

## Многослойные InGaAs-гетероструктуры „квантовая яма-точки“ в фотопреобразователях на основе GaAs

© С.А. Минтаиров<sup>1,3</sup>, Н.А. Калужный<sup>3</sup>, А.М. Надточий<sup>1,2,3</sup>, М.В. Максимов<sup>1,3</sup>, В.Н. Неведомский<sup>3</sup>, Л.А. Сокура<sup>3,5</sup>, С.С. Рувимов<sup>4</sup>, М.З. Шварц<sup>3</sup>, А.Е. Жуков<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> ООО „Солар Дотс“, 194021 Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

<sup>4</sup> University of Notre Dame, Notre Dame, Indiana 46556, USA

<sup>5</sup> Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“ им. В.И. Ульянова (Ленина), 197376 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: mintairov@scell.ioffe.ru

(Получена 2 апреля 2018 г. Принята к печати 10 апреля 2018 г.)

Исследованы GaAs-фотопреобразователи, содержащие гетероструктуры квантовая яма-точки (КЯТ), которые по своим свойствам являются промежуточными между квантовыми ямами и квантовыми точками. КЯТ были получены осаждением  $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$  номинальной толщиной 8 монослоев методом газовой эпитаксии из металлоорганических соединений и представляют собой плотный массив локализуемых носителей в трех направлениях упругонапряженных островков, образованных локальным увеличением толщины слоя InGaAs и(или) концентрации индия в нем. Обнаружено наличие двух уровней размерного квантования различной природы в структурах с КЯТ, которые проявляются на спектральных характеристиках GaAs-фотопреобразователей. Коротковолновый спектральный пик с максимумом в области 935 нм связан с поглощением в остаточной квантовой яме, а длинноволновый (1015–1030 нм) обусловлен поглощением в КЯТ. Исследования методом просвечивающей электронной микроскопии позволили установить, что увеличение числа слоев InGaAs приводит к росту упругих напряжений, которые в свою очередь приводят к заглублению уровней размерного квантования в КЯТ и длинноволновому сдвигу в спектральной зависимости внутреннего квантового выхода фототока.

DOI: 10.21883/FTP.2018.10.46452.8879

### 1. Введение

Квантоворазмерные гетероструктуры на основе материалов, не совпадающих по параметру решетки с окружающей матрицей, находят широкое применение в современных светоизлучающих и фотопреобразующих полупроводниковых приборах [1–7]. В настоящее время наибольшее практическое применение нашли приборы на основе квантовых ям (КЯ) и квантовых точек (КТ). Одним из важных преимуществ напряженных КЯ и КТ является возможность достижения больших длин волн поглощения и излучения по сравнению с приборами на основе объемных материалов. В частности, использование InGaAs КЯ и InAs КТ позволило на подложках арсенида галлия создать фотопреобразователи (ФП) с краем поглощения до 1100 нм [1–4] и лазерные диоды, излучающие на длинах волн более 1300 нм [5–7]. Однако при создании таких гетероструктур необходимо уделять особое внимание минимизации упругих напряжений, что приводит к определенным ограничениям с точки зрения конструкции активной области. Так, например, при последовательном росте нескольких КЯ следует избегать пластической релаксации упругих напряжений за счет образования дислокаций несоответствия и других дефектов, что в свою очередь увеличивает темп безыз-

лучательной рекомбинации и уменьшает квантовую эффективность. Данная проблема затрудняет возможность использования большого количества КЯ в активной области приборов, что необходимо для достижения достаточного поглощения света.

При образовании КТ напряженный слой InAs распадается на отдельные упругонапряженные трехмерные островки. Это происходит после осаждения всего 1.7 монослоев InAs. Малое количество материала, рассогласованного на 7% по отношению к параметру решетки матрицы, дает возможность для последовательного формирования десяти и более рядов КТ в активной области прибора без образования дефектов, а малая ширина запрещенной зоны материала в сочетании с достаточно большой высотой островков позволяет реализовать поглощение (излучение) в более длинноволновой области спектра по сравнению с КЯ. В то же время плотность состояний структур с КТ ограничена поверхностной плотностью точек, которая, как правило, относительно мала  $\sim 10^{10} \text{ см}^{-2}$  [8]. Это определяет слабое поглощение излучения в КТ, что для ФП выражается в незначительном приросте фототока и определяет необходимость использования значительного количества рядов КТ для его существенного увеличения. КЯ характеризуются значительно большей плотностью

состояний и поэтому до настоящего времени в основном именно они использовались в ФП для увеличения фототока. Однако и в этом случае прирост фототока все еще остается недостаточным для широкого применения КЯ в ФП.

