

Получение nanoостровков Ge ультрамалых размеров с высокой плотностью на атомарно-чистой поверхности окиси Si

© А.И. Никифоров, В.В. Ульянов, О.П. Пчеляков, С.А. Тийс, А.К. Гутаковский

Институт физики полупроводников Сибирского отделения Российской академии наук,
630090 Новосибирск, Россия

E-mail: nikif@isp.nsc.ru

Приведены экспериментальные результаты исследований начальных стадий роста пленки германия на атомарно-чистой окисленной поверхности кремния. Показано, что в данной системе рост пленки германия происходит в соответствии с механизмом Фольмера–Вебера. На окисленной поверхности кремния образуются упругонапряженные островки с латеральным размером менее 10 nm и плотностью $2 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$. При толщинах пленки более 5 монослоев наряду с ними образуются островки германия с латеральными размерами до 200 nm и плотностью $1.5 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-2}$, которые полностью срелаксированы.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 03-02-16468 и 03-02-16506) и INTAS (грант N 03-51-5051).

Интенсивные исследования явления самоорганизации островков нанометровых размеров в последние годы переходят от стадии изучения самого процесса к вопросам, связанным с практическим использованием этого явления. Наличие на поверхности Si(100) бездислокационных островков германия размером 10–100 nm, которые появляются после образования сплошной пленки Ge, обуславливает интерес к этой системе [1]. Размеры таких островков удалось уменьшить до значений, обеспечивающих проявление эффектов размерного квантования вплоть до комнатной температуры [2]. Область применения кремниевых структур с квантовыми точками германия в оптоэлектронике достаточно широка: от ИК-области [3] до длин волн, используемых в волоконно-оптической связи [4]. В работе [4] для уменьшения размеров островков германия и увеличения их плотности выращивание проводилось на предварительно окисленной поверхности кремния.

Размеры островков уменьшаются при снижении температуры осаждения германия. Минимальные размеры островков германия, получаемые при росте на чистой поверхности кремния, составляют 15 nm. С целью уменьшения размеров и увеличения плотности выращивание германия осуществляется на атомарно-чистой окисленной поверхности, которая подготавливается непосредственно в установке полекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ). Возможность создания окисного слоя на поверхности кремния в условиях сверхвысокого вакуума известна достаточно давно. Впервые в работе [5] было показано, что в зависимости от давления кислорода и температуры можно подобрать режимы травления и роста окисной пленки. Дальнейшее развитие эта методика получила совсем недавно, когда формирование сверхтонкого окисла было сопряжено с дальнейшим ростом эпитаксиального слоя кремния [6]. Рост островков германия на предварительно окисленной поверхности кремния позволяет существенно уменьшить размеры и увеличить плотность островков. В работах [7,8] было показано, что в случае роста островков на окисленной

поверхности Si(111) их латеральные размеры составляют менее 10 nm, а плотностью выше 10^{12} cm^{-2} . Условия окисления не только оказывают существенное влияние на процесс образования островковой германия, но и являются критическими для их дальнейшего зарастивания слоем кремния. Наличие достаточно толстого слоя окисла не позволяет получить приемлемый по дефектности эпитаксиальный слой Si. В связи с этим требуется тщательный контроль условий окисления. В установке МЛЭ наиболее удобным методом контроля является дифракция быстрых электронов (ДБЭ), которая позволяет последовательно контролировать как окисление [9], так и последующий рост слоев германия и кремния.

