

Образование дислокационных дефектов при заращивании квантовых точек InAs в GaAs

© Н.А. Берт, А.Л. Колесникова*, В.Н. Неведомский, В.В. Преображенский⁺, М.А. Путьято⁺, А.Е. Романов, В.М. Селезнев⁺, Б.Р. Семягин⁺, В.В. Чалдышев[¶]

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

* Институт проблем машиноведения Российской академии наук, 199178 Санкт-Петербург, Россия

⁺ Институт физики полупроводников Сибирского отделения Российской академии наук, 630090 Новосибирск, Россия

(Получена 30 декабря 2008 г. Принята к печати 6 апреля 2009 г.)

Представлены электронно-микроскопические свидетельства дислокационной релаксации напряжений вблизи квантовых точек InAs, перешедших в объем GaAs путем заращивания. Обнаружено, что в некоторых объемных квантовых точках образуются дислокационные дефекты, не выходящие на поверхность пленки. Это указывает на релаксацию напряжений в заглубленном состоянии квантовой точки, а не на стадии образования и роста островка InAs на поверхности GaAs. Приводятся модели внутренней дислокационной релаксации заращенных квантовых точек.

PACS: 61.72.Ff, 61.72.Lk, 81.07.Ta

Квантовые точки (КТ) в полупроводниковых гетероструктурах привлекают пристальное внимание исследователей на протяжении двух последних десятилетий [1,2]. Обычно КТ возникают в результате процессов самоорганизации в объеме или на поверхности полупроводникового материала и исходно оказываются в когерентном упруго деформированном состоянии. Поэтому особенности электронной структуры квантовых точек обусловлены не только конечностью их размеров, но и влиянием внутренних упругих деформаций [3–7]. Эти упругие деформации и связанные с ними механические напряжения ответственны также и за ряд других эффектов в гетероструктурах с КТ, например, за взаимодействие и упорядочение в ансамбле КТ или изменение формы и химического состава КТ [8,9].

Накопление упругой энергии в гетероструктурах с КТ может приводить к их структурной релаксации, обычно происходящей с помощью образования и перемещения дислокаций. Качественное и количественное описание релаксации имеет исключительное значение для понимания изменения напряженного состояния, электронных и оптических свойств материалов.

Цель данной работы состояла в изучении процессов релаксации механических напряжений квантовых точек, перешедших в объем материала путем заращивания поверхности, на которой они были изначально расположены.

Явление релаксации напряжений достаточно хорошо исследовано для КТ, формирующихся на поверхности роста [10–12] или в объеме полупроводника [13,14]. В частности, данной работе предшествовал цикл теоретических и экспериментальных исследований релаксации напряжений объемных КТ [13–17]. Так, было обнаружено, что в пленке GaAs, осажженной мето-

дом низкотемпературной молекулярно-лучевой эпитаксии, δ -легированной сурьмой в процессе роста и затем отожженной, образуются КТ SbAs, вблизи которых располагаются круговые дислокационные призматические петли [13,14,16]. Было показано, что КТ SbAs, являясь включением в объеме GaAs, создает поле напряжений, обусловленное несоответствием параметров решеток включения и окружающей матрицы. По мере роста КТ ее упругое поле провоцирует образование круговой дислокационной петли внедрения [13,14,16]. Такая петля-сателлит уменьшает общую упругую энергию системы и, таким образом, является эффективным релаксатором напряжений. Разработанные теоретические модели процесса релаксации напряжений и упругих энергий позволили: 1) объяснить наблюдаемую зависимость величины радиуса петли-сателлита от радиуса КТ [4]; 2) выдвинуть две модели материального источника образования петли-сателлита, как то — за счет образования противоположной по знаку дискретной дислокационной петли несоответствия на КТ или за счет изменения собственной деформации (eigenstrain) КТ [17]; 3) рассчитать критический радиус сферической КТ, начиная с которого в сторону увеличения возможно формирование одиночной петли несоответствия или пары, состоящей из петли несоответствия и петли-сателлита [17]. Отметим, что модель образования петли несоответствия на включении и модель образования петли-сателлита, опоясывающего включение, были выдвинуты еще в 1973 г. Мэтьюсом [18]. Петли-сателлиты, окружающие включение, были обнаружены на микровключениях [19], петли-сателлиты вблизи напряженных нанокластеров фосфора в германиевой матрице также наблюдались в [20]. В дальнейшем в работе [21] была представлена модель испускания призматических петель включением, которые скользили по так называемому цилиндру скольжения. При этом учитывалось, что по

[¶] E-mail: Chald@gvgo.ioffe.ru

мере испускания петель включение уменьшает свою собственную деформацию. Наиболее детально к вопросу о зарождении петли-сателлита подошли авторы работы [22], которые рассчитали зарождение, равновесную форму петли и испускание петли из включения в условиях термического и механического нагружения.

По мере развития теории релаксации КТ возник вопрос, как влияет близость поверхности на ее критический радиус. Расчеты показали, что критический радиус КТ для образования одиночной петли несоответствия или пары, состоящей из петли несоответствия и петли-сателлита, располагающихся в одной экваториальной плоскости КТ, убывает с удалением КТ от свободной поверхности [23]. Это обстоятельство дало возможность предположить, что находящиеся на поверхности материала нерелаксированные островки, будучи погруженными в объем материала, могут релаксировать за счет выбрасывания дислокационной петли-сателлита.

