

Фотолюминесценция с длиной волны до 1.6 мкм в квантовых точках с увеличенной эффективной толщиной слоя InAs

© М.Н. Дроздов, Н.В. Востоков, В.М. Данильцев, Ю.Н. Дроздов,
Л.Д. Молдавская[¶], А.В. Мурель, В.И. Шашкин

Институт физики микроструктур Российской академии наук,
603950 Нижний Новгород, Россия

(Получена 19 июня 2007 г. Принята к печати 29 июня 2007 г.)

Методом металлорганической газофазной эпитаксии изготовлены многослойные гетероструктуры InAs/GaAs с квантовыми точками, демонстрирующие фотолюминесценцию в диапазоне 1.55 мкм при 300 К. Особенностью процесса роста является использование повышенной эффективности толщины слоя InAs d_{eff} для формирования квантовых точек в сочетании с низкотемпературным зарращиванием их тонким (6 нм) слоем GaAs и со стадией отжига дефектов. Методами рентгеновской дифракции и фотолюминесценции в структурах с повышенной толщиной d_{eff} показано возникновение вторичного смачивающего слоя InGaAs поверх слоя квантовых точек из растворенных крупных релаксированных кластеров InAs при отжиге. Предложен новый механизм формирования крупных квантовых точек с большим значением „aspect ratio“, основанный на 2D–3D трансформации вторичного слоя InGaAs в поле упругих напряжений ранее сформированных квантовых точек. Особенностью массива квантовых точек является наличие трех популяций квантовых точек разных размеров с многомодовой фотолюминесценцией в диапазоне от 1 до 1.6 мкм. Исследуется применение таких структур в качестве фотоприемников на инфракрасный диапазон 1–2.5 мкм при комнатной температуре.

PACS: 78.55.Gr, 85.60.Cz, 68.65.Hb, 78.67.Hc, 81.15.Gh

1. Введение

При формировании квантовых точек (КТ) по механизму Странского–Крастанова одним из критических параметров является соотношение эффективной толщины нанесенного слоя полупроводника для формирования КТ (d_{eff}) и критической толщины их образования (d^*). Как правило, наилучшее оптическое качество КТ достигается при незначительном превышении d_{eff} над величиной d^* : $d_{\text{eff}} \approx (1.1–1.2)d^*$, хотя сама величина d^* может изменяться в достаточно широких пределах от 1.7 до 4 монослоев в зависимости от температуры подложки, соотношения потоков реагентов и конкретного типа гетеропары. Процесс роста КТ в гетероструктурах InAs/GaAs с повышенной толщиной d_{eff} изучался в работах [1–5], где было показано, что при увеличении d_{eff} одновременно с ростом плотности КТ возрастает разброс их размеров и увеличивается число крупных релаксированных кластеров дефектов InAs. Это приводит к уширению линии фотолюминесценции (ФЛ) КТ и снижению ее интенсивности. Поэтому такой подход был признан бесперспективным для формирования излучающих лазерных структур. Насколько нам известно, такой же вывод был сделан и для гетероструктур с КТ, применяемых в качестве инфракрасных фотоприемников. Однако этот вывод представляется нам неокончательным. Недавно, в работах [6–9], для улучшения качества лазерных структур был предложен метод отжига дефектов, что позволило полностью избавиться от крупных релаксированных кластеров при $d_{\text{eff}} \leq (1.1–1.2)d^*$. При росте структур с повышенной

толщиной d_{eff} этот метод ранее не использовался. В данной работе изучаются особенности роста гетероструктур InAs/GaAs с повышенной толщиной d_{eff} при использовании стадии отжига дефектов. Цель этих исследований заключается в поиске оптимальных условий формирования гетероструктур с КТ для фотоприемников в инфракрасном (ИК) диапазоне излучения. В работе [10] мы наблюдали максимальное значение внутризонной фотопроводимости КТ в области 5 мкм при увеличении d_{eff} до $(1.5–2)d^*$. В работе [11] мы показали, что в процессе зарращивания происходит частичное растворение крупных КТ и формирование вторичной квантовой ямы InGaAs из материала растворенных больших островков. При этом образуется сэндвич-структура, в которой квантовые точки расположены между двумя тонкими слоями с повышенным содержанием индия — смачивающим слоем InAs и вторичным слоем InGaAs. Такие структуры характеризуются повышенной плотностью КТ с одинаковой высотой, что объясняет рост их фотопроводимости, см. работу [10]. Кроме того, в работе [10] при 77 К мы наблюдали интенсивные линии межзонной фотопроводимости в области 1.6 мкм и внутризонной вблизи 3 мкм, что свидетельствовало об образовании крупных КТ. Механизм их формирования до последнего времени оставался не ясен. В данной работе проведено детальное исследование структурных и оптических свойств серии гетероструктур InAs/GaAs с повышенной толщиной d_{eff} , отличающихся условиями формирования КТ и их зарращивания низкотемпературным слоем GaAs. Предложен новый механизм формирования крупных КТ в таких структурах. Приведены результаты исследования ИК фотопроводимости

[¶] E-mail: lmd@ipm.sci-nnov.ru

и абсолютной калибровки фоточувствительности таких структур в диапазоне 1–2.5 мкм при комнатной температуре.

