

Рост и структура наностроек Ge 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 данные о процессе формирования самоорганизованных островков Ge на атомарно-чистой окисленной поверхности Si(100). В отличие от механизма роста Странского–Крастанова, который реализуется в случае роста Ge на чистой поверхности кремния, на окисленной поверхности кремния наблюдается механизм роста Фольмера–Вебера. Процесс роста сопровождается существенным изменением размера поверхностной ячейки решетки Ge относительно этого параметра для Si, достигающего 7%. Получаемые наностройки при толщине пленки Ge до 5 монослоев имеют размеры в основании менее 10 nm с плотностью более $2 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 03-02-16468 и 03-02-16506).

Интерес к исследованиям явления самоорганизации островков нанометровых размеров проявляется в нескольких областях физики твердого тела. С точки зрения физики поверхности и конденсированных сред актуальным является исследование механизмов роста наноструктур и атомных процессов, протекающих при этом на поверхности. С другой стороны, в области физики полупроводников также проявляется заинтересованность к подобным объектам из-за возможности их использования в качестве квантово-размерных наноструктур. Одним из таких объектов является гетеросистема Ge на Si, в которой наностройки Ge выступают в качестве квантовых точек. На поверхности Si(100) были обнаружены бездислокационные островки германия размером 10–100 nm, которые появляются после образования сплошной пленки Ge [1]. Размеры таких островков удалось уменьшить до значений, обеспечивающих проявление эффектов размерного квантования вплоть до комнатной температуры [2].

Минимальные размеры островков германия, получаемые при росте на чистой поверхности кремния, составляют 15 nm. Для их уменьшения и увеличения плотности можно проводить рост германия на атомарно-чистой окисленной поверхности, которая подготавливается непосредственно в установке МЛЭ. Возможность создания окисного слоя на поверхности кремния в условиях сверхвысокого вакуума известно достаточно давно. Впервые в [3] было продемонстрировано, 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 [4]. Рост островков германия на предварительно окисленной поверхности кремния позволяет существенно уменьшить размеры и увеличить плотность островков. В работах [5,6] было показано, что в случае роста островков на окисленной поверхности Si(111) их

латеральные размеры составляют менее 10 nm, а плотность выше 10^{12} cm^{-2} . Авторы работы [5] предположили, что при этом происходит локальное раскисление окиси кремния германием (реакция диспропорционирования), сопровождающееся десорбцией монооксида германия. В этих местах зарождаются наностройки германия, когерентно сопряженные с кремнием. Однако данных о деформации островков и ее релаксации в гетеросистеме германий–окись кремния практически нет.

Цель настоящей работы — определение механизма роста островковой пленки Ge на атомарно-чистой окисленной поверхности Si и создание массива наностроек Ge с ультрамалыми размерами и высокой плотностью.

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) испаряются из эффузионных ячеек. Аналитическая часть камеры состоит из квадрупольного масс-спектрометра, кварцевого измерителя толщины и дифрактометра быстрых электронов (ДБЭ) с энергией 20 kV. В процессе роста дифракционная картина регистрируется CCD-камерой, и изображение вводится в персональный компьютер. Программное обеспечение позволяет наблюдать и регистрировать дифракционную картину со скоростью 10 кадров в секунду. Скорость роста Ge составляла 10 монослоев (МС) в минуту, температура 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 400–500°C. Затем на окисленную поверхность наносился германий.

2. Результаты и их обсуждение

С целью уменьшения размеров островков Ge и увеличения их плотности рост островков проводился на предварительно окисленной поверхности кремния. Окисление осуществлялось в установке МЛЭ при напуске кислорода до давления 10^{-4} Па и температуре подложки $400\text{--}500^\circ\text{C}$. После откачки кислорода проводилось напыление германия. 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 [7]. Для анализа начальной стадии роста пленки германия на окисленной поверхности кремния проводилась регистрация изменения интенсивности 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. Наличие осцилляций интенсивности зеркального рефлекса в случае роста на чистой поверхности, его погасание и появление 3D-рефлекса при толщинах пленки германия более четырех указывает на послойный рост смачивающего слоя с последующим образованием трехмерных островков. В случае же роста пленки Ge на окисленной поверхности интенсивность этих рефлексов изменяется уже после напыления одного МС, и осцилляций интенсивности зеркального рефлекса не наблюдается. Это свидетельствует об отсутствии такой стадии роста, как образование смачивающего слоя. Во время напыления первого монослоя на поверхности SiO_2 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 протекает по механизму Фольмера–Вебера.