Предмет настоящего исследования — это квантовые точки InAs, изначально находящиеся на поверхности монокристаллической пленки GaAs и впоследствии захороненные под слоем GaAs.

Исследования проводились в два этапа. На первом этапе методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) была специально подготовлена серия образцов с различными по величине островками InAs на поверхности GaAs. Для контроля плотности и величины островков поверхность образцов сканировалась с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ). На втором этапе были выращены образцы, в которых слои КТ были покрыты слоем GaAs толщиной 30 нм. Такие захороненные КТ изучались методами просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ).

Образцы выращивались на подложках полуизолирующего GaAs с ориентацией $(001) \pm 0.5^\circ$. Перед осаждением слоя InAs на поверхности подложки выращивался буферный слой GaAs при температуре 580°C со скоростью роста 1 мкм/ч толщиной 0.2 мкм . Рост проходил в условиях существования поверхностной сверхструктуры (3×1) , что приводит к формированию на поверхности системы эквидистантно расположенных моноатомных террас, ширина которых определяется углом отклонения поверхности роста от сингуляра (001) и составляла в нашем случае примерно $30\text{--}35 \text{ нм}$ [24]. После роста буферного слоя поток галлия перекрывался, температура подложки понижалась и осаждались 2, 3, 4 или 5 монослоев (МС) InAs со скоростью роста 0.05 МС/с . Температуры осаждения слоев InAs и их номинальные толщины приведены в таблице. Температура подложки определялась по методике, описанной в [25]. Плотность потока As_4 составляла $P_{\text{As}_4} = 1 \cdot 10^{15} \text{ ат/см}^2 \cdot \text{с}$ при температуре 440 и 460°C , что соответствовало условиям стабилизации поверхности InAs мышьяком вблизи структурного поверхностного перехода $(2 \times 4)\text{As} \leftrightarrow (4 \times 2)\text{In}$. Обогащение поверхностного слоя индием, связанное с увеличением десорбции мышьяка с поверхности InAs при температурах роста 480

Параметры послойно осажденных структур GaAs–InAs и GaAs–InAs–GaAs

№ образца	$T_s, ^\circ\text{C}$ (для слоя InAs)	Толщина слоя InAs, МС	Закрывающий слой	Плотность КТ, 10^{10} см^{-2}
1840	440	2	Нет	1.0
1841	440	3	»	2.3
1842	440	4	»	2.0
1843	440	5	»	1.0
1849	460	3	»	2
1850	440	3	»	2.5
1851	480	3	»	1.5
1852	500	3	»	0.7
1853	460	2	30 нм GaAs (460°C)	
1854	460	3	То же	
1855	460	4	» »	
1856	460	5	» »	

и 500°C , вызвало необходимость увеличения плотности потока мышьяка до $P_{\text{As}_4} = 2 \cdot 10^{15} \text{ ат/см}^2 \cdot \text{с}$ при 480°C и до $P_{\text{As}_4} = 4 \cdot 10^{15} \text{ ат/см}^2 \cdot \text{с}$ при 500°C . Оперативное управление плотностью потока мышьяка обеспечивалось использованием источника мышьяка вентильного типа. Срыв псевдоморфного роста и формирование квантовых точек наблюдались на картине дифракции быстрых электронов на отражение и соответствовали толщине $(1.9\text{--}2) \text{ МС}$ InAs. Выращивание образцов первой серии на этом заканчивалось. В образцах второй серии производилось зарращивание КТ InAs материалом матрицы GaAs при температуре 460°C и скорости роста 1 мкм/ч . В таблице представлены параметры полученных образцов, на которых проводились дальнейшие исследования.

Изучение морфологии поверхности образцов с открытыми КТ InAs были выполнены с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ) Solver-Pro компании NT-MDT, Россия. Сканирование поверхности проводилось в полуконтактной моде с амплитудой колебания кантилевера $\sim 5 \text{ нм}$. Для экспериментов использовались кантилеверы с жесткостью $\sim 95 \text{ Н/м}$.

На рис. 1 приведены полученные АСМ-изображения образцов с открытыми КТ при различной номинальной толщине слоя InAs. Появление КТ на поверхности было зафиксировано при толщине слоя InAs, равной или превышающей 2 МС . Оценки поверхностной плотности КТ, полученные из анализа АСМ-изображений, приведены в таблице. При номинальной толщине слоя InAs, равной 2 МС (образец 1840, рис. 1, *a*), поверхностная плотность КТ составляет $\sim 0.95 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$, причем на поверхности доминируют островки высотой 6 и 8 нм . Разрешение геометрической формы островков и их латеральных размеров ограничено радиусом закругления иглы кантилевера, который в данном случае сравним с размерами островков. При увеличении номинальной толщины слоя InAs до 3 МС (образец 1841, рис. 1, *b*) поверхностная плотность островков увеличивается бо-

