

## Формирование субмикронных цилиндрических структур при воздействии на поверхность кремния компрессионным плазменным потоком

В. В. Углов<sup>1)</sup>, В. М. Анищик, В. В. Асташинский, В. М. Асташинский<sup>2)</sup>+, С. И. Ананин<sup>+</sup>, В. В. Аскерко<sup>+</sup>,  
Е. А. Костюкевич<sup>+</sup>, А. М. Кузьмицкий<sup>+</sup>, Н. Т. Квасов\*, А. Л. Данилюк\*

Белорусский государственный университет, 220080 Минск, Беларусь

<sup>+</sup> Институт молекулярной и атомной физики НАН Беларуси, 220072 Минск, Беларусь

\* Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 220013 Минск, Беларусь

Поступила в редакцию 16 июля 2001 г.

Получены субмикронные цилиндрические структуры на поверхности монокристалла кремния при воздействии на него компрессионным плазменным потоком. Внутри модифицированного слоя кремния обнаружена периодическая структура из нормально ориентированных к поверхности каналов, период расположения которых соответствует размещению поверхностных образований.

PACS: 52.40.Hf, 68.35.Bs, 79.20.Rf

**Введение.** В настоящее время ведутся интенсивные исследования по формированию субмикронных и наноразмерных структур различных соединений, использование которых в микроэлектронике открыло бы качественно новый этап ее развития [1–4]. Наибольший интерес представляет формирование подобных структур в кремнии в связи с его широким применением в микроэлектронике. Однако, несмотря на разнообразие использованных методов (химических, лазерных и плазменных), сформировать цилиндрические структуры в кремнии не удавалось [4].

В данной работе представлены результаты исследований структурной модификации поверхности кремния при воздействии на него квазистационарным компрессионным плазменным потоком. Такие потоки получают с помощью квазистационарных плазменных ускорителей типа магнитоплазменный компрессор (МПК) [5]. Преимуществами МПК по сравнению с другими типами ускорителей являются высокая устойчивость генерируемого им компрессионного потока, возможность управления его составом, размерами и параметрами плазмы при достаточной для практических применений длительности разряда [6–9].

**Методика проведения экспериментов.** Компрессионные плазменные потоки получали с помощью газоразрядного МПК компактной геометрии, накопителем энергии которого служила конденсаторная бата-

рея емкостью 1200 мкФ при изменении начального напряжения от 3 до 5 кВ [7]. МПК работал в режиме остаточного газа, при котором предварительно откачанную камеру ускорителя заполняли азотом до заданного давления (100–1300 Па). В указанных условиях на выходе разрядного устройства МПК формируется компрессионный плазменный поток длиной 6–10 см и диаметром в области максимального сжатия 1 см. Сжатие плазменного потока в МПК происходит за счет взаимодействия продольной составляющей разрядного тока, вынесенного из разрядного устройства, с собственным азимутальным магнитным полем. Наличие в плазменном потоке выносного тока обусловлено замороженностью магнитного поля в плазму.

Скорость плазмы компрессионного потока, в зависимости от начальных параметров МПК, составляет  $(4–7) \cdot 10^6$  см/с. Концентрация заряженных частиц в области максимального сжатия достигает  $(5–10) \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup>, а температура – 1–3 эВ [6–8]. Компрессионный поток устойчиво существует примерно 80 мкс, после чего начинает распадаться.

Воздействию компрессионного плазменного потока подвергали образцы монокристаллического кремния с ориентацией (111) площадью  $10 \times 10$  мм<sup>2</sup> и толщиной 280 мкм, которые устанавливали нормально компрессионному потоку на расстояниях 6–16 см от среза разрядного устройства МПК. Набегание компрессионного потока на образец приводит к образованию вблизи поверхности ударно-сжатого плазменного слоя. Отметим, что торможение компрессионно-

<sup>1)</sup> e-mail: uglov@phys.bsu.unibel.by

<sup>2)</sup> e-mail: ast@imaph.bas-net.by

го потока, в плазму которого заморожено магнитное поле, сопровождается образованием замкнутых токовых петель (вихрей) [10,11].

Плотность плазмы в зоне взаимодействия компрессионного потока с образцом меняется от  $10^{18} \text{ см}^{-3}$  (в области максимального сжатия) до  $10^{16} \text{ см}^{-3}$  (в области сильного расхождения компрессионного потока). При этом, как показали проведенные калориметрические исследования, поглощенная образцом энергия уменьшается с 25 до 5 Дж, что в условиях экспериментов соответствует изменению плотности мощности плазменного потока в диапазоне  $(3 - 0.5) \cdot 10^5 \text{ Вт/см}^2$ .

Съемку микрорельефа поверхности и сколов образцов монокристаллического кремния проводили с помощью растровой электронной микроскопии высокого разрешения на микроскопе Hitachi S806.

