

Исследование фотолюминесценции в системе InGaAs/GaAs с квантовыми точками спектрального диапазона 1100 нм

© А.В. Бабичев¹, С.Д. Комаров², Ю.С. Ткач¹, В.Н. Неведомский¹, С.А. Блохин¹,
Н.В. Крыжановская^{2,3}, А.Г. Гладышев⁴, Л.Я. Карачинский⁴, И.И. Новиков⁴

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет им. Ж.И. Алфёрова
Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

³ Национальный исследовательский университет „Высшая школа экономики“,
190121 Санкт-Петербург, Россия

⁴ Национальный исследовательский университет ИТМО,
197101 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: a.babichev@mail.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 7 октября 2022 г.

В окончательной редакции 31 января 2023 г.

Принята к публикации 3 февраля 2023 г.

Представлены результаты исследования оптических свойств InGaAs-квантовых точек. Однослойные InGaAs-квантовые точки с высотой 5.3, 3.6 и 2.6 монослоя, а также трехслойные квантовые точки с высотой 2.6 монослоя были сформированы методом молекулярно-пучковой эпитаксии по механизму Странски–Крастанова на подложках GaAs, с использованием метода частичного прикрытия и высокотемпературного отжига. Уменьшение размеров квантовых точек позволяет осуществить коротковолновый сдвиг положения максимума спектра фотолюминесценции с 1200 до 1090 нм, а увеличение числа слоев квантовых точек позволяет компенсировать падение интенсивности максимума спектра фотолюминесценции. Показано, что данный тип квантовых точек подходит для создания активных областей лазеров с вертикальным микрорезонатором для нейроморфных вычислений.

Ключевые слова: молекулярно-пучковая эпитаксия, арсенид галлия, InGaAs, механизм Странски–Крастанова.

DOI: 10.21883/FTP.2023.01.54932.4184

1. Введение

Квантовые точки (КТ) используются в качестве активных областей для широкого круга лазерных применений [1], в том числе в лазерах с микрорезонатором для нейроморфных вычислений [2,3]. В источниках одиночных фотонов требуется малая плотность КТ [4], однако в лазерных структурах с вертикальным микрорезонатором, где изначально объем активной области минимален, наоборот, требуется повышать плотность КТ, чтобы достигнуть порога лазерной генерации. Оптическое усиление активных областей на основе „идеальных“ КТ должно превышать оптическое усиление активных областей на основе квантовых ям (КЯ), однако на практике ситуация иная, что обусловлено эффектом неоднородного уширения в ансамбле КТ. Данный факт ограничивает высокотемпературную генерацию лазеров с КТ в конструкции с вертикальным микрорезонатором. Предельная рабочая температура данных лазеров с токовой накачкой составляет ~ 100 К [5].

Для эпитаксиального роста длинноволновых лазерных структур с КТ (О-спектрального диапазона, вблизи 1300 нм) традиционно используются InAs/InGaAs КТ [6]. В свою очередь осаждение дополнительного слоя

InGaAs с более низким составом по индию позволяет реализовать длинноволновое излучение в КТ на основе тройных твердых растворов InGaAs [7]. Однако усиленные свойства активных областей О-спектрального диапазона на основе InGaAs КТ ниже в сравнении со случаем использования InAs КТ. Эпитаксия КТ проводится по механизму Странски–Крастанова (СК), для которого типично наличие смачивающего слоя [8], представляющего собой по сути напряженную КЯ высотой в несколько нанометров, расположенную на гетероинтерфейсе КТ/GaAs [9].

Для реализации лазерных структур с излучением вблизи 1100 нм традиционно используются InGaAs/GaAs КТ. При высокой доле индия ($\sim 60\%$) формируются механически сильнонапряженные „линзообразные“ InGaAs КТ с размерами 10–15 нм и плотностью точек $\sim (1-2) \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$. Снижение доли индия до 45% позволяет уменьшить плотность КТ до $(1-2) \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$ и увеличить размер КТ до 20–25 нм [10]. Дальнейшее уменьшение доли индия (до 30%) позволяет существенно уменьшить механические напряжения между осаждаемым слоем и подложкой (до 2%), осаждают КТ с меньшей плотностью ($\sim 9 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$) и вытянутые вдоль одного кристаллографического направления, что

требуется для создания источников одиночных фотонов. В данном случае характерные размеры КТ находятся в диапазоне 50–100 нм вдоль направления $[0\bar{1}\bar{1}]$ и ~ 30 нм в перпендикулярном направлении [11–15].

Типичная полуширина спектра фотолюминесценции (ФЛ) КТ, излучающих вблизи 1100 нм и демонстрирующих высокую эффективность ФЛ, требуемую для лазерных применений, составляет 80–90 мэВ [16,17], что существенно превышает аналогичное значение для КТ О-спектрального диапазона [18]. Данный факт обусловлен большей флуктуацией размеров КТ в ансамбле для случая КТ спектрального диапазона 1100 нм, размеры которых меньше в сравнении с КТ спектрального диапазона 1200–1300 нм при типичных ростовых температурах. В свою очередь реализация низкотемпературных КТ позволяет снизить полуширину линии ФЛ (до 35–40 мэВ [16,17]), однако при этом интенсивность линии ФЛ падает на несколько порядков [16].

