

05;06;12

## Особенности наноструктурирования субмонослойных покрытий углерода, осажденных на поверхность монокристаллов кремния в низкотемпературной плазме СВЧ-разряда

© В.Я. Шаныгин, Р.К. Яфаров

Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,  
410019 Саратов, Россия  
e-mail: pirpc@renet.ru

(Поступило в Редакцию 29 марта 2011 г. В окончательной редакции 13 декабря 2011 г.)

Изучены особенности поверхностного наноструктурирования субмонослойных углеродных покрытий, осажденных на пластины кремния с кристаллографическими ориентациями (111) и (100) в высокоионизованной сверхвысокочастотной плазме низкого давления. Показано влияние толщины покрытий и основных параметров режимов обработки на механизмы морфологических изменений с учетом реконструкции поверхности монокристаллическом кремнии и механических напряжений, возникающих при получении атомно-чистой поверхности в процессе плазмохимического травления, гетерогенной конденсации и высокотемпературном отжиге. С использованием наноструктурированных углеродных образований в качестве масочных покрытий и высокоанизотропного плазмохимического травления на монокристаллическом кремнии ориентации (100) получены интегральные столбчатые наносистемы с плотностью до  $(4-5) \cdot 10^9 \text{ cm}^{-2}$  и высотой свыше 400 nm.

### Введение

Актуальной задачей современного полупроводникового материаловедения является разработка новых методов создания квантово-размерных систем, примером которых могут служить самоорганизующиеся структуры при получении квантовых проволок, латеральных поверхностных сверхрешеток, квантовых точек [1]. Основными методами создания таких структур в нанoeлектронике являются молекулярно-лучевая эпитаксия и осаждение из газовой фазы, которые основываются на получении планарных гетероструктур с относительно высокой разностью параметров решеток пленки и подложки. Последующая релаксация упругих напряжений вблизи свободной поверхности способствует спонтанному образованию поверхностных наноструктур. Такой процесс получил название самоорганизации в процессе роста. Созданные этими методами квантово-размерные системы продемонстрировали уникальные физические свойства, которые обеспечили существенное улучшение функциональных характеристик электронных и оптических приборов, а также сенсоров. Так, в области оптоэлектроники наноструктуры обеспечивают более низкие пороговые токи, повышают быстродействие и обеспечивают более узкий спектр излучения в лазерах на квантовых точках.

Не менее актуальным в настоящее время является разработка методов создания пространственно упорядоченных квантово-размерных структур, представителями которых являются фотонные кристаллы, нанокompозитные и нанопористые материалы. Важным фактором, определяющим свойства наноматериалов, является влияние матрицы и среды нахождения объектов с размерно-зависимыми свойствами. Основным предназначением таких структур является создание приборов, основанных

на использовании фотоэлектрических явлений, в частности, высокоэффективных светоизлучателей, работающих при повышенных температурах и имеющих повышенную радиационную стойкость. На основе наноматериалов возможно создание различных нелинейных оптических наносистем для оптических преобразователей, получение светоперестраиваемых диодов и лазеров с изменением длины волны и др. Особый интерес к этому направлению обусловлен также и тем, что перспективным материалом для него является кремний, который является традиционным и основным материалом микроэлектроники и квантово-размерные свойства которого позволили резко расширить возможности его применения в фотоэлектронике [2].

Несмотря на перспективность этого направления, степень разработки непосредственно технологических подходов к созданию таких систем и их теоретическое осмысление являются в настоящее время недостаточными. В связи с этим целью работы явилось 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 пространственно-упорядоченных кремниевых наноструктур.

### 1. Экспериментальная установка и методики исследований

Получение самоорганизующихся углеродных масочных покрытий на пластинах кремния различных кристаллографических ориентаций осуществлялось в 3 этапа. На первом этапе для получения атомно-чистых

поверхностей пластины кремния подвергались сверхвысокочастотному (СВЧ) вакуумно-плазменному травлению [3]. После травления на пластины осаждались ультратонкие углеродные пленки. На третьем этапе с помощью метода термически активируемого коалесцентного распада при высокотемпературном вакуумном отжиге формировались масочные покрытия в виде островковых образований, размер и поверхностная плотность которых зависели от технологических параметров процесса.

