

# Самоорганизация островков размером менее 20 нм на эпитаксиальных плёнках GaAs/InGaAs/GaAs, стимулированная пространственно-периодическим лазерным излучением

Ю.К.Верёвкин, В.Н.Петряков, Ю.Ю.Гущина, Ч.С.Пенг,  
С.Тан, М.Песса, З.Ванг, С.М.Олайзола, С.Тиссеранд

*При воздействии на поверхность эпитаксиальной плёнки GaAs/InGaAs/GaAs четырёх интерферирующих пучков обнаружен эффект лазерного стимулирования самоорганизации наноразмерных островков, расположенных двумерно-периодически. (Под самоорганизацией здесь понимаются процессы, определяющие размеры отдельных островков.) Распределение островков по диаметру имеет два ярко выраженных максимума. Островки малого диаметра (~5 нм) образовывались внутри отдельной области нагрева, а большего диаметра (~15 нм) – по периметру этой области. Поперечные размеры островков в 20–60 раз меньше периода стоячей волны интерферирующего излучения, что можно объяснить влиянием упругих напряжений на поверхности эпитаксиальной плёнки.*

**Ключевые слова:** самоорганизация наноразмерных островков, эпитаксиальная плёнка GaAs/InGaAs/GaAs, пространственно-периодическое лазерное излучение.

## 1. Введение

Эффект самоорганизации широко исследуется и используется для создания наноструктур, улучшения характеристик полупроводниковых лазеров [1] и детекторов. Самоорганизация наноструктур представляет также интерес для многих других направлений науки о наноразмерных системах и для нанотехнологий [2].

В настоящее время активно продолжают исследоваться по оптимизации условий самоорганизации наноструктур на поверхности различных материалов [3–7]. Одно из направлений таких исследований связано с поиском условий для создания периодически расположенных в пространстве островков размером менее 100 нм [8–13]. Для этой цели обычно используются различные маски или предварительно подготовленные подложки с рельефом. В работе [13] исследуется самоорганизация наноразмерных островков на поверхности Si под действием мощного УФ излучения в режиме возбуждения поверхностных волн. Эффект самоорганизации наноструктур удалось получить при воздействии более 200 импуль-

сов с плотностью энергии  $\sim 1$  Дж/см<sup>2</sup>. В [14] представлены детальные исследования самоорганизации квантовых точек в системах Si–Ge/Si и InAs/GaAs на плоских и структурированных подложках. Авторы работы [15] обнаружили интересный эффект образования отдельных групп квантовых точек на плёнках InAs/GaAs. Для управления параметрами квантовых точек из InAs в [15, 16] использовалась технология «droplet homoepitaxy (GaAs/GaAs) nano-holed island templates». Создание таких дефектов на поверхности подложки позволяет ограничить в пространстве места возникновения квантовых точек и в зависимости от условий роста изменять их морфологию. Другой способ пространственного ограничения роста квантоворазмерных островков на поверхности монокристаллов Si и GaAs реализовали авторы [17]. Для воздействия на эти монокристаллы они использовали четыре когерентных пучка излучения мощного импульсного УФ лазера. Такое воздействие привело к созданию пространственно-периодических островков и ямок с размерами менее 100 нм.

В работе [17] был обнаружен эффект прямого лазерного стимулирования формирования островков с размерами, в 5–10 раз меньшими периода стоячей волны излучения. Такой эффект не может быть объяснён только зависимостью от теплового порога лазерного воздействия, т. к. он сохранялся при увеличении плотности энергии воздействующего излучения почти в два раза. Размер интерференционного максимума, в десять раз меньший периода стоячей волны, при действии только тепловой нелинейности может быть получен при превышении порога менее чем на 10 %. Для объяснения наблюдаемых малых размеров в [17] было высказано предположение о том, что такая модификация возможна при наличии поверхностных напряжений. В настоящей работе представлены результаты наноразмерной модификации эпитак-

Ю.К.Верёвкин, В.Н.Петряков. Институт прикладной физики РАН, Россия, 603950 Н.Новгород, ул. Ульянова, 46; e-mail: verevkin@appl.sci-nnov.ru

Ю.Ю.Гущина. Научно-образовательный центр «Физика твердотельных наноструктур» Нижегородского государственного университета, Россия, 603950 Н.Новгород, просп. Гагарина, 23

C.S.Peng, C.Tan, M.Pessa. Optoelectronics Research Centre, Tampere University of Technology, Tampere, Finland

Z.Wang. Manufacturing Engineering Centre, Cardiff University, Cardiff, UK

S.M.Olaizola. CEIT and Tecnun (University of Navarra), San Sebastian, Spain

S.Tisserand. SILIOS Technologies, Peynier, France

Поступила в редакцию 6 апреля 2009 г., после доработки – 3 августа 2009 г.