Для анализа деформаций решетки германия измерялось изменение параметра элементарной поверхностной двумерной ячейки a_{\parallel} . Для этого регистрировалось изменение расстояния между рефлексами дифракционной картины, которое соответствует параметру a_{\parallel} . На рис. 1 показано изменение a_{\parallel} в процессе роста пленки Ge относительно значения, соответствующего поверхности кремния. Из представленной зависимости видно, что рост сопровождается существенным изменением поверхностной ячейки решетки Ge относительно этого параметра для Si, остающегося постоянным. Это изменение достигает 7%, как это наблюдалось и в случае роста на чистой поверхности Si(100) [7]. Вначале происходит рост упруго напряженных островков, затем значение a_{\parallel} уменьшается до величины объемного германия, что свидетельствует о полной пластической релаксации островков. Характер изменения параметра a_{\parallel} аналогичен тому, что наблюдается в процессе гетероэпитаксии германия на чистой поверхности Si(100), но область существо-

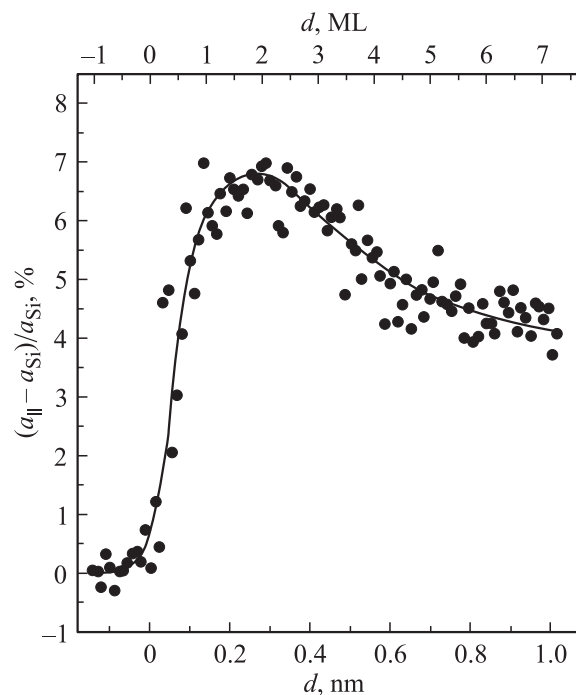


Рис. 1. Изменение параметра элементарной поверхностной двумерной ячейки a_{\parallel} в процессе роста пленки Ge на окисленной поверхности Si(100).