Для реализации фотонных резервуарных вычислений требуется формировать плотный массив спектрально-однородных микролазеров с целью реализации дифракционного связывания лазеров в массиве [2]. Увеличение же числа микролазеров в массиве приводит к росту пороговой мощности оптической накачки, требуемой для реализации фотонных резервуарных вычисления. Как результат, наряду со спектральной однородностью микролазеров также необходимо минимизировать пороговую мощность накачки отдельных микролазеров [2]. С целью снижения пороговой мощности необходимо, с одной стороны, увеличивать усиление активных областей на основе КТ, а с другой — минимизировать потери в слоях распределенных брэгговских отражателей.

Для повышения максимального оптического усиления активных областей в лазерах спектрального диапазона 1100 нм на основе КТ [17] применяются подходы, направленные на снижение неоднородного уширения (inhomogeneous linewidth broadening, i.e. QDs size distribution).

Первый из подходов по снижению неоднородного уширения состоит в использовании субмонослойной миграционно-стимулированной эпитаксии (субмонослойного осаждения), основанной на формировании чередующихся субмонослойных слоев InAs/(In)GaAs [11–13,19,20]. Из недостатков подхода стоит отметить сложность контроля состава КТ в силу инерционности переключения заслонок материалов в установках молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ).

Второй подход по снижению неоднородного уширения КТ состоит в использовании метода частичного прикрытия и высокотемпературного отжига КТ (partial capping and annealing, PCA technique) или, как его также называют, — метод испарения индия (indium-flush procedure) [21], метод эпитаксии КТ с ограничением по высоте (height-limiting growth method) [17]. В данном случае после формирования КТ и эпитаксии тонкого покрывающего слоя GaAs проводится высокотемпературный отжиг структуры длительностью в несколько

минут [22–24]. При отжиге структуры уменьшается высота КТ вследствие десорбции материала с непокрытой области вблизи вершины КТ. Развитие данного подхода представлено в работе [25], в котором за счет формирования дополнительного широкозонного слоя AlAs после формирования КТ удалось исключить эффект связывания между КТ и состояниями смачивающего слоя (наличие ФЛ от смачивающего слоя в спектрах ФЛ ансамбля КТ), а высокотемпературный отжиг применен для уменьшения разброса по высоте КТ в ансамбле.

Суммируем: применение метода PCA для эпитаксии КТ в лазерах с вертикальным микрорезонатором позволяет более прецизионно контролировать длину волны излучения (за счет изменения толщины покрывающего слоя и за счет изменения времени отжига) и, как следствие, более прецизионно контролировать величину сдвига (detuning) между спектральным положением излучения ансамбля КТ и спектральным положением основной оптической моды резонатора, что требуется для лазерных структур, используемых для нейроморфных вычислений.

Ранее для формирования гетероструктур лазеров на КТ с вертикальным микрорезонатором, требуемых для нейроморфных вычислений, применялся метод металлоорганической газофазной эпитаксии (МОГФЭ) [2,3]. Однако типичное отклонение толщин слоев по площади эпитаксиальной структуры составляло $\sim 2\%$, что приводило к сдвигу резонансной длины волны излучения ~ 30 мэВ по площади двухдюймовой пластины. Как результат, при создании лазеров для фотонных резервуарных вычислений необходимо компенсировать данную спектральную неоднородность. В свою очередь технология МПЭ обеспечивает большую однородность состава и толщин слоев по площади структуры ($\sim 1\%$).

В настоящей работе представлены результаты по эпитаксиальному росту и исследованию оптических свойств InGaAs КТ, выращенных методом МПЭ по механизму Странски–Крастанова с применением метода PCA.

2. Экспериментальные образцы

В ходе эксперимента методом МПЭ сформирована серия образцов, включающих InGaAs КТ, выращенных по механизму Странски–Крастанова. На подложках GaAs(100) выращивался буферный выполаживающий слой GaAs толщиной 100 нм. Между двумя барьерными слоями $\text{Al}_{0.23}\text{Ga}_{0.77}\text{As}$ толщиной 35 нм располагался слой матрицы GaAs толщиной 300 нм, в середину которого помещались слои с КТ. Температура роста составляла 580°C для всех исследованных структур. В свою очередь перед осаждением КТ температура подложки снижалась до 490°C . Скорость осаждения слоев КТ составила 0.2 монослоя (МС) в секунду. Далее проводились осаждение покрывающего КТ слоя GaAs (capping layer) с увеличением потока мышьяка и

последующий подъем температуры до 580°C [17] с целью отжига образцов длительностью 4 мин (реализация режима PCA).

Структуры 1–3 включали один слой $\text{In}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}\text{As}$ КТ с различной высотой КТ (5.3, 3.6 и 2.6 МС). Толщина покрывающего КТ слоя GaAs в них составляла 5.0 нм. Структура 4 аналогична структуре 3, за исключением толщины покрывающего КТ слоя GaAs, которая была уменьшена до 3.5 нм.

С целью повышения оптического усиления активных областей лазеров с вертикальным микрорезонатором, требуемых для нейроморфных вычислений, была выращена структура 5 с тремя слоями $\text{In}_{0.63}\text{Ga}_{0.37}\text{As}$ КТ высотой 2.6 МС. Дальнейшее увеличение числа слоев КТ до 5 и более неэффективно ввиду необходимости помещения КТ в максимум пространственного распределения интенсивности стоячей волны в микрорезонаторе. Толщина покрывающего КТ слоя GaAs в структуре 5 составляла 5 нм, а слои КТ разделены слоями GaAs толщиной 20 нм с целью исключения эффекта связывания между слоями КТ. Для структур 3–5 добавлена выдержка после осаждения КТ на поверхность GaAs, время выдержки в потоке мышьяка составило 30 с.

