

Структурирование субмонослойных углеродных покрытий, осажженных в СВЧ плазме низкого давления на монокристаллическом кремнии

© В.Я. Шаныгин, Р.К. Яфаров[¶]

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук (Саратовский филиал), 410019 Саратов, Россия

(Получена 12 апреля 2011 г. Принята к печати 18 апреля 2011 г.)

Изучены особенности поверхностного структурирования субмонослойных углеродных покрытий, осажженных в высокоионизированной сверхвысокочастотной плазме низкого давления на пластины кремния с кристаллографическими ориентациями (111) и (100). Установлено, что размер, форма и поверхностная плотность наноструктурных углеродных образований определяются атомной микроструктурой свободной поверхности кремния заданных кристаллографических ориентаций и ее модификацией в зависимости от условий осаждения и отжига. Показана принципиальная возможность получения интегральных столбчатых наноструктур с поверхностной плотностью до $(4-5) \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$ и высотой свыше 400 нм в результате высокоанизотропного травления с использованием полученных углеродных островковых нанобразований в качестве масочного покрытия на монокристаллическом кремнии ориентации (100).

1. Введение

Актуальной задачей современного полупроводникового материаловедения является разработка новых методов создания квантово-размерных систем, примером которых могут служить самоорганизующиеся структуры при создании квантовых проволок, латеральных поверхностных сверхрешеток, квантовых точек и нанопористых материалов. К сожалению, достигнутый на сегодня уровень поверхностной плотности самоорганизованных квантовых объектов составляет всего $10^9-10^{10} \text{ см}^{-2}$; их максимальная объемная плотность также очень мала ($10^{15}-10^{16} \text{ см}^{-3}$), что не обеспечивает необходимого уровня эффективности приборов, изготовленных на их основе.

Одним из основных управляющих факторов, способствующих упорядочению трехмерных (3D) островков как по размерам, так и по их пространственному распределению, является наноморфология поверхности, на которой эти островки формируются [1]. Управление обеспечивается применением литографии: созданием окон на подложке, ограничивающих область сбора адатомов в островок и отделяющих островки друг от друга. Однако существующие литографические методы высокого разрешения обладают недостатками, которые ограничивают область их использования в экспериментах.

Это низкая производительность и высокая стоимость, что, кроме всего прочего, делает их недоступными для широкого круга исследователей. Поэтому все большее внимание исследователей привлекают процессы самоорганизации и самоупорядочения различных низкоразмерных структур, которые не только открывают широкие возможности создания наносистем на поверхности и в объеме кристалла без применения традиционных высокоразрешающих литографических методов, но и вносят новое понимание в структурные процессы на

поверхности кристаллов. Особенно перспективным это представляется для самоорганизации углеродных материалов на монокристаллическом кремнии, так как при этом реализуется наиболее сильное и, по-видимому, наиболее компактное и результативное взаимодействие между атомами углеродного адсорбата и поверхности кремния.

В связи с этим целью работы являлось исследование процессов самоорганизации и наноструктурирования углеродных образований на пластинах кремния различных кристаллографических ориентаций, а также определение возможности их использования в качестве безлитографических масочных покрытий для получения интегральных пространственно упорядоченных наноструктур.

2. Экспериментальная установка и методики исследований

Осаждение углеродных покрытий осуществлялось в вакуумной установке с использованием сверхвысокочастотного (СВЧ) ионно-плазменного плазмотрона на частоте 2.45 ГГц [2]. В качестве рабочего вещества использовали пары этанола. Мощность СВЧ излучения и индукция магнитного поля составляли соответственно 250 Вт и 875 Гс. Давление рабочего газа в процессе осаждения углеродных пленок было равным 0.05 Па и обеспечивало выполнение в газовом разряде электронного циклотронного резонанса, при котором степень ионизации плазмы составляла около 5%. Исследование этих пленок с помощью комбинационного рассеяния света показало присутствие в их структуре наноалмазграфитовой фазы. Осажденные пленки имели толщины от 1.2 нм, что составляет примерно 3 монослоя (МС) графитовой фазы, до 3.4 нм, что эквивалентно примерно 10 МС. Температуры осаждения монослоев углерода варьировались в диапазоне от $T_{\text{dep}} = 100^\circ$ до 300°C с

[¶] E-mail: pirpc@renet.ru

интервалом 100°C . Потенциал смещения на подложкодержателе в процессе осаждения составлял -300 В . После нанесения углеродных слоев кремниевые пластины подвергались вакуумному термическому отжигу в течение 1 ч при температурах $T_{\text{ann}} = 700^{\circ}\text{C}$ и $T_{\text{ann}} = 900^{\circ}\text{C}$. В экспериментах использовались пластины монокристаллического кремния марок КДБ-10 ориентации (111) и КЭС-0.01 ориентации (100).