Эксперименты, связанные с плазмохимическим травлением (ПХТ) и осаждением углеродных покрытий, проводились в вакуумной установке с использованием СВЧ-ионно-плазменного источника на частоте 2.45 GHz [4]. Мощность СВЧ-излучения и индукция магнитного поля составляли соответственно 250 W и 875 Gs. В качестве рабочего газа для травления пластин монокристаллического кремния использовался хладон-14. Давление газа в процессе сухого травления кремния было равным 0.1 Pa и обеспечивало выполнение условий ЭЦР, при котором степень ионизации плазмы составляла около 5%. Для определения оптимальных режимов получения атомно-чистой поверхности монокристаллического кремния под осаждение углеродных пленок исследовалось влияние на наноморфологию поверхности энергии ионов рабочего вещества. Энергия ионов задавалась режимом плазменного травления с различными потенциалами смещения на обрабатываемых пластинах в диапазоне от -100 до -350 V.

Осаждение углеродных покрытий после травления пластин кремния осуществлялось в СВЧ-плазме с использованием в качестве рабочего вещества паров этанола. Температуры осаждения варьировались в диапазоне от 100 до 300°C с интервалом 100°C. Потенциал смещения на подложкодержателе в процессе осаждения составлял -300 V. Осаждение осуществлялось в условиях малой адсорбции при давлении паров этанола около 0.05 Pa. Исследование полученных покрытий с помощью комбинационного рассеяния света показало присутствие в их структуре наноалмазографитовых фаз. Осажденные пленки имели толщины от 1.2 nm, что составляет примерно 3 монослоя (monolayer ML) графитовой фазы, до 3.4 nm, что эквивалентно примерно 10 ML.

После нанесения углеродных слоев кремниевые пластины подвергались вакуумному термическому отжигу в течение 1 h при температурах 700 и 900°C. В экспериментах использовались пластины монокристаллического кремния марок КДБ 10 ориентации (111) и КЭС 0.01 ориентации (100).

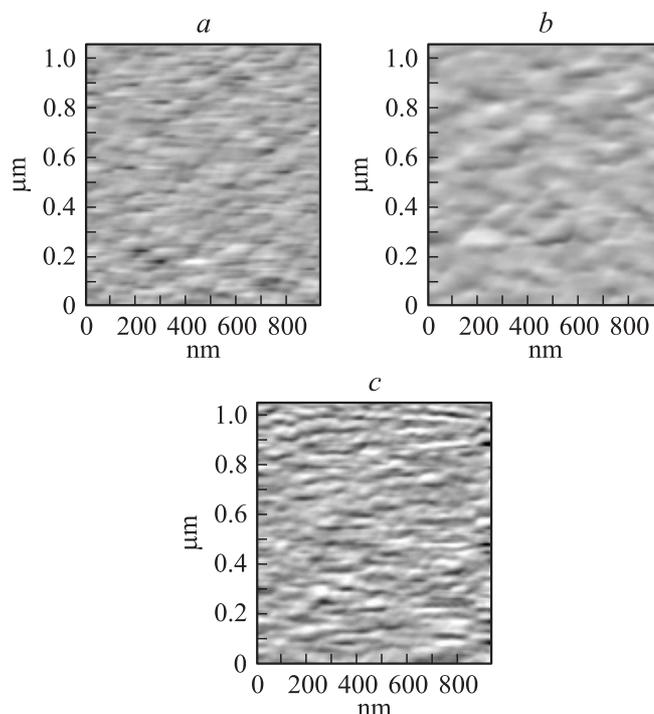
Для количественной оценки и сравнения наноморфологических характеристик исследуемых поверхностей использовалась величина их шероховатости, которая изучалась с использованием сканирующего атомно-силового микроскопа NT MDT-P4. Обработка результатов измерений производилась с использованием программного обеспечения этого микроскопа. Размер и форма структурных образований на поверхности пластин

кремния, а также на их сколе изучались с использованием сканирующего электронного микроскопа „МИРА II“.