Исследования методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ-исследования) проводились на электронном микроскопе JEM2100F (Jeol) при ускоряющем напряжении 200 кВ. Образцы готовились в геометрии поперечного сечения по общепринятой методике, включающей уточнение с помощью прецизионной шлифовки и распыление ионами аргона на конечном этапе до перфорации.

Измерения спектров ФЛ при температуре 297 К проведены с использованием установки PM2000, VerteX (Nanometrics) с применением InGaAs-фотодетектора и полупроводникового лазера с длиной волны накачки 532 нм. Скорость измерений составляла 5 точек в секунду, размер щели 2 мм. Использована дифракционная решетка 300 линий/мм. Мощность оптической накачки фиксирована на уровне 4 и 45 мВт соответственно.

Измерения спектров микро-ФЛ проведены в диапазоне температур 77–290 К с использованием лазера Nd:YLF с длиной волны излучения 527 нм. Мощность лазера варьировалась в диапазоне 0.016–2 мВт (непрерывный режим накачки). Фокусировка излучения проводилась при помощи объектива 100× M Plan Apo NIR (Mitutoyo). Размер пятна после фокусировки составил ~ 1 мкм. Сигнал ФЛ направлялся на входные щели монохроматора MS5204i (Sol Instruments). Техника синхронного детектирования с применением охлаждаемого InGaAs детектора использовалась для регистрации спектров микро-ФЛ.

3. Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлены изображения структур 1–3, 5, полученные методом просвечивающей электронной мик-

Параметры InGaAs КТ выращенных структур

№ структуры	Высота КТ, нм	Латеральный размер КТ, нм	Толщина смачивающего слоя, нм
1	4.5–5.5	15–20	4.9
2	2.0–4.0	20–27	2.8
3	2.0–2.5	14–23	1.5–2.4
5	3.8–4.2	18–35	1.5–1.7

роскопии (ПЭМ-изображения) в двулучевых условиях с действующим вектором дифракции $g = (002)$ в режиме темного поля. Показано, что КТ в структуре 3 имеют самую минимальную высоту. Форма КТ отличается от образца к образцу. В структуре 2 КТ имеют форму линз высотой ~ 4 нм и латеральным размером 20–27 нм. В структуре 1 форма КТ — это „высокая“ усеченная пирамида, а в структуре 3 — тоже усеченная пирамида, но существенно меньшей высоты. Данная форма КТ обусловлена применением отжига после роста прикрывающего слоя GaAs, который привел к испарению индия с вершин КТ, выступающих над прикрывающим слоем. Параметры слоев InGaAs сведены в таблицу. Оценочное значение плотности КТ в исследуемых образцах составило $(1–3) \cdot 10^{10}$ ед./см². Верхняя граница слоев GaAs, которые прикрывали КТ во время отжига между КТ, не видна. Однако слои, в которых располагаются КТ, имеют довольно сильный темный контраст. Подобный контраст связывают со смачивающим слоем (WL), который остается после формирования КТ. В исследованных структурах толщина данного „темного“ слоя на ПЭМ-изображениях достигает 3.5–4.0 нм. Типичные толщины смачивающего слоя при росте InAs КТ составляют 0.5–1.0 нм [26]. Таким образом, при росте InGaAs КТ толщина смачивающего слоя превышает аналогичное значение в InAs КТ [12], что обусловлено меньшим рассогласованием по постоянной кристаллической решетки между InGaAs и слоем матрицы GaAs [27], по сути составом по индию InGaAs.

На рис. 1, d представлены результаты исследования структуры 5, включающей 3 слоя $\text{In}_{0.63}\text{Ga}_{0.37}\text{As}$ КТ высотой 2.6 МС. На изображении наблюдается вертикальное выстраивание КТ при складировании. Как показано ранее [28], последовательное осаждение нескольких слоев КТ, разделенных тонкими барьерами, приводит к тому, что механические напряжения нижнего слоя КТ влияют на рост следующего слоя КТ и наблюдается эффект вертикального выстраивания КТ в колонны. В то же время показано [29], что данный эффект наблюдается при толщинах слоев, разделяющих КТ, < 15 нм. В свою очередь в структуре 5 толщина слоев, разделяющих КТ, выше (20 нм), но при этом эффект складирования в колонки также наблюдается, что может быть обусловлено большим латеральным размером КТ. На основе статистического анализа ряда снимков, полученных для