2. Эксперимент

Многослойные гетероструктуры InAs/GaAs с квантовыми точками выращивались методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (МОГФЭ) при пониженном давлении. Использовались подложки GaAs(100) с отклонением среза на 2° в направлении $[1\bar{1}0]$. Структуры состояли из 10 слоев КТ InAs, разделенных барьерными слоями GaAs толщиной 60–90 нм. Рост каждого из слоев квантовых точек проводился при пониженной температуре 480°C . Важным ростовым параметром здесь являлось время роста КТ или эквивалентная толщина слоя InAs d_{eff} . Затем следовала продувка реактора водородом в присутствии арсина и зарращивание КТ тонким слоем GaAs при той же температуре роста. Низкотемпературный слой GaAs служит для консервации КТ при дальнейшем подъеме температуры. В режиме прерывания роста температура поднималась до 600°C и проводился рост барьерных слоев GaAs. Данная техника роста включает стадию отжига КТ, зарощенных тонким слоем GaAs, что составляет основу процесса растворения крупных кластеров дефектов [6–9]. Для анализа методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) квантовые точки формировались также на поверхности каждой структуры. Они зарощивались слоем низкотемпературного GaAs при тех же условиях, что и в объеме. Ростовые параметры структур приведены в таблице, варьировались d_{eff} и толщина низкотемпературного слоя GaAs при сохранении других параметров.

Для исследования структурных и оптических свойств использовались методы АСМ, рентгеновской дифракции (РД) и фотолюминесценции. ИК фотопроводимость исследовалась с помощью монохроматора МДР-41. В качестве источника ИК излучения использовался глобар с температурой 1000°C . Для абсолютной калибровки фоточувствительности использовался источник излучения „абсолютно черное тело“ с температурой 600°C .

Параметры роста структур

№ образца	Время роста слоя квантовых точек t^* , с	Время роста низкотемпературного слоя GaAs, с
1060	12	20
1065	13	20
1064	15	20
1061	18	20
1062	12	10
1063	12	30

2.1. АСМ изображения, зарращивание и отжиг

На рис. 1, *a* представлено изображение поверхности образца 1060, полученное методом АСМ. Присутствуют зарощенные КТ большой плотности со слабым контрастом и небольшое число крупных кластеров. После дополнительного отжига при 600°C на месте крупных кластеров возникают пустоты — происходит растворение незарощенных крупных кластеров InAs (рис. 1, *b*). Это процесс получил название „отжиг дефектов“. В работах [6–9] показана его эффективность для улучшения оптического качества лазерных структур при $d_{\text{eff}} \approx d^*$. Мы обнаружили, что использование процедуры отжига дефектов позволяет снизить количество дефектов также и в структурах с увеличенной толщиной слоя InAs d_{eff} . В структуре 1064 число крупных кластеров на поверхности больше, чем в 1060 (рис. 1, *c*), однако и в этой структуре после отжига эти кластеры исчезают (рис. 1, *d*).

На рис. 1, *a* среди КТ присутствует небольшое число вытянутых в направлении $[1\bar{1}0]$ образований с углублениями посередине. Плотность объектов такого типа резко возрастает в структуре 1062, где толщина слоя низкотемпературного GaAs была уменьшена (рис. 1, *e*). Этот рисунок также демонстрирует, что КТ упорядочены вдоль атомных ступеней вицинальной поверхности. Изображения такого вида получили в литературе название „eye-like“ [11–14]. Их образование свидетельствует о том, что процесс зарощивания КТ происходит благодаря поверхностной миграции атомов вдоль атомных ступеней на поверхности слоя GaAs. Следует отметить, что на всех приведенных АСМ-изображениях присутствует хорошо выделенный контраст от атомных ступеней роста, характерный для вицинальной поверхности. Анализируемый слой КТ является одиннадцатым в структуре, общая толщина структуры составляет около 1 мкм. Это доказывает, что в изготовленных многослойных структурах сохраняется планарный ростовой фронт и отсутствуют распространяющиеся на всю глубину дислокации, типичные для дефектных структур.

Таким образом, при использовании стадии отжига в структурах с повышенной толщиной d_{eff} происходит эффективное удаление крупных кластеров дефектов. При этом на ростовой поверхности образуется значительное количество свободных атомов In и As. При выращивании структур методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) эти атомы, как правило, испаряются с поверхности и не принимают участия в дальнейшем процессе роста. По-видимому, такая же ситуация реализовалась и в работе [7], где КТ выращивались методом МОГФЭ, а отжиг проводился с прерыванием потока арсина. В нашей работе подъем температуры при отжиге происходил в потоке арсина, что препятствует испарению атомов In с поверхности. Поэтому атомы In из растворенных крупных кластеров остаются на поверхности низкотемпературного слоя GaAs и эффективно участвуют в дальнейшем росте структуры.

