

УДК 621.315.5:621.382

Влияние температуры осаждения индия на морфологию наноразмерных гетероструктур InAs/GaAs, полученных капельным методом в условиях МОС-гидридной эпитаксии

М. А. Сурнина, А. Л. Сизов, Р. Х. Акчуринов, Т. А. Багаев

Исследовано влияние температуры разложения триметилла индия на геометрию и морфологию массива квантовых точек InAs, выращиваемых капельным методом на поверхности подложки GaAs в условиях МОС-гидридной эпитаксии. Подтверждены теоретические расчеты по степени разложения триметилла индия при температуре ниже 300 °С.

PACS: 68.37.Ps

Ключевые слова: гетероструктуры InAs/GaAs, квантовые точки, МОС-гидридная эпитаксия, капельный метод.

Введение

Матричные фотоприемные устройства (ФПУ), чувствительные в коротковолновом инфракрасном (ИК) диапазоне спектра (SWIR), используются для работы в самых различных отраслях применения, а именно, в космических исследованиях, медицине, неразрушающем контроле, системах оптической связи, оптоволоконной связи, сельском хозяйстве, астрономии и др. [1—3]. В настоящее время активно развиваются новые методы выращивания перспективных полупроводниковых материалов и структур.

Одним из перспективных методов формирования кванторазмерных гетероструктур для наноэлектроники является капельный метод. В рамках этого метода на первой стадии на поверхности подложки образуются наноразмерные капли элемента III группы (например, In); на второй стадии происходит растворение в этих каплях элемента V группы (например, As), в результате чего на подложке образуются наноразмерные кристаллы $A^{III}B^V$.

Капельный метод, в отличие от традиционной эпитаксии по механизму Странского-Крастанова [4], дает возможность получения изолированных квантовых точек независимо от степени рассогласования периодов решеток.

В последние годы процесс «капельной» эпитаксии активно развивался в условиях молекулярно-лучевой эпитаксии. Однако такие ограничения этого метода, как довольно низкая производительность, сложность и высокая стоимость оборудования, делают привлекательным развитие этого метода в условиях МОС-гидридной эпитаксии (МОСГЭ).

Ранее нами уже проводились исследования процессов формирования наноразмерных капель In на поверхности GaAs(100) в результате разложения $In(CH_3)_3$ и были установлены зависимости параметров капель от технологических условий их формирования. Однако для более точного определения влияния температуры процесса на геометрические параметры КТ InAs необходимо провести дополнительные исследования, используя возможности по варьированию таких параметров процесса, как температура осаждения и расход триметилла индия.

Экспериментальная часть

Эксперименты проводились на установке МОС-гидридной эпитаксии Сигмос-130 в водородной атмосфере при пониженном давлении. В качестве источников использовали триметилиндия (ТМИ), триметилгаллия (ТМГ) и арсин. На подвергнутую стандартной обработке подложку GaAs(100) *n*-типа проводимости при 580 °С с использованием ТМГ и арсина наращивали буферный слой GaAs, после чего при пониженной температуре осуществляли осаждение индия тер-

Сурнина Мария Александровна¹, инженер 1 кат.
Сизов Александр Леонидович², инженер-технолог 1 кат.
Акчуринов Рауф Хамзинович¹, профессор.
Багаев Тимур Анатольевич³, инженер-технолог.

¹МИТХТ им. М. В. Ломоносова.

Россия, 119571, Москва, пр. Вернадского, 86.

Тел. 8 (495) 246-84-66. E-mail: awiwa@mail.ru

²АО «НПО «Орион»

Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.

Тел. 8 (499) 374-81-30. E-mail: orion@orion-ir.ru

³ООО «Сигм Плюс».

Россия, 109431, Москва, ул. Авиаконструктора Миля, 4.

Тел. 8 (495) 333-35-25.

Статья поступила в редакцию 18 марта 2015 г.

© Сурнина М. А., Сизов А. Л., Акчуринов Р. Х., Багаев Т. А., 2015

мическим разложением ТМИ. Температурный интервал осаждения капель индия изменяли в пределах 230—400 °С при постоянном расходе ТМИ и времени осаждения. При проведении экспериментов по последующей термообработке образцов температуру отжига выдерживали 400 °С. Пиролиз арсина осуществляли при 400 °С в течение 15 мин с подачей 20 см³/мин. Исследование рельефа поверхности полученных образцов проводили с использованием атомно-силового микроскопа NTEGRA Maximus фирмы NT-MDT при комнатной температуре.

