

©1995 г.

НАБЛЮДЕНИЕ АТОМАРНОЙ СТРУКТУРЫ ПАССИВИРОВАННОЙ В ВОДОРОДНОЙ ЭЦР ПЛАЗМЕ ПОВЕРХНОСТИ Si (111) С ПОМОЩЬЮ СКАНИРУЮЩЕГО ТУННЕЛЬНОГО МИКРОСКОПА НА ВОЗДУХЕ

В.Л.Гуртовой, В.В.Дремов, В.А.Макаренко, С.Ю.Шаповал

Институт проблем технологии микроэлектроники
и обособленных материалов Российской академии наук,
142432, Черноголовка, Россия
(Получена 20 января 1995 г. Принята к печати 29 марта 1995 г.)

Представлены результаты наблюдения с помощью сканирующей туннельной микроскопии на воздухе обработанной плазме поверхности Si(111). Показана возможность получения атомного разрешения. Наблюдалась структура поверхности Si(111) – 1×1 в течение нескольких часов без потери атомного разрешения, а также атомно-гладкие террасы и ступеньки с толщиной в один, два и четыре бислоя. Результаты свидетельствуют о высокой чистоте и стойкости к окислению пассивированной с помощью плазменного процесса поверхности кремния.

В современной микроэлектронике кремний остается наиболее широко используемым материалом. В то же время субмикронная технология ставит важную задачу разработки методов исследования структуры и свойств поверхности этого материала с высоким разрешением, чтобы использовать кремний в нанoeлектронике. Сканирующая туннельная микроскопия (СТМ) позволяет изучать поверхность материала с разрешением вплоть до атомного. Однако в случае кремния наличие на поверхности тонкого слоя естественного окисла препятствует получению высокого разрешения при наблюдении с помощью СТМ на воздухе. Поэтому такого рода эксперименты, как правило, проводят в сверхвысоком вакууме на отожженных образцах. Структура им свойства поверхности таких образцов отличается от тех, которые имела бы исходная поверхность. Обычно интерес представляет изучение материала в условиях более приближенных к естественным. Поэтому актуальной является задача подготовки образцов кремния для исследования с помощью СТМ на воздухе. Для решения этой задачи может быть использовано травление пластин в водном растворе HF или NH_4F [1]. При этом естественный слой окисла удаляется, а оборванные связи на поверхности пассивируются водородом. В результате такой обработки скорость окисления кремния сильно уменьшается, что позволяет даже получать атомное разрешение на небольших участках поверхности [2].

Для преодоления описанных выше проблем при СТМ экспериментах на воздухе мы предлагаем проводить обработку кремния в водородной плазме, полученной в условиях электронного циклотронного резонанса (ЭЦР плазма). Достоинством этого метода является его простота в сравнении со сложными многостадийными процессами пассивации в водных растворах HF или NH_4F [1-3], требующих высокой чистоты исходных химических веществ. Кроме того, обработка в ЭЦР плазме характеризуется высокой чистотой и отсутствием радиационного повреждения образцов, обусловленного низкой энергией активных частиц плазмы (менее 10 эВ). При этом происходит стравливание слоя естественного окисла и эффективная пассивация поверхности водородом [4], что дает возможность изучать атомную структуру поверхности без особых затруднений.

В экспериментах использовались пластины кремния *n*-типа, легированного мышьяком с удельным сопротивлением 0.01 Ом·см (КЭМ 0.01) и ориентацией (111), прошедших стандартную предэпитаксиальную обработку более двух лет назад. Пластины загружались в ЭЦР установку [5], которая представляла собой вертикальный цилиндрический реактор из нержавеющей стали, откачиваемый турбомолекулярным насосом. ЭЦР плазменный источник с электромагнитами размещался в верхней части реактора. Через кварцевое окно осуществлялся ввод СВЧ мощности от магнетрона, который соединялся с реактором посредством волновода прямоугольного сечения. В источнике возбуждалась плазма в условиях электронного-циклотронного резонанса на частоте 2.45 ГГц при напряженности магнитного поля 875 Э. Пластины обрабатывались в течение 20 мин. при давлении водорода 10^{-3} Тор и расходе $10 \text{ см}^3/\text{мин}$. Подводимая СВЧ мощность составляла порядка 150 Вт. Нагрев подложек в плазме не превышал 50°C . Образцы в процессе обработки находились под плавающим потенциалом. Плотность ионного тока насыщения в этих условиях равнялась $1 \text{ mA}/\text{cm}^2$.