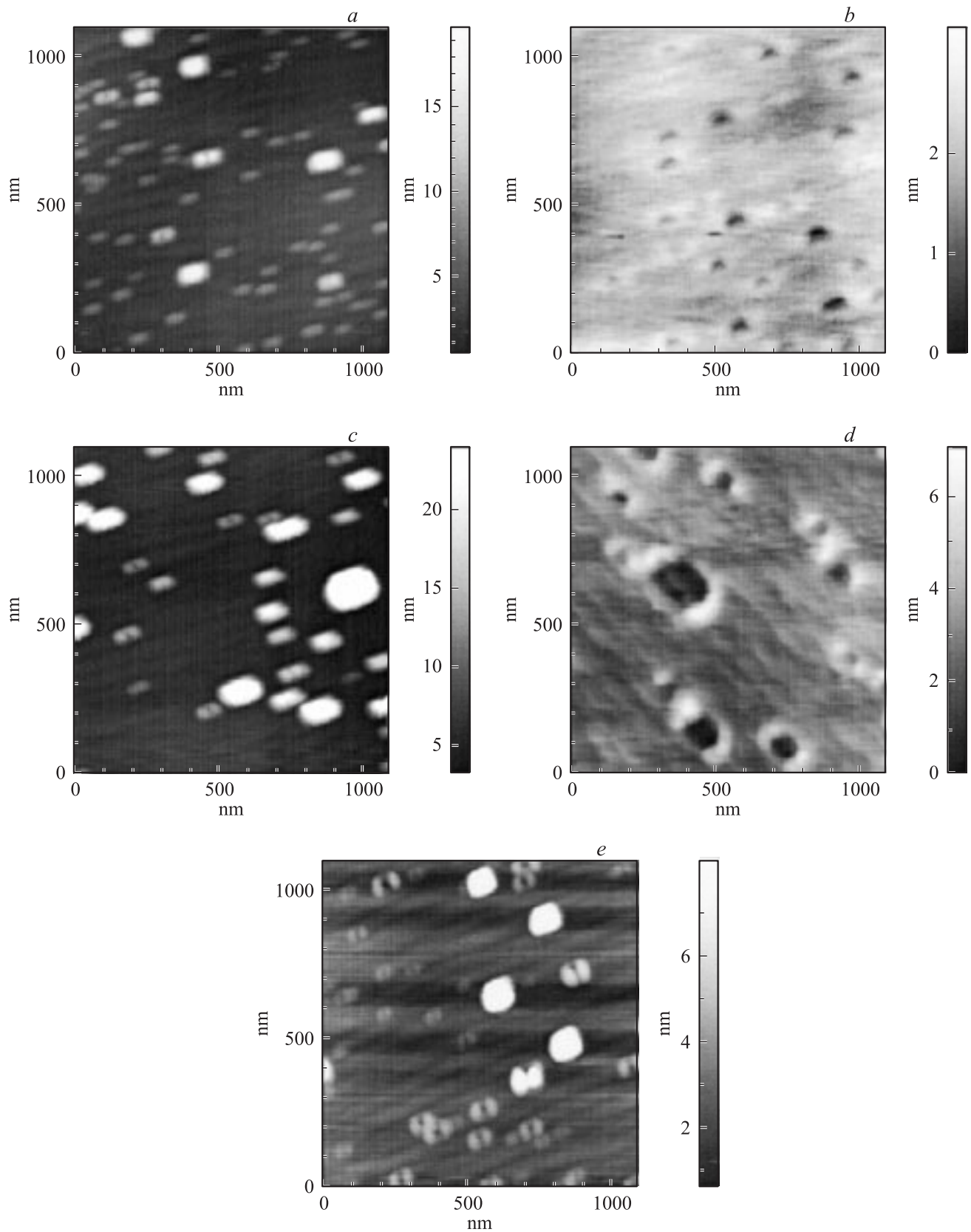


Рис. 1. АСМ изображения поверхности структур до отжига (*a, c, e*) и после (*b, d*). Номера образцов: *a, b* — 1060; *c, d* — 1064, *e* — 1062 (см. таблицу).

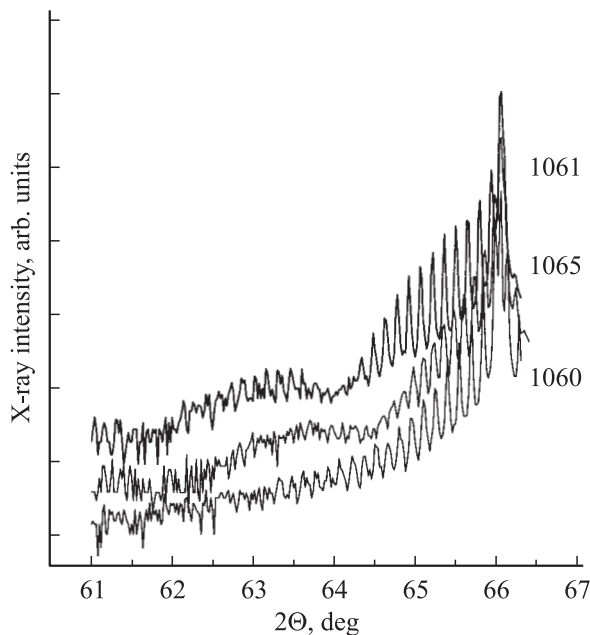


Рис. 2. Рентгенодифракционные кривые структур 1060, 1065 и 1061.

