

06;07

## **Самоорганизация нанометровых островков на поверхности монокристаллов кремния и арсенида галлия, стимулированная пространственно-периодическим лазерным излучением**

© Ю.К. Веревкин, Э.Я. Дауме, В.Н. Петряков,  
Ю.Ю. Гуцин, С.В. Тихов

Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород  
E-mail: verevkin@appl.sci-nnov.ru  
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

Поступило в Редакцию 15 марта 2005 г.

При воздействии на поверхность четырех интерферирующих пучков обнаружен эффект лазерного стимулирования самоорганизации островков, расположенных двумерно периодически на поверхности монокристаллов кремния и арсенида галлия. Под самоорганизацией здесь понимаются процессы, определяющие размеры отдельных островков. Исследовано влияние поляризации интерферирующих пучков на характер самоорганизации островков. Созданы островки с поперечными размерами 60–100 nm с высотой 6–12 nm. Поперечные размеры островков в 5–10 раз меньше периода стоячей волны интерферирующего излучения, что можно объяснить влиянием упругих напряжений на поверхности кристаллов.

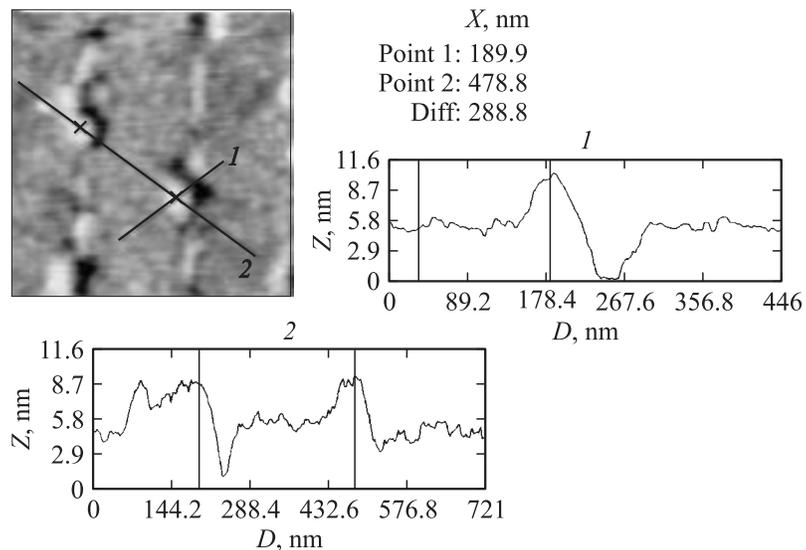
Хорошо известна роль самоорганизации наноструктур (СОНС) в существенном улучшении характеристик полупроводниковых лазеров [1]. Эффект СОНС представляет также интерес во многих других направлениях развития нанонауки и нанотехнологии [2].

В последние годы активно продолжаются исследования по оптимизации условий СОНС на различных материалах [3–6]. Одно из направлений таких исследований связано с поиском условий создания периодически расположенных в пространстве суб 100 nm островков [7–10]. Для этой цели обычно используются различные маски или предва-

рительно подготовленные подложки с рельефом. В [11] исследуется самоорганизация наноразмерных островков на Si под воздействием мощного УФ-излучения в режиме возбуждения поверхностных волн. Эффект СОНС удалось получить при воздействии более 200 импульсов с энергией около  $1 \text{ J/cm}^2$ . В [12] представлены детальные исследования самоорганизации квантовых точек в системах Si–Ga/Si и InAs/GaAs на плоских и структурированных подложках.

В нашей работе приведены результаты исследования условий создания двумерных периодических нанометровых островков на стандартно подготовленной поверхности монокристаллов Si марки КЭФ-4 и GaAs марки АГЧО-1 с кристаллографической ориентацией (100). Для воздействия на поверхность использовались четыре когерентных пучка излучения XeCl лазера. Такой способ воздействия на материалы позволил авторам реализовать условия локальной наноразмерной модификации парамагнитных пленок в ферромагнитное состояние [13]. Распределение излучения в стоячей волне существенно зависит от поляризации интерферирующих пучков. Нами использовались два варианта поляризации пучков TE–TE и TE–TM (подробнее см. [14]). Представленные ниже результаты получены за один импульс лазерного излучения длительностью 10 ns при экспозиции  $1–1.5 \text{ J/cm}^2$ .