сиальной плёнки GaAs/InGaAs/GaAs, которые свидетельствуют о ещё большей роли поверхностных напряжений в развитии пространственных неустойчивостей на поверхности.

## 2. Экспериментальные результаты

Эксперименты по модификации эпитаксиальных плёнок GaAs проводились с использованием образцов четырёх типов. Подложкой служили кристаллы n-GaAs (001). После удаления окисей с подложки на неё наносился буферный слой GaAs толщиной до 100 нм при температуре 580 °С, далее выращивался слой  $\text{In}_{0,35}\text{Ga}_{0,65}\text{As}$  толщиной 3 нм при температуре 520 °С. Верхний слой GaAs толщиной 5, 10, 20 или 40 нм выращивался при температуре 520 °С. Для эпитаксиального роста во всех процессах применялась установка для молекулярно-пучковой эпитаксии с твёрдотельными источниками.

В качестве источника излучения использовался ХеСl-лазер (длина волны излучения 308 нм, длина когерентности более 30 см) с энергией до 100 мДж в импульсе длительностью 10–15 нс и расходимостью выходного излучения, близкой к дифракционной. Все результаты модификации морфологии плёнок, приведённые ниже, получены за один лазерный импульс при интерференции четырёх пучков. В оптической схеме разделения исходного лазерного пучка на четыре применялись три диэлектрических зеркала с коэффициентами отражения 50 %. Для последующего объединения пучков на образце использовались восемь диэлектрических зеркал с коэффициентами отражения  $\sim 99\%$ . Поляризация интерферирующих пучков соответствовала ТЕ–ТМ в обозначениях, принятых в [18]. Там же приводятся подробные аналитические выражения и результаты компьютерных расчётов пространственного распределения интенсивности стоячих волн для этого случая. Коротко это распределение можно охарактеризовать как синусоидальное по двум координатам в плоскости образца.

Все эксперименты по наноразмерной модификации эпитаксиальных плёнок выполнены в комнатных условиях (образцы располагались вертикально). В пределах точности измерений топографии поверхности характер модификации плёнок не зависел от толщины плёнки GaAs. Ниже приводятся результаты воздействия УФ-излучения на плёнку толщиной 20 нм.

На рис.1 показано полученное с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ) изображение участка поверхности плёнки GaAs/InGaAs/GaAs после воздействия четырёх пучков лазерного излучения со средней плотностью энергии  $\sim 1.5$  Дж/см<sup>2</sup>. Отметим, что в этом эксперименте биссектрисы углов между направлениями распространения пучков, лежащими в одной плоскости падения, не были перпендикулярны к поверхности образцов, что приводило к изменению интенсивности интерференционного максимума в два раза [18] вдоль диагонали рисунка из верхнего левого угла в правый нижний угол. Таким образом, при воздействии одного лазерного импульса можно наблюдать изменение характера модификации плёнки при изменении локальной плотности энергии в два раза. Обратим внимание на две особенности результата воздействия лазерного излучения. Внешняя граница модификации, обусловленная одним интерференционным максимумом, близка к прямоугольной, тогда как область нагрева имеет вид круга. Вторая важная особенность

