

06

Влияние периодического прерывания роста квантовых точек InAs/GaAs на их морфологию и оптоэлектронные спектры в методе газофазной эпитаксии при атмосферном давлении

© А.В. Здорovejщев, П.Б. Демина, Б.Н. Звонков

Научно-исследовательский физико-технический институт Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород
E-mail: zdorovei@nifti.unn.ru

Поступило в Редакцию 4 июля 2008 г.

Модифицирован режим роста квантовых точек газофазной эпитаксией из металлорганических соединений при атмосферном давлении. В отличие от стандартного режима роста время периодического прерывания подачи триметилиндия и арсина в реактор было увеличено и варьировалось в диапазоне от 4 до 18 с. Показано, что оптимизация времени прерывания роста позволяет получить плотные, однородные по размерам массивы квантовых точек и снизить концентрацию крупных релаксированных кластеров без применения дополнительных обработок (легирования сурфактантами или химического травления). Поверхностную концентрацию квантовых точек удалось повысить почти на порядок до $6 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2}$. Структуры, выращенные по модифицированной методике, имеют высокую термостабильность и высокую интенсивность электролюминесценции диодов Шоттки с торца структуры при комнатной температуре.

PACS: 68.37.Ps, 78.67.Hc, 81.07.Ta, 81.15.Gh

Гетероструктуры с качественными массивами самоорганизованных квантовых точек (КТ) изготавливают методами молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) (например, [1]) и газофазной эпитаксии из металлорганических соединений (ГФЭ МОС) при пониженном [2] или атмосферном давлении. Последний метод применяется нами для выращивания квантово-размерных гетероструктур, содержащих слой КТ InAs/GaAs. Его недостатками являются не столь высокое качество слоев и меньшая воспроизводимость результатов (по сравнению, например, с методом МЛЭ), поэтому получение массивов КТ с высокой поверхностной

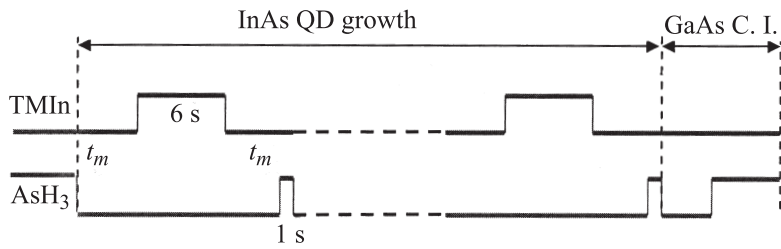


Рис. 1. Схема режима роста КТ InAs/GaAs методом ГФЭ МОС при атмосферном давлении.

концентрацией, однородных по размерам и химическому составу, не содержащих крупных релаксированных кластеров, остается до сих пор актуальной задачей. Ранее для улучшения этих параметров КТ InAs/GaAs в гетероструктурах, полученных методом ГФЭ МОС при атмосферном давлении, нами были разработаны методики легирования слоя КТ висмутом [3] и экспонирования поверхности КТ в потоке тетрахлорида углерода [4]. Результаты этих исследований позволили существенно улучшить параметры массива КТ InAs/GaAs и получить светоизлучающие диоды с $p-n$ -переходом на $1.3\ \mu\text{m}$ [4] и с барьером Шоттки на $1.3\text{--}1.57\ \mu\text{m}$ [5] при 300 К. В [2] появилось сообщение о том, что для ГФЭ МОС при пониженном давлении прерывание потока арсина во время роста слоя КТ также позволяет увеличить поверхностную концентрацию КТ и избавиться от появления крупных релаксированных кластеров.

В данной работе мы исследовали влияние прерывания подачи материалов при росте КТ методом ГФЭ МОС при атмосферном давлении на морфологию и спектры фотолюминесценции (ФЛ) массивов КТ. Ранее [6], поскольку рост осуществлялся при атмосферном давлении, прерывание подачи материалов t_m (рис. 1) до 4 с, которое вводилось для ограничения концентрации триметилиндия (ТМIn) и арсина, не приводило к обеднению атмосферы реактора атомами мышьяка (такой режим роста далее будем называть стандартным). В отличие от стандартного режима роста для достижения обеднения поверхности роста атомами мышьяка мы увеличили время прерывания подачи триметилиндия и арсина в реактор и варьировали его в диапазоне от 4 до 18 с.