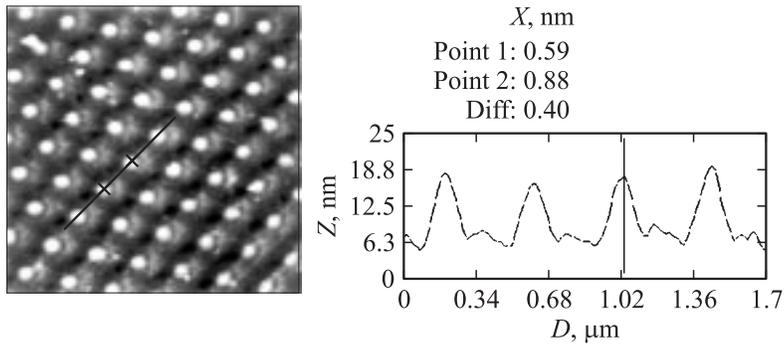
На рис. 1 показаны изображения с атомно-силового микроскопа (АСМ) части поверхности кремния после воздействия четырех пучков с поляризациями TE–TE. Здесь же показаны сечения поверхности в разных направлениях, отмеченных прямыми линиями. Структура стоячей волны в этом случае представляет собой сумму двух взаимно перпендикулярных полос. В соответствии с этим распределением вблизи области максимума интенсивности возникли островки диаметром 40–60 nm (см. сечения). Между такими островками появились протяженные подъемы с размерами  $30 \times 150 \text{ nm}$ . Отметим одну интересную особенность самоорганизации в этом режиме — рядом с островками (выпуклостями) появились ямки различной конфигурации с поперечными размерами от 30 nm и глубиной 46 nm. Как видно из рис. 1, такие ямки расположены по разные стороны от соседних островков. Такой характер модификации кристаллической поверхности существенно отличается от результатов воздействия лазерного излучения на поверхность аморфных материалов [14]. При модификации аморфных материалов вокруг ямок образуются симметричные бугорки.



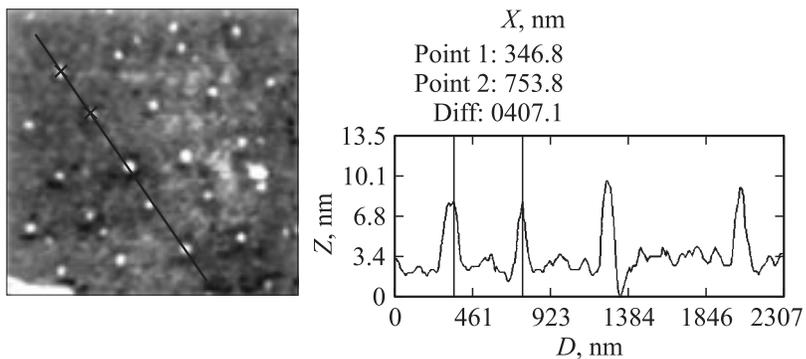
**Рис. 1.** АСМ-изображение поверхности кремния после воздействия четырех пучков УФ-излучения (по два пучка в горизонтальной и вертикальной плоскостях падения с ТЕ–ТЕ-поляризациями).

Существенно другой характер самоорганизации наблюдается при интерференции пучков с ТЕ–ТМ-поляризациями. В этом случае максимумы интенсивности хорошо локализованы и окружены линиями нулевой интенсивности. Такое распределение приводит к более четкой локализации возникающих островков. На рис. 2 показаны АСМ-изображения поверхности кремния и сечение участка, отмеченного прямой линией. Здесь видна достаточно хорошая двумерная периодичность в пространстве возникшей структуры островков диаметром менее 100 nm и высотой 12 nm. Обратим внимание, что в этом образце все островки возникли относительно ближайших ямок по одну сторону. Это говорит о том, что условия диффузии атомов кремния в этом эксперименте не изменяются на масштабе АСМ-изображения.

На рис. 3 показаны АСМ-изображение поверхности GaAs после воздействия пучков с ТЕ–ТМ-поляризациями и сечение участка, отмеченного прямой линией. Образовавшиеся на GaAs островки имеют диаметр



**Рис. 2.** АСМ-изображение поверхности кремния после воздействия четырех пучков УФ-излучения (два пучка в горизонтальной плоскости с ТЕ-поляризациями, а два пучка в вертикальной плоскости с ТМ-поляризациями).