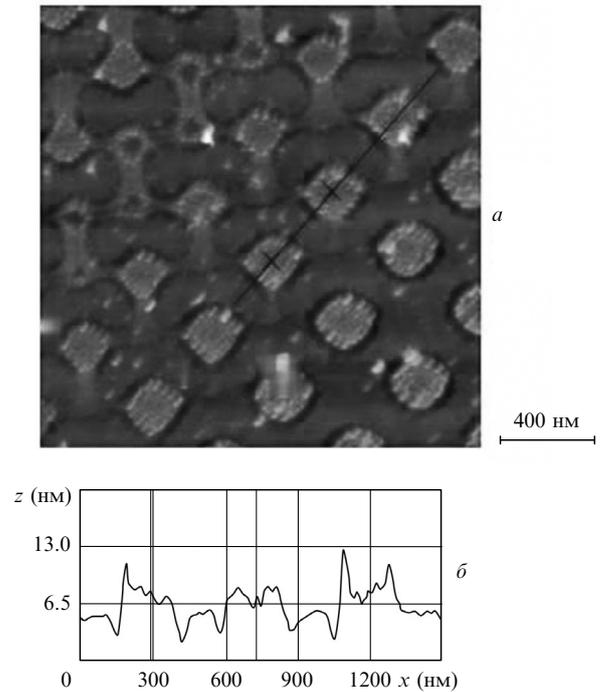


Рис.1. АСМ-изображение участка поверхности структуры GaAs/InGaAs/GaAs после воздействия четырёх когерентных пучков излучения ХеСl-лазера (а) и профиль этого изображения вдоль жирной линии на рис.1,а (б).

состоит в том, что внутри этой области возникло значительное число островков, отсутствующих в местах, на которые не воздействовало лазерное излучение.

На рис.2 приведены АСМ-изображения участков плёнки с большим разрешением, чем на рис.1. Здесь можно

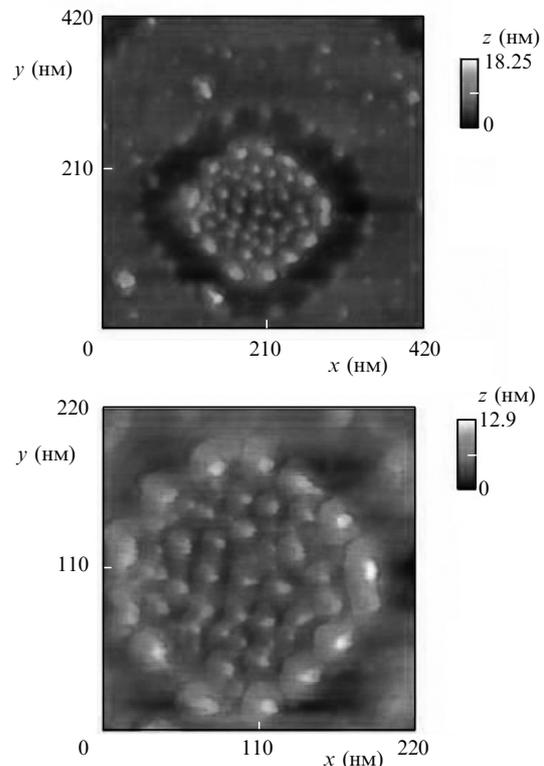


Рис.2. АСМ-изображения различных участков поверхности структуры GaAs/InGaAs/GaAs, которые показывают варианты возникающих модификаций.

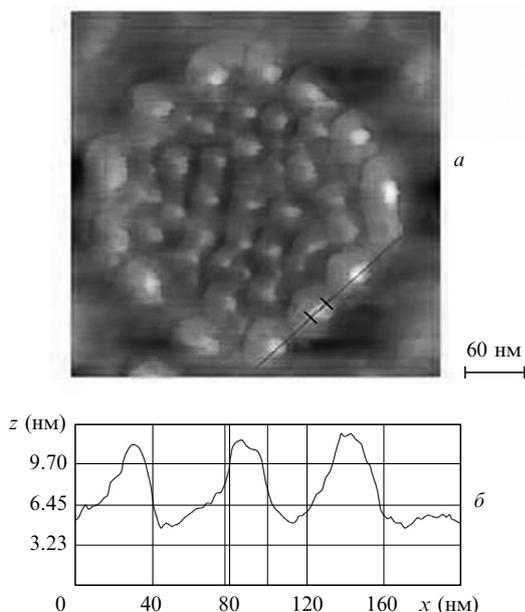


Рис.3. АСМ-изображение участка поверхности в области одного интерференционного максимума (а) и профиль этого изображения вдоль жирной линии на рис.3,а (б).

отметить, что модификация эпитаксиальной плёнки существенно отличается от модификации монокристаллов [17] и аморфных плёнок [19–22]. В первом случае рядом с интерференционным максимумом возникает одиночный островок, а непосредственно в области максимума образуется ямка. Это указывает на перемещение материала. Во втором случае в максимуме интенсивности образуется ямка, окружённая «подъёмом» материала, как это бывает при взрыве. Для получения статистической информации о размерах возникших островков были получены АСМ-изображения, показанные на рис.3. На этих изображениях хорошо видно, что размеры островков (диаметром 7–20 нм), возникших на периферии области максимума интенсивности интерферирующих волн, существенно отличаются от размеров островков, которые возникли внутри этой области (3–8 нм). Распределения островков по размерам приведены на рис.4 и 5. Плотность островков на периферии составляет  $\sim 10^{10}$  шт./см<sup>2</sup>, а плотность внутренних островков можно оценить как  $5 \times 10^{10}$  шт./см<sup>2</sup>.