2.2. Рентгенодифракционный анализ, вторичный слой InGaAs

На рис. 2 приведены рентгенодифракционные кривые качания для структур 1060, 1065 и 1061 в окрестности пика GaAs(004). В структуре 1060 время роста слоя InAs t^* составляло 12 с, в структуре 1061 — 18 с при одинаковом времени роста слоя низкотемпературного GaAs (20 с). В структуре 1061 наблюдается дополнительный толщинный контраст, что свидетельствует о возникновении вторичного слоя $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ поверх слоя низкотемпературного GaAs и слоя КТ. Численное моделирование РД данных (см. [15]) позволяет оценить толщину d_2 и состав x_2 этого вторичного слоя: $d_2 = 3.5$ нм, $x_2 = 9\%$ и толщину низкотемпературного слоя GaAs — 6 нм. Таким образом, согласно РД данным в структуре 1061 КТ расположены между двумя тонкими слоями с повышенным содержанием индия — смачивающим слоем InAs и вторичным слоем InGaAs. В структуре 1065, где время роста КТ составляло 13 с, также наблюдается дополнительной толщинный контраст. Однако в отличие от структуры 1061 здесь нет четкой модуляции дополнительного пика сателлитами от периодической структуры смачивающих слоев. На наш взгляд, это связано с тем, что в структуре 1065 концентрация крупных кластеров была ниже, поэтому широкие двумерные островки, обогащенные In, еще не сомкнулись, в отличие от структуры 1061, и не образуют сплошной вторичный слой. Эти островки располагаются в слоях не периодически по толщине структуры, как и породившие их крупные кластеры, поэтому их дифракционный пик не модулирован.

Отметим, что ранее о наблюдении вторичного слоя InGaAs в структурах с КТ другими методами сообщалось в работах [9,16]. Данные механизм роста еще мало изучен [17].

2.3. Фотолюминесценция смачивающего слоя

В работе [11] мы исследовали фотолюминесценцию структуры 1060 и 1064 в коротковолновой области 890–940 нм, где основной вклад дает ФЛ смачивающего слоя. В структуре 1060 при возбуждении непрерывным Ar-лазером и при импульсном возбуждении лазером на ИАГ: Nd^{3+} большей мощности присутствует только одна линия от квантовой ямы вблизи 914 нм. В структуре 1064 наблюдались две линии — 911 и 930 нм, причем интенсивность коротковолновой линии значительно возрастает при увеличении мощности накачки. На наш взгляд, наблюдаемые в структуре 1064 линии ФЛ определяются уровнями в двух квантовых ямах — смачивающем слое InAs и дополнительном слое InGaAs. Таким образом, результат работы [11] является дополнительным свидетельством возникновения вторичного слоя InGaAs в структурах с увеличенной d^* .

2.4. Фотолюминесценция квантовых точек при $d_{\text{eff}} \approx 1.2d^*$

На рис. 3 показаны спектры ФЛ КТ в структурах 1060, 1062 и 1063 при 300 К. В структуре 1060 длина волны основного перехода в КТ составляет 1.18 мкм. При изменении времени зарастивания КТ слоем низкотемпературного GaAs линия ФЛ КТ смещается, как

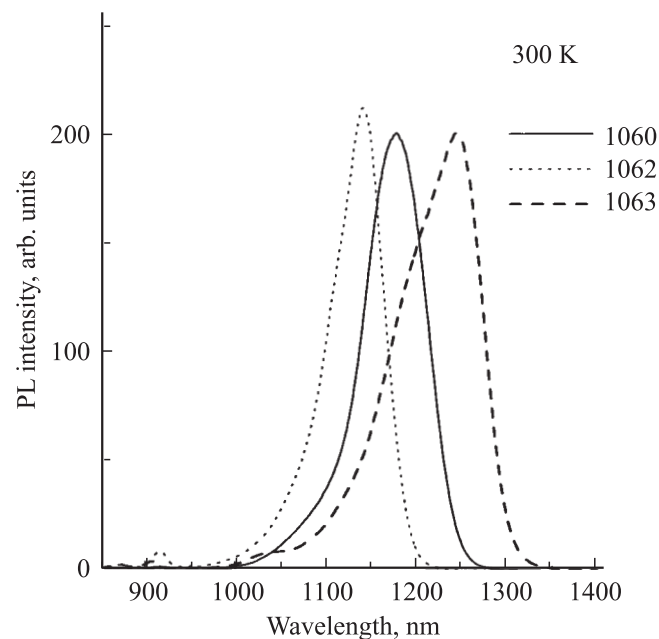


Рис. 3. Спектры фотолюминесценции структур 1060, 1062 и 1063 при $T = 300$ К. Длина волны возбуждающего излучения 514.5 нм, мощность возбуждения 100 мВт.