Таким образом, актуальной является задача создания и исследования гибридных (промежуточных между КЯ и КТ) полупроводниковых гетероструктур, которые обладали бы преимуществами обоих типов квантово-размерных структур. Они должны обеспечивать частичное перераспределение напряжений двумерного слоя в массив упругонапряженных областей без образования высокой концентрации дефектов, сохраняя при этом высокий уровень поглощения (усиления). Недавно авторами данной работы были продемонстрированы гибридные InGaAs-структуры типа „квантовая яма-точки“ (далее КЯТ или QWDs), которые удовлетворяют данным требованиям. Использование таких гибридных наноструктур позволило повторно осаждать (складировать) до 20 слоев КЯТ [9] без существенного ухудшения их оптических свойств и обеспечило расширение спектральной чувствительности ФП на основе GaAs в длинноволновую область спектра (с 860 нм (для GaAs) до 1100 нм). Был продемонстрирован рекордно высокий прирост фототока в GaAs ФП с КЯТ [10]. Торцевые лазеры на основе КЯТ продемонстрировали меньшие пороговые плотности тока по сравнению с КЯ и большее усиление по сравнению с КТ [11].

В данной работе представлены результаты исследования методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) структур, содержащих различное количество слоев InGaAs КЯТ, а также детальное исследование влияния дизайна поглощающей среды на основе КЯТ на спектральную чувствительность GaAs ФП.

## 2. Методика эксперимента

Структуры ФП с КЯТ были выращены методом МОС-гидридной эпитаксии (газовой эпитаксии из металлоорганических соединений) на подложках  $n^+$ -GaAs(100) при пониженном давлении 100 мбар. Для проведения эпитаксиальных процессов использовалась установка с реактором горизонтального типа. Триметилгаллий, триметилалюминий и триметилиндий применялись в качестве источников элементов III группы, в качестве источника мышьяка (V группа) использовался арсин. Силан и диэтилцинк служили для легирования слоев донорной и акцепторной примесью соответственно.

Все структуры ФП включали в себя базу  $n$ -GaAs толщиной 2700 нм и эмиттер  $p$ -GaAs толщиной 200 нм, между которыми располагался нелегированный слой  $i$ -GaAs толщиной 800 нм. В середине нелегированного слоя выращивались 1, 3, 5, 7, 10, 15 или 20 рядов КЯТ, разделенных промежуточными (спейсерными) слоями GaAs толщиной 40 нм. Для сравнения также была выращена контрольная структура, не содержащая КЯТ

(Ref-SC). Слои  $n$ -Al<sub>0,3</sub>Ga<sub>0,7</sub>As и  $p$ -Al<sub>0,85</sub>Ga<sub>0,15</sub>As использовались в качестве тыльного потенциального барьера и широкозонного „окна“ соответственно. Каждый ряд КЯТ формировался осаждением In<sub>0,4</sub>Ga<sub>0,6</sub>As номинальной толщиной 8 монослоев (МС). Все слои структуры выращивались при температуре 700°C, при росте КЯТ и спейсерных слоев температура понижалась до 550°C.

Для измерения фотовольтаических характеристик из выращенных структур были изготовлены ФП без контактной сетки. Для этого на тыльную и лицевую стороны структуры ФП осуществлялось электрохимическое осаждение металлическим контактом из никеля, а в областях, не закрытых металлическим контактом, проводилось химическое травление контактного слоя. Измерение спектральных зависимостей внешнего квантового выхода фотоответа и коэффициента отражения позволяло получать значения для внутреннего квантового выхода (ВКВ) фотоответа ФП в диапазоне длин волн до 1400 нм [12].