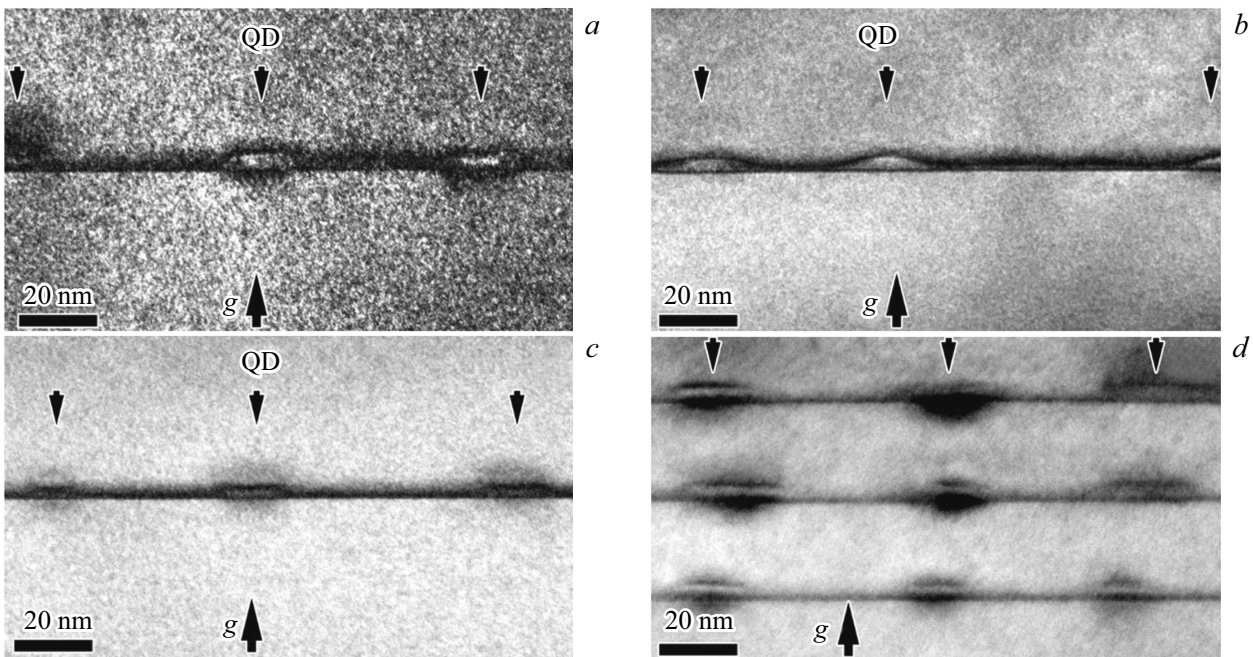


Рис. 1. Изображения поперечного сечения ($1\bar{1}0$): *a, b, c* и *d* — для структур 1, 2, 3 и 5 соответственно.

структуры 5, показано, что форма и размер КТ во всех трех слоях идентичны, при этом режим роста слоев КТ также был одинаков. Специальных подходов для сохранения размера КТ не применялось. Таким образом, при данных размерах КТ и толщинах разделяющих слоев GaAs в процессе роста поле упругих напряжений от уже выращенных КТ оказывает влияние только на место расположения КТ в формируемом слое и никак не влияет на их размер и форму. Как результат, эффекта роста величины неоднородного уширения вследствие дисперсии КТ по размерам в разных рядах не проявляется.

На рис. 2 представлены спектры ФЛ, измеренные при уровне оптической накачки 4 и 45 мВт. При низком уровне накачки структура 1 с одним слоем $\text{In}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}\text{As}$ КТ высотой 5.3 нм демонстрирует максимум интенсивности спектра ФЛ вблизи 1198 нм с малой полной полушириной максимума спектра ФЛ (~ 45 мэВ, рис. 1, *a*). Таким образом, применение техники root cause analysis (RCA) позволило снизить разброс параметров КТ (неоднородное уширение в ансамбле КТ [20,30]). Значение полуширины линии ФЛ (величины FWHM), соответствующей переходам через основные состояния в ансамбле КТ (~ 38 мэВ, на основе разложения на 2 гауссовы компоненты), сопоставимо с ранее полученными результатами (FWHM ~ 40 мэВ) для $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ КТ аналогичной высоты, полученных методом RCA [17]. В спектре ФЛ также наблюдается коротковолновое плечо вблизи 1154 нм, отстоящее на 42 мэВ от линии ФЛ, соответствующей переходам через основные состояния. Типичные энергетические расстояния между основными и возбужденными состояниями в ансамбле КТ составля-

ют 25–75 мэВ и определяются режимами эпитаксии, в том числе температурой осаждения КТ, их составом, а также толщиной покрывающего слоя [21].

Уменьшение высоты КТ с 5.3 до 2.6 нм (структуры 1–3) приводит к коротковолновому сдвигу положения максимума интенсивности спектра ФЛ, увеличению интенсивности линии ФЛ, соответствующей переходам через возбужденные состояния, а также к уширению максимума спектра ФЛ.

Максимум интенсивности спектра ФЛ для структуры 3 с КТ высотой 2.6 нм соответствует длине волны излучения 1094 нм. Как показано ранее [31], уменьшение размеров КТ при сохранении их состава приводит к росту энергии квантования основного и возбужденного состояний. При достижении определенного критического размера КТ возбужденные состояния настолько поднимаются по энергии, что сдвигаются в область смачивающего слоя, приводя к наличию только основного состояния и оптических переходов с ним связанных. В свою очередь увеличение размера КТ выше какого-то критического значения приводит к сближению энергетических уровней до тех пор, пока не образуется мини-зона. Таким образом, с уменьшением размера КТ проявляются два эффекта: коротковолновый сдвиг положения обеих линий ФЛ, а также увеличение энергетического расстояния между данными линиями ФЛ [1] (большой коротковолновый сдвиг линии ФЛ возбужденного состояния по отношению к сдвигу линии ФЛ основного состояния), что и описывают наблюдаемые в эксперименте коротковолновый сдвиг положения максимума ФЛ, а также увеличение ширины максимума спектра ФЛ.