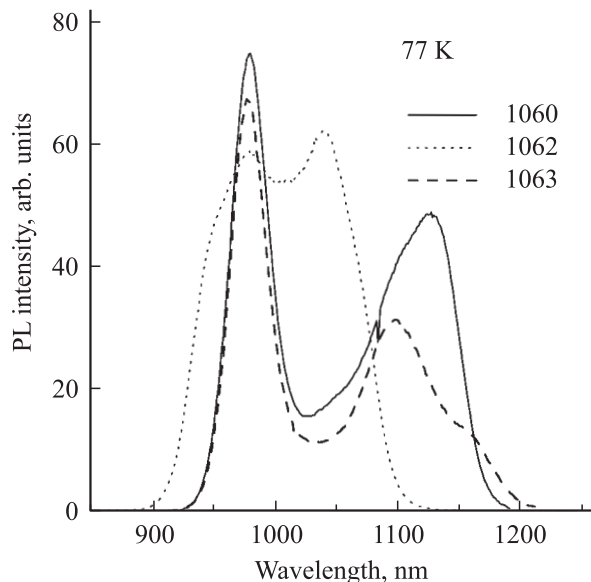


Рис. 4. Спектры фотолюминесценции структур 1060, 1062 и 1063 при $T = 77$ К. Длина волны возбуждающего излучения 514.5 нм, мощность возбуждения 20 мВт.

показано на рис. 3. Длина волны основного перехода в КТ снижается до 1.14 мкм для более тонкого слоя GaAs (структура 1062) и возрастает до 1.24 мкм при его увеличении (1063) при незначительном изменении интенсивности и ширины линии ФЛ. Это доказывает, что высота КТ находится в прямой зависимости от толщины низкотемпературного слоя GaAs и практически совпадает с ней. Таким образом, при использованных режимах роста могут растворяться не только крупные кластеры дефектов, возможно также растворение и вершин отдельных более крупных когерентных КТ, благодаря чему происходит выравнивание массива КТ по высоте. Ранее такая роль процесса зарастивания для КТ на поверхности отмечалась в работе [18]. Это дает возможность дополнительного управления длиной волны ФЛ. Кроме того, при этом может происходить увеличение значения „aspect ratio“ для КТ — отношения их высоты к латеральному размеру, что играет важную роль в увеличении фоточувствительности и снижении темнового тока ИК-фотоприемников [19].

При 77 К вид спектров ФЛ структур 1060, 1062 и 1063 изменяется (рис. 4). Кроме смещенных линий ФЛ от КТ в области 1.2 мкм, обсуждавшихся выше, во всех структурах появляется интенсивная линия вблизи 0.975 мкм. Длина волны и интенсивность этой линии одинаковы для структур с разной толщиной слоя низкотемпературного GaAs, сохраняются эти величины и для структур 1061 и 1064. Поэтому, на наш взгляд, линия 0.975 мкм при 77 К свидетельствует о появлении в структурах второй популяции мелких КТ. Дополнительный анализ показал, что эти КТ формируются при незначительном превышении толщины d_{eff} над критической толщиной d^* . Их высота не превышает 2–3 нм, поэтому различия

в процедуре зарастивания не влияют на свойства КТ данной популяции. При 300 К происходит быстрый термический выброс захваченных фотовозбужденных носителей с мелких уровней в КТ, поэтому в результате конкуренции двух популяций в спектре доминирует ФЛ в области 1.2 мкм. Появление популяции мелких КТ на вицинальных подложках наблюдалось во многих работах по росту КТ (см., например, [20]). Здесь мы подробно остановились на ФЛ этих КТ для облегчения трактовки результатов в последующих разделах.

2.5. Фотолюминесценция квантовых точек при $d_{\text{eff}} \approx (1.5-1.7)d^*$

На рис. 5 показаны спектры ФЛ структур 1060, 1065 и 1064 при 300 К. Наиболее характерной особенностью ФЛ в структурах 1065 и 1064 оказывается появление длинноволновой линии 1.55 мкм, свидетельствующее о формировании более крупных КТ. Линия фотолюминесценции 1.55 мкм сохраняется при химическом травлении верхнего слоя структуры толщиной 0.25 мкм (при этом травлятся как поверхностный слой, так и два нижележащих слоя КТ в объеме структуры). Это доказывает, что она связана с крупными объемными КТ, а не с поверхностными, как это наблюдалось, например, в работах [5,21].

В спектрах ФЛ присутствуют также обсуждавшиеся выше линии 911 и 930 нм и линия от популяции мелких КТ вблизи 1 мкм. Кроме того, в структурах 1065 и 1064 появляется дополнительная линия вблизи 1.1 мкм (рис. 5). Линия 1.24 мкм в структуре 1065 соответствует смещенной в длинноволновую область линии 1.18 мкм структуры 1060. В структуре 1065 интенсивность этой