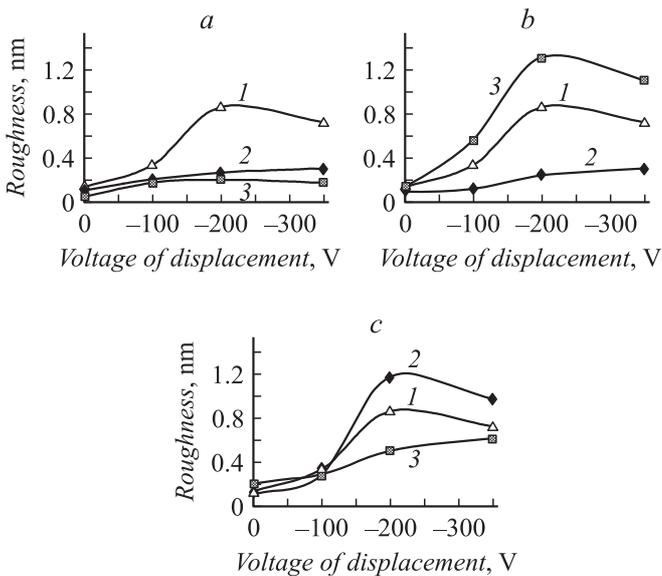
## 2. Результаты экспериментов

На АСМ-изображениях, приведенных на рис. 1, можно видеть, что с увеличением отрицательного смещения в интервале от -100 до -200 V текстура поверхностей кремния (111) после СВЧ-травления становится более контрастной, при больших смещениях она имеет вид волнистой наноморфологии (ряби).

Из зависимостей, приведенных на рис. 2 (на этом и других рисунках точкам с потенциалом смещения, равным нулю, условно соответствуют значения шероховатостей пластин кремния и осажденных на них углеродных пленок, не подвергавшихся предварительному СВЧ-плазменному травлению), можно видеть, что с увеличением потенциалов смещений в интервале от -100 до -200 V шероховатости атомно-чистых поверхностей кремния и осажденных на них покрытий увеличиваются более чем в 2 раза с последующей стабилизацией при увеличении потенциалов смещения до -350 V. Практически такой же характер зависимостей шероховатостей от потенциалов смещения наблюдается для осажденных покрытий как до, так и после их отжига. При толщине 3 ML шероховатости осажденной пленки до и после отжига практически не отличаются друг от друга и имеют значения меньше, чем шероховатость



**Рис. 1.** АСМ-изображения поверхностей кремниевых пластин ориентации (111) после СВЧ-травления в CF<sub>4</sub> при различных напряжениях смещения на подложкодержателе V, V: a — (-100), b — (-200), c — (-350).



**Рис. 2.** Зависимости от потенциалов смещения величины шероховатостей кремниевых пластин ориентации (111) после СВЧ-травления (кривые 1), а также углеродных пленок различных толщин, осажденных в СВЧ-плазме паров этанола при температуре  $T_s = 300^\circ\text{C}$  до (кривые 2) и после вакуумного отжига при  $T_a = 700^\circ\text{C}$  (кривые 3) толщиной, ML: *a* — 3, *b* — 5, *c* — 10.

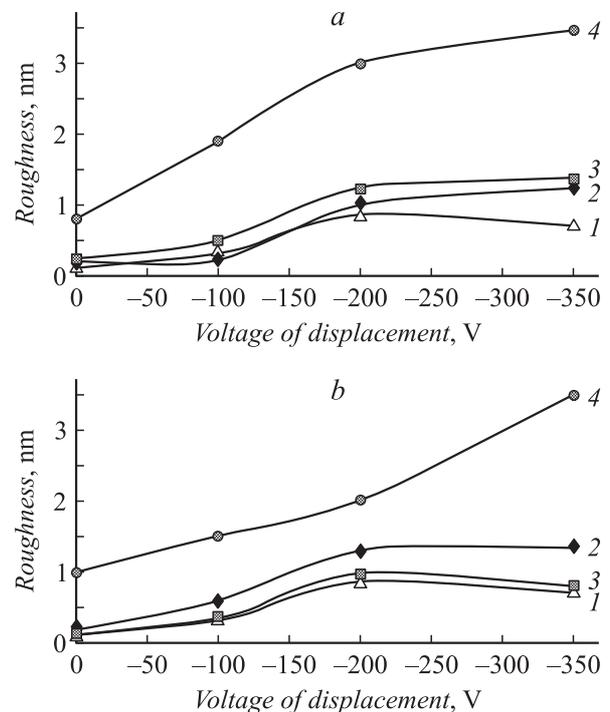
исходной травленной поверхности кремния. При больших толщинах пленок их шероховатости до и после отжига отличаются существенным образом. Причем шероховатость отожженной пленки толщиной 5 ML выше, а шероховатость отожженной пленки толщиной 10 ML, напротив, меньше шероховатостей как атомно-чистой поверхности кремния, так и осажденной углеродной пленки до отжига.