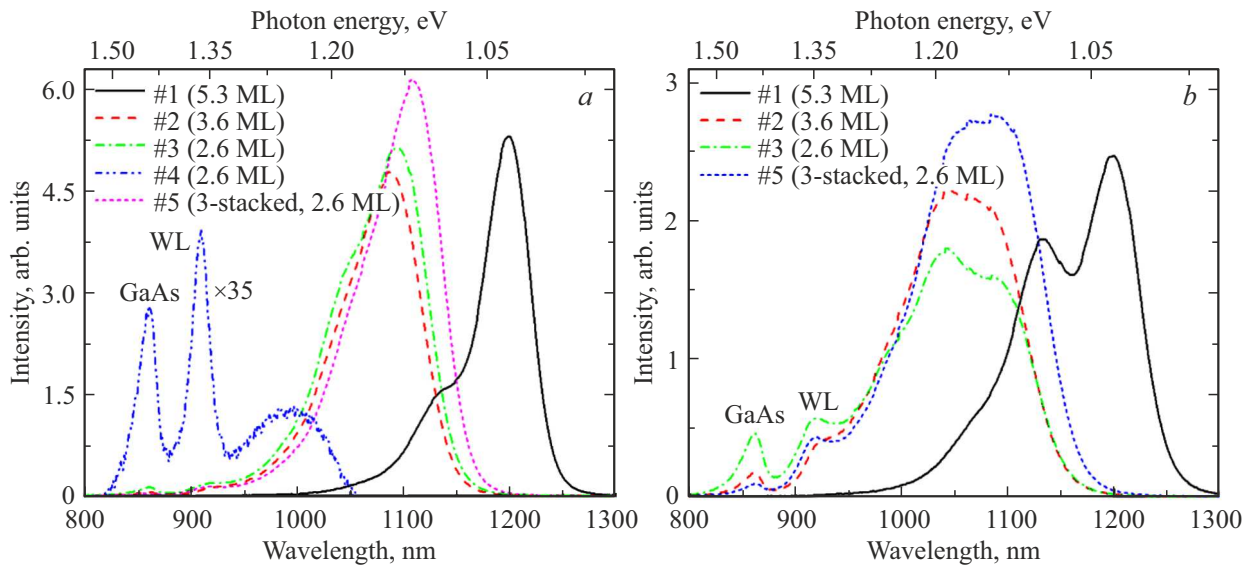


Рис. 2. Спектры фотолюминесценции структур 1–5 при уровне оптической накачки 4 мВт (панель *a*) и 45 мВт (панель *b*). Спектр ФЛ структуры 4 на панели *a* показан в масштабе ($\times 35$), обозначение WL соответствует смачивающему слою InGaAs.

Структура 5 с тремя слоями $\text{In}_{0.63}\text{Ga}_{0.37}\text{As}$ КТ высотой 2.6 МС демонстрирует большую интенсивность спектра ФЛ в сравнении со структурой 3 с одним слоем КТ высотой 2.6 МС. Ранее было показано [32], что эффект насыщения ФЛ через основные состояния наблюдается при более высоких плотностях оптической накачки в структурах с несколькими слоями КТ, что соотносится с экспериментом. Полная ширина спектра ФЛ от КТ несколько ниже аналогичного значения для структуры 3 с одним слоем КТ по причине более эффективной накачки основного состояния в структуре 5 с тремя слоями КТ.

Ранее сообщалось об использовании покрывающего слоя толщиной 3 нм для реализации КТ, излучающих в спектральном диапазоне 1100 нм, выращенных методом МПЭ [17]. Схожие параметры были использованы при росте структуры 4, где толщина покрывающего слоя составила до 3.5 нм. Однако уменьшение толщины покрывающего слоя в сравнении со структурами 1–3 привело к отсутствию линии, типичной для КТ в спектре ФЛ (см. рис. 1, *a*). В спектре ФЛ структуры 4 присутствуют три линии, соответствующие GaAs (вблизи 860 нм), смачивающему слою InGaAs (вблизи 910 нм, обозначение WL), а также слою КТ, существенно сдвинутому в коротковолновую область по отношению к положению линии КТ в структуре 3. В силу уменьшения толщины покрывающего слоя большие КТ переиспарились и в спектре ФЛ наблюдается излучение от КТ с меньшими размерами, излучающими в более коротковолновой области спектра. Интенсивность ФЛ от КТ уменьшилась, что связано с меньшей плотностью КТ в сравнении со структурой 3.

Повышение уровня оптической накачки (до 45 мВт) приводит к росту интенсивности ФЛ. В отличие от слу-

чая низкой оптической накачки, в спектре ФЛ структуры 1 с одним слоем $\text{In}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}\text{As}$ КТ явно выражены два максимума, что обусловлено более эффективной накачкой возбужденных состояний (рис. 1, *b*). С уменьшением высоты КТ (с 5.3 до 2.6 МС) наблюдаются два эффекта: уменьшение интенсивности максимума спектра ФЛ, а также рост интенсивности линии, соответствующей переходам через возбужденные состояния. Структура 5 с тремя слоями КТ демонстрирует рост интенсивности спектра ФЛ и более эффективную накачку основного состояния в сравнении со структурой 3 с одним слоем КТ. Сопоставление спектров ФЛ структуры 1 с одним слоем КТ высотой 5.3 МС и структуры 5 с тремя слоями КТ высотой 2.6 МС позволяет сделать следующие выводы: уменьшение размера КТ позволяет осуществить коротковолновый сдвиг положения максимума спектра ФЛ с 1200 до 1090 нм, а увеличение числа слоев КТ позволяет компенсировать падение интенсивности максимума спектра ФЛ.