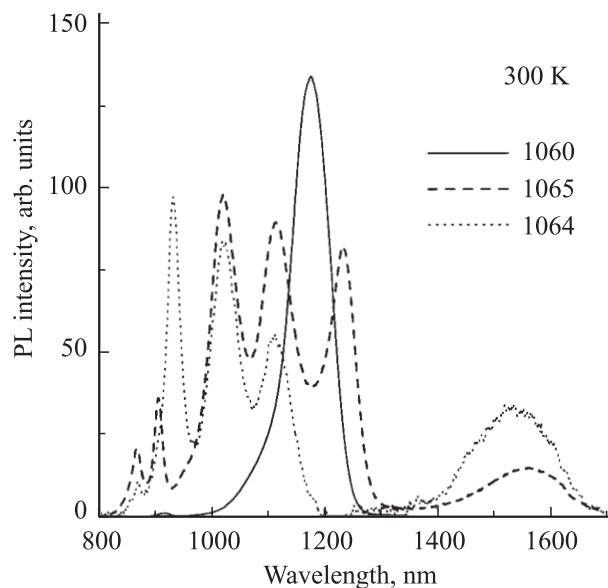


Рис. 5. Спектры фотолюминесценции структур 1060, 1065 и 1064 при $T = 300$ К. Длина волны возбуждающего излучения 514.5 нм, мощность возбуждения 100 мВт.

линии значительно ослаблена по сравнению со структурой 1060, а в структуре 1064 она практически исчезает.

3. Обсуждение результатов, модель роста квантовых точек

Данные измерений АСМ и РД показывают, что в структурах с повышенной толщиной d_{eff} образуется вторичный слой InGaAs, источником которого являются растворенные крупные кластеры InAs. Для структуры 1064 количество атомов In в этом слое не превышает 50–70% от количества In в слое с критической толщиной d^* для исходных КТ. Однако вторичный слой формируется в сильно неоднородном поле упругих напряжений от ранее сформированного массива КТ. В такой ситуации критическая толщина самоорганизации снижается и происходит дальнейшая трансформация двумерного вторичного слоя InGaAs в трехмерный массив КТ. Кроме того, в связи с малой толщиной прослойки между слоями особенностью процесса роста КТ в верхнем слое является вертикальное упорядочение КТ с ранее сформированным массивом КТ (см., например, [22]). С учетом этих обстоятельств наиболее вероятной нам представляется следующая модель процесса роста КТ в структурах с повышенной толщиной d_{eff} . В этой модели роста линия ФЛ 1.1 мкм на рис. 5 обусловлена возникновением второй популяции мелких КТ, видимо вертикально связанных с мелкими КТ первого слоя (линия ФЛ 1 мкм). В то же время популяция КТ в исходном слое, отвечающая ФЛ в области 1.2 мкм, по высоте занимает всю толщину слоя низкотемпературного GaAs. Поэтому формирование КТ над этой популяцией фактически будет продолжать рост, главным образом в высоту. На наш взгляд, именно таким образом в структурах с повышенной толщиной d_{eff} формируются крупные КТ с высоким значением „aspect ratio“ и с длиной волны ФЛ 1.55 мкм. Как следует из рис. 5, линии ФЛ 1.1 и 1.55 мкм появляются уже в структуре 1065, где, согласно данным РД, еще не происходит полного смыкания двумерных островков, обогащенных In. Такая модель роста крупных КТ одновременно объясняет и последовательное гашение ФЛ КТ в области 1.2 мкм, наблюдаемое на рис. 5 (связанное с постепенной трансформацией мелких КТ в крупные). Отметим, что в работе [23] уже сообщалось о подобном механизме формирования высоких КТ. Однако в этой работе „дорастивание“ КТ по высоте возникало в результате дополнительного осаждения слоя InAs толщиной в 1 монослой на массив КТ, выращенных тонким слоем InGaAs. Длина волны ФЛ крупных КТ в работе [23] не превышала 1.3 мкм.

Предложенная модель формирования КТ путем трансформации вторичного слоя InGaAs объясняет все детали спектров ФЛ, наблюдаемые на рис. 5. Наиболее яркой особенностью структур с повышенной толщиной d_{eff} оказывается наличие длинноволновой ФЛ вплоть

до 1.6 мкм при 300 К. Далее рассматривается возможное применение таких структур в качестве фотоприемников ближнего ИК диапазона при комнатной температуре.

4. Межзонная фотопроводимость структур с повышенной толщиной d_{eff} при 300 К

Для исследования фотопроводимости при комнатной температуре мы изготовили несколько дополнительных структур с КТ с повышенной толщиной эквивалентного слоя InAs на изолирующих и проводящих подложках. Фотопроводимость (ФП) таких структур в продольной геометрии электронного транспорта при 300 К не имеет выраженного бимодального характера, ее основной особенностью является сохранение интенсивной ФП при увеличении длины волны до 1.7 мкм (результаты исследований ФП частично приведены в нашей работе [24]). Подобные зависимости наблюдались и в случае вертикальной ФП. Кроме того, в некоторых структурах мы наблюдали узкую резонансную линию в спектре продольной ФП при 300 К в области 2.5 мкм (рис. 6). Для структур InGaAs/GaAs эта область длин волн соответствует внутризонной ФП. В структурах с КТ фотопроводимость при комнатной температуре в этой области спектра ранее не наблюдалась. Абсолютная фоточувствительность образца, спектр которого приведен на рис. 6, была прокалибрована с помощью АЧТ в качестве источника излучения. С дополнительным фильтром на основе пластины кремния вольт-ваттная чувствительность при комнатной температуре состави-