Исследования структур с КЯТ проводились методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) на микроскопе Titan-80-300 в режиме высокого разрешения и на микроскопе JEOL JEM 2100F в дифракционном режиме при ускоряющем напряжении 200 кВ. Образцы были приготовлены с помощью двух общеизвестных методик: ионного травления (на установке FEI Dual-Beam™ SEM/FIB Helios Nano-Lab 600) и путем предварительной механической шлифовки с последующей окончательной обработкой ионным пучком Ag<sup>+</sup> с энергией ~ 3.5 кэВ.

## 3. Результаты и обсуждение

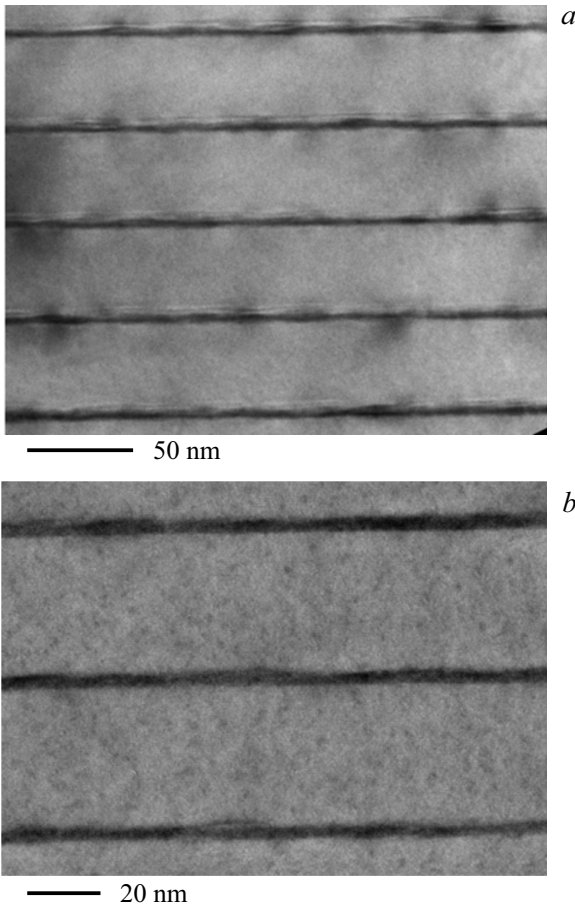
На рис. 1 приведены светлопольные ПЭМ-изображения поперечного сечения средней части структуры, содержащей КЯТ. В области одиночных слоев InGaAs (рис. 1, *a*) видны неоднородности толщины, имеющие характерный период 35–40 нм. Наблюдаемые изменения контраста могут быть вызваны как модуляцией толщины InGaAs-слоя, так и модуляцией концентрации индия, приводящей к локальному перераспределению упругих напряжений, а также их комбинацией. Таким образом, в слоях КЯТ происходит частичное снятие упругих напряжений за счет образования небольшого рельефа верхней границы. Это обуславливает их преимущество по сравнению с однородными КЯ с точки зрения последовательного роста нескольких слоев без формирования дефектов. При сравнении с КТ преимущество КЯТ определяется большей поверхностной плотностью центров локализации носителей, т.е. областей с большей толщиной и (или) с большим содержанием индия ( $\propto 10^{11}$  см<sup>-2</sup>).

Увеличение числа рядов осажденного InGaAs не приводит к заметному изменению размеров и плотности КЯТ в отдельных слоях (рис. 1, *a*). Кроме того, на ПЭМ изображениях в режиме высокого разрешения (рис. 1, *b*) видно, что нижняя граница слоев сохраняет свою планарность. Это позволяет заключить, что использованная толщина GaAs спейсерного слоя (40 нм) достаточна