Проведены температурные исследования спектров микро-ФЛ структуры 5 с тремя слоями КТ высотой 2.6 МС. На рис. 3 представлены результаты измерений при мощности оптической накачки 0.17 мВт. При температуре 77 К наблюдается широкий максимум с характерной полной полушириной максимума спектра микро-ФЛ ~ 110 мэВ. Увеличение температуры до 140 К приводит к росту интенсивности микро-ФЛ. При этом наблюдается падение величины полной полуширины максимума спектра микро-ФЛ, что обусловлено более эффективной накачкой через основные состояния. Дальнейшее увеличение температуры до 290 К приводит к уменьшению интенсивности излучения. Малое падение интегральной интенсивности микро-ФЛ (в 1.9 раза) с увеличением температуры с 77 до 290 К свидетельствует

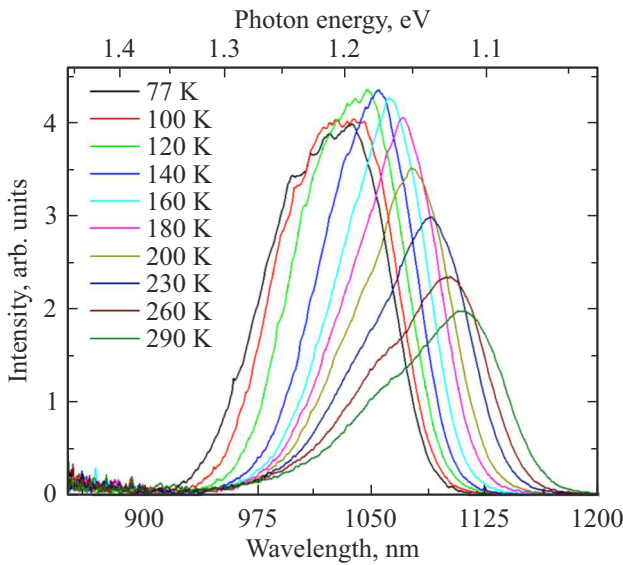


Рис. 3. Спектры микро-ФЛ структуры 5, измеренные при различных температурах. Мощность оптической накачки составила 0.17 мВт.

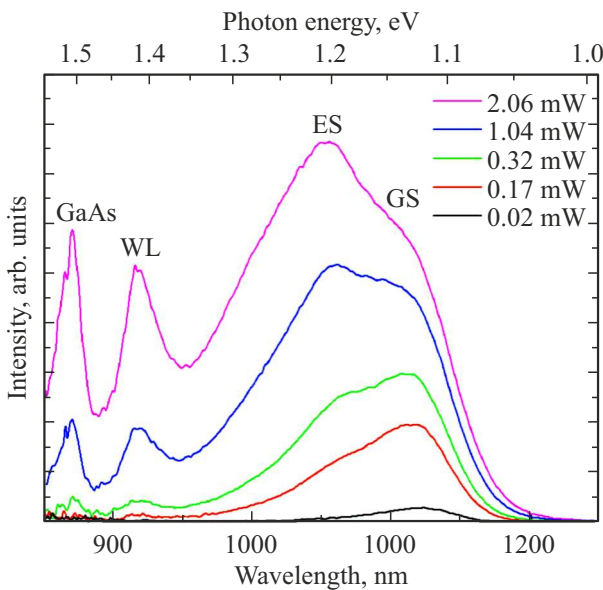


Рис. 4. Спектры микро-ФЛ структуры 5 при различных уровнях оптической накачки, измеренные при температуре 290 К.

о высоком оптическом качестве сформированных КТ. Проведено разложение максимума спектра микро-ФЛ, соответствующего температуре 290 К, на две гауссовы компоненты. Полуширина линии ФЛ вблизи 1070 нм, соответствующей переходам через основные состояния, составила ~ 54 мЭВ. Энергетическое расстояние между основными и возбужденными состояниями в ансамбле КТ составило 47 мЭВ.

На рис. 4 приведены спектры микро-ФЛ структуры 5 с 3 слоями КТ высотой 2.6 МС в зависимости от накачки, измеренные при температуре 290 К. При мощности

накачки 0.02 мВт наблюдается оптическая накачка через основные состояния в ансамбле КТ. Полуширина пика ФЛ составила 66 мЭВ. С увеличением накачки наблюдается увеличение интенсивности линии микро-ФЛ от возбужденных состояний, возрастает эффективность люминесценции от смачивающего слоя и подложки. При уровне накачки 0.54 мВт интенсивности линий микро-ФЛ от переходов в ансамбле КТ через основные и возбужденные состояния сравниваются. Дальнейший рост уровня накачки (> 0.54 мВт) приводит к более быстрому росту интенсивности линии ФЛ, обусловленной оптическими переходами через возбужденные состояния с насыщением интенсивности линии ФЛ, обусловленной оптическими переходами через основные состояния.