Для ориентации (100) соотношения между шероховатостями кремниевой пластины после СВЧ ПХТ и осажденных углеродных пленок при  $T_s = 300^\circ\text{C}$  до и после отжига в зависимости от их толщины имеют другой характер. Шероховатость покрытий толщиной от 3 до 10 ML как до отжига, так и после него, всегда была меньше, чем шероховатость кремниевой подложки. Исключение составляют режимы, в которых потенциал смещения в процессе СВЧ ПХТ кремниевых пластин превышает  $-200\text{ V}$ . В этих случаях при толщине углеродной пленки 10 ML ее шероховатость до отжига незначительно превышает шероховатости, как подложки кремния, так и самой пленки после отжига.

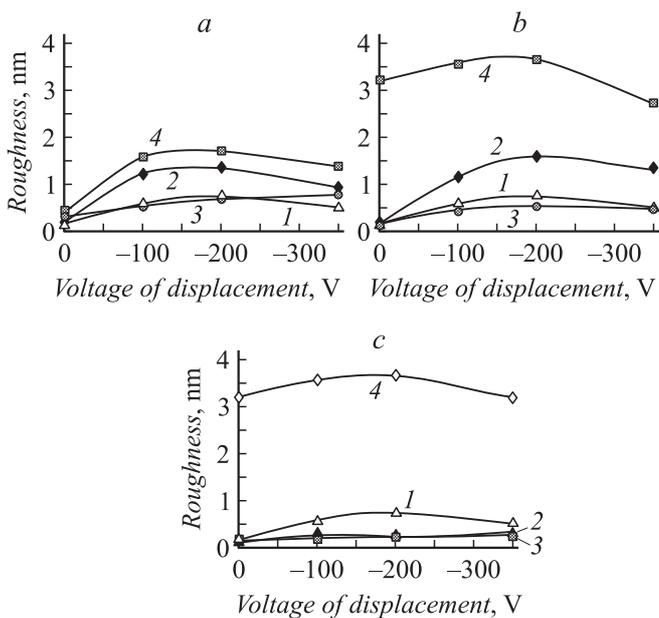
Из рис. 2, *a* и рис. 3 (кривые 1–3) можно видеть, что при уменьшении температуры осаждения шероховатости углеродных пленок на кремнии (111) как до, так и после отжига при  $T_a = 700^\circ\text{C}$  становятся выше шероховатости подложки. После отжига при температуре  $900^\circ\text{C}$  (рис. 3), шероховатость скачкообразно увеличивается, по сравнению с шероховатостями пластины кремния и углеродной пленки, как до отжига, так и после при

$T_a = 700^\circ\text{C}$  в 2–3 раза с последующим монотонным увеличением в зависимости от энергии ионов предварительного ионно-плазменного травления пластин кремния. Причем эта закономерность наблюдается и для пластин, которые не проходили травление в СВЧ плазме (точки с потенциалом смещения, равным нулю).