1. Эксперимент

Синтез проводился в установке МЛЭ „Катунь-С“. Испарение кремния осуществлялось из электронно-лучевого испарителя (ЭЛИ), поток германия формировался либо ЭЛИ, либо эффузионной ячейкой с тиглем из нитрида бора, легирующие примеси (Sb и В) испарялись из эффузионных ячеек. Аналитическая часть камеры состоит из квадрупольного масс-спектрометра, кварцевого измерителя толщины и дифрактометра быстрых электронов с энергией 20 kV. В процессе роста дифракционная картина регистрировалась ССД-камерой, изображение вводилось в персональный компьютер. Программное обеспечение позволяло наблюдать и регистрировать дифракционную картину со скоростью 10 кадров в секунду. Скорость роста Ge составляла 10 ML/min, температура подложки варьировалась от комнатной до 700°C. В качестве подложек использовались пластины кремния (100) с разориентацией менее 0.5°. Окисление проводилось в установке МЛЭ при напуске кислорода в камеру до 10^{-4} Pa и температуре подложки 400–600°C. После откачки кислорода на окисленную поверхность наносился германий.

2. Результаты и их обсуждение

В процессе окисления регистрировалось изменение интенсивности различных рефлексов картины ДБЭ. Наиболее информативным оказалось изменение интенсивности зеркального рефлекса. На рис. 1 показано изменение интенсивности зеркального и сверхструктурного (2×1) рефлексов во время окисления поверхности Si(100) при температуре подложки 400°C и напуске кислорода в

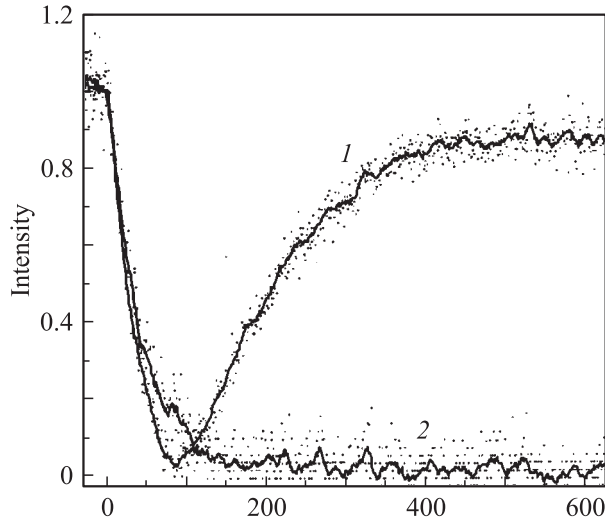


Рис. 1. Относительное изменение интенсивности зеркального (1) и сверхструктурного (2) рефлексов в процессе окисления Si(100) при температуре 400°C и давлении кислорода $2 \cdot 10^{-5}$ Па.

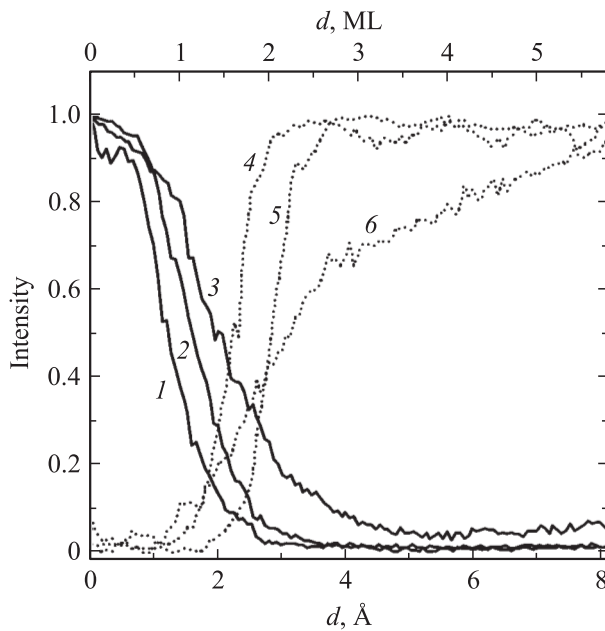


Рис. 2. Относительное изменение интенсивности зеркального (1–3) и 3D-рефлексов (4–6) в процессе роста пленки Ge при различных температурах подложки на окисленной поверхности Si(100). T_s , $^\circ\text{C}$: 1, 4 — 550 , 2, 5 — 500 , 3, 6 — 450 .