Для исследований был изготовлен простой СТМ [6] на основе трубчатого пьезосканера и инерционного пьезодвигателя для приближения образца к игле. Благодаря малым ($30 \times 30 \times 80 \text{ мм}^3$) размерам и высокой жесткости микроскоп не требовал сложных систем виброизоляции и обладал малым (менее $0.01 \text{ нм}/\text{с}$) дрейфом. В качестве зондов использовались отрезки платино-иридиевой проволоки диаметром 0.5 мм, обрезанные дважды под углом 30° к оси проволоки (второе обрезание проводилось после поворота проволоки на 90° вокруг оси.)

Сразу после обработки в ЭЦР реакторе образец помещался на платформу инерционного пьезодвигателя. Наши эксперименты показали, что обработка кремниевых пластин в водородной ЭЦР плазме позволяет легко получать СТМ изображения хорошего качества на воздухе при напряжениях на зонде $-(0.5-1) \text{ В}$ относительно образца и туннельном токе $0.2-1 \text{ нА}$. На рис. 1 представлено изображение поверхности кремния с атомным разрешением, полученное в режиме постоянной средней величины туннельного зазора. Хорошо видна поверхностная структура из атомов Si. Измеренное значение постоянной решетки $s \cong 0.4 \text{ нм}$, причем симметрия решетки атомов соответствует $\text{Si}(111) - 1 \times 1$ (поверхность является моногидридной, т.е. каждый атом кремния соединен с одним атомом водорода). В нижнем правом углу рисунка наблюдается область без определенной атомной структуры,