*Результаты исследований.* Воздействие компрессионного плазменного потока на образец приводит к плавлению кремния и модификации его поверхности на глубину 6 мкм. На микрофотографиях поверхностного слоя (рис.1) хорошо видна периодическая структура, фрагменты которой имеют цилиндрическую форму. Длина этих фрагментов составляет более 50 мкм, диаметр – 0.7–1.0 мкм. Период размещения фрагментов на поверхности образца составляет 1–2 мкм, а плотность –  $(2 - 6) \cdot 10^6 \text{ см}^{-2}$ . Характерно наличие отростков между цилиндрическими фрагментами структуры, что свидетельствует о влиянии внешних силовых факторов на протекание структурно-фазовых превращений.

Внутри модифицированного слоя кремния обнаружены периодические структуры типа каналов, ориентированные нормально к поверхности (рис.2). Длина каналов составляет  $\sim 6-12$  мкм, диаметр – 0.1–0.2 мкм, а период их расположения (1–2 мкм) соответствует размещению цилиндрических поверхностных образований.

Формирование наблюдаемых структур связано, в первую очередь, с энергетическим воздействием компрессионного потока на поверхность, что ведет к быстрому ее разогреву, плавлению поверхностного слоя, развитию термоупругих напряжений, растеканию плазмы по поверхности, обусловленному динамическим давлением компрессионного потока (порядка нескольких атмосфер) и градиентом параметров плазмы в ударно-сжатом слое. Кристаллизация кремния характеризуется быстрым охлаждением и существенным температурным градиентом. Указанные процессы происходят в присутствии магнитных полей, наведенных выносными токами набегающего плазменного потока.

Рис.1. Морфология поверхности кремния после воздействия компрессионного плазменного потока

Рис.2. Структура приповерхностной области кремния

Взаимодействие компрессионного потока с поверхностью образца сопровождается формированием в решетке кремния термоупругих напряжений, в поле градиента которых по известным механизмам имеет место генерация дислокаций. При определенной плотности дислокаций образуются их периодические скопления. Кристаллизующийся расплав,

как известно, наследует структурные несовершенства подложки, выводя их на поверхность. В этой связи движущийся фронт кристаллизации представляет собой застывающую рябь ступенек, которые, в свою очередь, в условиях развивающихся неустойчивостей могут быть зародышами цилиндрических образований.

Возникновение неустойчивостей обусловлено давлением потока плазмы (порядка нескольких атмосфер) на расплав кремния. Давление компрессионного потока ведет к продавливанию более легких слоев на поверхности сквозь более тяжелые слои расплавленного кремния, вследствие чего развивается рэлей-тейлоровская неустойчивость. При наличии давления плазмы в расплавленном слое кремния может также возникнуть конвективная неустойчивость Бенара. В этом случае фактор давления, способствующий конвективному перемешиванию слоев, нагретых до различных температур, ведет к возникновению самоорганизации, которая проявляется в виде структурных образований [12]. Неустойчивость Кельвина-Гельмгольца возникает на границе раздела двух жидкостей или газов различной плотности при их скольжении относительно друг друга. Такой тип неустойчивости характерен при раскатке волн в ветреную погоду [13]. Его возникновение в данном случае связано с растеканием плазмы ударно-сжатого слоя по поверхности кремния. При этом в одном направлении текут два потока с различными скоростями. Так как потоки являются кулоновскими системами, то масштаб волновых возмущений должен уменьшаться. В данном случае характер возмущений, длина волны которых соответствует частоте порядка  $10^{14}$  Гц, соотносится с плазменными колебаниями ионов в поверхностном ионизированном слое.

Кроме того, под действием градиента термоупругих напряжений за время его существования происходит знакопеременный изгиб пластины кремния, в результате чего кристаллизация расплавленного вещества происходит на подложке изменяющейся формы, что в совокупности с эффектами поверхностного натяжения приводит к сложной геометрии поверхности и возникновению образований типа отростков между цилиндрами.

**Заключение.** В результате проведенных исследований сформированы субмикронные цилиндрические структуры на поверхности кремния при воздействии на него компрессионным плазменным потоком. Внутри модифицированного слоя кремния выявлены нормально ориентированные к поверхности каналы, период расположения которых соответствует размещению цилиндрических образований. Структурно-фазовые изменения состояния поверхности кремния могут быть связаны с процессами быстрой кристаллизации расплавленного слоя на фоне развития различного рода неустойчивостей в присутствии наведенного магнитного поля.