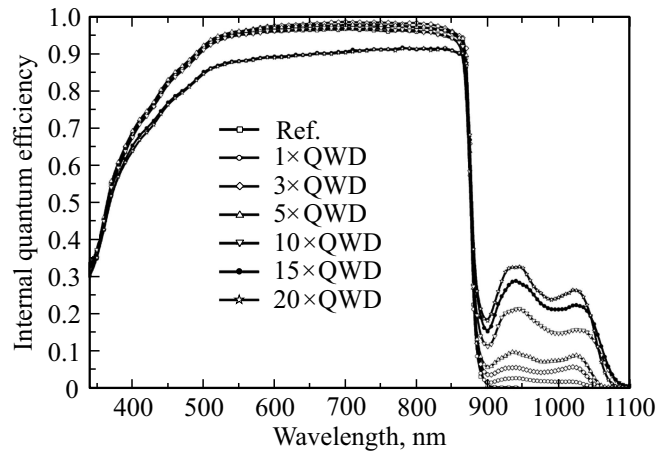
для того, чтобы нивелировать влияние полей упругих напряжений от нижних слоев КЯТ на формирование верхних слоев.

Введение КЯТ в нелегированную область GaAs ФП приводит к расширению его фоточувствительности в длинноволновую область спектра с 860 до 1100 нм (рис. 2). Использование 10 рядов КЯТ не оказывает заметного влияния на спектр ВКВ фототовета в основном диапазоне фоточувствительности GaAs (менее 860 нм). Дальнейшее увеличение количества слоев КЯТ до 15 и выше приводит к понижению общего уровня ВКВ в диапазоне длин волн короче 860 нм, что говорит о возникновении каналов безызлучательной рекомбинации в области *p-n*-перехода GaAs ФП. Это вероятно, определяется образованием точечных дефектов из-за накопления упругих напряжений в КЯТ.

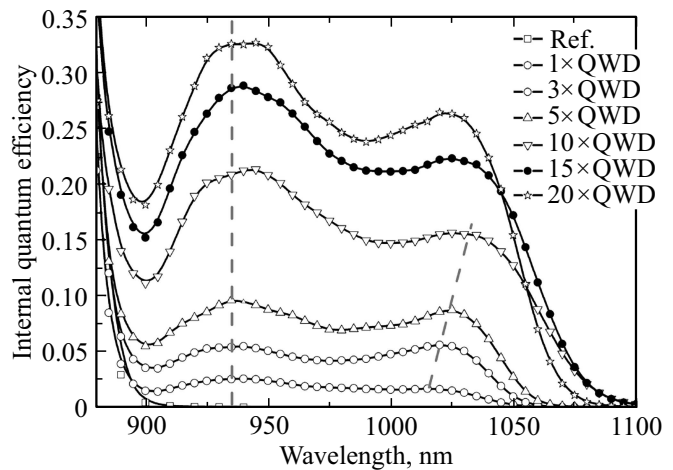
Спектр ВКВ фототовета КЯТ включает два длинноволновых пика с максимумами в области 930–940 и 1015–1030 нм (рис. 3), причем увеличение количества рядов КЯТ приводит к росту величины ВКВ для обоих пиков. Рост числа слоев КЯТ с 1 до 10 также проявляется в монотонном сдвиге длинноволнового пика и края поглощения КЯТ в область больших длин волн, при этом спектральная позиция коротковолнового пика



**Рис. 1.** Светлопольные изображения части структур, содержащих КЯТ, полученные методом ПЭМ: *a* — в зоне [110]; *b* — в режиме высокого разрешения.