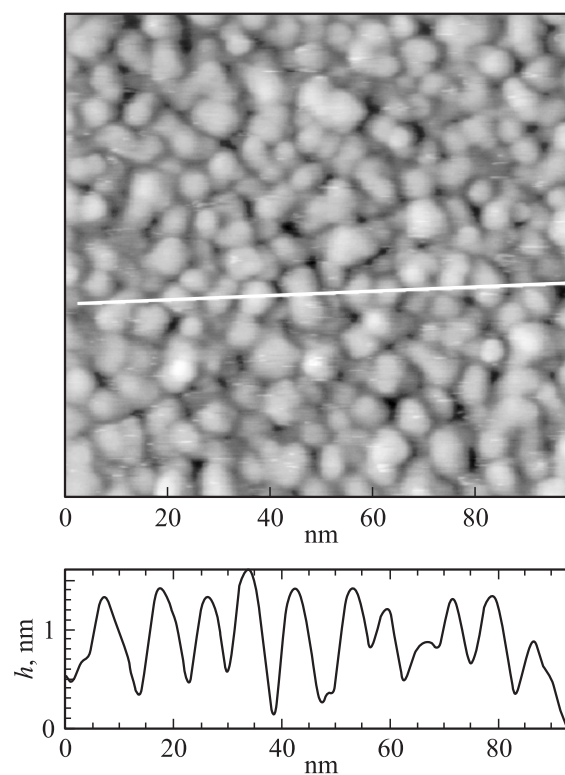


Рис. 2. СТМ изображение массива островков Ge на поверхности окиси кремния и профиль изменения морфологии вдоль светлой линии $d_{\text{Ge}} = 3 \text{ МС}$, $T_s = 650^\circ\text{C}$.

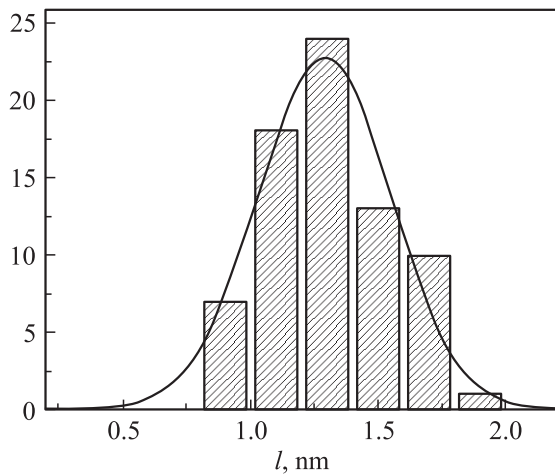


Рис. 3. Распределение островков Ge ($d_{\text{Ge}} = 3 \text{ МС}$, $T_s = 650^\circ\text{С}$) по основанию.

вания напряженных островков Ge значительно меньше и появившиеся трехмерные островки уже после напыления одного монослоя германия имеют максимальное значение параметра двумерной поверхностной ячейки. Это свидетельствует о наличии максимальной упругой деформации уже у зародышей трехмерных островков.

В зависимости от толщины напыленного германия островки имеют различные размеры и плотность. При толщине пленки до пяти МС размеры островков в основании были менее 10 nm с плотностью более $2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$. На рис. 2 показано СТМ изображение массива островков Ge на поверхности окиси кремния, полученного после напыления трех МС германия при температуре подложки 650°С . Распределение островков Ge ($d_{\text{Ge}} = 3 \text{ МС}$, $T_s = 650^\circ\text{С}$) по основанию приведено на рис. 3. Увеличение эффективной толщины осажденного германия приводит к образованию наряду с островками малого размера островков с размерами на порядок больше и существенно меньшей плотностью. Таким образом, на окисленной поверхности Si(100) при толщине пленки германия более 1 nm наблюдается бимодальное распределение островков по их размерам и плотности. Это подтверждается также и электронно-микроскопическими исследованиями.

Список литературы

- [1] D.J. Eaglesham, M. Cerullo. Phys. Rev. Lett. **64**, 1943 (1990).
- [2] A.I. Yakimov, A.V. Dvurechenskii, Yu.Yu. Proskuryakov, A.I. Nikiforov, O.P. Pchelyakov. Thin Solid Films **336**, 332 (1998).
- [3] J.J. Lander, L. Morrison. J. Appl. Phys. **33**, 2098 (1962).
- [4] Y. Wei, M. Wallace, A.C. Seabaugh. J. Appl. Phys. **81**, 6415 (1997).
- [5] A.A. Shklyaev, M. Shibata, M. Ichikawa. Phys. Rev. B **62**, 1540 (2000).
- [6] A. Barski, M. Derivaz, J.L. Rouviere, D. Buttard. Appl. Phys. Lett. **77**, 3541 (2000).
- [7] A.I. Nikiforov, V.A. Cherepanov, O.P. Pchelyakov, A.V. Dvurechenskii, A.I. Yakimov. Thin Solid Films **380**, 158 (2000).