1. W. Hang, Y. Bando, K. Kurashima et al., *Appl. Phys. Lett.* **73**, 3085 (1998).
2. T. Laude, A. Marraud, Y. Matsui et al., *Appl. Phys. Lett.* **76**, 3239 (2000).
3. M. Zhang, Y. Bando, and K. Wada, *J. Mater. Res.* **15**, 387 (2000).
4. S. B. Fagan, R. J. Baierle, R. Mota et al., *Phys. Rev.* **B61**, 9994 (2000).
5. A. I. Morozov, *Nuclear Fusion*, Special Suppl. 1969, p. 111.
6. S. I. Ananin, V. M. Astashinskii, G. I. Bakanovich et al., *Sov. J. Plasma Phys.* **16**, 102 (1990).
7. V. M. Astashinskii, V. V. Efremov, E. A. Kostyukevich et al., *Sov. J. Plasma Phys.* **17**, 545 (1991).
8. В. М. Асташинский, Г. И. Баканович, А. М. Кузьмицкий и др., *ИФЖ* **62**, 714 (1992).
9. В. М. Асташинский, А. А. Маньковский, Л. Я. Минько и др., *Физика плазмы* **18**, 90 (1992).
10. С. И. Ананин, *Физика плазмы* **21**, 966 (1995).
11. С. И. Ананин, В. М. Асташинский, Е. А. Костюкевич и др., *Физика плазмы* **24**, 1003 (1998).
12. Г. Хакен, *Синергетика*, М.: Наука, 1985. (H. Haken, *Synergetics*, Berlin, Springer-Verlag, 1978).
13. Ю. А. Степанянц, А. Л. Фабрикант, *Распространение волн в сдвиговых потоках*, М.: Наука, 1996. (Yu. A. Stepanyants and A. L. Fabrikant, *Propagation of Waves in Shear Flows*, Physical and Mathematical Literature Publishing Company, Russian Academy of Sciences, 1996).

## Исследование эволюции границы раздела фаз в пористых средах с использованием динамического рассеяния света

Д. А. Зимняков<sup>1)</sup>, П. В. Захаров, В. А. Трифонов, О. И. Чанилов

Саратовский государственный университет, 410026 Саратов, Россия

Поступила в редакцию 8 мая 2001 г.

После переработки 17 июля 2001 г.

Проведены экспериментальные исследования эволюции границы раздела фаз в процессе испарения жидкой фазы из насыщенного жидкостью слоя пористой среды (бумаги) с использованием спектрального анализа флуктуаций интенсивности лазерного излучения, рассеянного в слое. Полученные данные сопоставлены с результатами моделирования необратимого роста в трехмерных решетках. Зависимости полуширины спектра флуктуаций интенсивности от времени испарения демонстрируют характерные особенности развития фронта испарения, аналогичные установленным в ходе моделирования особенностям развития фронта необратимого роста. В результате сравнения максимальных значений полуширины спектра для двух различных насыщающих жидкостей установлено, что процесс движения локальных границ раздела фаз при испарении жидкости из слоя пористой среды близок к “классической” диффузии.

PACS: 42.25.Dd, 61.43.-j

Исследования процессов переноса в неупорядоченных системах являются одним из интенсивно развивающихся направлений физики конденсированного состояния. Характерным примером подобных процессов может служить массоперенос в пористых средах, происходящий при испарении жидкой фазы или ее распространении в системе пор под действием капиллярных сил. При этом наблюдаются интересные физические явления (в частности, формирование фрактальных границ роста [1, 2]), имеющие универсальный характер и являющиеся объектом теоретических и экспериментальных исследований в последние два десятилетия. Весьма важным аспектом подобных исследований является разработка экспериментальных методов анализа динамики массопереноса в гетерогенных многофазных системах. В данной работе рассмотрена возможность использования метода динамического рассеяния когерентного света для исследования эволюции границы раздела газообразной и жидкой фаз в процессе испарения жидкости из слоя пористой среды. В рассматриваемом случае флуктуации интенсивности рассеянного света в точке наблюдения обусловлены рассеянием зондирующего излучения на движущихся локальных границах раздела фаз в системе пор. Рис.1 иллюстрирует подобную модель многократного рассеяния в зоне испарения; разброс значений скоростей и направлений перемещения локальных границ, представляющих собой ансамбль нестационарных рассеивате-

лей, приводит в результате интерференции парциальных составляющих рассеянного поля, характеризующихся различной кратностью рассеяния, к формированию динамического спекл-поля, ширина спектра флуктуаций интенсивности которого определяется средней подвижностью локальных границ и их объемной плотностью в зоне испарения. Распространение зондирующего излучения в областях 1, 1' и 3, представляющих собой системы стационарных рассеивателей, не приводит к частотной модуляции парциальных составляющих. В то же время доплеровские сдвиги частоты при рассеянии парциальных составляющих на движущихся локальных границах раздела фаз в зонах испарения (2, 2') в результате многократного рассеяния приводят к формированию нестационарного спекл-поля в плоскости наблюдения. В работе [3] установлено, что фронты испарения жидкой фазы в пористых средах представляют собой фрактальные границы роста с локализованными вблизи подобных границ кластерами из заполненных жидкостью пор. Развитие подобных структур в процессе испарения должно оказывать влияние на объемную плотность рассеивающих центров в зоне испарения и приводить к существенным изменениям спектра флуктуаций интенсивности рассеянного света.

На рис.2 приведена схема эксперимента по исследованию спектральных характеристик флуктуаций интенсивности лазерного излучения, рассеянного слоем пористой среды, предварительно насыщенного жидкостью, в процессе испарения жидкости из слоя. Источником излучения являлся одномодо-

<sup>1)</sup>e-mail: zimnyakov@sgu.ssu.runnet.ru