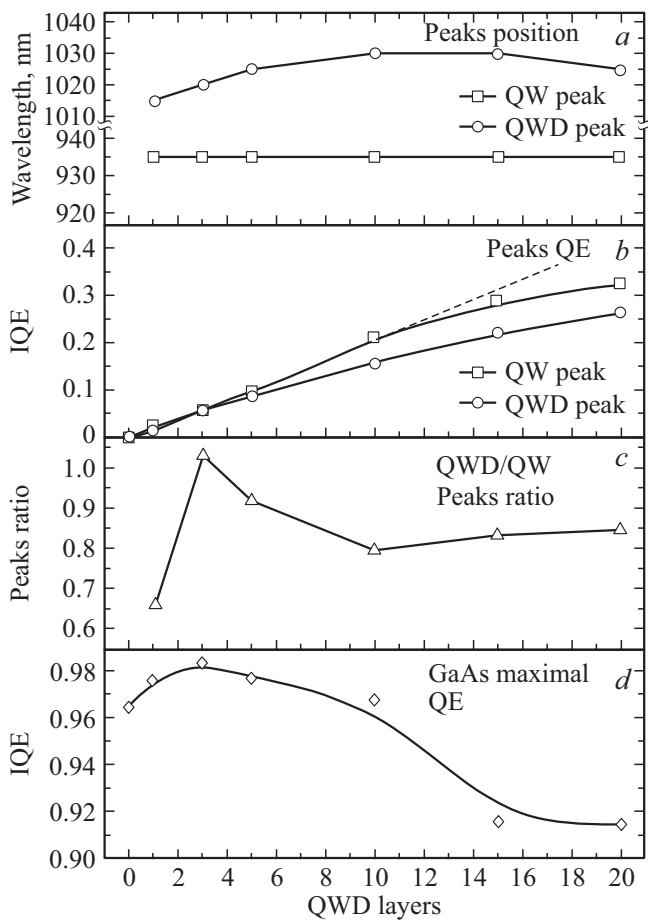
**Рис. 2.** Спектральные зависимости ВКВ фототовета для ФП на основе GaAs с различным количеством слоев КЯТ.



**Рис. 3.** Спектральные пики на зависимостях ВКВ фототовета в длинноволновой области фоточувствительности, определяемой КЯТ с различным количеством слоев.

остается неизменной (рис. 3). Однако при дальнейшем увеличении количества слоев КЯТ (до 15–20) пик на 1020–1030 нм претерпевает коротковолновый сдвиг (рис. 3). При этом максимум коротковолнового пика (930–940 нм) сохраняет свою позицию как для случая 15, так и 20 рядов КЯТ. Кроме описанных выше особенностей, увеличение количества слоев КЯТ приводит к изменению отношения максимальных значений ВКВ фототовета для описанных выше пиков.

Анализ спектральных характеристик ФП с КЯТ приведен на рис. 4. Ввиду различного характера изменений в положениях двух пиков на спектральных зависимостях ВКВ фототовета при увеличении количества рядов КЯТ (рис. 4, *a*) мы полагаем, что эти пики имеют различную природу. Коротковолновый пик (935 нм) следует соотносить с уровнем размерного квантования InGaAs КЯ (QW-peak), а изменяющий свою спектральную позицию длинноволновый пик (QWD-peak) с КЯТ, локализуя носители в трех измерениях в областях с большей



**Рис. 4.** Параметры пиков КЯТ и КЯ: *a* — длина волны максимума ВКВ, *b* — максимальное значение ВКВ, *c* — отношение максимальных значений ВКВ пиков от КЯТ и КЯ, *d* — максимальный уровень ВКВ фотоответа в области фоточувствительности GaAs для ФП с различным количеством слоев КЯТ.

толщиной и(или) большим содержанием индия внутри InGaAs-слоя. Разброс по размерам и содержанию индия в КЯТ приводит к неоднородному уширению пика ВКВ фотоответа. Коротковолновый пик (930–940 нм) также значительно уширен вследствие неоднородного профиля толщины и концентрации индия в окружающей КЯТ квантовой яме.

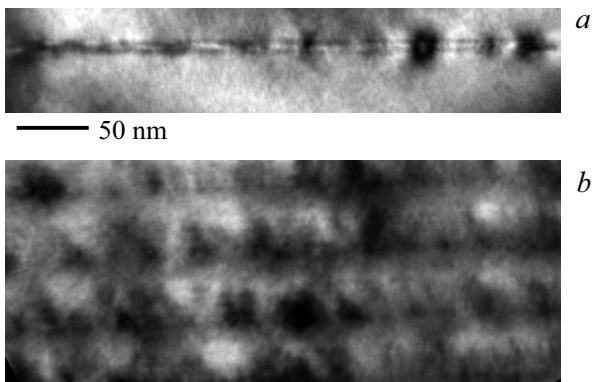
Различие природы пиков КЯ и КЯТ также подтверждается различным характером возрастания значений ВКВ фотоответа при увеличении количества рядов КЯТ (рис. 4, *b*). Так при увеличении числа слоев КЯТ с 1 до 10 наблюдается линейное увеличение величины ВКВ для пика КЯ, в то время как небольшое отклонение от линейности спектрального пика КЯТ происходит уже при 5 слоях (рис. 4, *b*). Отклонение роста значений ВКВ от линейного говорит о том, что часть фотогенерированных носителей безызлучательно рекомбинирует на дефектах, образующихся в КЯТ. Тот факт, что для пика КЯ это происходит при большем количестве слоев InGaAs, подтверждает сделанное выше предположение о природе