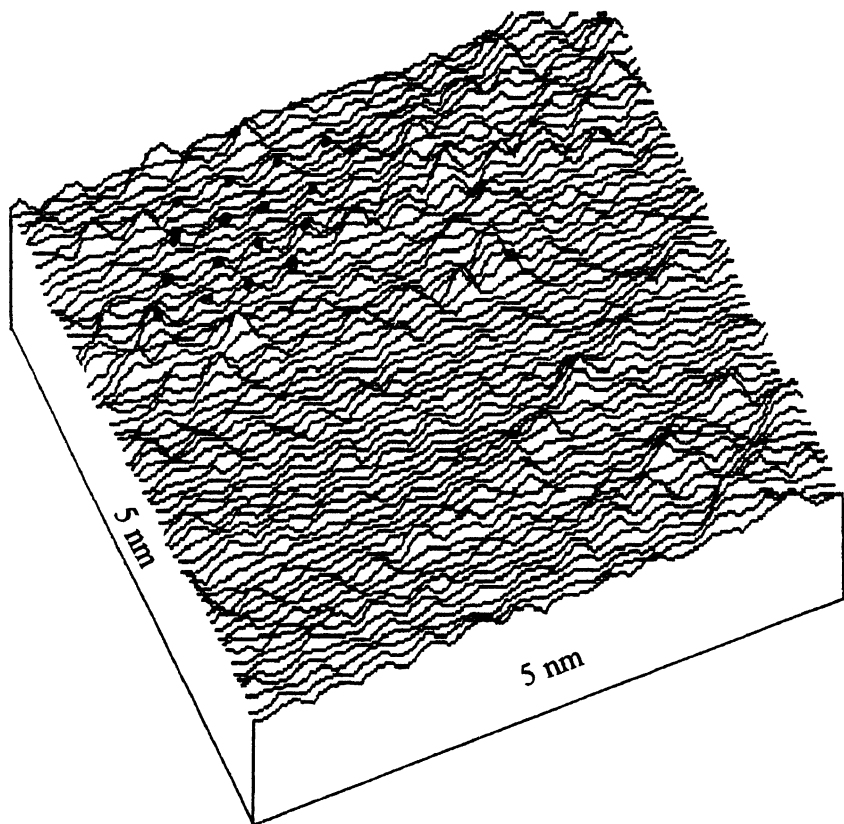


Рис. 1. Атомарная структура (1×1) на поверхности Si(111). Изображение получено при напряжении на зонде -0.8 В в режиме постоянной средней величины туннельного зазора.

что, возможно, указывает на тригидридное ($-\text{SiH}_3$) покрытие поверхности, аналогичное обнаруженному в работе [7]. Следует отметить, что на поверхности преобладала структура Si(111) $- 1 \times 1$. На рис. 2 показан участок поверхности достаточно большой площади, полученный в режиме постоянного туннельного тока. На изображении видны ступеньки, отмеченные буквами *A*, *B*, *C*, *D* и атомно-гладкие террасы, с одной из которых было получено изображение на рис. 1. Высота ступеньки *A* составляет около 0.32 нм, высота ступенек *B* и *C* была около 0.64 нм, а ступеньки *D* — 1.3 нм. Это соответствует одной, двум и четырем бислойным ступенькам. Наличие террас и ступенек обусловлено разориентацией пластины относительно плоскости (111).

Следует отметить, что мы наблюдали изображения, подобные представленным выше, в течение нескольких часов без заметного ухудшения их качества. Атомное разрешение получалось практически в любой точке образца в отличие от работы [2], где атомное разрешение на воздухе удавалось наблюдать только на 1% исследуемой поверхности. В отличие от работы [8] мы не обнаружили изменения СТМ изображений при многократном сканировании в процессе на-

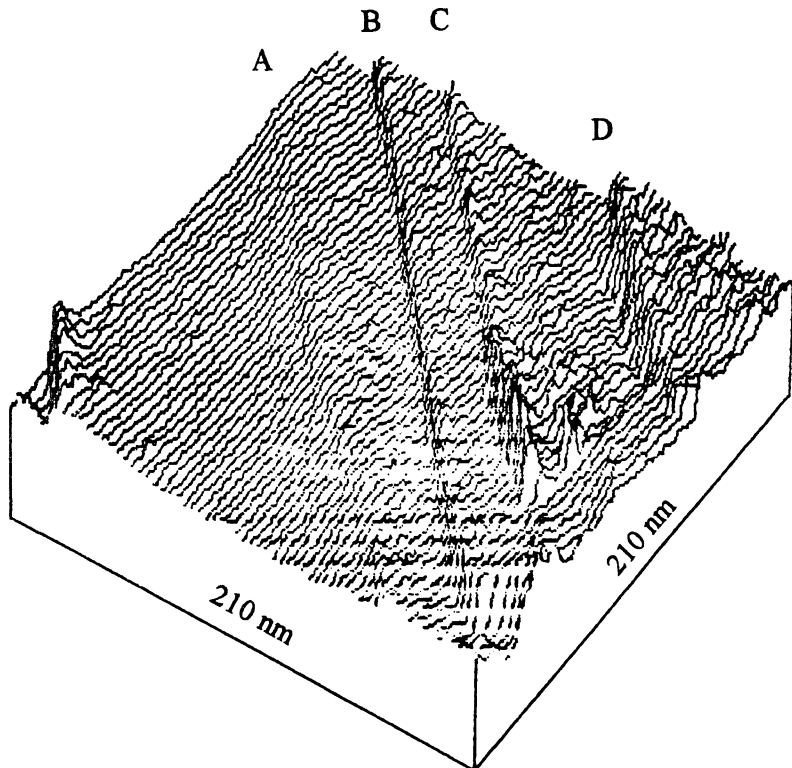


Рис. 2. Ступеньки на поверхности Si(111). Изображение получено в режиме постоянного туннельного тока 0.2 нА при напряжении на зонде -0.8 В.