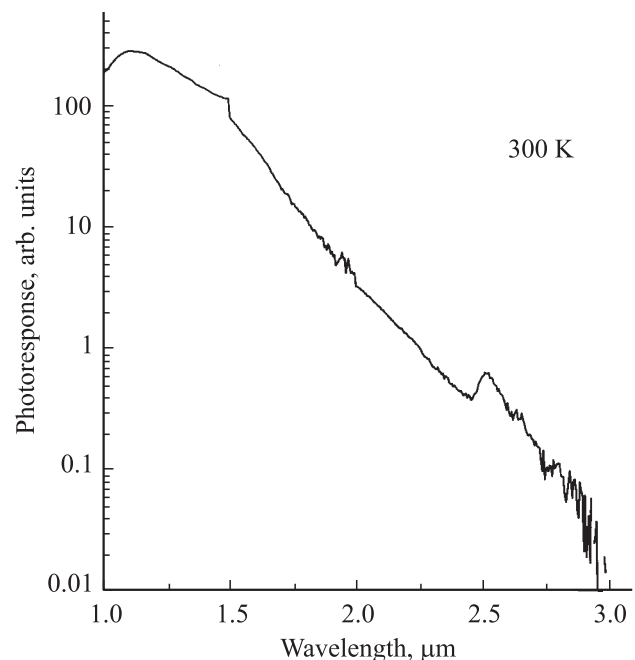


Рис. 6. Спектр продольной фотопроводимости структуры с квантовыми точками при $T = 300$ К.

ла $3 \cdot 10^3$ В/Вт, удельная обнаружительная способность $9 \cdot 10^8$ см \cdot Гц^{1/2}/Вт.

5. Заключение

В данной работе исследованы особенности формирования КТ в гетероструктурах InAs/GaAs с повышенной толщиной слоя InAs. Процесс роста структур включает зарращивание КТ слоем низкотемпературного GaAs и использование стадии отжига дефектов перед ростом толстых барьерных слоев. В отличие от известных в МЛЭ и МОГФЭ работ при зарращивании мы не используем дополнительные слои InGaAs, что снижает деформирующие напряжения в структурах и количество дислокаций. Благодаря процессу отжига дефектов оптическое качество таких структур остается высоким даже при использовании повышенных значений d_{eff} .

Изготовлены многослойные гетероструктуры InAs/GaAs с КТ, демонстрирующие при комнатной температуре многомодовую ФЛ с линиями от 1 до 1.55 мкм. Предложена новая модель роста КТ в таких структурах, включающая стадию формирования двумерного вторичного слоя InGaAs из растворенных крупных кластеров InAs и дальнейшую трехмерную трансформацию этого слоя в поле упругих напряжений ранее сформированных КТ. Возможность применения таких структур для получения лазерной генерации в диапазоне 1.55 мкм пока представляется нам проблематичной из-за большого числа популяций КТ, приводящих к многомодовости ФЛ. Изготовленные структуры с крупными КТ демонстрируют интенсивную фотопроводимость в диапазоне 1–2.7 мкм при комнатной температуре, что может представлять интерес для быстрых фотоприемников ближнего ИК диапазона, включая диапазон 1.55 мкм волоконно-оптических линий связи.

Работа поддержана РФФИ, проекты 06-02-16519 и 07-02-00163.

