

06

Исследование процессов формирования самоупорядоченных квантовых точек на основе (In,Mn)As

© А.Д. Буравлев, А.А. Зайцев, П.Н. Брунков, В.Ф. Сапега,
А.И. Хребтов, Ю.Б. Самсоненко, Г.Э. Цырлин,
В.Г. Дубровский, В.М. Устинов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
Санкт-Петербургский Академический университет —
Научно-образовательный центр нанотехнологий РАН
Институт аналитического приборостроения РАН, Санкт-Петербург
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
E-mail: bour@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 6 января 2012 г.

Методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложках GaAs(100) синтезированы (In,Mn)As квантовые точки. Исследование морфологии поверхности полученных образцов с помощью методики атомно-силовой микроскопии продемонстрировало, что присутствие Mn влияет на поверхностную плотность и размеры самоупорядоченных квантовых точек. Изучено влияние предварительно осажденного подслоя атомов Mn на свойства образцов.

В последнее время все большее внимание уделяется изучению процессов формирования самоупорядоченных квантовых точек (СКТ) на основе разбавленных магнитных полупроводников. Это связано с тем, что они потенциально могут быть использованы для создания целого ряда новых приборов не только нанoeлектроники, но и спинтроники. Одной из наиболее популярных методик формирования СКТ является молекулярно-пучковая эпитаксия (МПЭ). Обычно стараются проводить МПЭ синтез СКТ (In,Mn)As при пониженных ростовых температурах (меньших 400°C) с целью предотвратить нежелательную сегрегацию вторичных фаз типа MnAs, Ga_nMn_m [1–3]. Кроме того, использование данного технологического режима позволяет синтезировать структуры с повышенной концентрацией атомов Mn, которая считается необходимой для получения структур, демонстрирующих высокую температуру ферромагнитного упорядочения. С другой стороны, использование

более высокотемпературных режимов роста позволяет осуществлять легирование СКТ одиночными атомами Mn [4,5]. Поскольку было показано, что атом Mn в конфигурации A_0 в СКТ InAs представляет собой двухуровневую систему, хорошо отделенную от верхних энергетических уровней [5], получение подобных наноструктур открывает новые возможности для создания приборов квантовой информатики, путем использования обменного взаимодействия с оптически поляризованными носителями. Однако, несмотря на возрастающий интерес, целый ряд вопросов, связанных не только с технологическими аспектами формирования СКТ на основе полупроводниковых соединений (In,Mn)As, но и с истинной природой магнетизма в этих структурах, до сих пор остается открытым.

Данная работа посвящена изучению характерных особенностей формирования СКТ(In,Mn)As при использовании метода МПЭ.

Ростовые эксперименты проводились на установке МПЭ ЭП1203, оснащенной молекулярными источниками Mn, In, Ga и As. Рост структур осуществлялся на полуизолирующих подложках монокристаллического GaAs с ориентацией (100), готовых к эпитаксии (epi-ready). Скорость роста по In и Ga устанавливалась на уровне $V_{\text{InAs}} = 0.1$ монослоя в секунду (ML)/s и $V_{\text{GaAs}} = 1$ ML/s соответственно с помощью предварительной калибровки потоков по периоду осцилляций интенсивности зеркального рефлекса картины дифракции быстрых электронов на отражение (ДБЭО). Температура молекулярного источника Mn устанавливалась равной 710°C . Данная температура источника при росте объемных слоев соответствовала уровню легирования порядка 10^{18} cm^{-3} . На первом этапе проводилась термическая очистка поверхности образцов от слоя естественного окисла. Далее температура подложки снижалась на $30\text{--}50^\circ\text{C}$ и для выравнивания поверхности выращивался буферный слой GaAs. Время роста буферного слоя составляло 10 min. После достижения ростовой температуры осуществлялся рост СКТ (In,Mn)As в течение 25 s при температуре около 380°C . При выбранной нами скорости роста по In это соответствовало осаждению 2.5 ML материала. После завершения роста СКТ производилось постепенное снижение температуры до комнатной в потоке As. Изучение поверхности полученных образцов проводилось с помощью атомно-силовой методики (АСМ) на микроскопе Solver компании NT-MDT. Спектры фотолюминесценции (ФЛ) были получены при возбуждении гелий-неоновым лазером с энергией фотонов 1.96 eV. Для записи спектров