4. Заключение

Проведены эксперименты по эпитаксиальному росту и исследованию оптических свойств InGaAs КТ спектрального диапазона 1100 нм, полученных по механизму Странски–Крастанова с применением метода частичного прикрытия и высокотемпературного отжига КТ. Проведено исследование структурного качества сформированных КТ методом просвечивающей электронной микроскопии. Показано, что для структуры, включающей три слоя $\text{In}_{0.63}\text{Ga}_{0.37}\text{As}$ КТ высотой 2.6 МС, наблюдается вертикальное выстраивание КТ при складировании. Проведено исследование спектров ФЛ сформированных структур. Уменьшение размера КТ позволяет осуществить коротковолновый сдвиг положения максимума спектра ФЛ с 1200 до 1090 нм, а увеличение числа слоев КТ позволяет компенсировать падение интенсивности максимума спектра ФЛ. Проведены температурные исследования спектров микро-ФЛ структуры с тремя слоями КТ высотой 2.6 МС. Обнаружено слабое падение интегральной интенсивности микро-ФЛ с увеличением температуры с 77 до 290 К, что свидетельствует о высоком оптическом качестве сформированных КТ и перспективности использования данных КТ в качестве активных областей лазеров с вертикальным микрорезонатором для нейроморфных вычислений.

Финансирование работы

Работа авторов из Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00221, <https://rscf.ru/project/22-19-00221/> в части разработки конструкции, эпитаксии гетероструктур, ПЭМ-исследований, исследования спектров микрофотолюминесценции. Н.В. Крыжановская благодарит за поддержку Программу фундаментальных исследований Национального исследовательского университета „Высшая школа экономики“ в части анализа спектров фотолюминесценции.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] D. Bimberg, M. Grundmann, N. N. Ledentsov. *Quantum Dot Heterostructures* (Chichester, England, John Wiley & Sons Ltd, 1999) p. 344.
- [2] T. Heuser, J. Grose, S. Holzinger, M.M. Sommer, S. Reitzenstein. *IEEE J. Select. Top. Quant. Electron.*, **26** (1), 1 (2020).
- [3] T. Heuser, J. Große, A. Kaganskiy, D. Brunner, S. Reitzenstein. *APL Photonics*, **3** (11), 116103 (2018).
- [4] I.I. Novikov, A.M. Nadtochiy, A.Yu. Potapov, A.G. Gladyshev, E.S. Kolodeznyi, S.S. Rochas, A.V. Babichev, V.V. Andryushkin, D.V. Denisov, L.Ya. Karachinsky, A.Yu. Egorov. *J. Luminesc.*, **239**, 118393 (2021).
- [5] S. Reitzenstein, T. Heindel, C. Kistner, A. Rahimi-Iman, C. Schneider, S. Höfling, A. Forchel. *Appl. Phys. Lett.*, **93** (6), 061104 (2008).
- [6] A. Rantamäki, G.S. Sokolovskii, S.A. Blokhin, V.V. Dudelev, K.K. Soboleva, M.A. Bobrov, A.G. Kuzmenkov, A.P. Vasil'ev, A.G. Gladyshev, N.A. Maleev, V.M. Ustinov, O. Okhotnikov. *Optics Lett.*, **40** (14), 3400 (2015).
- [7] J. Große, P. Mrowiński, N. Srocka, S. Reitzenstein. *Appl. Phys. Lett.*, **119** (6), 061103 (2021).
- [8] X. Hu, Y. Zhang, D. Guzun, M.E. Ware, Y.I. Mazur, C. Lienau, G.J. Salamo. *Sci. Rep.*, **10** (1), 10930 (2020).
- [9] G. Şek, P. Poloczek, K. Ryczko, J. Misiewicz, A. Löffler, J.P. Reithmaier, A. Forchel. *J. Appl. Phys.*, **100** (10), 103529 (2006).
- [10] A. Löffler. *„Selbstorganisiertes Wachstum von (Ga)InAs/GaAs-Quantenpunkten und Entwicklung von Mikroresonatoren höchster Güte für Experimente zur starken Exziton-Photon-Kopplung“*, Dissertation (Würzburg, Germany, 2008) p. 191. <https://opus.bibliothek.uni-wuerzburg.de/frontdoor/index/index/year/2008/docId/2589> URN: urn:nbn:de:bvb:20-opus-30323.
- [11] A. Löffler, J.P. Reithmaier, G. Şek, C. Hofmann, S. Reitzenstein, M. Kamp, A. Forchel. *Appl. Phys. Lett.*, **86** (11), 111105 (2005).
- [12] P. Poloczek, G. Şek, J. Misiewicz, A. Löffler, J.P. Reithmaier, A. Forchel. *J. Appl. Phys.*, **100** (1), 013503 (2006).
- [13] S. Reitzenstein, S. Münch, P. Franek, A. Rahimi-Iman, A. Löffler, S. Höfling, L. Worschech, A. Forchel. *Phys. Rev. Lett.*, **103** (12), 127401 (2009).
- [14] C. Hopfmann, A. Musiał, M. Strauß, A. M. Barth, M. Glässl, A. Vagov, M. Strauß, C. Schneider, S. Höfling, M. Kamp, V.M. Axt, S. Reitzenstein. *Phys. Rev. B*, **92** (24), 245403 (2015).
- [15] A. Löffler, J.-P. Reithmaier, A. Forchel, A. Sauerwald, D. Peskes, T. Kümmell, G. Bacher. *J. Cryst. Growth*, **286** (1), 6 (2006).
- [16] N. Ozaki, S. Kanehira, Y. Hayashi, S. Ohkouchi, N. Ikeda, Y. Sugimoto, R.A. Hogg. *J. Cryst. Growth*, **477** (1), 230 (2017).
- [17] K. Watanabe, T. Akiyama, Y. Yokoyama, K. Takemasa, K. Nishi, Y. Tanaka, M. Sugawara, Y. Arakawa. *J. Cryst. Growth*, **378**, 627 (2013).
- [18] R.P. Mirin, K.L. Silverman, D.H. Christensen, A. Roshko. *J. Vac. Sci. Technol.*, B: *Microelectron. Nanometer Struct.*, **18** (3), 1510 (2000).
- [19] T. Finke, V. Sichkovskiy, J.P. Reithmaier. *J. Cryst. Growth*, **517**, 1 (2019).
- [20] S. Ruvimov, P. Werner, K. Scheerschmidt, U. Gösele, J. Heydenreich, U. Richter, N.N. Ledentsov, M. Grundmann, D. Bimberg, V.M. Ustinov, A.Yu. Egorov, P.S. Kop'ev, Zh.I. Alferov. *Phys. Rev. B*, **51** (20), 14766 (1995).
- [21] H. Sasakura, S. Kayamori, S. Adachi, S. Muto. *J. Appl. Phys.*, **102** (1), 013515 (2007).
- [22] L. Wang, A. Rastelli, O. G. Schmidt. *J. Appl. Phys.*, **100** (6), 064313 (2006).
- [23] Z.R. Wasilewski, S. Fafard, J.P. McCaffrey. *J. Cryst. Growth*, **201–202**, 1131 (1999).
- [24] J.M. García, T. Mankad, P.O. Holtz, P.J. Wellman, P.M. Petroff. *Appl. Phys. Lett.*, **72** (24), 3172 (1998).
- [25] M.C. Löbl, S. Scholz, I. Söllner, J. Ritzmann, T. Denneulin, A. Kovács, B.E. Kardynał, A.D. Wieck, A. Ludwig, R.J. Warburton. *Commun. Phys.*, **2** (1), 93 (2019).
- [26] J.H. Blokland, M. Bozkurt, J.M. Ulloa, D. Reuter, A.D. Wieck, P.M. Koenraad, P.C.M. Christianen, J.C. Maan. *Appl. Phys. Lett.*, **94** (2), 023107 (2009).
- [27] P. Podemski, M. Pieczarka, A. Maryński, J. Misiewicz, A. Löffler, S. Höfling, J.P. Reithmaier, S. Reitzenstein, G. Şek. *Superlat. Microstruct.*, **93**, 214 (2016).
- [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. Zaitsev, N.Yu. Gordeev, Zh.I. Alferov, A.I. Borovkov, A.O. Kosogo, S.S. Ruvimov, P. Werner, U. Gösele, J. Heydenreich. *Phys. Rev. B*, **54**, 8743 (1996).
- [29] С.А. Блохин, А.М. Надточий, А.А. Красивичев, Л.Я. Карачинский, А.П. Васильев, В.Н. Неведомский, М.В. Максимов, Г.Э. Цырлин, А.Д. Буравлев, Н.А. Малеев, А.Е. Жуков, Н.Н. Леденцов, В.М. Устинов. *ФТП*, **47** (1), 87 (2013).
- [30] В.И. Белявский, С.В. Шевцов. *ФТП*, **36** (7), 874 (2002).
- [31] A. Schliwa, M. Winkelkemper, D. Bimberg. *Phys. Rev. B*, **76** (20), 205324 (2007).
- [32] M. Grundmann, D. Bimberg. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **36** (pt 1, No. 6B), 4181 (1997).