Для количественной оценки и сравнения наноморфологических характеристик исследуемых поверхностей использовалась величина их шероховатости, которая изучалась с использованием сканирующего атомно-силового микроскопа (АСМ) NT MDT-P4. Обработка результатов измерений, полученных с помощью NT MDT-4P, производилась с использованием программного обеспечения этого микроскопа. Размер и форма структурных образований на поверхности пластин кремния изучались с использованием сканирующего электронного микроскопа „МИРА II“.

3. Результаты экспериментов

На рис. 1 приведены зависимости шероховатостей углеродных пленок толщиной 3 нм от температуры

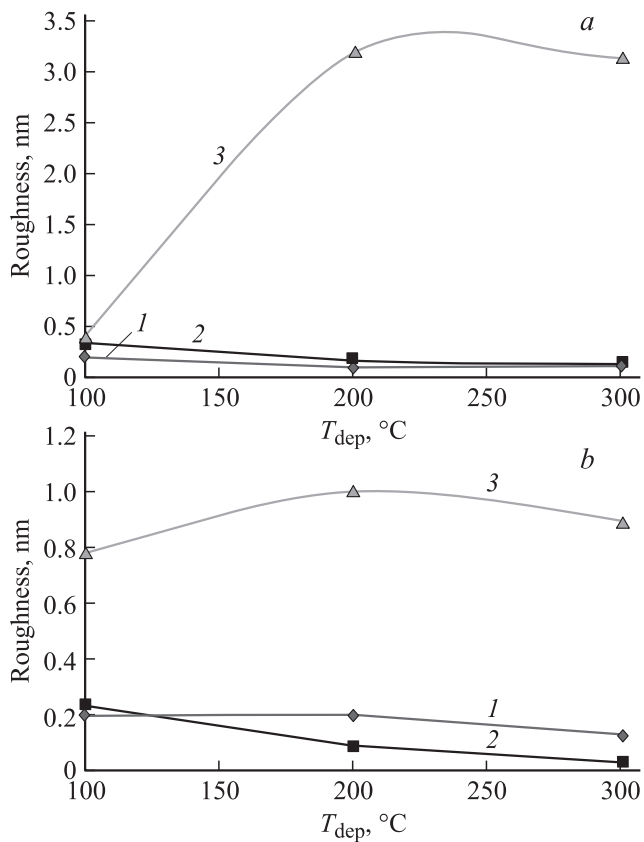


Рис. 1. Зависимости шероховатостей углеродных покрытий толщиной 3 нм от температуры осаждения в СВЧ плазме этанола низкого давления на пластины Si до (1) и после термического отжига при температуре $T_{\text{ann}} = 700^{\circ}\text{C}$ (2) и 900°C (3). Ориентация пластин Si: *a* — (100), *b* — (111).