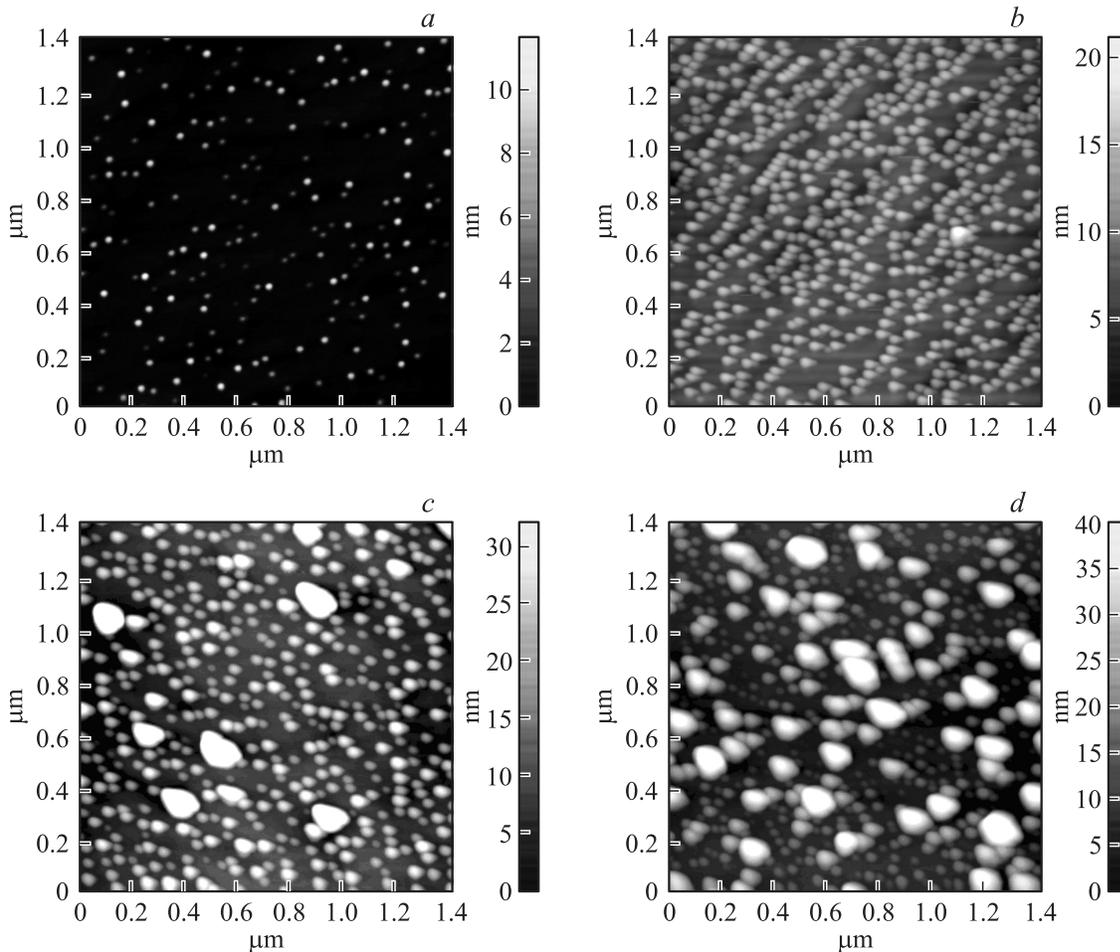


Рис. 1. АСМ-изображения квантовых точек на поверхности GaAs при разных номинальных толщинах слоя InAs: *a* — 2 МС, *b* — 3 МС, *c* — 4 МС, *d* — 5 МС.

лее чем в 2 раза и составляет $\sim 2.3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$. Высота КТ при этом достигает характерных значений 8–10 нм, увеличиваются и латеральные размеры КТ. Увеличение номинальной толщины слоя InAs до 4 МС приводит к качественным изменениям в ансамбле КТ (образец 1842, рис. 1, *c*), а именно в дополнение к системе относительно мелких островков, высотой ~ 10 нм, появляются крупные островки, высотой до 35 нм. Поверхностная плотность мелких островков при этом несколько уменьшается, однако количество мелких островков значительно превышает число крупных. При увеличении номинальной толщины слоя InAs до 5 МС (образец 1843, рис. 1, *d*) общая плотность КТ снижается до $\sim 1 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$, при этом плотность крупных островков растет и достигает $0.3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$.

На рис. 2 представлены АСМ-изображения для образцов с открытыми КТ, самоорганизующимися при номинальной толщине слоя InAs, равной 3 МС, и разных температурах подложки. Значения поверхностной плотности КТ приведены в таблице. Из рис. 2 и таблицы видно, что по мере повышения температуры подложки поверхностная плотность островков уменьшается. В образце 1850, выращенном при 440°C , по-

верхностная плотность КТ составляет $2.5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$, а высота ~ 8 нм (рис. 2, *a*). При увеличении температуры подложки до 460°C (образец 1849, рис. 2, *b*) поверхностная плотность КТ уменьшается до $2.0 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$, размеры КТ несколько увеличиваются. В образцах 1850 и 1849 основная часть материала сосредоточена в мелких островках, а число крупных островков невелико. Количество крупных островков увеличивается при повышении температуры подложки до 480 и 500°C . При этом поверхностная плотность мелких островков уменьшается до $1.5 \cdot 10^{10}$ и $0.7 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ соответственно.

Бимодальное распределение КТ, самоорганизующихся по механизму Странского–Крастанова на поверхности, хорошо известно и обычно связывается с тем, что относительно мелкие островки являются упруго напряженными и когерентными по отношению к матрице (подложке), в то время как крупные островки релаксированы и содержат дислокации несоответствия на гетерогранице КТ/матрица [8].