Для кремниевых пластин ориентации (100) из зависимостей, приведенных на рис. 4, можно видеть, что, так же как и на Si ориентации (111), шероховатость 3 ML углеродных покрытий, полученных при  $T_s = 300^\circ\text{C}$ , меньше, чем шероховатость поверхности кремния после СВЧ ПХТ, а шероховатость покрытий, полученных при более низких температурах ( $T_s = 200$  и  $100^\circ\text{C}$ ), превышает шероховатость подложки Si (100). Однако это превышение существенно больше, чем на пластинах (111). После отжига при  $T_a = 700^\circ\text{C}$  шероховатость покрытий уменьшается и становится, так же как для пластин ориентации (111), одинаковой с шероховатостью атомно-чистой поверхности кремния. Отжиг при  $T_a = 900^\circ\text{C}$  приводит к кардинальному изменению шероховатости покрытий. Так, для температуры осаждения  $200^\circ\text{C}$  она увеличивается относительно шероховатостей подложки и покрытий после отжига при  $700^\circ\text{C}$  больше, чем на порядок. Причем такое увеличение шероховатости покрытий после  $T_a = 900^\circ\text{C}$  имеет место и при их осаждении на кремний, не



**Рис. 3.** Зависимости от потенциалов смещения величины шероховатостей кремниевых пластин ориентации (111) после СВЧ ПХТ (кривые 1), а также углеродных пленок толщиной 3 ML, осажденных в СВЧ-плазме паров этанола при температурах  $T_s = 100^\circ\text{C}$  (*a*) и  $T_s = 200^\circ\text{C}$  (*b*) до (кривые 2) и после вакуумного отжига при  $T_a = 700^\circ\text{C}$  (кривые 3) и  $T_a = 900^\circ\text{C}$  (кривые 4).



**Рис. 4.** Зависимости от потенциалов смещения шероховатостей кремниевых пластин ориентации (100) после СВЧ-ПХТ (кривые 1), а также шероховатостей углеродных пленок толщиной 3 ML, осажденных в СВЧ-плазме паров этанола до (кривые 2) и после отжига при  $T_a = 700^\circ\text{C}$  (кривые 3) и  $T_a = 900^\circ\text{C}$  (кривые 4) при различных температурах подложек: *a* —  $100^\circ\text{C}$ , *b* —  $200^\circ\text{C}$ , *c* —  $300^\circ\text{C}$ .

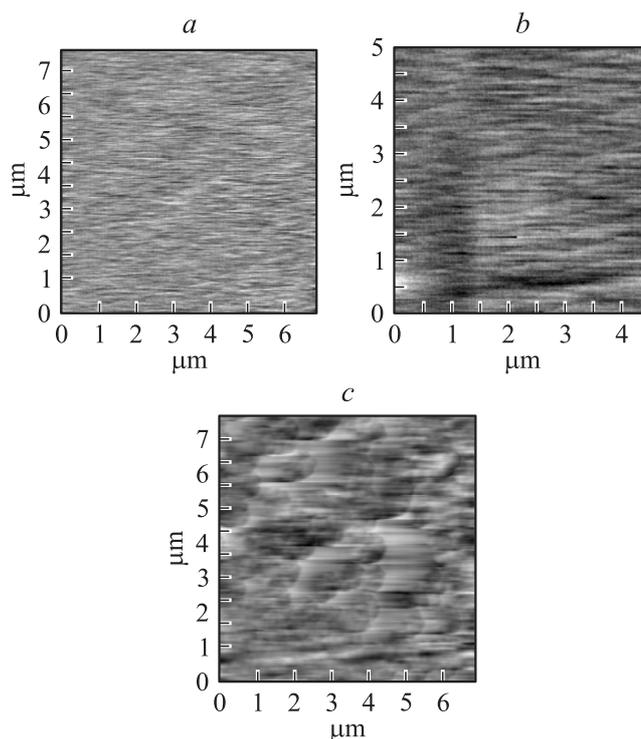
подвергавшийся ПХТ, для получения атомно-чистой поверхности (рис. 4, *b*). При уменьшении температуры осаждения до  $100^\circ\text{C}$  увеличение шероховатости покрытий после  $T_a = 900^\circ\text{C}$  значительно меньше, чем в предыдущем случае (рис. 4, *a*). Причем шероховатость покрытий, осажденных на кремний, не подвергавшийся ПХТ, после отжига при  $T_a = 900^\circ\text{C}$  практически не отличается от шероховатости покрытий после отжига при  $T_a = 700^\circ\text{C}$ .