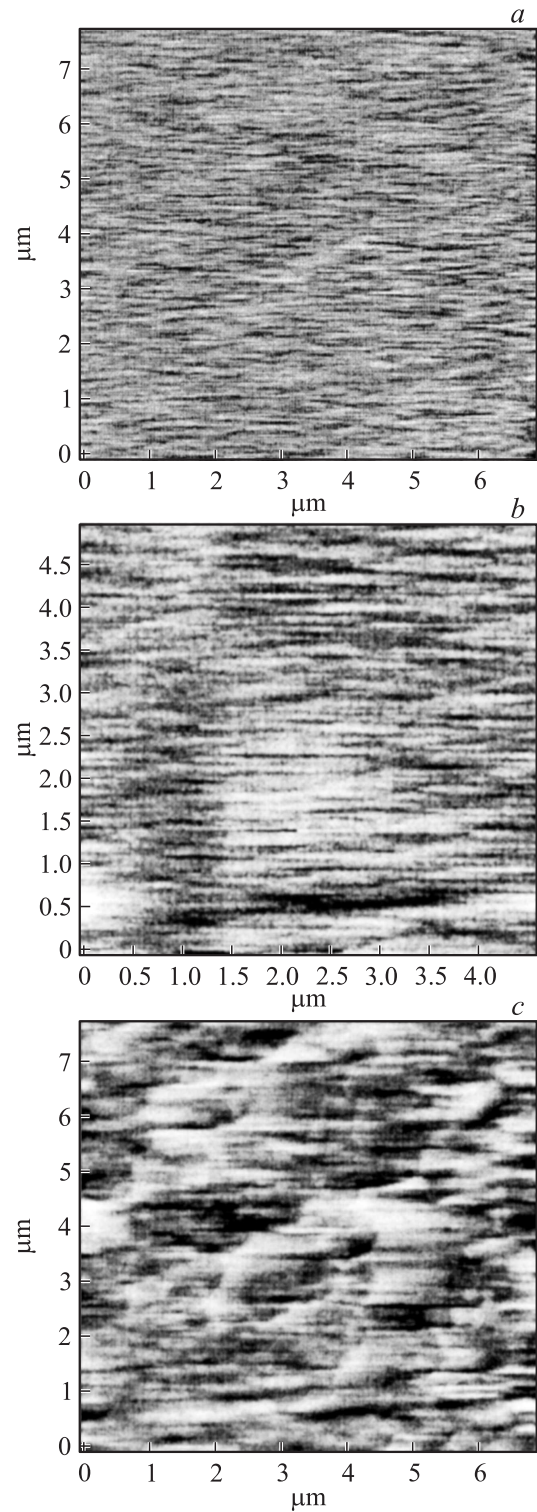


Рис. 2. АСМ изображения наноморфологии углеродного покрытия в 3 нм на Si(100), осажденного при температуре $T_{\text{dep}} = 200^{\circ}\text{C}$: *a* — до отжига; *b* — после отжига при $T_{\text{ann}} = 700^{\circ}\text{C}$; *c* — после отжига при 900°C .

осаждения в СВЧ плазме паров этанола низкого давления на пластины кремния различных кристаллографических ориентаций до и после вакуумного термического

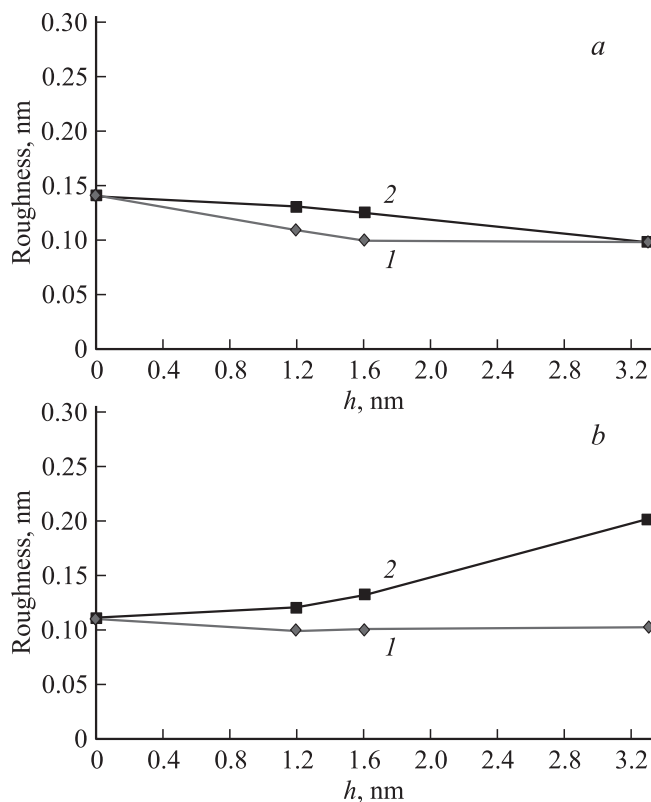


Рис. 3. Зависимости шероховатостей от толщины углеродных покрытий h , осажденных на пластины Si различных ориентаций в СВЧ плазме низкого давления при $T_{\text{dep}} = 300^\circ\text{C}$ до (1) и после термического отжига при температуре $T_{\text{ann}} = 700^\circ\text{C}$ (2). Ориентация пластин Si: a — (100), b — (111).

отжига T_{ann} при температурах 700 и 900°C . Можно видеть, что для обеих ориентаций кремния шероховатость углеродных покрытий, как до, так и после отжига при $T_{\text{ann}} = 700^\circ\text{C}$, уменьшается с увеличением температуры осаждения. Для пластин обеих ориентаций только при температуре осаждения $T_{\text{dep}} = 100^\circ\text{C}$ шероховатость углеродной пленки после отжига при 700°C превышает ее шероховатость до отжига. При больших температурах осаждения шероховатости покрытий до и после отжига при 700°C на пластинах (100) практически одинаковые, а для пластин (111) шероховатость после отжига заметно меньше, чем до отжига.