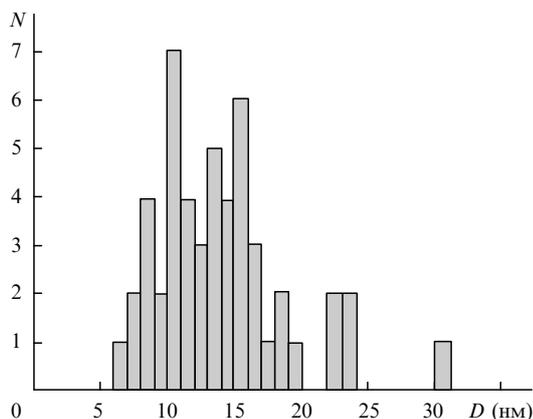


Рис.4. Распределение по размерам  $D$  периферийных (больших) островков.

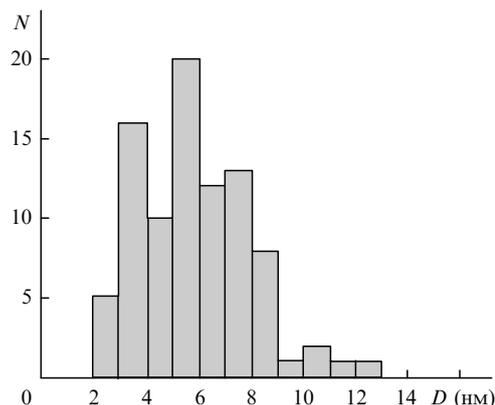


Рис.5. Распределение по размерам  $D$  внутренних (маленьких) островков.

### 3. Обсуждение результатов

На основе проведённых измерений можно высказать ряд физических предположений, объясняющих процесс возникновения полученных островков. Прежде всего отметим, что в условиях наших экспериментов отсутствует абляция (удаление материала с обрабатываемой поверхности). Рельефные структуры возникают в результате перемещения материала по поверхности. Поперечные размеры островков в 20–60 раз меньше периода стоячей волны излучения. Такие размеры невозможно объяснить только тепловыми процессами, поскольку похожие островки возникают при изменении энергии экспозиции в два раза. Как и при воздействии на монокристаллы [17], для понимания процесса модификации эпитаксиальных плёнок необходимо учитывать существенное влияние поверхностных напряжений. По нашему мнению, возникновение островков в данных экспериментах можно описать в рамках модели Странски–Крастанова.

Хорошо известно, что поверхность монокристалла (и эпитаксиальных плёнок) находится в напряжённом состоянии. Напряжения на поверхности монокристаллов связаны с различием в окружении атомов, находящихся внутри и на поверхности кристалла. Чем более высокого качества поверхность монокристалла, тем больше поверхностные напряжения. Реально напряжения исчезают в точках дефектов монокристаллической поверхности, которые возникают при росте и обработке монокристалла. В качестве таких дефектов могут выступать все типы дефектов, известные в кристаллографии. В этом случае, пространственный масштаб изменения напряжений зависит от качества монокристалла и может быть соизмерим с размером образца, что и наблюдалось в работе [17] для монокристаллов кремния.

Основная причина возникновения поверхностных напряжений в эпитаксиальных плёнках также хорошо известна – различие в постоянных решёток материалов плёнки ( $C_1 = 6.0584 \text{ \AA}$  для InAs) и подложки ( $C_G = 5.6534 \text{ \AA}$  для GaAs). Пространственный масштаб напряжений определяется биениями между двумя периодическими функциями с периодами  $C_1$  и  $C_G$ . В простейших предположениях для минимального периода пространственного рассогласования этих решёток можно получить выражение  $2C_1C_G/(C_1 - C_G)$ . Эта оценка даёт значение  $\sim 170 \text{ \AA}$ . В описываемых экспериментах эпитаксиальная плёнка имела смешанный состав –  $\text{In}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ . Среднее значение постоянной решётки смеси можно оце-

нить, исходя из предположения о линейной зависимости постоянной решётки от концентрации In. В этом случае пространственное рассогласование решёток составляет  $\sim 510 \text{ \AA}$ . Это значение удивительно хорошо согласуется с экспериментально измеренным расстоянием между островками, которые показаны на рис.3. Такое совпадение даёт дополнительный аргумент в пользу существенного влияния поверхностных напряжений на характер модификации эпитаксиальных плёнок, которая наблюдается в наших экспериментах. Теперь можно сделать более сильное предположение: изменение расстояния между разными островками определяется случайными локальными изменениями концентрации In!

