

06

Оптическая анизотропия InAs квантовых точек

© С.А. Блохин, А.М. Надточий, А.А. Красивичев,
Л.Я. Карачинский, А.П. Васильев, М.В. Максимов,
А.Е. Жуков, Н.Н. Леденцов, В.М. Устинов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
E-mail: blokh@mail.ioffe.ru
VI Systems GmbH, Hardenbergstrasse 7, Berlin,
10623, Federal Republic of Germany

Поступило в Редакцию 30 июля 2010 г.

С помощью спектроскопии фотолюминесценции проведены поляризационные исследования InAs квантовых точек (КТ), синтезированных с помощью непрерывного либо субмонослойного осаждения InAs на сингулярной поверхности GaAs (100). Обнаружено, что изолированный массив КТ, сформированных в режиме непрерывного осаждения, обладает слабой ($< 1-2\%$) оптической анизотропией, тогда как вертикальное совмещение подобных КТ (спейсерные слои менее 15 nm) приводит к 8%-ной линейной поляризации вдоль кристаллографического направления $[0\bar{1}1]$. В случае КТ, сформированных в режиме субмонослойного осаждения, выявлена сильная (17–20%) оптическая анизотропия излучения с основного и возбужденных состояний КТ вдоль кристаллографического направления $[0\bar{1}1]$.

В последнее время значительно усилился интерес к методам и способам управления процессами формирования массивов квантовых точек (КТ), позволяющих контролировать структурные параметры и энергетический спектр КТ. Особое внимание также уделяется изучению механизмов формирования структурной анизотропии КТ с целью управления рабочими характеристиками приборов на их основе, в том числе и поляризацией. Так, применение низких скоростей роста ($\sim 0.05 \text{ \AA/s}$) в режиме роста по механизму Странского–Крастанова (СК) позволяет добиться существенной структурной анизотропии КТ [1], однако оптические свойства такого рода КТ не были исследованы. Согласно работе [2], эпитаксиальный рост напряженных гетероструктур при повышенной температуре (540°C) приводит к выстраиванию КТ в латеральные

цепочки точек. При повторном осаждении нескольких рядов КТ, разделенных узкими спейсерными слоями (порядка высоты КТ), наблюдается не только вертикальное совмещение КТ соседних рядов, но также латеральное объединение вертикально связанных КТ в латеральные цепочки КТ [3]. Хотя подобного рода структурная анизотропия и приводит к гигантской (более 60%) оптической анизотропии [4], плохое оптическое качество таких структур ограничивает практическое применение данного подхода. В настоящей работе представлены результаты исследования степени линейной поляризации (оптической анизотропии) фотолюминесценции массивов InAs, КТ, синтезированных в рамках различных ростовых подходов.

Все структуры были выращены методом молекулярно-пучковой эпитаксии в установке Riber 32P с твердотельным источником мышьяка на подложках GaAs с ориентацией (100). КТ, синтезируемые в режиме субмонослойного осаждения (далее СМКТ), формируются в результате 8 циклов осаждения слоя InAs докритической толщины (0.1 nm) с последующим 10 s прерыванием роста в потоке мышьяка, тогда как КТ в режиме непрерывного осаждения (НОКТ) формировались в результате осаждения 0.8 nm. Переход к островковому росту контролировался по появлению точечной картины дифракции быстрых электронов. Для предотвращения утечки неравновесных носителей при проведении оптических исследований в приповерхностную область и в область подложки активная область ограничивалась с обеих сторон короткопериодическими сверхрешетками AlAs/GaAs. Поляризационные исследования проводились методом спектроскопии фотолюминесценции (ФЛ). ФЛ возбуждалась YAG:Nd-лазером с энергией кванта ~ 2.33 eV и плотностью возбуждения $0.01-1$ kW/cm². С помощью монохроматора и охлаждаемого Ge-детектора в стандартной схеме синхронного детектирования производилась регистрация сигнала ФЛ в направлении [100]. Степень оптической анизотропии определялась как отношение разницы интенсивности ФЛ в двух ортогональных направлениях к их сумме.