После вакуумного отжига с температурой $T_{\text{ann}} = 900^\circ\text{C}$ шероховатость углеродных пленок, осажденных на кремний ориентации (100) при температуре больше $T_{\text{dep}} = 100^\circ\text{C}$, более чем на порядок превышает шероховатость этих пленок как до отжига, так и после отжига при $T_{\text{ann}} = 700^\circ\text{C}$. Причем изменяется и характер наноморфологии. Это можно видеть из рис. 2, где приведены АСМ изображения наноморфологии углеродных пленок в 3 МС, осажденных при $T_{\text{dep}} = 200^\circ\text{C}$, как до, так и после отжига при 700 и 900°C . Если после отжига при 700°C наблюдается текстурирование поверхности в виде волнистой наноморфологии (ряби), то отжиг при

900° приводит к кардинальной перестройке поверхности: углеродная пленка в 3 МС приобретает выраженную островково-сетчатую морфологию.

На пластинах Si ориентации (111) шероховатость в 3 МС углеродного покрытия после отжига при 900°C в 4 раза превышает как исходную, так и шероховатость после отжига при 700°C и практически не зависит от температуры осаждения.

На рис. 3 приведены зависимости шероховатостей от толщины углеродных пленок (h), осажденных на пластины кремния различных ориентаций в СВЧ плазме паров этанола при $T_{\text{dep}} = 300^\circ\text{C}$ до и после их термического отжига при температуре 700°C . Можно видеть, что шероховатости покрытий на пластинах обеих ориентаций до отжига имеют одинаковую тенденцию к уменьшению с увеличением их толщины. После отжига характер этой зависимости для пластин (111) изменяется — шероховатость с увеличением толщины углеродных покрытий в интервале от 3 до 10 МС имеет устойчивую тенденцию к увеличению.

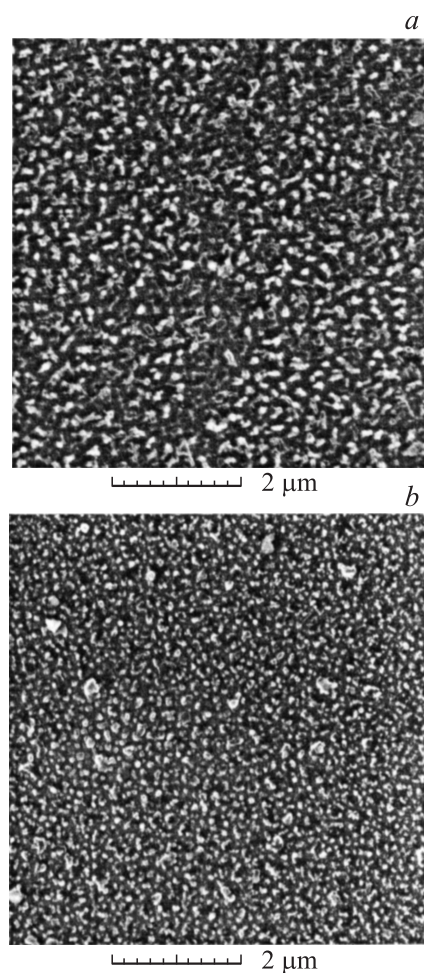


Рис. 4. СЭМ изображения структурированных углеродных нанопокровов после использования их в качестве безлитографической маски при низкоэнергетичном СВЧ плазмохимическом травлении пластин Si различных кристаллографических ориентаций: a — (111), b — (100).

На рис. 4 приведены электронно-микроскопические изображения структурированных субмонослойных ($\sim 2-3$ МС) углеродных образований, полученных в результате отжига и последующего высокоанизотропного СВЧ плазмохимического травления пластин кремния различных ориентаций с использованием этих углеродных образований в качестве масочных покрытий. На поверхности кремния с ориентацией (111) (рис. 4, *a*) наблюдаются углеродные островки в виде разветвленных структур различной формы („звездочек“). На кремнии ориентации (100) (рис. 4, *b*) в отличие от ориентации (111) форма островков представляется в виде многоугольников или дисков диаметром до 80–100 нм. На морфологии границы скола пластин кремния с ориентацией (100) после плазмохимического травления наблюдались столбчатые структуры с минимальным диаметром 70 нм и высотой 420 нм. Столбики имели одинаковый диаметр по высоте и были перпендикулярны относительно поверхности кристалла.

В отличие от этого морфология границы скола пластин кремния ориентации (111) после плазмохимического травления (ПХТ) через углеродную маску столь выраженной анизотропности травления, как у кремния ориентации (100), не имела. После СВЧ ПХТ на сколе кремния (111) наблюдается волнистая конфигурация с периодом 300–400 и глубиной до 200 нм, в некоторых местах которой имеются нановыступы, направление которых относительно друг друга и плоскости поверхности кристалла имеют неупорядоченный характер.