камеру до давления $2 \cdot 10^{-5}$ Па. Минимум интенсивности зеркального рефлекса соответствует максимальной шероховатости поверхности, т.е. покрытию поверхности окислом толщиной 0.5 ML. В дальнейшем его интенсивность повышается и стремится к стационарному значению. Образование второго и последующих слоев окисла не приводит к изменению интенсивности зеркального рефлекса, так как морфология поверхности не меняется. Сверхструктурный рефлекс практически погасает при покрытии 0.5 ML и больше не изменяется.

Процесс роста пленки Ge контролировался по картине ДБЭ путем регистрации как качественных изменений структуры и морфологии растущей поверхности пленки, так и количественной информации об упругой деформации элементарной поверхностной ячейки [10]. Для анализа начальной стадии роста пленки германия на окисленной поверхности кремния проводилась регистрация изменения интенсивностей зеркального рефлекса и рефлекса трехмерной дифракции (3D-рефлекс). Эти величины очень чувствительны к изменению шероховатости поверхности, а возникновение 3D-рефлекса указывает на наличие трехмерных объектов на исследуемой поверхности. На рис. 2 показано характерное изменение интенсивностей рефлексов в процессе роста пленки Ge на окисленной поверхности Si(100). Интенсивности этих рефлексов изменяются уже после напыления одного монослоя, и осцилляция интенсивности зеркального рефлекса не наблюдается. Это свидетельствует об отсутствии такой стадии роста, как образование смачивающего слоя. Во время напыления первого монослоя на поверхности SiO₂ образуется адсорбционный слой германия, который со второго монослоя трансформируется в трехмерные островки. Таким образом, в отличие от механизма роста Странского–Крастанова, который реализуется на чистой поверхности кремния, на поверхности окисленного кремния рост пленки германия происходит по механизму Фольмера–Вебера.

В зависимости от толщины напыленного германия островки имеют различные размеры и плотность. На рис. 3 представлено СТМ-изображение *ex situ* массива островков Ge на поверхности окиси кремния, полученного после напыления 0.3 и 0.7 nm германия при температуре подложки 650°C . При толщине пленки до 5 ML формируются островки с основанием менее 10 nm и плотностью более $1 \cdot 10^{12}$ см⁻². Увеличение эффективной толщины осажденного германия приводит к образованию наряду с островками малого размера островков с большими размерами и существенно меньшей плотностью. Их латеральный размер достигает 200 nm, а плотность составляет $1.5 \cdot 10^9$ см⁻². Принимая во внимание изменение величины поверхностной элементарной ячейки, установленной в работе [11], можно заключить, что островки германия большого размера срелаксированы и имеют параметр решетки, равный параметру объемного Ge. Об этом свидетельствует и