Редактор Г.А. Оганесян

Investigation of photoluminescence in the InGaAs/GaAs system with 1100-nm range quantum dots

*A.V. Babichev¹, S.D. Komarov², Yu.S. Tkach¹,
V.N. Nevedomskiy¹, S.A. Blokhin¹,
N.V. Kryzhanovskaya^{2,3}, A.G. Gladyshev⁴,
L.Ya. Karachinsky⁴, I.I. Novikov⁴*

¹ Ioffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

² Alferov University,
194021 St. Petersburg, Russia

³ National Research University Higher School
of Economics,

190008 St. Petersburg, Russia

⁴ ITMO University,
197101 St. Petersburg, Russia

Abstract The results of studying the optical properties of InGaAs quantum dots are presented. Single-layer InGaAs quantum dots with a height of 5.3, 3.6 and 2.6 monolayers, as well as three-stacked layers of tunnel-uncoupled quantum dots with a height of 2.6 monolayers were formed by molecular-beam epitaxy according to the Stranski–Krastanow mechanism on GaAs substrates, using the partial capping and annealing technique. A decrease in the size of quantum dots makes it possible to carry out a blueshift of the photoluminescence spectrum maximum from 1200 nm to 1090 nm, and an increase in the number of quantum dots layers makes it possible to compensate for the decrease in the peak intensity. It is shown that this type of quantum dots is suitable for creating the lasers active regions with a vertical microcavity for neuromorphic computing.