baldassarri Höger von Högersthal, A. Larionov, H. Kurtze, D.R. Yakovlev, M. Bayer, S. Fafard, Z. Wasilewski, P. Hawrylak, Y.B. Lyanda-Geller, T.L. Reinecke, A. Babinski, M. Potemski, V.B. Timofeev, A. Forchel. *Phys. Rev. B*, **71**, 125 335 (2005).
- [5] H.J. Krenner, M. Sabathil, E.C. Clark, A. Kress, D. Schuh, M. Bichler, G. Abstreiter, J.J. Finley. *Phys. Rev. Lett.*, **94**, 057 402 (2005).
- [6] М.М. Соболев, Г.Э. Цырлин, Ю.Б. Самсоненко, Н.К. Поляков, А.А. Тонких, Ю.Г. Мусихин. *ФТП*, **39**, 131 (2005).
- [7] М.М. Соболев, А.Е. Жуков, А.П. Васильев, Е.С. Семенова, В.С. Михрин, Г.Э. Цырлин, Ю.Г. Мусихин. *ФТП*, **40**, 84 (2006).
- [8] 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).
- [9] 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**, 205 304 (2009).
- [10] V.G. Talalaev, G.E. Cirlin, A.A. Tonkikh, N.D. Zakharov, J.W. Tomm, P. Werner, U. Gösele. *Nanoscale Res. Lett.*, **1** (2), 137 (2006).
- [11] М.М. Соболев, G.E. Cirlin, A.A. Tonkikh. *Physica B: Condens. Matter*, **401–402**, 576 (2007).
- [12] М.М. Соболев, Г.Э. Цырлин, А.А. Тонких, Н.Д. Захаров. *ФТП*, **42**, 311 (2008).
- [13] М.М. Соболев, А.П. Васильев, В.Н. Неведомский. *ФТП*, **44**, 790 (2010).
- [14] 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).
- [15] М.М. Соболев, И.М. Гаджиев, И.О. Бакшаев, В.Н. Неведомский, М.С. Буяло, Ю.М. Задиранов, Р.В. Золотарева, Е.Л. Портной. *ФТП*, **46**, 93 (2012).
- [16] A. Gubenko, D. Livshits, I. Krestnikov, S. Mikhlin, A. Kozhukhov, A. Kovsh, N. Ledentsov, A. Zhukov, E. Portnoi. *Electron. Lett.*, **41**, 1124 (2005).
- [17] M. Sobolev, M. Buyalo, I. Gadzhiev, I. Bakshaev, Y. Zadiranov, E. Portnoi. *Nanoscale Res. Lett.*, **7**, 545 (2012).

- [18] 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**, R10 509 (1996).
- [19] F. Adler, M. Geiger, A. Bauknecht, F. Scholz, H. Schweizer, M.H. Pilkuhn, B. Ohnesorge, A. Forchel. J. Appl. Phys., **80**, 4019 (1996).
- [20] T. Tanaka, J. Singh, Y. Arakawa, P. Bhattachatya. Appl. Phys. Lett., **62**, 756 (1993).

Редактор Л.В. Шаронова

Influence of the GaAs spacer thickness on the quantum coupling and optical polarization in 10-layer systems of InAs/GaAs vertically correlated quantum dots

M.M. Sobolev, I.M. Gadzhiyev, M.S. Buyalo, V.N. Nevedomskiy, Yu.M. Zadiranov, R.V. Zolotareva, A.P. Vasil'ev, V.M. Ustinov

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

Abstract Experimental electroluminescence (EL) and absorption studies of optical polarization anisotropy in 10-layer system of InAs/GaAs vertically correlated quantum dots (VCQD) are presented. The VCQD system with thickness of GaAs interlayer of 8.6 nm was incorporated in two-sectional laser with sections of equal length. The polarization anisotropy in this structure is smaller, than for the analogous systems with single quantum dot layer and quantum dot molecule, but stronger than in quantum dot superlattice systems. Besides, the results of differential absorption spectra at different fields applied to the structure are provided. The measured Stark shift rate dependence on electrical field allowed us to identify controlled quantum coupling of two neighboring quantum dots in 10-layer VCQD systems with interlayer thickness of 8.6 and 30 nm. The measured polarization dependencies are defined by the effect of heavy-hole ground states involvement in optical transitions. The nature of this effect is due to two-dimensionality of investigated systems.