Результаты и обсуждение

Исследования образца с температурой осаждения индия 400 °С показали величину плотности квантовых точек 1×10^9 см⁻², высоту ~40—45 нм, а размер по основанию 130—150 нм (рис. 1). После осаждения индия при температуре 350 °С плотность квантовых точек при увеличении температуры осаждения не изменилась и равна $0,9 \times 10^9$ см⁻², высота 30—35 нм, а размер по основанию 120—130 нм.

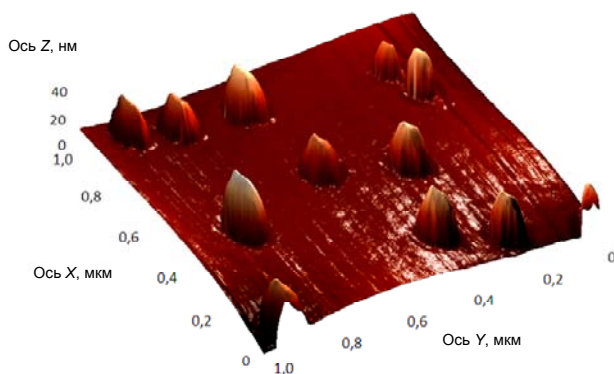


Рис. 1. АСМ изображение поверхности образцов при температуре осаждения индия 400 °С

После осаждения индия при температуре 230 °С плотность распределения квантовых точек InAs на подложке GaAs составляет $\sim 0,9 \times 10^9$ см⁻², высота 25—30 нм, а размер по основанию 80—100 нм (рис. 2).

Стоит отметить, что экспериментальные данные, полученные при температурах разложения триметила индия ниже 250 °С, не согласуются с данными, опубликованными в источнике [5]. В работе [6] было проведено квантово-химическое моделирование процесса разложения ТМИ в присутствии подложки GaAs с использованием полуэмпирического метода PM6 [7]. По результатам моделирования была установлена возможность разложения триметила индия при температурах менее 250 °С (рис. 3).

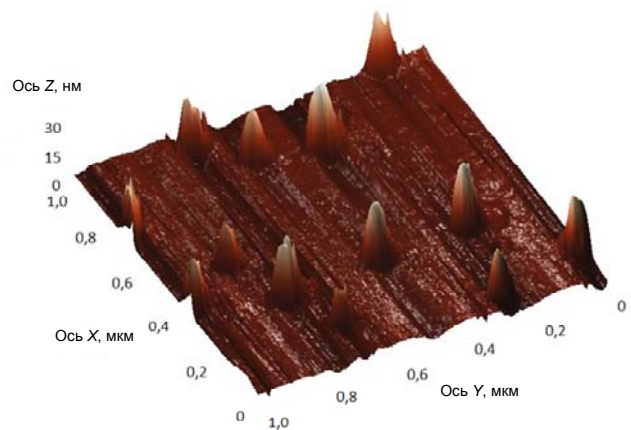


Рис. 2. АСМ изображение поверхности образцов при температуре осаждения индия 230 °С

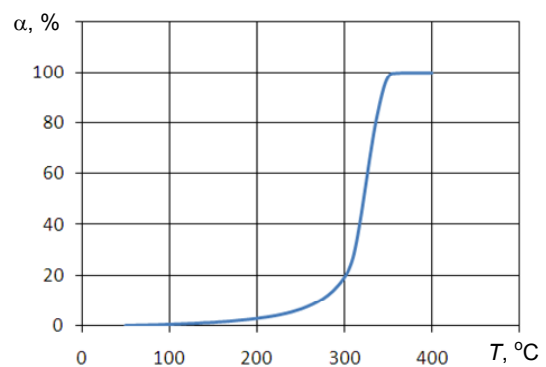


Рис. 3. Зависимость степени разложения триметила индия от температуры

Исследование образцов показало, что изменение температуры от 400 до 230 °С не оказывает значительного влияния на плотность КТ InAs/GaAs, которая составляет величину порядка $0,9 \times 10^9$ см⁻². Однако наблюдается уменьшение геометрических размеров КТ с 40—45 до 25—30 нм по высоте и с 130—150 до 80—100 нм по основанию при снижении температуры осаждения капель индия с 400 до 230 °С соответственно.

В работе [8] прослеживается зависимость плотности распределения КТ в зависимости от температуры осаждения. Процесс проводился при расходе триметила индия 25 см³/мин. С понижением температуры осаждения с 340 до 230 °С плотность расположения капель индия возрастала с $0,4 \times 10^9$ до $2,5 \times 10^9$ см⁻², а геометрические размеры по высоте уменьшались с 10—12 нм до 3—3,5 нм. Это объясняется тем, что при более высокой температуре происходит слияние капель индия. Исходя из новых экспериментальных данных, полученных в этой работе, можно предположить, что снижение расхода триметила индия с 25 до 20 см³/мин позволяет уменьшить влияние температуры на концентрацию КТ, а также дает возможность контролировать плотность квантовых точек.