4. Обсуждение результатов

Наблюдаемые в экспериментах изменения шероховатости углеродных пленок, осажденных на пластины кремния различных ориентаций в зависимости от температур осаждения и отжига, обусловлены, согласно современным представлениям, стремлением системы пленка–подложка к минимуму свободной энергии. Движущей силой процессов является релаксация механических напряжений, возникших при неравновесной конденсации паров углерода на относительно холодных подложках кремния. Динамика и кинетика перехода в новое равновесное состояние осуществляется благодаря статистическому процессу перераспределения атомов на поверхности и изменению их относительного расположения за счет поверхностной миграции с характерной для каждого случая энергией активации E_{dif} . Кинетика превращения, определяемая характерным временем атомных перескоков, зависит от коэффициента поверхностной диффузии:

$$D_{\text{dif}} = D_0 \exp\left(-\frac{E_{\text{dif}}}{kT}\right), \quad (1)$$

где D_0 — предэкспоненциальный фактор, k — постоянная Больцмана, T — температура. В результате

такого фазового превращения сплошная, но упруго напряженная пленка, покрывающая подложку, при благоприятных температурных условиях может испытывать процесс релаксационного формоизменения вплоть до полного (коалесцентного) распада на изолированные островки [1,3]. Этот процесс заключается в увеличении неравномерности толщин в различных частях пленки, образовании пор и, наконец, утончении и разрыве перемычек и образовании изолированных островков, приводящих к значительному увеличению шероховатости. С другой стороны, лапласовское давление, возникающее за счет поверхностного натяжения со стороны поверхности с положительной кривизной, вызывает увеличение химического потенциала [3], которое в свою очередь стимулирует перенос массы в направлении от бугорков к впадинам, т.е. способствует выравниванию поверхности и уменьшению шероховатости.

Исходя из этих представлений, полученные результаты можно объяснить следующим образом. С увеличением температуры подложки в процессе осаждения усиливается поверхностная миграция адсорбированных атомов, которая приводит к релаксации напряжений, возникающих в процессе гетерогенной конденсации атомов адсорбата, имеющего параметры кристаллической решетки отличные от кристаллической решетки подложки. Поэтому шероховатость покрытий с увеличением температуры осаждения на пластинах кремния обеих ориентаций уменьшается (кривые 1 на рис. 1, *a, b*). Величины остаточных механических напряжений в полученных тонких пленках зависят от температуры подложки: они тем меньше, чем выше температура. Поэтому наибольшая перестройка поверхности углеродной пленки после отжига при $T_{\text{ann}} = 700^\circ\text{C}$ наблюдаются при минимальной температуре осаждения, равной $T_{\text{dep}} = 100^\circ\text{C}$ (рис. 1, *a, b*, кривые 2). Причем на пластинах обеих ориентаций шероховатости покрытий, полученных при этой температуре подложки, после отжига не уменьшаются, а увеличиваются. Это свидетельствует о их структурировании в процессе отжига.

При больших температурах осаждения, например $T_{\text{dep}} = 200^\circ\text{C}$, как следует из рис. 2, *a, b*, перестройка поверхности углеродной пленки после отжига при $T_{\text{ann}} = 700^\circ\text{C}$ также сопровождается уменьшением в системе пленка–подложка остаточных механических напряжений. Об этом свидетельствует увеличение периода волнистости, который, как известно, увеличивается с уменьшением напряжений в пленке [1]. Однако шероховатость углеродной пленки на пластине Si ориентации (100) при этом существенного количественного изменения не претерпевает (рис. 1, *a*). В отличие от этого шероховатость углеродных покрытий на пластинах ориентации (111) после отжига при 700°C становится меньше, чем шероховатость той же пленки до отжига (рис. 1, *b*). Это различие может свидетельствовать о том, что покрытия, осажденные на кремнии (111) и (100) при температурах больше $T_{\text{dep}} = 100^\circ\text{C}$, являются более напряженными в первом случае.

При высокотемпературном отжиге с $T_{\text{ann}} = 900^\circ\text{C}$ преобладающими процессами на пластинах ориентации (100) вместе с уменьшением остаточных напряжений в системе пленка–подложка являются процессы релаксационного формоизменения в самой пленке. Они становятся преобладающими, как правило, в том случае, когда в результате повышения температуры из-за высокой диффузионной подвижности конденсированных атомов ослабевает ориентирующее влияние подложки. Результатом этого является кардинальная перестройка поверхности, которая наблюдается на рис. 2, *с*.