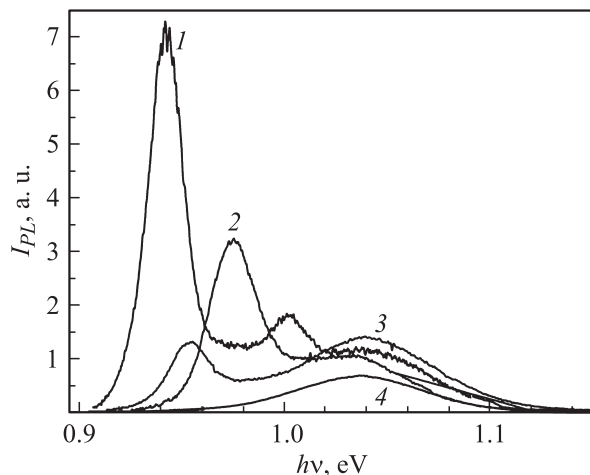


Рис. 2. Зависимость спектра ФЛ (77 К) КТ/КЯ от технологического режима осаждения КТ: 1, 2, 3 — прерывание роста соответственно 12, 8, 18 с; 4 — стандартный режим.

Рост осуществлялся на подложках n^+ -GaAs, на которые наносился буферный слой GaAs толщиной $0.6 \mu\text{m}$, слой КТ InAs в различных режимах и комбинированный покровный слой, состоящий из КЯ $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ толщиной 3 нм и слоя GaAs толщиной 20 нм. О качестве полученных структур судили по измерениям топографии поверхности и спектрам фото- и электролюминесценции. Фотолюминесценцию возбуждали He–Ne лазером мощностью 30 мВт; электролюминесценцию диодов Шоттки, образованных термическим напылением золотого контакта на поверхность гетероструктур с КТ, измеряли при прямом смещении. Измерения проводились при 77 и 300 К. Морфология поверхности исследовалась методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) как на структурах без покровного слоя, так и после селективного травливания покровного слоя GaAs.

На спектрах ФЛ (рис. 2) КТ, выращенных с различными временами прерывания, наблюдаются узкие низкоэнергетические пики и широкий пик на 1.04 eV. Причем низкоэнергетические пики различаются как по длине волны, так и по интенсивности от образца к образцу, в то время как пик на 1.04 eV присутствует на спектрах всех образцов

независимо от времени прерывания роста, что, вероятно, объясняется бимодальным распределением КТ по размеру. Наиболее интересен в этом случае массив более крупных КТ, спектром которых, как видим, можно управлять, изменяя режим роста. Оптимальное время прерывания роста для нелегированных структур составляет 12 s. Пик ФЛ (рис. 2, кривая 3), соответствующий энергии основного перехода таких КТ, имеет высокую интенсивность, энергию 0.94 eV (1.32 μm) и рекордно узкую ширину на полувысоте 20 meV. Такой эффект можно объяснить тем, что увеличение времени прерывания подачи арсина приводит к обеднению поверхности атомами мышьяка и, как следствие, увеличению длины свободного пробега атомов индия по поверхности роста. Это приводит к тому, что индий более равномерно распределяется по поверхности, а его излишки удаляются с поверхности роста. При этом поверхностная концентрация КТ увеличивается и уменьшается число крупных релаксированных кластеров, что приводит к увеличению интенсивности фотолюминесценции. С другой стороны, слишком большое время прерывания роста приводит к возникновению высокой концентрации антиструктурных дефектов и тем самым к уменьшению интенсивности фотолюминесценции.

При применении дополнительного легирования КТ висмутом в модифицированном режиме роста наблюдается аналогичная картина, только в этом случае оптимальным временем прерывания роста оказалось 8 s. При этом интенсивность пика ФЛ, соответствующего энергии основного перехода КТ, несколько увеличилась, однако его ширина на полувысоте увеличилась и составила 34 meV. Вероятно, присутствие висмута на поверхности роста замедляет диффузию адатомов индия и соответственно снижает оптимальное время прерывания роста, при котором наблюдается наиболее равномерное распределение индия по поверхности.

При сравнении спектров ФЛ гетероструктур с КТ, выращенных в оптимальном режиме прерывания (рис. 2, кривая 3) и в стандартном режиме роста (рис. 2, кривая 1), видно, что оптимизация прерывания роста значительно улучшает фотолюминесцентные свойства, причем пики, имеющие наименьшую полуширину, получаются в режиме прерывания роста 12 s без легирования висмутом. О высоком качестве таких структур говорит также тот факт, что на выращенных по модифицированной методике гетероструктурах с КТ зарегистрирована высокая интенсивность электролюминесценции с торца структуры при комнатной температуре.