При оптимальных условиях осаждения InAs при 495°C в режиме непрерывного осаждения (образец А) формируются НОКТ пирамидальной формы с квадратным основанием (~ 16 nm) и с высотой ~ 5 nm [5]. Базовые стороны пирамидальных НОКТ ориентированы вдоль кристаллографических направлений [001] и [010]. На рис. 1, а представлены результаты спектроскопии фотолюминесценции при температуре 300 K,

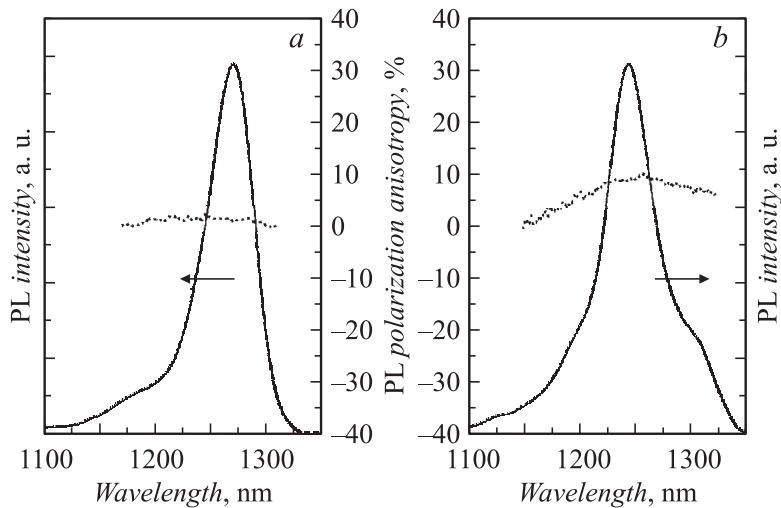


Рис. 1. Спектры ФЛ (сплошная) и оптической анизотропии (пунктирная) в плоскости (100) для InAs СККТ (a) и вертикально связанных InAs СККТ (b) при 300 К.

согласно которым такие InAs СККТ демонстрируют слабую (менее 1–2%) оптическую анизотропию в плоскости (100).

В то же время осаждение нескольких рядов НОКТ в режиме вертикального совмещения (при толщинах спейсерных слоев GaAs менее 20 nm) приводит к некоторому росту степени оптической анизотропии вдоль направления $[0\bar{1}1]$. В частности в образце Б, имеющем толщину спейсерных слоев 15 nm, степень оптической анизотропии достигала 8% (см. рис. 1, b). Для объяснения обнаруженного эффекта необходимо рассмотреть эффект вертикального связывания КТ. При повторном осаждении нескольких рядов КТ поля упругих напряжений нижнего слоя КТ распространяются в спейсерный слой GaAs и при толщинах спейсера менее 20 nm начинают оказывать существенное влияние на процесс формирования верхнего слоя КТ, что в конечном счете приводит к вертикальному выстраиванию (связыванию) рядов КТ в колонны. Ранее нами было показано, что при вертикальном совмещении НОКТ, разделенных узкими спейсерными слоями (порядка высоты КТ),