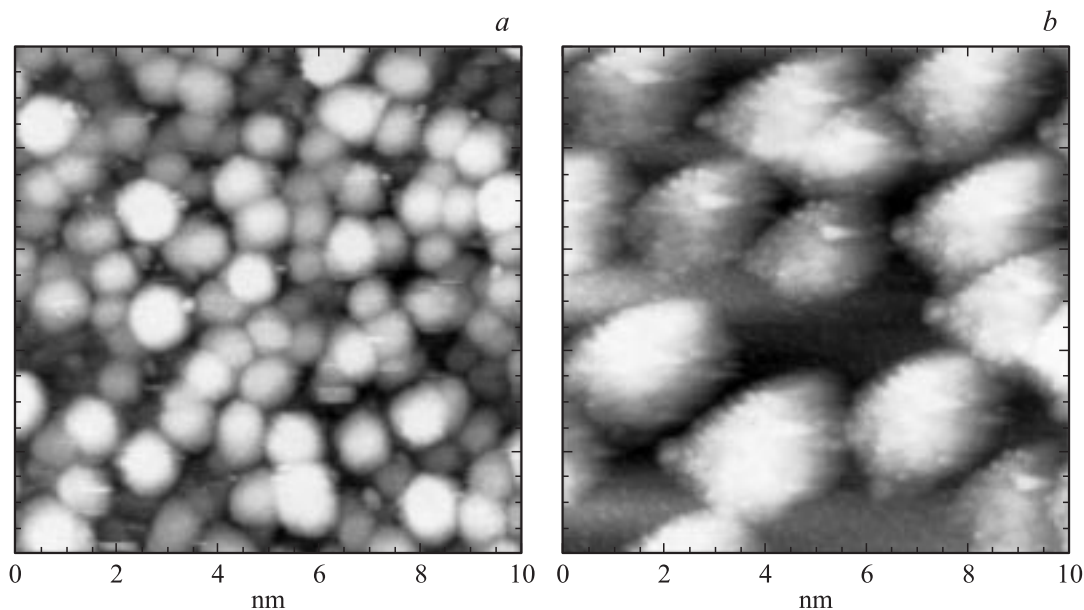


Рис. 3. СТМ-изображение массива островков Ge на поверхности окиси кремния. $d_{\text{Ge}} = 0.3$ (a) и 0.7 nm (b).

наличие полос Муара на электронно-микроскопическом изображении.

Необходимо отметить, что форма островков близка к сферической без ярко выраженной огранки. Подобная форма наблюдалась в работе [7], в которой проводился СТМ-анализ *in situ* островков германия на поверхности Si(111). По-видимому, форма островков зависит в основном от наличия слоя окисла, а не от ориентации подложки и толщины окисла. Островки малого размера незначительно меняют свои размеры и плотность при толщине покрытия, соответствующей появлению больших островков, сосуществующих с ними (рис. 3, b). Таким образом, на окисленной поверхности Si(100) при толщине пленки германия более 1 nm наблюдается бимодальное распределение островков по размерам и плотности. Это подтверждается также и электронно-микроскопическими исследованиями.

Таким образом, в настоящей работе показано, что в отличие от механизма Странского–Крастанова, реализуемого в системе Ge/Si(100), рост пленки германия на окисленной поверхности кремния происходит по механизму Фольмера–Вебера. Это проявляется в отсутствии смачивающего слоя перед образованием трехмерных островков. При толщинах германия менее 5 ML островки имеют латеральный размер менее 10 nm и плотность $2 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$. При больших толщинах наряду с ними образуются островки германия с латеральными размерами до 200 nm и плотностью $1.5 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-2}$, которые полностью срелаксированы.

Список литературы

- [1] D.J. Eaglesham, M. Cerullo. Phys. Rev. Lett. **64**, 1943 (1990).
- [2] A.I. Yakimov, A.V. Dvurechenskii, A.I. Nikiforov, O.P. Pchelyakov. Thin Solid Films **336**, 332 (1998).
- [3] A.I. Yakimov, A.V. Dvurechenskii, A.I. Nikiforov, Yu.Yu. Proskuryakov. J. Appl. Phys. **89**, 5676 (2001).
- [4] А.И. Якимов, А.В. Двуреченский, А.И. Никифоров, С.В. Чайковский, С.А. Тийс. ФТП **37**, 1383 (2003).
- [5] J.J. Lander, J. Morrison. J. Appl. Phys. **33**, 2098 (1962).
- [6] Y. Wei, M. Wallace, A.C. Seabaugh. J. Appl. Phys. **81**, 6415 (1997).
- [7] A.A. Shklyaeв, M. Shibata, M. Ichikawa. Phys. Rev. B **62**, 43, 1540 (2000).
- [8] A. Barski, M. Derivaz, J.L. Rouviere, D. Buttard. Appl. Phys. Lett. **77**, 3541 (2000).
- [9] H. Watanabe, T. Baba. Appl. Phys. Lett. **74**, 3284 (1999).
- [10] A.I. Nikiforov, V.A. Cherepanov, O.P. Pchelyakov, A.V. Dvurechenskii, A.I. Yakimov. Thin Solid Films **380**, 158 (2000).
- [11] А.И. Никифоров, В.В. Ульянов, О.П. Пчеляков, С.А. Тийс, А.К. Гутаковский. ФТТ **46**, 80 (2004).