Тем не менее, сложная зависимость размеров КТ от степени разложения триметила индия, наличия подложки, выступающей в роли катализатора, присутствия смачивающего слоя на поверхности подложки, а также возможность слияния квантовых точек требует проведения дополнительных экспериментов с разными параметрами процесса для выявления более точных зависимостей. Результатом экспериментов станет возможность управлять длиной волны излучения массивов КТ, используя лишь незначительные поправки в параметрах процесса осаждения индия.

Выводы

Исследована морфология массива квантовых точек InAs на подложке GaAs. Экспериментально доказано влияние снижения температуры осаждения капель индия на геометрические параметры квантовых точек из-за уменьшения степени разложения триметила индия. Показано, что с уменьшением расхода триметила индия снижается

зависимость плотности распределения квантовых точек от температуры осаждения.

Основным достоинством метода выращивания является то, что при высоком качестве полученных структур их стоимость гораздо ниже, чем в широко известном методе молекулярно-лучевой эпитаксии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Корнеева М. Д., Пономаренко В. П., Филачев А. М. // Прикладная физика. 2011. № 2. С. 47.
2. Корнеева М. Д., Пономаренко В. П., Филачев А. М. // Прикладная физика. 2011. № 3. С. 82.
3. Филачев А. М., Таубкин И. И., Трищенко М. А. Твердотельная фотоэлектроника. — М.: Физматкнига, 2005.
4. Sears K., Mokkarati S., Buda M. et al. // Proc. SPIE. 2006. V. 6415. P. 641506.
5. Stringfellow G. B. Organometallic Vapor Phase Epitaxy: Theory and Practice. — London. Acad. Press. 1999.
6. Гордеев Е. Г., Акчурин Р. Х., Сурнина М. А. // ЖФХ. 2015. Т. 89. № 1. С. 1.
7. Stewart J. J. P., Mol J. // Model. 2007. V. 13. P. 1173.
8. Акчурин Р. Х., Берлинер Л. Б., Богинская И. А. и др. // ЖТФ. 2014. Т. 84. Вып. 1. С. 80.

Influence of In deposition temperature on morphology of nanoscale heterostructures InAs/GaAs grown by droplet MOCVD epitaxy

M. A. Surnina¹, A. L. Sizov², R. Kh. Akchurin¹, and T. A. Bagaev³

¹Lomonosov Moscow State University of Fine Chemical Technology
86 Vernadskogo av., Moscow, 119571, Russia
E-mail: awiwa@mail.ru

²Orion R&P Association, Inc.
9 Kosinskaya str., Moscow, 111538, Russia
E-mail: orion@orion-ir.ru

³Sigm Plus, Ltd.
4 Aviakostruktora Milya str., Moscow, 109431, Russia

Received March 18, 2015

Influence of TMI decomposition temperature on geometry and morphology of InAs QD array grown by droplet MOCVD epitaxy was investigated. It was confirmed that theoretical calculations of TMI decomposition level versus temperature are in a good accordance with experiment.

PACS: 68.37.Ps

Keywords: InAs/GaAs heterostructures, quantum dots, MOS hydride epitaxy, drop method.

REFERENCES

1. M. D. Korneeva, V. P. Ponomarenko, and A. M. Filachev, *Prikladnaya Fizika*, No. 2, 47 (2011).
2. M. D. Korneeva, V. P. Ponomarenko, and A. M. Filachev, *Prikladnaya Fizika*, No. 3, 82 (2011).
3. A. M. Filachev, I. I. Taubkin, and M. A. Trishenkov, *Solid-State Photoelectronics. Physical Base*. (Fizmatkniga, Moscow, 2005) [in Russian].
4. K. Sears, S. Mokkaṭpati, M. Buda, et al., *Proc. SPIE* **6415**, 641506 (2006).
5. G. B. Stringfellow, *Organometallic Vapor Phase Epitaxy: Theory and Practice*. (London. Acad. Press. 1999).
6. E. G. Gordeev, R. Kh. Akchurin, M. A. Surnina, *Rus. J. of Phys. Chem. A*. 2015. **89** (1), 24 (2015).
7. J. J. P. Stewart and J. Mol, *Model.* **13**, 1173 (2007).
8. R. Kh. Akchurin, L. B. Berliner, I. A. Boginskaya, et al., *Tech. Phys.* **84** (1), 80 (2014).