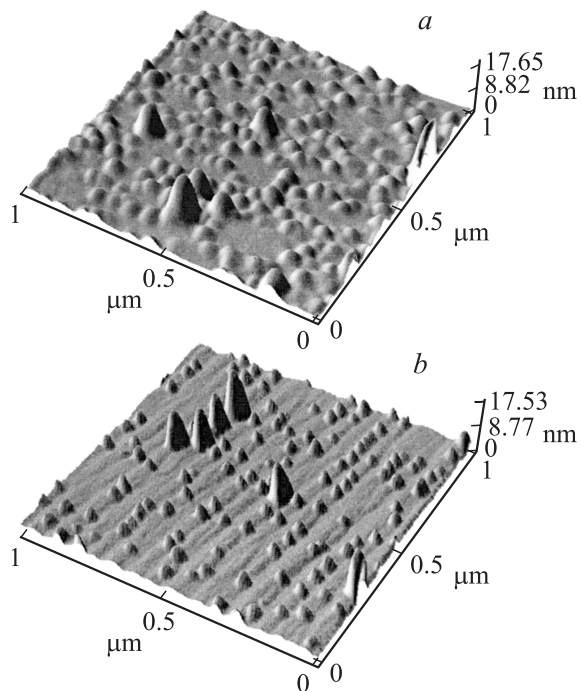


Рис. 3. АСМ-изображение поверхности гетероструктуры с КТ, выращенной с применением прерывания потока арсина и легирования Bi в процессе роста слоя КТ: *a* — после стравливания покровного слоя GaAs толщиной 20 нм в селективном травителе; *b* — выращенной без покровного слоя.

Полученные данные ФЛ также подтверждаются исследованиями морфологии поверхности КТ методом атомно-силовой микроскопии. После селективного стравливания покровного слоя разработанным нами ранее методом [7] на поверхности наблюдается (рис. 3, *a*) массив нанокластеров — КТ, имеющий бимодальное распределение по размеру (центры распределений на 3 и 5 нм), с высокой общей поверхностной концентрацией — $3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$, что почти на порядок выше значения поверхностной концентрации КТ, сформированных в стандартном режиме роста при легировании Bi . У нелегированных структур при оптимальном времени прерывания роста (12 с) поверхностная концентрация КТ еще выше и составляет $6 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$.

Гетероструктуры с КТ, выращенными без покровного слоя, имеют меньшую поверхностную концентрацию КТ: легированные Bi структуры при оптимальном времени прерывания роста (8 s) — $1.5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ (рис. 3, *b*), нелегированные структуры при оптимальном времени прерывания роста (12 s) $2 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2}$. Однако наряду с мелкими псевдоморфными кластерами — КТ в обоих случаях на поверхности также наблюдаются крупные релаксированные кластеры (в отличие от работы [2]), число которых несколько снизилось, но полностью исключить их образование оптимизацией режима прерывания роста не удалось.

В результате показано, что модифицированная методика прерывания роста позволяет получать плотные, однородные по размерам массивы КТ и снижать концентрацию крупных релаксированных кластеров без применения дополнительных обработок (легирования сурфактантами или химического травления). Поверхностную концентрацию InAs/GaAs КТ удалось повысить почти на порядок до $6 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2}$.

Работа поддержана РФФИ (гранты 06-02-16159, 05-02-16624), Минобрнауки РФ (проекты РНП.2.1.1.2741, РНП.2.2.2.3.16006) и CRDF BRNE (RUX0-001-NN/BF7M01).

Список литературы

- [1] Черкашин Н.А., Максимов М.В., Макаров А.Г. и др. // ФТП. 2003. Т. 37. В. 7. С. 120.
- [2] Lee Y., Ahn E., Kim J. et al. // Appl. Phys. Lett. 2007. V. 90. P. 033105.
- [3] Звонков Б.Н., Карпович И.А., Байдусь Н.В. и др. // ФТП. 2001. Т.35. В. 1. С. 92.
- [4] Байдусь Н.В., Бирюков А.А., Данилов Ю.А. и др. // Изв. РАН. Сер. Физ. 2003. Т. 67. № 2. С. 208.
- [5] Baidus N.V., Zvonkov B.N., Demina P.B. et al. // Semicond. Sci. Technol. 2004. V. 19. P. 469.
- [6] Байдусь Н.В., Звонков Б.Н., Некоркин С.М. и др. // Мат. совещ. „Нанопотоника“. Н. Новгород, 1999. С. 242.
- [7] Karpovich I.A., Baidus N.V., Zvonkov B.N. et al. // Phys. Low-Dim. Struct. 2001. V. 3/4. P. 341.