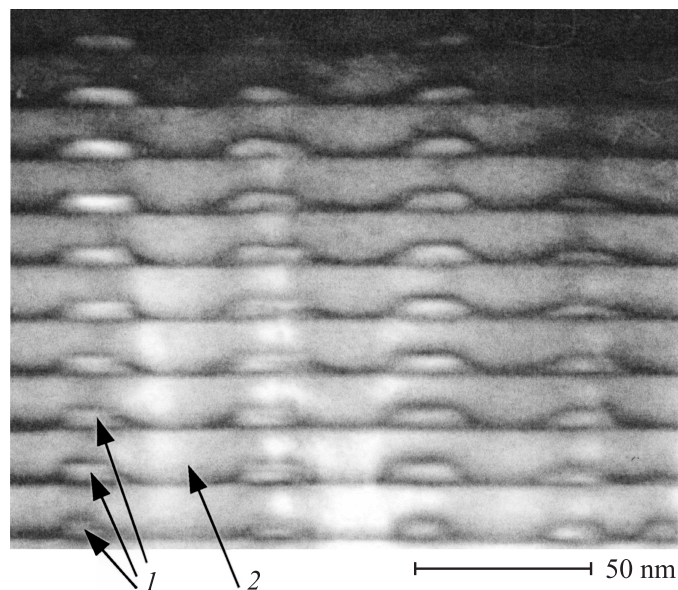


Рис. 2. Изображение вертикально связанных InAs СККТ, полученное методом просвечивающей электронной микроскопии в геометрии поперечного сечения: 1 — вертикально совмещенные КТ; 2 — матрица GaAs.

наблюдается латеральное объединение вертикально связанных КТ в латеральные цепочки КТ [3], приводящее к появлению гигантской (более 60%) оптической анизотропии [4]. С другой стороны, согласно результатам просвечивающей электронной микроскопии (рис. 2), при толщине спейсерных слоев 15 nm (образец Б) признаков эффекта латерального связывания КТ не наблюдается — среднее расстояние между КТ составляет около 25 nm. Было предположено, что обнаруженная оптическая анизотропия вертикально связанных НОКТ обусловлена спецификой поверхностной миграции адатомов в полях упругих напряжений уже сформированных трехмерных островков.

С целью проверки данного предположения были синтезированы КТ в режиме субмонослойного осаждения (образец В). Согласно рис. 3, в случае СККТ обнаружена сильная оптическая анизотропия — степень

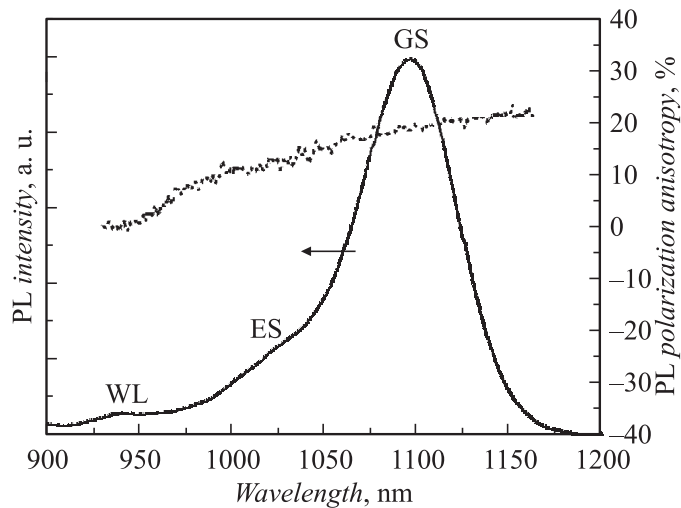


Рис. 3. Спектр ФЛ (сплошная) и оптической анизотропии (пунктирная) в плоскости (100) для InAs СМКТ при 300 К.

линейной поляризации вдоль кристаллографического направления $[0\bar{1}1]$ достигает $\sim 19\%$, что свидетельствует о существенной неэквивалентности направлений $[011]$ и $[0\bar{1}1]$. С одной стороны, для полярных полупроводников характерна анизотропия диффузии адатомов: диффузионная длина в направлении $[0\bar{1}1]$ больше, чем в направлении $[011]$. В случае циклического субмонослойного осаждения с относительно длительным прерыванием роста (10 s), когда количество осаждаемого слоя InAs за цикл критических толщин для трехмерного роста, миграция адатомов по поверхности более сильно выражена и может приводить к существенной удлинненности КТ вдоль кристаллографического направления $[0\bar{1}1]$. С другой стороны, для системы с субмонослойным покрытием при длительном прерывании роста, вследствие анизотропии упругих напряжений, возможно формирование цепочек КТ [6], ориентированных вдоль кристаллографического направления $[0\bar{1}1]$. Однако появление оптической анизотропии в случае латерального объединения КТ в цепочки возможно, когда расстояние между КТ в цепочке меньше или порядка радиуса экситона Бора (около 10 nm), тогда как расстояние