длинноволнового и коротковолнового пиков на спектральных зависимостях ВКВ фотоответа. Возможность свободного транспорта фотогенерированных носителей вдоль КЯ уменьшает вероятность их рекомбинации на дефектах, находящихся в КЯТ, имеющих наибольшую энергию локализации (т.е. с большим размером и(или) составом по In) и, как следствие, характеризующихся неравномерным распределением внутри слоя InGaAs. С другой стороны, носители, рожденные за счет поглощения длинноволновых фотонов в КЯТ, локализованы и не могут перемещаться вдоль слоя, что увеличивает вероятность их безызлучательной рекомбинации, прежде чем они будут разделены полем  $p-n$ -перехода.

Описанное выше поведение максимумов в пределах спектральных пиков для КЯТ и КЯ объясняет тот факт, что их отношение уменьшается при увеличении КЯТ слоев от 3 до 10 (рис. 4, *c*). При дальнейшем увеличении числа слоев InGaAs концентрация дефектов в КЯТ становится значительной и безызлучательная рекомбинация оказывает сравнимое влияние на гибель всех фотогенерированных носителей. Поэтому отношение длинноволнового и коротковолнового пиков ВКВ не претерпевает заметного изменения для образцов с 15 и 20 рядами КЯТ (рис. 4, *c*). Малое отношение пиков КЯТ и КЯ для образца с одним слоем КЯТ (рис. 4, *c*) может объясняться только меньшим поглощением фотонов в КЯТ, поскольку на данном этапе исследований это трудно связать какими-либо определенными свойствами КЯТ.

Максимальные значения ВКВ фотоответа в области фоточувствительности GaAs (диапазон длин волн короче 860 нм), как известно, ограничиваются безызлучательной рекомбинацией носителей, разделяющихся в  $i$ -области  $p-n$ -перехода. Тот факт, что введение 1–3 слоев КЯТ в GaAs ФП приводит к возрастанию значения ВКВ (рис. 4, *d*), может говорить об уменьшении концентрации дефектов в  $i$ -области. Это в свою очередь может объясняться диффузией дефектов в объемном слое  $i$ -GaAs в полях упругих напряжений, создаваемых слоями КЯТ. Последнее находит свое отражение в их неравномерном распределении в  $i$ -области и уменьшении вероятности безызлучательной рекомбинации. При увеличении количества слоев КЯТ от 3 до 10 наблюдается некоторое снижение максимального значения ВКВ фотоответа в диапазоне основной фоточувствительности GaAs (рис. 4, *d*), что со значительно большей вероятностью определяется излучательной рекомбинацией носителей, захваченных на уровни слоев КЯТ, чем возникновением каналов безызлучательной рекомбинации. Дальнейшее увеличение количества слоев КЯТ до 15 и более приводит к значительному уменьшению значений ВКВ фотоответа для GaAs (рис. 4, *d*), что, как уже говорилось ранее, связано с возникновением большого количества дефектов в слоях КЯТ.

На рис. 5 приведены изображения структур, содержащих 1 и 10 рядов КЯТ, полученные ПЭМ в режиме дифракционного контраста в двулучевых условиях с действующим вектором дифракции  $\mathbf{g} = (220)$ . Изображения подтверждают, что увеличение количества рядов



**Рис. 5.** Темнопольное изображение ПЭМ с действующим вектором дифракции  $\mathbf{g} = (220)$  части структур, содержащих: *a* — один слой КЯТ, *b* — десять слоев КЯТ.