Существенно (более чем на порядок) меньшее после $T_{\text{ann}} = 900^\circ\text{C}$ значение шероховатости покрытий, осажденных при температуре подложки $T_{\text{dep}} = 100^\circ\text{C}$ по сравнению с более высокими температурами осаждения (рис. 1, *а*, кривая 3), может быть обусловлено тем, что поверхностные кремний-углеродные фазы, полученные в СВЧ плазме на пластинах кремния ориентации (100) при различных температурах осаждения, имеют качественное различие в структуре и свойствах. В частности, при температурах осаждения более $T_{\text{dep}} = 100^\circ\text{C}$ на кремний ориентации (100) образуется поверхностная углеродная фаза, которая имеет меньше связей с поверхностными атомами кремния и, как следствие, обладает меньшими энергиями активации поверхностной диффузии. В результате этого, в частности, покрытия при температуре подложки больше 100°C конденсируются менее напряженными и шероховатыми, а их шероховатости до и после 700°C отжига практически не отличаются друг от друга (рис. 1, *а*, кривые 1, 2).

Существенно более слабая зависимость от температуры осаждения шероховатости отожженных при 900°C углеродных покрытий на пластинах кремния ориентации (111) (рис. 1, *б*, кривая 3) свидетельствует о том, что структурно-фазовый состав углеродного покрытия в отличие от осаждения на кремний (100) менее изменчив по свойствам в зависимости от температуры подложки T_{dep} . Кроме того, наблюдается относительно слабое изменение шероховатости отожженных при 900°C покрытий на Si (111) по сравнению с шероховатостью полученных в таких же условиях покрытий на Si (100), отожженных при 700 и 900°C .

Такие наблюдения могут свидетельствовать о том, что энергия связи хемосорбированных атомов углерода на кремнии (111) выше, чем на кремнии (100), и, согласно (1), не допускает протекания процессов коалесцентного распада нанопокровов при заданных температурах отжига.

Сильное влияние пластины кремния ориентации (111) на морфологию субмонослойного углеродного покрытия подтверждают также данные, приведенные на рис. 3. Из них следует, в частности, что с увеличением толщины покрытий их шероховатость после отжига при 700°C возрастает только в случае кремния ориентации (111), в то время как для ориентации (100) идет монотонное диффузионное выравнивание поверхности (рис. 3, *а*), которое характерно для аморфных подложек и подложек

с низкой энергией взаимодействия на границе подложка–конденсат [3].

Установленные макроскопические особенности структурирования субмонослойных углеродных покрытий на пластинах кремния рассмотренных кристаллографических ориентаций в зависимости от температуры осаждения и отжига, могут быть объяснены различием атомной микроструктуры их свободной поверхности [4].

Как известно, структура поверхности полупроводниковых кристаллов сильно модифицирована по отношению к структуре соответствующих атомных плоскостей в объеме. Это связано с тем, что объемоподобная свободная поверхность нестабильна из-за наличия большого количества ненасыщенных (оборванных) связей. Для того чтобы уменьшить свободную энергию поверхности атомы смещаются из своих первоначальных положений, чтобы, образовав связи друг с другом, насытить оборванные связи. Дальнейшее уменьшение поверхности происходит за счет переноса заряда между оставшимися ненасыщенными связями (в результате некоторые из них становятся незаполненными, а другие — заполненными). Этот механизм называют автокомпенсацией [4]. С другой стороны, смещение атомов приводит к возникновению механических напряжений в решетке, что увеличивает свободную энергию поверхности. Результат противодействия этих двух тенденций и определяет конкретную структуру реконструированной поверхности.

Идеальная объемоподобная поверхность Si (100) представляет собой квадратную решетку, образованную верхними атомами Si, каждый из которых связан с двумя атомами 2-го слоя и имеет 2 ненасыщенные связи. На реконструированной поверхности Si (100) атомы спариваются, образуя димеры, в результате число ненасыщенных связей уменьшается вдвое. Из димеров формируются ряды, и поверхность имеет периодичность 2×1 .

На атомарно чистой поверхности Si (111) наблюдаются 2 основные реконструкции: 2×1 и 7×7 . Структура 2×1 метастабильная и необратимо переходит в реконструкцию 7×7 при прогреве до температуры около 400°C . Реконструкция 7×7 , в свою очередь, стабильна до температуры около 850°C , где она претерпевает переход типа „порядок–беспорядок“ в структуру „ 1×1 “. Этот переход обратимый и при медленном охлаждении реконструкция 7×7 восстанавливается.