#### 4. Заключение

Таким образом, в настоящей работе обнаружен и исследован новый способ создания двумерно-периодических островков размером менее 20 нм на поверхности эпитаксиальной плёнки. Этот способ может применяться при напылении многослойных эпитаксиальных структур с коррелированными квантовыми точками.

Развиваемый нами метод создания периодических островков размером менее 20 нм может стать альтернативой методу, использующему различные пространственные маски для ограничения места появления квантоворазмерных структур.

Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке гранта Комиссии европейского сообщества ЕС FP-6 IST-4 № 027976 и гранта Программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 27.

1. Леденцов Н.Н., Устинов В.М., Щукин В.А. и др. *ФТП*, **32**, 385 (1998).
2. *Нанотехнология в ближайшем десятилетии*. Под ред. М.К.Ро-

- ко, Р.С.Уильямса, П.Аливисатоса (М.: Мир, 2002, с. 293).
3. Устинов В.М. *ФТП*, **38**, 963 (2004).
4. Крыжановская Н.В., Гладышев А.Г., Блохин С.А. и др. *ФТП*, **38**, 867 (2004).
5. Звонков Б.Н., Карпович И.А., Байдусь Н.В. и др. *ФТП*, **35**, 92 (2001).
6. Sgartato A., Szkutnik P.D., Balzarotti A., Motta N., Rosel F. *Appl. Phys. Lett.*, **83**, 4002 (2004).
7. Placidi E., Della Pia A., Arciprete F. *Appl. Phys. Lett.*, **94**, 021901 (2009).
8. Kitajima T., Lu B., Leone S.R. *Appl. Phys. Lett.*, **80**, 497 (2002).
9. Capellini G., De Seta M., Spinella C., Evangelisti F. *Appl. Phys. Lett.*, **82**, 1772 (2003).
10. Zhou Z., Halilovic A., Fromherz T., Schaffer F., Bauer G. *Appl. Phys. Lett.*, **82**, 4779 (2003).
11. Li Q., Han S.M., Brueck S.R.J., Hersee S., Jiang Y.-B. *Appl. Phys. Lett.*, **83**, 5032 (2003).
12. Alonso-Gonzalez P., Gonzalez L., Gonzalez Y., Fuster D., Fernandez-Martinez I., Martin-Sanchez J., Abellmann L. *Nanotechnology*, **18**, 355302 (2007).
13. Pedraza A.J., Fowlkes J.D., Guan Y.-F. *Appl. Phys. A*, **77**, 277 (2003).
14. Patella F., Szkutnik A., Sgarlata E. *J. Phys. Condens. Matter.*, **16**, S1503 (2004).
15. Lee J.H., Wang Zh.M., Liang B.L., Sablon K.A., Strom N.W., Salamo G.J. *Semicond. Sci. Technol.*, **21**, 1547 (2006).
16. Liang B.L., Wang Zh.M., Lee J.H., Sablon K.A., Mazur Yu.I., Salamo G.J. *Appl. Phys. Lett.*, **89**, 213103 (2006).
17. Верёвкин Ю.К., Дауме Э.Я., Петряков В.Н., Гущина Ю.Ю., Тихов С.В. *Письма в ЖТФ*, **31** (17), 83 (2005).
18. Fernandez A., Phillion D.W. *Appl. Opt.*, **37** (3), 473 (1998).
19. Алексеев А.М., Верёвкин Ю.К., Востоков Н.В. и др. *Письма в ЖЭТФ*, **73** (4), 214 (2001).
20. Бредихин В.И., Верёвкин Ю.К., Дауме Э.Я. и др. *Квантовая электроника*, **30**, 333 (2000).
21. Верёвкин Ю.К., Бронникова Н.Г., Королихин В.В. и др. *ЖТФ*, **73**, 99 (2003).
22. Бредихин В.И., Буренина В.Н., Верёвкин Ю.К. и др. *ЖТФ*, **74**, 86 (2004).