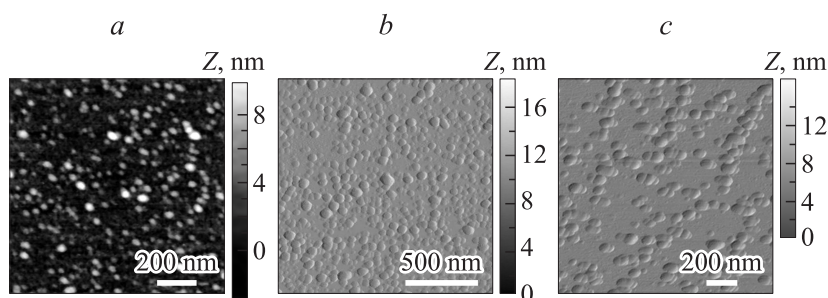


Рис. 1. АСМ-изображения поверхности структур: с квантовыми точками InAs (a); СКТ (In,Mn)As (b); СКТ (In,Mn)As, выращенными после осаждения подслоя атомов Mn (c).

использовался спектрограф DILOR XY800, оборудованный охлаждаемой ПЗС-матрицей. Поляризация фотолуминесценции в магнитном поле измерялась с помощью фотоупругого кварцевого модулятора. Магнитные поля (до 5 Т) создавались сверхпроводящим магнитом, позволяющим проводить измерения в фарадеевской и фойхтовской геометрии.

Первоначально для проверки ростовых параметров и получения информации о влиянии Mn на формирование квантовых точек нами были синтезированы квантовые точки на основе InAs при тех же ростовых параметрах, которые были использованы в дальнейших ростовых экспериментах по синтезированию квантовых точек на основе (In,Mn)As. На основании данных исследования морфологии поверхности полученных образцов, проведенного с помощью АСМ, было установлено, что одиночные СКТ InAs имеют характерный разброс по латеральным размерам от 10 до 70 nm, при этом средний размер квантовых точек составляет около 50 nm (рис. 1, a). Квантовые точки InAs распределены однородно по поверхности образца с плотностью порядка 10^9 cm^{-2} .

В свою очередь, изучение поверхности образцов с СКТ (In,Mn)As, синтезированных при температуре 380°C, показало, что характерные размеры варьируются от 10 до 100 nm, а средний размер составляет порядка 40 nm (рис. 1, b). Более крупные квантовые точки неравномерно распределены по поверхности образца. Поверхностная плотность СКТ по сравнению с СКТ InAs существенно возросла и составила

$2 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$. Столь существенное возрастание поверхностной плотности СКТ (In,Mn)As при практически схожих размерах может быть обусловлено влиянием Mn на формирование СКТ. Также данный результат может быть связан с изменением кристаллической структуры квантовых точек.

В работе также было проведено исследование влияния предварительно осажденного подслоя атомов Mn на формирование СКТ (In,Mn)As. Непосредственно осаждение атомов Mn производилось на поверхность буферного слоя GaAs после снижения температуры подложки до 530°C при отсутствии потока As в течение 10 с с целью создания нанокластеров, состоящих из атомов Mn. Была выдвинута гипотеза, что места образования нанокластеров могут быть декорированы при последующем самоупорядочении квантовых точек (In,Mn)As. СКТ (In,Mn)As, синтезированные на предварительно осажденном подслое атомов Mn, представлены на рис. 1, *с*. Размеры квантовых точек варьировались от 30 до 140 nm, а их средний размер возрос и составил порядка 70 nm. При этом по сравнению со структурой, выращенной без предварительного осаждения подслоя Mn, поверхностная плотность массивов квантовых точек (In,Mn)As уменьшилась и составила порядка 10^{10} cm^{-2} .