КЯТ не приводит к изменению среднего расстояния между областями деформаций кристаллической решетки, что согласуется с данными ПЭМ, полученными в зоне  $(1\bar{1}0)$  (рис. 1, *a*). Увеличение количества рядов осажденного InGaAs также не приводит к заметному изменению размеров КЯТ (рис. 1), что подтверждается сохранением ширины спектрального пика и общей формы спектральной зависимости для КЯТ. Действительно, если бы упругие напряжения, создаваемые нижними слоями КЯТ, влияли на формирование последующих, приводя к увеличению их латерального размера и (или) концентрации индия в них, то спектр поглощения КЯТ уширился бы при увеличении количества рядов КЯТ. Таким образом, можно сделать вывод, что наблюдаемый сдвиг максимума спектрального пика КЯТ с 1015 до 1030 нм при увеличении количества слоев КЯТ от 1 до 10 (рис. 4, *a*) не связан с увеличением размеров КЯТ в верхних слоях. По всей видимости, возрастание количества напряженных InGaAs-слоев приводит к увеличению общего упругого напряжения области, содержащей КЯТ, и соответственно к росту локализуемого потенциала островков и заглоблению их уровня размерного квантования. Коротковолновый сдвиг спектрального пика при дальнейшем увеличении количества КЯТ слоев до 20, по всей видимости, вызван образованием дефектов в части квантово-размерного массива с наибольшей энергией локализации и, как следствие, с наибольшей упругой напряженностью в структуре. Это также подтверждается тем, что ширина спектрального пика КЯТ заметно уменьшается для образцов с 15 и 20 рядами КЯТ (рис. 3).

#### 4. Заключение

Методами ПЭМ и фототока проведены исследования структур, полученных эпитаксиальным осаждением от 1 до 20 рядов  $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$  номинальной толщиной 8 монослоев. Показано, что внутри слоя InGaAs формируются области с локальным увеличением толщины слоя

InGaAs и (или) концентрации индия в нем, обладающие большой поверхностной плотностью и локализующие носители заряда в трех направлениях (квантовые ямы-точки). В экспериментальных спектральных зависимостях ВКВ фотоответа исследуемых структур наблюдаются два пика, имеющих разную природу. Коротковолновый пик (935 нм) связан с поглощением в модулированной обедненной индием КЯ, а длинноволновый (1015–1030 нм) с поглощением в КЯТ. Показано, что увеличение количества слоев КЯТ не приводит к изменению их структурных параметров (концентрации In, размера), однако общее напряжение кристаллической решетки при этом возрастает. Это приводит к длинноволновому сдвигу спектрального пика на зависимости ВКВ фотоответа для КЯТ при увеличении количества слоев InGaAs, в то время как пик КЯ не изменяет своего положения. Показано, что в GaAs ФП может быть введено до 10 слоев КЯТ без заметного ухудшения его структурного совершенства. При дальнейшем увеличении количества слоев КЯТ происходит образование дефектов и падение значения ВКВ фотоответа в области основной полосы фоточувствительности GaAs.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (соглашение 16-12-10269). ПЭМ исследования выполнены с использованием оборудования федерального ЦКП „Материаловедение и диагностика в передовых технологиях“, поддержанного Министерством образования и науки России (Уникальный идентификатор проекта RFMEFI62117X0018). Постростовая обработка выращенных образцов была выполнена в ЦКП „Элементная база радиофотоники и нанoeлектроники: технология, диагностика, метрология“.