Исходя из цели работы и описанных выше данных АСМ для поверхностных КТ InAs, полученных в разных условиях, были выбраны условия выращивания для

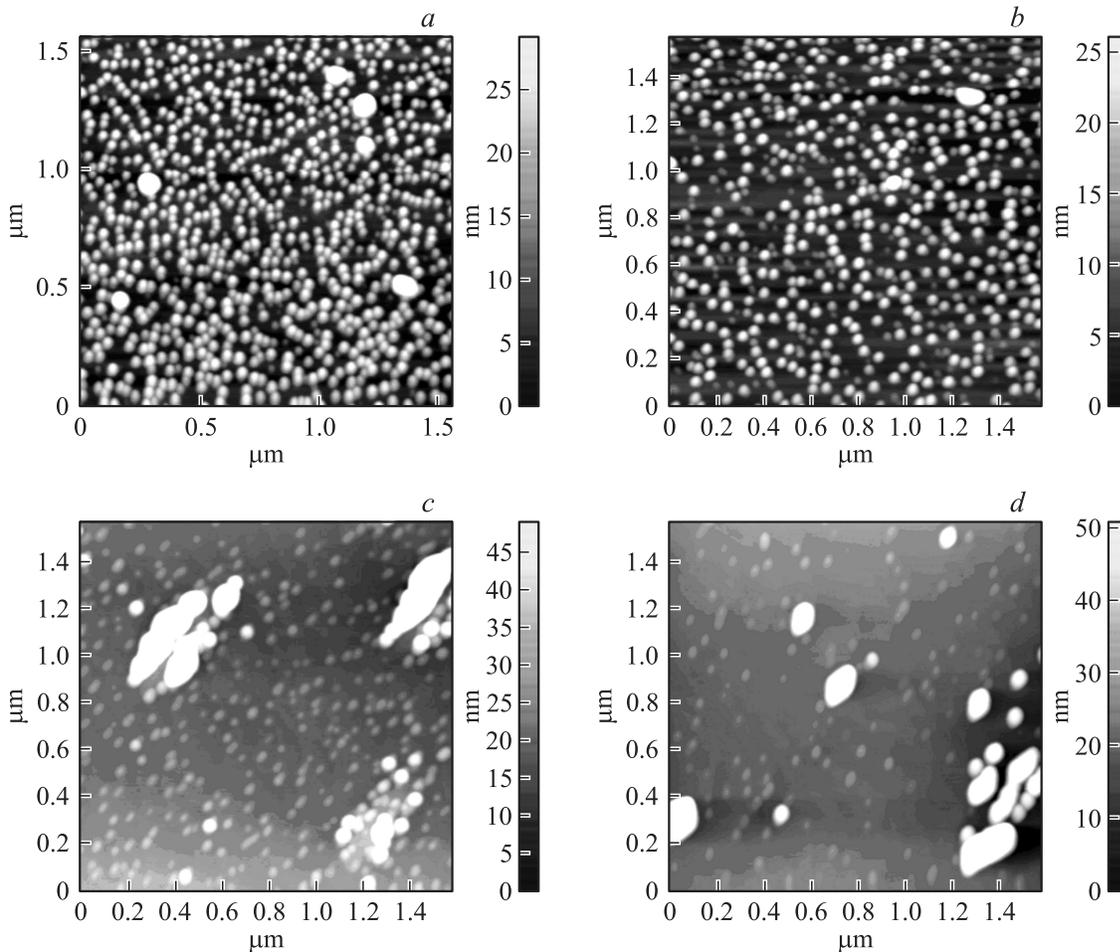


Рис. 2. АСМ-изображения квантовых точек на поверхности GaAs при номинальной толщине слоя InAs, равной 3 МС, и температурах осаждения 440 (а), 460 (b), 480 (c) и 500°С (d).

второй серии образцов, в которой поверхностные КТ зарращивались слоем GaAs. А именно, температура роста для второй серии образцов была выбрана равной 460°С, а номинальные толщины слоев InAs составляли 2, 3, 4 и 5 монослоев — образцы 1853, 1854, 1855 и 1856 соответственно (см. таблицу). При этом ожидалось, что в образце 1853 квантовые точки не будут релаксировать ни на поверхности, ни при зарращивании, т.е. останутся когерентными напряженными нановключениями в объеме матрицы GaAs. В образце 1854 ожидалось получение ансамбля когерентных КТ на поверхности с размерами, близкими к критическим. При зарращивании часть из таких КТ могла релаксировать с образованием характерных дефектов структуры. В образце 1855 ожидалось сосуществование относительно мелких КТ, сохраняющих когерентность на поверхности, и крупных КТ, релаксационные процессы в которых происходят на поверхности до начала процедуры зарращивания. Наконец, в образце 1856 должны доминировать крупные КТ, содержащие дислокации несоответствия. При зарращивании таких КТ можно ожидать появления дефектов структуры, связанных с прорастанием имеющихся в КТ дислокаций несоответствия через закрывающий слой матрицы GaAs.