Для исследования процессов, происходящих при формировании кластеров Mn, непосредственно после завершения этой технологической операции было осуществлено резкое снижение температуры до комнатной. Исследование морфологии поверхности полученного таким образом образца выявило формирование достаточно больших, порядка $1 \mu\text{m}$, образований (рис. 2, *а*). Следует отметить, что подобный характер наблюдался как при росте СКТ в условиях пониженной температуры подложки, так и при понижении температуры подложки в процессе формирования СКТ InAs/GaAs [6]. Как уже было отмечено выше, характерный размер (In,Mn)As СКТ, выращенных на подслое Mn, составил 70 nm (рис. 1, *с*). Поэтому, скорее всего, образование столь крупных кластеров может быть связано, с одной стороны, с процессами, происходящими при резком понижении температуры, а с другой — с тем, что атомы Mn могут подтравливать поверхность образца (о чем также свидетельствует форма образовавшихся кластеров, рис. 2, *б*).

Кроме того, было проведено изучение оптических свойств образцов. Для измерения ФЛ образцы с массивами квантовых точек (In,Mn)As,

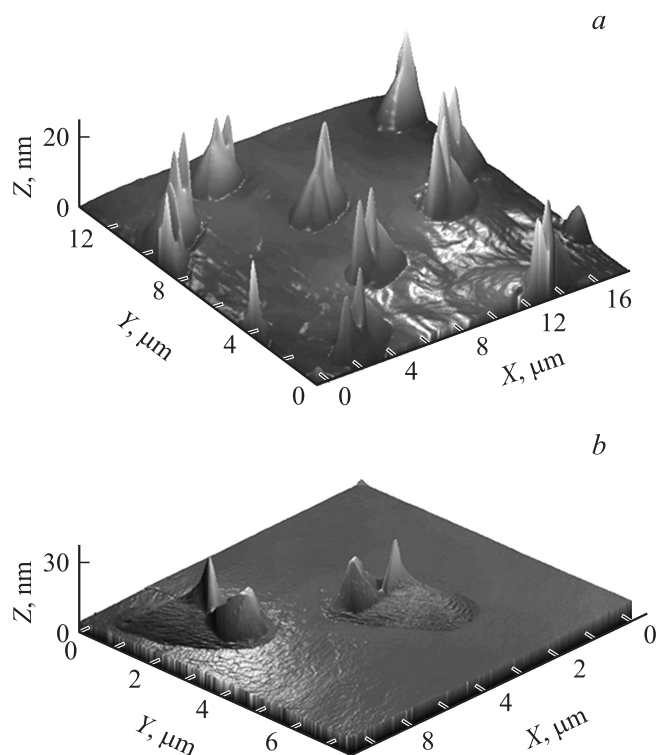


Рис. 2. Изображение поверхности образцов после осаждения атомов Mn на буферный слой GaAs с меньшим (*a*) и большим (*b*) пространственным разрешением.

выращенные как без использования, так и с использованием предварительно осажденного подслоя атомов Mn, заравнивались слоем GaAs толщиной порядка $0.2\ \mu\text{m}$. Изучение спектров ФЛ этих структур не выявило никаких характерных особенностей. Поэтому для увеличения кристаллографического качества структур и подавления безызлучательной рекомбинации, связанной с поверхностью образца и подложкой, для проведения экспериментов по измерению ФЛ нами был выращен образец, который содержал массивы СКТ (In,Mn)As, помещенные между симметричными барьерами на основе $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$.