блюдения одного и того же участка [8], что свидетельствует о высокой чистоте и стойкости к окислению пассивированной в водородной ЭПР плазме поверхности Si(111). Так же следует обратить внимание на атомную гладкость террас. Подобную поверхность получают при пассивации в NH_4F , обработка в HF , как правило, приводит к микрошероховатостям [9]. Несомненно, что обработка в водородной ЭПР плазме кремния с получением атомно-гладких поверхностей не ограничивается использованием при СТМ визуализациях, а имеет также большое значение для приборных применений в микро- и наноэлектронике, где атомная гладкость поверхности Si может быть решающим фактором высокого качества структур, например, при формировании подзатворного диэлектрика субмикронных приборных структур металл-окисел-полупроводник или в качестве подложек для металлических наноструктур.

Таким образом, в работе предлагается эффективный способ подготовки Si для изучения в течение длительного времени реальной структуры поверхности методом СТМ на воздухе. С помощью СТМ показано, что обработка кремния в водородной ЭПР плазме не приводит к образованию микрошероховатости. Отсутствие микрошероховатости и стойкость к окислению позволили впервые получить атомное разрешение на больших площадях пластин кремния.

Список литературы

- [1] G.S. Higashi, R.S. Becker, Y.J. Chabal, A.J. Becker. Appl. Phys. Lett., **58**, 1656 (1991).
- [2] Y. Nakagawa, A. Ishitani, T. Takahagi, H. Kuroda, H. Tokumoto, M. Ono, K. Kajimura. J. Vac. Sci. Technol., **A8**, 262 (1990).
- [3] U. Neuwald, H.E. Hessel, A. Feltz, U. Memmert, R.J. Behm. Appl. Phys. Lett., **60**, 1307 (1992).
- [4] M. Ishi, K. Nakashima, I. Tajima, M. Yamamoto. Appl. Phys. Lett., **58**, 1378 (1991).
- [5] S. Shapoval, O. Popov, A. Westner, M. Yoder. J. Vac. Sci. Technol., **A9**, 3071 (1991).
- [6] В.В. Дремов, В.А. Макаренко, М.Г. Элиашберг. Тез. докл. VIII симп. по растровой электронной микроскопии и аналитическим методам исследования твердых тел. (Черноголовка, 1993) с. 162.
- [7] Y. Morita, K. Miki, H. Tokumoto. Appl. Phys. Lett., **59**, 1347 (1991).
- [8] Л.Н. Болотов, В.А. Козлов, И.В. Макаренко, А.Н. Титков. ФТП, **27**, 1375 (1993).
- [9] Y.J. Chabal, G.S. Higashi, K. Raghavachari, V.A. Burrows. J. Vac. Sci. Technol., **A7**, 2104 (1989).

Редактор В.В. Чалдышев

Atomic structure observation of ECR hydrogen plasma passivated Si(111) surface by scanning tunneling microscope in air

V.L. Gurtovoi, V.V. Dremov, V.A. Makarenko, S.Yu. Shapoval

Institute of Microelectronics Technology, Russian Academy of Sciences, 142432 Chernogolovka, Russia

Scanning tunneling microscopy in air has been used to investigate Si(111) surface passivated in hydrogen electron-cyclotron resonance (ECR) plasma. An atomic resolution of Si(111)-1×1 structure has been attained for several hours without the resolution degradation. Atomically flat terraces with one, two and four bilayer steps have been observed. Our results witness the cleanness and high stability to oxidation of the hydrogen ECR plasma treated Si surface. This allows to have an atomic resolution image of large areas on Si surfaces in air.