между соседними цепочками существенно больше экситонного радиуса. Согласно результатам спектроскопии фотолюминесценции, излучение из структур с СМКТ, соответствующее смачивающему слою, не поляризовано, в отличие от излучения с основного и возбужденных состояний непосредственно КТ. Таким образом, смачивающий слой представляет собой двумерную систему, а трехмерные островки приблизительно равномерно распределены по поверхности GaAs. Следовательно, наблюдаемая оптическая анизотропия в СМКТ обусловлена структурной анизотропией самих КТ.

Ключевую роль в формировании массива когерентно напряженных трехмерных островков играет процесс релаксации упругих напряжений (уменьшение упругих энергий). В силу анизотропии поверхностной миграции атомов основных компонентов гетерофазной системы при росте напряженных гетероструктур наблюдается более сильная релаксация упругих напряжений вдоль направления $[0\bar{1}1]$, приводящая к формированию слабой анизотропии поля упругих напряжений, которое оказывается „замороженным“ в объеме зарощенной гетероструктуры (так как диффузией в объеме можно пренебречь). Поэтому при вертикальном совмещении КТ данное анизотропное поле упругих напряжений будет определять кинетику поверхностной миграции адатомов. В результате происходит вытягивание КТ вдоль направления $[0\bar{1}1]$ и увеличение их размеров с каждым последующим рядом КТ, что в конечном счете и приводит к появлению в вертикально связанных НОКТ поляризационной анизотропии в плоскости (100).

Таким образом, вертикальное совмещение КТ даже в отсутствие латерального связывания приводит к оптической анизотропии в плоскости (100). Установлено, что InAs КТ, сформированные в результате субмонослойного осаждения, обладают явно выраженной оптической анизотропией (17–20%) излучения с основного и возбужденных состояний КТ вдоль кристаллографического направления $[0\bar{1}1]$, что свидетельствует о структурной анизотропии точек, обусловленной анизотропной поверхностной миграцией адатомов.

Работа была выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, ФЦП „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ и Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере.

Список литературы

- [1] *Ma'riquez J., Geelhaar L., Jacobi K.* // Appl. Phys. Lett. 2001. V. 78. N 16. P. 2309–2311.
- [2] *Wang Z.M., Holmes K., Mazur Yu.I., Salamo G.J.* // Appl. Phys. Lett. 2004. V. 84. N 11. P. 1931–1933.
- [3] *Цацульников А.Ф., Егоров А.Ю., Жуков А.Е., Ковш А.Р., Устинов В.М., Леденцов Н.Н., Максимов М.В., Воловик Б.В., Суворова А.А., Берг Н.А., Копьев П.С.* // ФТП. 1997. Т. 31. В. 7. С. 851–854.
- [4] *Yu. P., Langbein W., Leosson K., Hvam J.M., Ledentsov N.N., Bimberg D., Ustinov V.M., Egorov A.Yu., Zhukov A.E., Tsatsul'nikov A.F., Musikhin Yu.G.* // Phys. Rev. B. 1999. V. 60. N 24. P. 16680–16685.
- [5] *Ruvimov S., Liliental-Weber Z., Washburn J., Ledentsov N.N., Ustinov V.M., Shchukin V.A., Kop'ev P.S., Alferov Zh.I., Bimberg D.* // ФТП. 1998. Т. 40. В. 5. С. 849–851.
- [6] *Wang P.D., Ledentsov N.N., Sotomayor Torres C.M., Kop'ev P.S., Ustinov V.M.* // Appl. Phys. Lett. 1994. V. 64. N 12. P. 1526–1528.