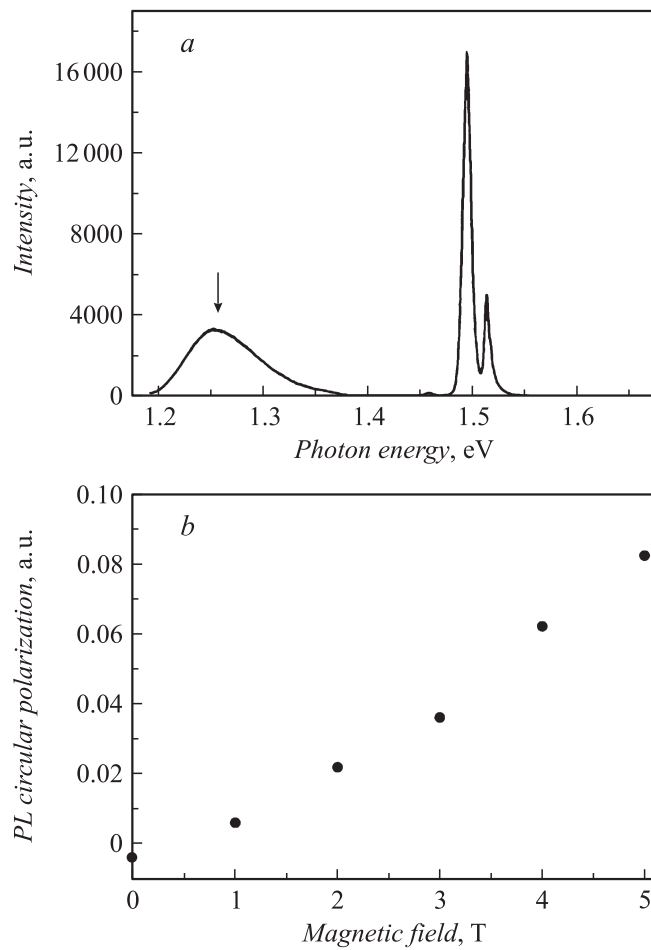


Рис. 3. Спектр ФЛ образца с СКТ (In,Mn)As, полученный при температуре 2 К (*a*), а также зависимость его поляризации от магнитного поля (*b*).

В результате исследований ФЛ, проведенных при температуре 2 К, была обнаружена широкая полоса излучения, соответствующая пику со значением энергии 1.25 eV (рис. 3, *a*), которая может быть связана с излучением СКТ (In,Mn)As. Кроме того, в магнитном по-

ле, приложенном перпендикулярно поверхности образца, наблюдалось увеличение поляризации ФЛ (рис. 3, *b*), вероятнее всего обусловленное поляризацией носителей заряда в квантовых точках в магнитном поле.

Работа была выполнена с использованием оборудования регионального ЦКП „Материаловедение и диагностика в передовых технологиях“ при финансовой поддержке РФФИ, президиума РАН, а также Министерства образования и науки РФ.

Список литературы

- [1] *Chen Y.F., Huang J.H., Lee W.N., Chin T.S., Huang R.T., Chen F.R., Kai J.J., Ku H.C. // Appl. Phys. Lett. 2007. V. 90. P. 022505.*
- [2] *Holub M., Chakrabarti S., Fathpour S., Bhattacharya P., Lei Y., Ghosh S. // Appl. Phys. Lett. 2004. V. 6. P. 973–975.*
- [3] *Yoon I.T., Lee S., Shon Y., Lee S.W., Kang T.W. // J. Superconductivity and Novel Magnetism. 2010. V. 24. P. 1393–1396.*
- [4] *Kudeslki A., Lemaitre A., Miard A., Voisin P., Graham T.C.M., Warburton R.J., Krebs O. // Phys. Rev. Lett. 2007. V. 99. P. 247209.*
- [5] *Lemaitre A., Kudeslki A., Miard A., Voisin P., Graham T.C.M., Warburton R.J., Krebs O. // SPIE. 2009. V. 7398. P. 739817.*
- [6] *Ledentsov N., N., Shchukin V.A., Bimberg D., Ustinov V.M., Cherkashin N.F., Musikhin Yu.G., Volovik B.V., Cirilin G.E., Alferov Zh.I. // Semicond. Sci. Technol. 2001. V. 16. P. 502.*