Образцы с захороненными КТ исследовались методами просвечивающей электронной микроскопии. На рис. 3 представлены ПЭМ-изображения образцов 1854, 1855 и 1856. На изображениях поперечного сечения образца с КТ малых размеров, сформированными осаждением 3 МС InAs, не обнаруживается каких-либо протяженных дефектов при использовании для получения изображений двухлучевых условий с различными действующими рефлексами. В качестве примера на рис. 3, а представлено темнопольное изображение КТ в рефлексе 002. Можно полагать, что КТ в этом случае остаются когерентными и при заглублиении не создают никаких дополнительных дефектов вблизи себя, т.е. остаются нерелаксированными. На аналогичных изображениях с номинальным количеством осажденного InAs в 4 МС на большинстве КТ также не наблюдалось специфического для протяженных дефектов контраста, но вблизи отдельных редких КТ обнаруживались локализованные дислокационные дефекты, не имеющие выхода на поверхность образца. Пример такого дефекта можно видеть на рис. 3, b, на котором приведено темнопольное изображение поперечного сечения образца в действующем рефлексе 002. Подобное изображение дислокацион-

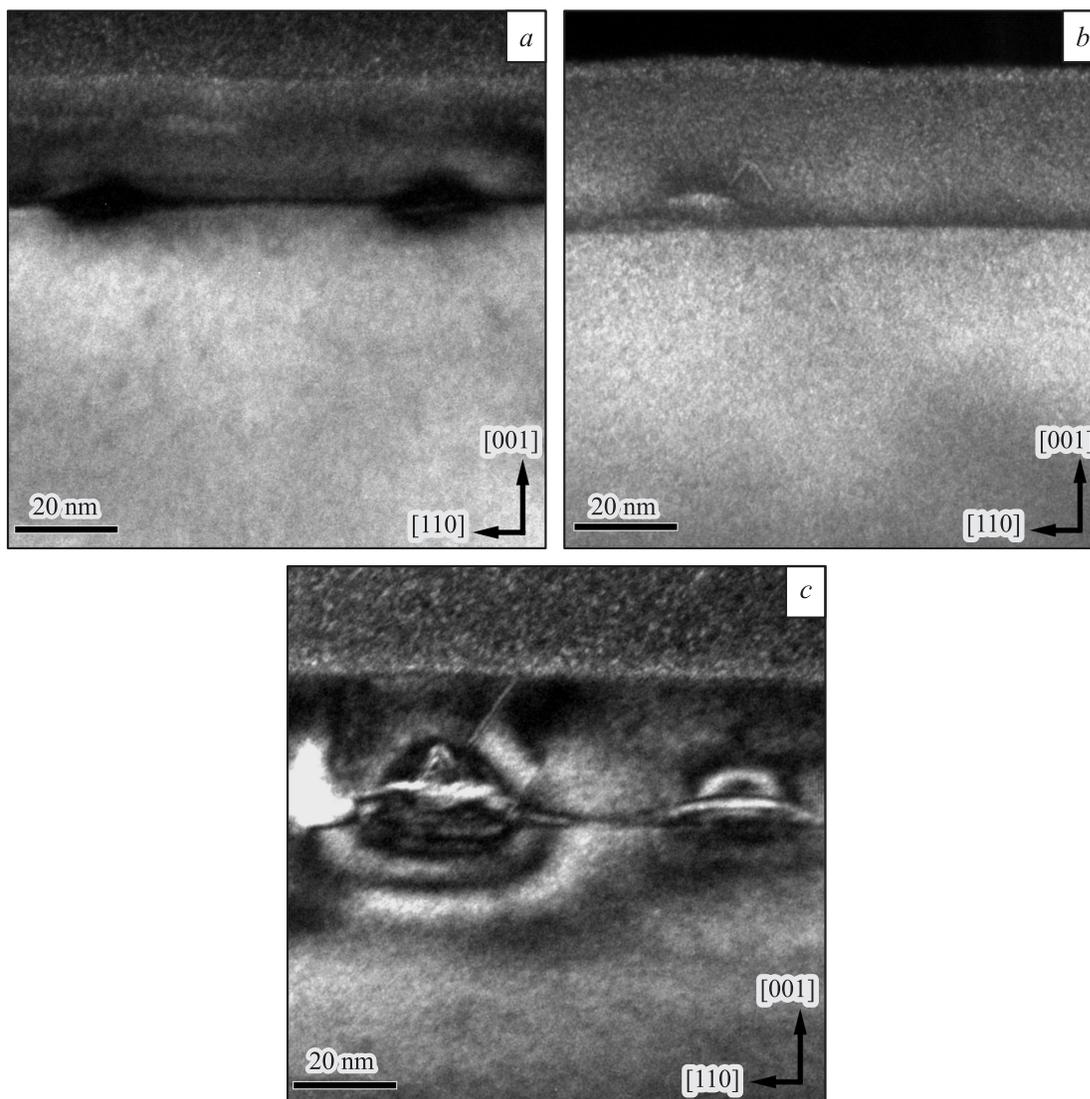


Рис. 3. Темнопольные электронно-микроскопические изображения с действующим рефлексом 002 квантовых точек InAs в объеме матрицы GaAs для образцов с когерентными включениями (квантовыми точками) (а), с включениями, отдельные из которых имеют вблизи себя локализованный дислокационный дефект (b), с включениями с сильной степенью релаксации, имеющими вблизи себя протяженные дефекты, выходящие на поверхность пленки (с).