Список литературы

- [1] D. Fekete, H. Dery, A. Rudra, E. Kapon. *J. Appl. Phys.*, **99** (3), 034 304 (2006).
- [2] J.F. Chen, R.S. Hsiao, Y.P. Chen, J.S. Wang, J.Y. Chi. *Appl. Phys. Lett.*, **87** (14), 141 911 (2005).
- [3] A. Passaseo, R. Rinaldi, M. Longo, S. Antonaci, A.L. Conventino, R. Cingolani, A. Taurino, M. Catalano. *J. Appl. Phys.* **89** (8), 4341 (2001).
- [4] В.М. Устинов. *ФТП*, **38** (8), 963 (2004).
- [5] A.A. El-Emawy, S. Birudavolu, P.S. Wong, Y.-B. Jiang, H. Xu, S. Huang, D.L. Huffaker. *J. Appl. Phys.*, **93** (9), 3529 (2003).
- [6] Д.С. Сизов, М.В. Максимов, А.Ф. Цацуньников, Н.А. Черкашин, Н.В. Крыжановская, А.Б. Жуков, Н.А. Малеев, С.С. Михрин, А.П. Васильев, Р. Селин, В.М. Устинов, Н.Н. Леденцов, Д. Бимберг, Ж.И. Алфёров. *ФТП*, **36** (9), 1097 (2002).
- [7] N. Nuntawong, S. Huang, Y.B. Jiang, C.P. Hains, D.L. Huffaker. *Appl. Phys. Lett.*, **87** (11), 113 105 (2005).
- [8] I.N. Kaiander, R.L. Sellin, T. Kettler, N.N. Ledentsov, D. Bimberg, N.D. Zakharov, P. Werner. *Appl. Phys. Lett.*, **84** (16), 2992 (2004).
- [9] G. Saint-Girons, G. Patriarche, L. Largeau, J. Coelho, A. Me-reuta, J.M. Gerard, I. Sagner. *J. Cryst. Growth*, **235**, 89 (2002).
- [10] L.D. Moldavskaya, V.M. Daniltsev, M.N. Drozdov, V.R. Zakamov, V.I. Shashkin. „*Conf. Proc. Narrow Gap Semiconductors 2005*“. (Institute of Physics Conference Series, № 187).
- [11] Л.Д. Молдавская, Н.В. Востоков, Д.М. Гапонова, В.М. Данильцев, М.Н. Дроздов, Ю.Н. Дроздов, В.И. Шашкин. *ФТП*, **42** (1), 101 (2008).
- [12] V.I. Shashkin, V.M. Daniltsev, Yu.N. Drozdov, O.I. Khrykin, A.V. Murel, N.V. Vostokov. *Proc. EW MOVPE VIII* (Prague, June 8–11, 1999) p. 159.
- [13] G. Costantini, A. Rastelli, C. Manzano, P. Acosta-Diaz, R. Songmuang, G. Katsaros, O.G. Schmidt, K. Kern. *Phys. Rev. Lett.*, **96** (22), 226 106 (2006).
- [14] S.J. Lee, J.O. Kim, S.K. Noh, J.W. Choe, K.-S.-Lee. *J. Cryst. Growth*, **284**, 39 (2005).
- [15] Ю.Н. Дроздов, В.М. Данильцев, М.Н. Дроздов, А.В. Мурель, О.И. Хрыкин, Н.В. Востоков, В.И. Шашкин. *Изв. РАН*, **71** (1), 107 (2007).
- [16] A. Lenz, H. Eisele, R. Timm, S.K. Becker, R.L. Sellin, U.W. Pohl, D. Bimberg, M. Dahne. *Appl. Phys. Lett.*, **85** (17), 3848 (2004).
- [17] В.И. Шашкин, В.М. Данильцев, М.Н. Дроздов, Ю.Н. Дроздов, Д.М. Гапонова, О.И. Хрыкин, А.В. Мурель, Н.В. Востоков, Taek Kim, Yong-Jo Park. *ФТП*, **40** (4), 455 (2006).
- [18] H. Zhu, Z. Wang, H. Wang. I. Cui, S. Feng. *J. Cryst. Growth*, **197**, 372 (1999).
- [19] H. Lim, W. Zhang, S. Tsao, T. Sills, J. Szafraniec, K. Mi, B. Movaghar, M. Razeghi. *Phys. Rev. B*, **72**, 085 332 (2005).
- [20] S. Liang, H.L. Zhu, J.Q. Pan, L.P. Hou, W. Wang. *J. Cryst. Growth*, **282**, 297 (2005).
- [21] I.A. Karpovich, N.V. Baidus, B.N. Zvonkov, S.V. Morozov, D.O. Filatov, A.V. Zdoroveishev. *Nanotechnology*, **12**, 425 (2001).
- [22] N. Nuntawong, J. Tatebayashi, P.S. Wong, D.L. Huffaker. *Appl. Phys. Lett.*, **90**, 163 121 (2007).
- [23] J.S. Kim, J.H. Lee, S.U. Hong, W.S. Han, H.-S. Kwack, J.H. Kim, D.K. Oh. *J. Appl. Phys.*, **94** (4), 2486 (2003).
- [24] В.И. Шашкин, В.М. Данильцев, М.Н. Дроздов, Ю.Н. Дроздов, В.Р. Закамов, А.Ю. Лукьянов, Л.Д. Молдавская, А.В. Мурель. *Прикл. физика*, **2**, 73 (2007).

Редактор Т.А. Полянская

1.55 μ luminescence in the InAs/GaAs quantum dot heterostructures with enhanced thickness of InAs layer

*M.N. Drozdov, N.V. Vostokov, V.M. Daniltsev,
Yu.N. Drozdov, L.D. Moldavskaya, A.V. Murel,
V.I. Shashkin*

Institute for Physics of Microstructures,
Russian Academy of Sciences,
603950 Nizhny Novgorod, Russia

Abstract Multilayer InAs/GaAs quantum dots (QDs) heterostructures with room temperature photoluminescence wavelength 1.55 μm have been fabricated by metalorganic chemical vapor deposition. The growth process peculiarities are increased thickness of InAs layer for QDs formation in combination with low temperature QD overgrowing by thin (6 nm) GaAs layers and following annealing of large islands. X-ray diffraction analysis and photoluminescence testify appearance of the secondary InGaAs wetting layer above the QDs resulting from partially dissolving of large relaxed InAs clusters during the annealing. A new mechanism of large QDs growth with high „aspect ratio“ based on subsequent 2D–3D transformation of the secondary InGaAs layer in an elastic field of QDs formed earlier is suggested. The main feature of QD array is the presence of three QD population with different sizes and multimode photoluminescence in the range of 1–1.6 μm . Application of the QD structures for 1–2.5 μm photodetector operating at the room temperature is investigated.