В процессе осаждения углеродных покрытий в высокоионизированной СВЧ плазме нескомпенсированные связи поверхностных атомов кремния обеих ориентаций насыщаются в результате взаимодействия с атомами углеродного адсорбата. Этому благоприятствует то, что углерод и кремний имеют одинаковую валентность, а энергия химической связи углерода с атомами кремния превышает как энергию связи кремния с другими химическими элементами, так и энергию связи между атомами кремниевой пластины. В результате такого взаимодействия в зависимости от степени ионизации плазмы, температуры

подложки, дозы адсорбата и других факторов поверхности кремния могут быть вновь реконструированы. Так, при воздействии атомарного углерода или его иона на поверхность кремния (100) наиболее вероятным, после насыщения нескомпенсированных связей поверхностных атомов кремния в структуре $\text{Si}(100)2 \times 1$, является разрыв слабых поверхностных σ -связей в димерах $\text{Si}=\text{Si}$ и насыщение вновь полученных свободных связей с образованием поверхностной фазы типа $\text{Si}(100)1 \times 1-\text{C}$. В результате этого поверхностная структура Si может вернуться к исходной объемноподобной. Закрепленные тем или иным способом атомы углерода становятся центрами зародышеобразования, вокруг которых, в результате поверхностной диффузии адатомов или прямой адсорбции из газовой фазы, происходит рост кластеров (островков) углеродной фазы. Так как идеальная объемноподобная поверхность $\text{Si}(100)$ представляет собой квадратную решетку, то растущий углеродный островок в целом будет повторять ту же конфигурацию. Это соответствует форме углеродных островков, которая наблюдается на Si ориентации (100) (рис. 4, b).

С увеличением температуры осаждения субмонослойного углеродного покрытия из-за тепловых флуктуаций параметров кристаллической решетки-подложки различные кремний-углеродные поверхностные фазы будут обладать различной стабильностью. При повышенных температурах осаждения ($T_{\text{dep}} \geq 200^\circ\text{C}$) наиболее стабильной и наименее напряженной из-за меньшего количества связей поверхностных атомов кремния с атомами углеродного адсорбата является фаза типа $\text{Si}(100)2 \times 1-\text{C}$. Как следствие это вызывает минимальные релаксационные изменения шероховатости при отжиге $T_{\text{ann}} = 700^\circ\text{C}$ (см. рис. 1, a, кривые 1, 2) и глобальные структурные изменения при отжиге $T_{\text{ann}} = 900^\circ\text{C}$ (рис. 1, a, кривая 3 при $T_{\text{dep}} \geq 200^\circ\text{C}$) из-за сильной поверхностной миграции незакрепленных связей $\text{Si}=\text{C}$ адатомов углерода, приводящей к островковой коалесценции покрытия (рис. 2, c).

При низкой температуре осаждения ($T_{\text{dep}} \approx 100^\circ\text{C}$) в результате низкоэнергетичного ионного воздействия, достаточного, однако, для разрыва σ -связей в димерах $\text{Si}=\text{Si}$, возможно образование поверхностной фазы типа $\text{Si}(100)1 \times 1-\text{C}$. Эта фаза, хотя и является более напряженной, чем фаза $\text{Si}(100)2 \times 1-\text{C}$, из-за большего количества связей между атомами кремния и углерода и разности параметров кристаллической решетки $\text{Si}-\text{Si}$ и $\text{Si}-\text{C}$, но, как показывают экспериментальные данные, при покрытии в ЗМС она более устойчива к высокотемпературному отжигу, вплоть до 900°C (рис. 1, a, кривые 1–3 при температуре осаждения 100°C).

При ионно-химическом воздействии атомарного углерода в процессе его осаждения на кремний ориентации (111) наиболее вероятным является формирование не одной структуры, а целого семейства различных поверхностных фаз типа $\text{Si}(111)\sqrt{3} \times \sqrt{3}$, имеющих адатомный тип или описываемых сотовой моделью тримеров [4]. В случае структуры $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ адатомного

типа атомы адсорбированного углерода располагаются на практически объемноподобной поверхности $\text{Si}(111)$ и занимают положение между тремя атомами верхнего слоя над атомами второго слоя. В этом случае каждый адатом углерода может быть дополнительно связан с одним–двумя атомами Si верхнего слоя. В результате происходит насыщение всех связей этих атомов кремния и их некоторое смещение из своих положений равновесий благодаря более сильной связи $\text{C}=\text{Si}$ по сравнению со связью $\text{Si}=\text{Si}$. В случае, если атомы адсорбата расположены в положениях „сверху“, они также за счет образования между собой связей $\text{C}=\text{C}$ могут сместиться к общему центру, в результате чего образуют тример. Закрепленные такими способами атомы углерода могут быть центрами новой углеродной островковой фазы.