ного дефекта, якобы локализованного в объеме, может возникать за счет его выхода за пределы наблюдаемого объема тонкого электронно-прозрачного участка через верхнюю или нижнюю поверхность электронно-микроскопического образца. Однако в нашем случае такой дефект присутствовал на изображении, будучи в непосредственной близости к КТ, и не наблюдалось его выхода на ростовую поверхность. Это позволяет предполагать, что обнаруженные дефекты реально локализованы возле отдельных КТ и что наблюдаемая ситуация соответствует начальной стадии релаксации.

На некоторых изображениях возле КТ обнаруживаются протяженные дефекты, выходящие на свободную поверхность и зачастую имеющие характерную V-образную форму (рис. 3,с). Такого рода дефекты неоднократно наблюдались для КТ с высокой степенью

релаксации (см., например, [26]). V-образные дефекты обычно расположены под углом 55° к плоскости (001), т.е. в плоскостях скольжения (111), наблюдаемых на изображениях поперечного сечения „с торца“. Полагается [27,28], что V-образные дефекты формируются за счет генерации краевых дислокаций у каждой стороны основания растущей КТ с дальнейшим их скольжением к ростовой поверхности и расщеплением на пару частичных дислокаций Шокли.

Исследование методом ПЭМ в режиме высокого разрешения обнаружило присутствие в окрестности отдельных квантовых точек дефектов крышеобразной формы, в то время как большинство квантовых точек в этом образце не содержало вблизи себя каких-либо протяженных дефектов. Пример подобного дефекта представлен на рис. 4. Можно видеть, что дефект не выходит на ро-

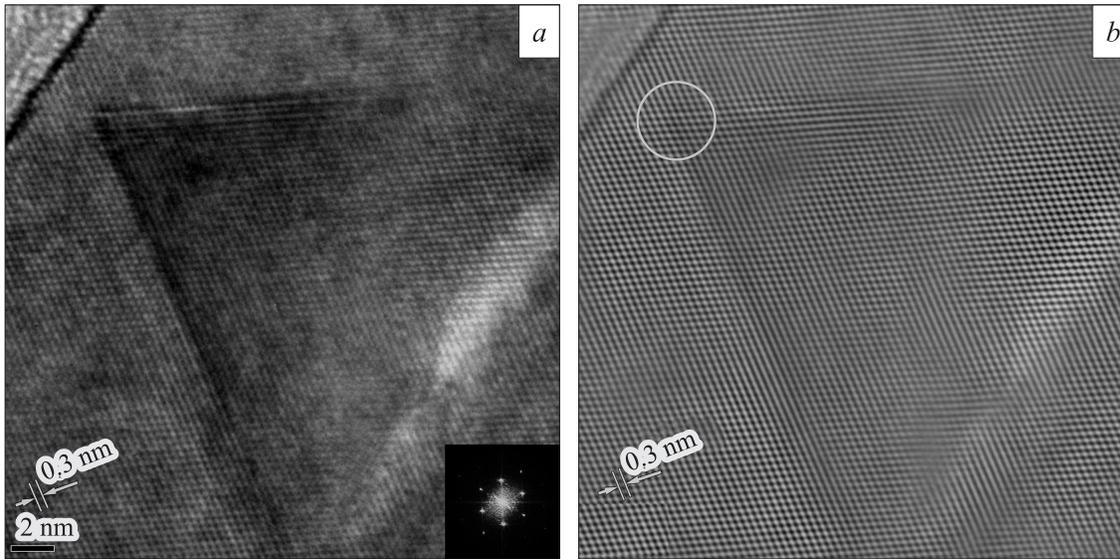


Рис. 4. Изображение дефекта крышеобразной формы при высоком разрешении: *a* — зарегистрированное в микроскопе; на вставке — дифракционная картина, полученная фурье-преобразованием; *b* — после фурье-фильтрации.