#### Список литературы

- [1] B. Browne, J. Lacey, T. Tibbitts, G. Bacchin, T.-C. Wu, J. Q. Liu, X. Chen, V. Rees, J. Tsai, J.-G. Werthen. *AIP Conf. Proceedings*, **1556**, 3 (2013).
- [2] H. Fujii, T. Toprasertpong, Y. Wang, K. Watanabe, M. Sugiyama, Y. Nakano. *Prog. Photovolt.: Res. Appl.*, **22**, 784 (2014).
- [3] N.A. Kalyuzhnyy, S.A. Mintairov, R.A. Saliy, A.M. Nadtochiy, A.S. Payusov, P.N. Brunkov, V.N. Nevedomsky, M.Z. Shvarts, A. Marti, V.M. Andreev, A. Luque. *Progr. Photovolt.*, **24** (9), 1261 (2016).
- [4] S.A. Blokhin, A.V. Sakharov, A.M. Nadtochy, A.S. Pauysov, M.V. Maximov, N.N. Ledentsov, A.R. Kovsh, S.S. Mikhlin, V.M. Lantratov, S.A. Mintairov, N.A. Kaluzhniy, M.Z. Shvarts. *Semiconductors*, **43**, 514 (2009).
- [5] L.A. Coldren, S.W. Corzine, M.L. Mashanovitch. *Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits*, ISBN: 978-0-470-48412-8.
- [6] А.Е. Жуков, М.В. Максимов, А.Р. Ковш. *ФТП*, **46** (10), 1249 (2012).
- [7] S.S. Mikhlin, A.R. Kovsh, I.L. Krestnikov, A.V. Kozhukhov, D.A. Livshits, N.N. Ledentsov, Yu.M. Shernyakov, I.I. Novikov, M.V. Maximov, V.M. Ustinov, Z.I. Alferov. *Semicond. Sci. Technol.*, **20**, 340 (2005).
- [8] Р.А. Салий, С.А. Минтаиров, П.Н. Брунков, А.М. Надточий, А.С. Паюсов, Н.А. Калужный. *ФТП*, **49**, 1136 (2015).

- [9] S.A. Mintairov, N.A. Kalyuzhnyy, M.V. Maximov, A.M. Nadtochiy, A.E. Zhukov. *Semicond. Sci. Technol.*, **32**, 015006 (2017).
- [10] S.A. Mintairov, N.A. Kalyuzhnyy, M.V. Maximov, A.M. Nadtochiy, S. Rouvimov, A.E. Zhukov. *Electron. Lett.*, **51** (20), 1602 (2015).
- [11] S.A. Mintairov, N.A. Kalyuzhnyy, V.M. Lantratov, M.V. Maximov, A.M. Nadtochiy, S. Rouvimov, A.E. Zhukov. *Nanotechnology*, **26** (38), 385202 (2015).
- [12] M.Z. Shvarts, A.E. Chalov, E.A. Ionova, V.R. Larionov, D.A. Malevskiy, V.D. Rummyantsev, S.S. Titkov. *Proc. 20th Eur. Photovoltaic Solar Energy Conf.* (Barcelona, Spain, 2005) p. 278.

Редактор А.Н. Смирнов

## Multilayer InGaAs quantum well-dots nanostructures in GaAs-based photo converters

S.A. Mintairov<sup>1,3</sup>, N.A. Kalyuzhnyy<sup>3</sup>,  
A.M. Nadtochiy<sup>1,2,3</sup>, M.V. Maximov<sup>1,3</sup>,  
S.V. Nevedomskiy<sup>3</sup>, L.A. Sokura<sup>3,5</sup>, S. Rouvimov<sup>4</sup>,  
M.Z. Shvarts<sup>3</sup>, A.E. Zhukov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> St. Petersburg Academic University,  
194021 St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup> Solar Dots Ltd.,  
194021 St. Petersburg, Russia

<sup>3</sup> Ioffe Institute,  
194021 St. Petersburg, Russia

<sup>4</sup> University of Notre Dame,  
Notre Dame, Indiana 46556, USA

<sup>5</sup> St. Petersburg Electronical University „LETI“,  
197376 St. Petersburg, Russia

**Abstract** GaAs photo-converters containing quantum well-dots (QWD) heterostructures are investigated. The properties of QWD are intermediate between those of quantum wells and quantum dots. The QWDs were obtained by epitaxial deposition of  $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$  with a nominal thickness of 8 monolayers by metalorganic vapor phase epitaxial deposition. QWDs represent a dense array of elastically stressed islands localizing carriers in three directions formed by a local increase in indium concentration and/or InGaAs layer thickness. There are two quantum levels of various nature in the structures with QWDs, which are manifested in the spectral characteristics of GaAs photo-converters. A short-wavelength peak with a maximum in the 935 nm region is associated with absorption in the residual quantum well, and the long-wavelength peak (1015–1030 nm) is due to absorption in the QWDs. Investigations by transmission electron microscopy showed that an increase in the number of InGaAs layers leads to an increase of the elastic stresses, the enhancement of carrier confinement energy in QWDs with corresponding long-wavelength shift of the internal quantum efficiency spectrum.