Адсорбция атомов углерода в положениях „сверху“, очевидно, из-за меньшего влияния тепловых колебаний кремниевой решетки является превалирующей при более высоких температурах осаждения. Однако в этом случае адатомы углерода оказываются меньше связанными с поверхностными атомами кремния и обладают, поэтому, меньшей энергией активации поверхностной диффузии и большей мобильностью с увеличением температуры отжига по сравнению с адсорбцией в положение между тремя атомами верхнего слоя над атомами второго слоя. В результате этого субмонослойные углеродные пленки, осажденные на кремний (111) при температуре около 100°C , имеют менее выраженные изменения шероховатостей после отжигов, чем пленки, осажденные при более высоких температурах подложек (рис. 1, b).

В обоих видах адсорбции поверхностная кремний-углеродная фаза на кремний (111) будет иметь вид сотовой структуры в общем случае с несколькими сцепленными тримерами („звездочками“, см. рис. 4, a). При высокотемпературном отжиге 900°C такой структуры в результате фазового перехода, который как уже отмечалось происходит при температуре около 850°C , поверхность углеродного покрытия (независимо от температуры осаждения) претерпевает новую реконструкцию (переход типа „порядок–беспорядок“), которой соответствует более высокая шероховатость (кривая 3 на рис. 1, b).

5. Заключение

Поверхностное структурирование субмонослойных углеродных покрытий, осажденных в высокоионизированной СВЧ плазме низкого давления на пластины монокристаллического кремния различных кристаллографических ориентаций, определяется атомной микроструктурой свободной поверхности этих пластин и ее модификацией в зависимости от температуры осаждения и высокотемпературного отжига. Образующиеся различные по составу и свойствам поверхностные кремний-углеродные фазы после отжига структурируются в раз-

личные по размерам и форме островковые образования. Из-за различной селективности травления кремния и углерода в некоторых химически активных газовых средах такое структурирование позволяет использовать образующиеся углеродные островки в качестве безлитографических масочных покрытий для получения интегральных наноразмерных столбчатых структур с использованием высококоразрешающего плазмохимического травления.

Понижение температуры осаждения покрытий, так же как и увеличение степени ионизации плазмы, ведут к уменьшению диффузионной длины адатомов на подложке. Соответственно область сбора адатомов для одного островка уменьшается, уменьшаются и его размеры, а поверхностная плотность островков возрастает. Толщина углеродного покрытия не должна превышать 2–3 монослоев, так как структурирование с увеличением толщины нанопокровов ослабевает.

На пластинах кремния, имеющих ориентацию (100), при хемосорбции атомов углерода образуется рядная структура, соответствующая структуре реконструированной поверхности монокристаллического кремния данной ориентации, которая затрагивает атомы верхнего слоя кремния. На реконструированной поверхности кремния ориентации (111) образуются разветвленные пирамидального вида структуры („звездочки“), в образовании которых участвуют атомы кремния нескольких верхних слоев. В результате этого образовавшаяся углеродная маска имеет неравномерную по поверхности толщину, которая не обеспечивает однородное рядное травление на одинаковую глубину, как в случае с кремнием (100).

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, Гос. контракт № 02.740.11.0795.

Список литературы

- [1] Н.Н. Леденцов, В.М. Устинов, В.А. Шукин, П.С. Копьев, Ж.И. Алфёров, Д. Бимберг. *ФТП*, **32** (4), 385 (1998).
- [2] Р.К. Яфаров. *Физика СВЧ вакуумно-плазменных нанотехнологий* (М., Физматлит, 2009).
- [3] В.М. Ивлев, Л.И. Трусов, В.А. Холмянский. *Структурные превращения в тонких пленках* (М., Металлургия, 1982).
- [4] К. Оура, В.Г. Лифшиц, А.А. Саранин, А.В. Зотов, М. Катаяма. *Введение в физику поверхности* (М., Наука, 2006).

Редактор Т.А. Полянская

Structurization of the submonolayer carbon coverings deposited in the microwave plasma of low pressure on single-crystal silicon

V.Ya. Shanygin, R.K. Yafarov

Kotel'nikov Radio Engineering and Electronics Institute, Russian Academy of Sciences, 410019 Saratov, Russia

Abstract Features of surface structurization of the submonolayer carbon coverings deposited in high ionized microwave plasma of low pressure upon plates of silicon with crystallographic orientations (111) and (100) have been studied. It is established that the size, the form and surface density of nanostructural carbon formations are defined by a nuclear microstructure of a free surface of silicon of the set crystallographic orientations and it's updating depending on deposition and annealing conditions. Basic possibility of reception of integrated columnar nanostructures with surface density to $(4-5) \cdot 10^9 \text{ cm}^{-2}$ and height over 400 nm as a result of high anisotropic etching with use received carbon insular nanoformations in the quality lithographic coverings on single-crystal silicon of orientation (100) is shown.