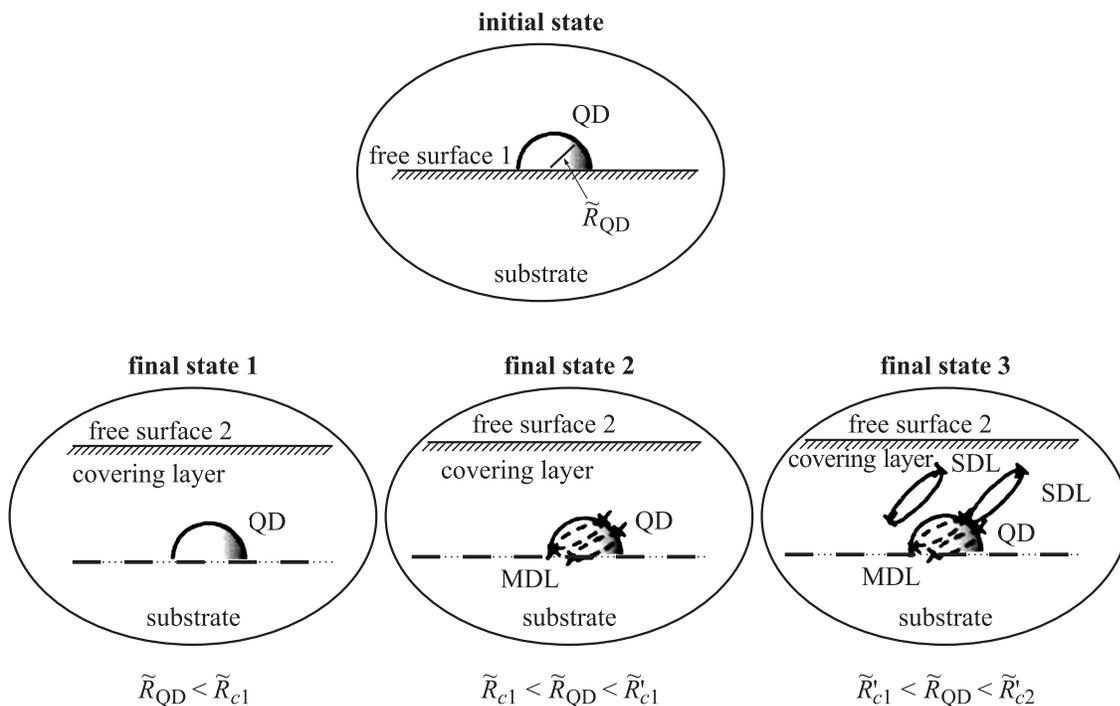


Рис. 5. Дислокационная релаксация объемной квантовой точки (QD) вблизи свободной поверхности. Схематические изображения квантовой точки в начальном состоянии (initial state) на свободной поверхности (free surface 1) и в захороненном состоянии (final state). Предполагается, что в начальном состоянии квантовая точка не релаксирует. Показаны возможные дислокационные релаксации вблизи квантовой точки в зависимости от ее размера. \tilde{R}_{QD} — радиус полусферической квантовой точки, \tilde{R}_{c1} , \tilde{R}'_{c1} , \tilde{R}'_{c2} — критические радиусы квантовой точки, при которых происходит смена релаксационной дислокационной модели, MDL — дислокационная петля несоответствия, SDL — дислокационная петля-сателлит.

стовую поверхность, контраст от которой виден в левом верхнем углу рисунка, что позволяет рассматривать его как возникший у подошвы квантовой точки с дальнейшим скольжением к поверхности в плоскостях (111) и аннигиляцией в месте встречи двух составляющих этого дефекта.

Резюмируя электронно-микроскопические данные по исследованию захороненных КТ различных размеров, можно говорить о наличии: 1) чистых когерентных КТ, не содержащих рядом с собой никаких дислокационных дефектов (рис. 3, *a*); 2) КТ с одиночными дислокационными дефектами, не выходящими на свободную поверхность пленки (рис. 3, *b*, 4); 3) КТ с множественными дислокационными дефектами, выходящими на поверхность пленки (рис. 3, *c*).

Эти наблюдения не противоречат модельным расчетам релаксационных дислокационных конфигураций, сделанным нами для сферического включения, находящегося на некотором расстоянии h от свободной поверхности [23]. Полученные зависимости критических радиусов включения $R_{\text{QD}}(h)$, начиная с которых реализуется та или иная дислокационная схема релаксации, позволяют предложить варианты релаксации подповерхностной КТ (рис. 5). Здесь смена схемы релаксации при помещении КТ в объем материала привязаны к размеру КТ, определенному как радиус полусферы \tilde{R}_{QD} . Критические радиусы КТ, в диапазоне которых релаксация идет по тому или иному пути, обозначены как \tilde{R}'_{c1} , \tilde{R}'_{c1} и \tilde{R}'_{c2} . Полагается, что КТ на поверхности не релаксировала. Исходы при захоронении КТ могут быть следующими: 1) КТ остается нерелаксированной при $\tilde{R}_{\text{QD}} < \tilde{R}'_{c1}$; 2) КТ релаксирует путем формирования петля несоответствия (MDL), возможно, одиночной петли при $\tilde{R}'_{c1} < \tilde{R}_{\text{QD}} < \tilde{R}'_{c1}$; этот исход может отсутствовать из-за недостаточной близости свободной поверхности для стока атомов, образующих MDL; 3) КТ релаксирует путем образования петля несоответствия MDL и петля сателлитов SDL разной ориентации при $\tilde{R}'_{c1} < \tilde{R}_{\text{QD}} < \tilde{R}'_{c2}$. При множественном образовании MDL КТ можно рассматривать как включение с измененной собственной деформацией. Такая модель также была нами рассмотрена ранее [17]. Если дислокациисателлиты выходят на поверхность, то ситуацию можно трактовать неоднозначно: либо КТ не была релаксирована на поверхности и при захоронении выбросила большие петли, достигшие поверхности, либо она была релаксирована уже в состоянии островка и при захоронении дислокации распространилась в объем.

Таким образом, в настоящей работе проведен экспериментальный анализ дефектов, возникающих на стадии зародивания квантовых точек InAs, исходно сформированных на поверхности и перешедших в объем GaAs. Показано, что при определенных условиях вблизи КТ образуются локализованные дислокационные дефекты, свидетельствующие об инициации пластической релаксации непосредственно на КТ, а не на свободной поверхности зародивающей пленки. Эти наблюдения

подтверждают физическую модель дислокационной релаксации захороненной КТ, сделанную на основании расчетов различных видов дислокационной релаксации нановключения вблизи свободной поверхности.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 07-01-00659а и 08-02-01215а).