**Рис. 3.** АСМ-изображение поверхности арсенида галлия после воздействия четырех пучков УФ-излучения (два пучка в горизонтальной плоскости с ТЕ-поляризациями, а два пучка в вертикальной плоскости с ТМ-поляризациями).

около 60 nm, а высоту  $\sim 7$  nm. Из картины на линии сечения видно, что положение образовавшихся островков имеет разброс около 30 nm.

В представленных выше результатах видно, что минимальный размер образовавшихся островков в 5–10 раз меньше периода стоячей волны лазерного излучения. В случае воздействия на аморфные или

поликристаллические пленки [15,16] размер области модификации их параметров составляет обычно 50% от периода стоячей волны. Такое большое различие в результатах воздействия лазерного излучения позволяет сделать вывод, что в случае кристаллических поверхностей в процессе их модификации существенную роль играют специфические кристаллические силы на поверхности. Можно предположить, что эти силы возникли в связи с отличием состояния поверхностных атомов кристалла от состояния атомов внутри объема кристалла [1]. Эти соображения позволяют нам предположить, что образование представленных периодических структур связано с локальным лазерным нагревом и стимулированием диффузии атомов в поле упругих напряжений в поверхностном слое монокристаллов, что реализует условия самоорганизации нанометровых островков с размерами существенно меньше пространственного периода стоячей волны излучения.

Таким образом, проведенные эксперименты показали возможность управления процессом самоорганизации структур на поверхности Si и GaAs путем воздействия нескольких когерентных пучков излучения. Такие структуры могут оказаться полезными для полупроводниковой электроники при организации вывода излучения полупроводниковых лазеров перпендикулярно поверхности их резонаторов.

В заключение отметим, что авторы планируют провести исследование самоорганизации при оптимизации условий возбуждения поверхностных электромагнитных волн.

## Список литературы

- [1] *Леденцов Н.Н., Устинов В.М., Шукин В.А.* и др. // ФТП. 1998. Т. 32. С. 385.
- [2] *Нанотехнология в ближайшем десятилетии* / Под ред. М.К. Роко, Р.С. Ульямса, П. Аливисатоса. М.: Мир, 2002. С. 293. (Nanotechnology Research Directions / Ed. by M.C. Roco, R.S. Williams, P. Alivisatos. Kluwer Academic Publishers, 2000, Dordrecht, Boston, London).
- [3] *Устинов В.М.* // ФТП. 2004. Т. 38. С. 963.
- [4] *Крыжановская Н.В., Гладышев А.Г., Блохин С.А.* и др. // ФТП. 2004. Т. 38. С. 867.
- [5] *Звонков Б.Н., Карпович И.А., Байдусь Н.В.* и др. // ФТП. 2001. Т. 35. С. 92.
- [6] *Sgartato A., Szkutnik P.D., Balzarotti A., Motta N, Rosel F.* // Appl. Phys. Lett. 2004. V. 83. P. 4002.
- [7] *Kitajima T., Lu B., Leone S.R.* // Appl. Phys. Lett. 2002. V. 80. P. 497.

- [8] *Capellini G., De Seta M., Spinella C., Evangelisti F.* // Appl. Phys. Lett. 2003. V. 82. P. 1772.
- [9] *Zhoug Z., Halilovic A., Fromherz T., Schaffer F., Bauer G.* // Appl. Phys. Lett. 2003. V. 82. P. 4779.
- [10] *Li Q., Han S.M., Bruek S.R.J., Hersee S., Jiang Y.-B.* // Appl. Phys. Lett. 2003. V. 83. P. 5032.
- [11] *Pedraza A.J., Fowlkes J.D., Guan Y.-E.* // Appl. Phys. 2003. A77. P. 277.
- [12] *Patella F., Szkutnik A., Sgarlata E.* // J. Phys. Condens. Matter. 2004. V. 16. S1503.
- [13] *Алексеев А.М., Веревкин Ю.К., Востоков Н.В.* и др. // Письма в ЖЭТФ. 2001. Т. 73. В. 4. С. 214–219.
- [14] *Бредихин В.И., Веревкин Ю.К., Дауме Э.Я.* и др. // Квант. электр. 2000. Т. 30. С. 333.
- [15] *Веревкин Ю.К., Бронников Н.Г., Королихин В.В.* и др. // ЖТФ. 2003. Т. 73. С. 99.
- [16] *Бредихин В.И., Буренина В.Н., Веревкин Ю.К.* и др. // ЖТФ. 2004. Т. 74. С. 86.