Список литературы

- [1] D. Bimberg, M. Grundmann, N.N. Ledentsov. *Quantum dot heterostructures* (Wiley, Chichester, 1998).
- [2] *Self-Assembled Quantum Dots Series: Lecture Notes in Nanoscale Science and Technology*, ed. by Z.M. Wang (Springer, Berlin, 2008).
- [3] J.D. Davies. *J. Appl. Phys.*, **84**, 1358 (1998).
- [4] A.D. Andreev, E.P. O'Reilly. *Phys. Rev. B*, **62**, 15 851 (2000).
- [5] A.E. Romanov, P. Waltereit, J.S. Speck. *J. Appl. Phys.*, **97**, 43 708 (2005).
- [6] В.П. Евтихийев, О.В. Константинов, А.В. Матвеевцев, А.Е. Романов. *ФТП*, **36**, 79 (2002).
- [7] Б.В. Новиков, Г.Г. Зегря, Р.М. Пелешак, О.О. Данькив, В.А. Гайсин, В.Г. Талалаев, И.В. Штрот, Г.Е. Цырлин. *ФТП*, **42**, 1094 (2008).
- [8] V.A. Shchukin, D. Bimberg. *Rev. Mod. Phys.*, **71**, 1125 (1999).
- [9] J.C. Hamilton, F. Leonard, E. Johnson, U. Dahmen. *Phys. Rev. Lett.*, **98**, 236 102 (2007).
- [10] F.K. LeGoues, M.C. Reuter, J. Tersoff, M. Hammann, R.M. Tromp. *Phys. Rev. Lett.*, **73**, 300 (1994).
- [11] K. Tillmann, A. Foster. *Thin Sol. Films*, **368**, 93 (2000).
- [12] B.J. Spencer, J. Tersoff. *Appl. Phys. Lett.*, **77**, 2533 (2000).
- [13] V.V. Chaldyshev, N.A. Bert, A.E. Romanov, A.A. Suvorova, A.L. Kolesnikova, V.V. Preobrazhenskii, M.A. Putyato, B.R. Semyagin, P. Werner, N.D. Zakharov, A. Claverie. *Appl. Phys. Lett.*, **80**, 377 (2002).
- [14] V.V. Chaldyshev, A.L. Kolesnikova, N.A. Bert, A.E. Romanov. *J. Appl. Phys.*, **97**, 024 309 (2005).
- [15] Н.А. Берт, А.Л. Колесникова, А.Е. Романов, В.В. Чалдышев. *ФТТ*, **44**, 2139 (2002).
- [16] А.Л. Колесникова, А.Е. Романов, В.В. Чалдышев. *ФТТ*, **49**, 633 (2007).
- [17] N.A. Bert, V.V. Chaldyshev, A.L. Kolesnikova, A.E. Romanov. In: *Self-Assembled Quantum Dots*, ed. by Z.M. Wang (Springer, 2008) p. 297.
- [18] J.W. Matheus. *Phys. Status Solidi A*, **15**, 607 (1973).
- [19] J.W. Matheus, E. Kloholm, V. Sadagopan, T.S. Plaskett, E. Mendel. *Acta Metall.*, **21**, 203 (1973).
- [20] N.D. Zakharov, V.N. Rozhanskii, P.L. Kochazhkina. *Sov. Phys. Solid State*, **16**, 1444 (1974).
- [21] W.C. Johnson, J.K. Lee. *Acta Metall.*, **31**, 1033 (1983).
- [22] X.J. Xin, G.S. Daehn, R.H. Wagoner. *Acta Mater.*, **46**, 6131 (1998).
- [23] V.V. Chaldyshev, N.A. Bert, A.L. Kolesnikova, A.E. Romanov. *Phys. Rev. B*, **79**, 233304 (2009).
- [24] А.В. Васев, М.А. Путьято, Б.Р. Семягин, В.А. Селезнев, В.В. Преображенский. *Вестн. НГУ. Сер. Физика*, **3**(4), 9 (2008).
- [25] В.В. Преображенский, М.А. Путьято, Б.Р. Семягин. *ФТП*, **36**(8), 897 (2002).

- [26] K. Sears, J. Wong-Leung, H.H. Tan, C. Jagadish. *J. Appl. Phys.*, **99**, 113 503 (2006).
- [27] S. Guha, A. Madhukar, K.C. Rajkumar. *Appl. Phys. Lett.*, **57**, 2110 (1990).
- [28] N.Y. Jin-Phillipp, F. Phillipp. *J. Microscopy*, **194**, 161 (1999).

Редактор Л.В. Шаронова

Formation of dislocation defects in the process of burying of InAs quantum dots into GaAs

N.A. Bert, A.L. Kolesnikova, V.N. Nenedomsky,
V.V. Preobrazhenskii⁺, M.A. Putyato⁺, A.E. Romanov,
V.M. Seleznev⁺, B.R. Semyagin⁺, V.V. Chaldyshev*

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

* Institute of Problems in Mechanical Engineering,
Russian Academy of Sciences,
199178 St. Petersburg, Russia

⁺ Institute of Semiconductor Physics,
630090 Novosibirsk, Russia

Abstract Electron microscopy evidences of dislocation relaxation of stresses at InAs quantum dots buried in GaAs are demonstrated. It has been found that dislocation defects formed in vicinity of selected InAs quantum dots do not exit to the free surface of the GaAs film. This means that the stress relaxation occurs in the buried state of a quantum dot but not at the stage of its formation and growth on the GaAs surface. The models of internal dislocation relaxation of buried quantum dots are provided.