Для ультратонких углеродных пленок, осажденных на пластины ориентации (100) при температуре больше  $100^\circ\text{C}$ , после отжига при  $700^\circ\text{C}$  наблюдается, как и для случая осаждения на Si (111), текстурирование поверхности в виде волнистой наноморфологии (ряби) с периодом несколько большим, чем до отжига (рис. 5). Однако отжиг при  $900^\circ\text{C}$  в отличие от покрытий, осажденных на Si (111), приводит к кардинальной перестройке поверхности. Углеродная пленка толщиной 3 ML приобретает выраженную островково-сетчатую морфологию.

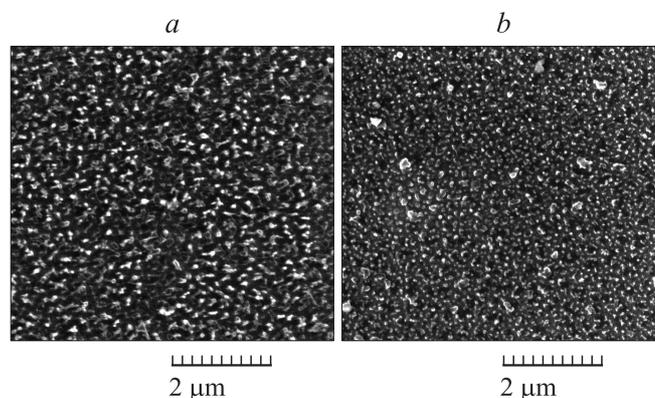
На рис. 6 приведены электронно-микроскопические изображения структурированных субмонослойных углеродных нанопокровов, полученных после отжига и последующего высокоанизотропного СВЧ ПХТ. На поверхности Si с ориентацией (111) (рис. 6, *a*) наблюдаются углеродные островки в виде разветвленных структур („звездочек“). На кремнии ориентации (100) (рис. 6, *b*) в отличие от ориентации (111) форма островков имеет вид компактных многоугольников или дисков диаметром

от 20 до 100 nm. На границе скола пластин кремния с этой ориентацией после ПХТ с углеродным покрытием наблюдались столбчатые структуры с диаметром 20–100 nm и высотой 420 nm. Они имели одинаковый диаметр по высоте и были перпендикулярны относительно плоскости кристалла.

Морфологии границы скола пластин кремния ориентации (111) после ПХТ через структурированную углеродную маску выраженной анизотропии травления не имели. После ПХТ на сколе пластины кремния



**Рис. 5.** АСМ-изображения на Si (100) наноморфологии углеродного покрытия толщиной 3 ML, осажденного при температуре  $200^\circ\text{C}$ : *a* — до отжига; *b* — после при  $T_a = 700^\circ\text{C}$ ; *c* — после при  $T_a = 900^\circ\text{C}$ .



**Рис. 6.** СЭМ-изображения углеродных масочных нанопокровов после СВЧ-ПХТ пластин Si различных кристаллографических ориентаций: *a* — (111), *b* — (100).

наблюдается волнистая конфигурация с периодом до 300–400 nm и глубиной до 200 nm.

### 3. Обсуждение результатов

Согласно современным представлениям, шероховатость тонких пленок, осажденных на поверхности твердого тела, зависит от наноморфологии подложки и механизмов зародышеобразования и роста пленок. Изменения шероховатостей пленок в зависимости от температур осаждения и отжига, обусловлены стремлением системы пленка–подложка к минимуму свободной энергии. Движущей силой процессов является релаксация механических напряжений, возникших при конденсации паров материала пленки [3–6]. Динамика и кинетика перехода в новое равновесное состояние осуществляется благодаря статистическому процессу перераспределения атомов на поверхности за счет поверхностной миграции с характерной для каждого случая энергией активации  $E_{\text{диф}}$ .

В соответствие с этим, из приведенных на рис. 2, *a, b* и рис. 4, *c* результатов, согласно которым шероховатость 3–5 монослойных углеродных пленок меньше, чем шероховатость подложки, можно заключить, что осажденные при температуре 300°C углеродные атомы концентрируются в основном в углублениях атомного рельефа поверхности кремниевых пластин независимо от их кристаллографической ориентации. „Заращивание“ потенциального рельефа поверхности твердого тела, как было изучено ранее [5], может осуществляться за счет поверхностной миграции как адатомов, так и отдельных островков-зародышей из осажденных атомов. Схема такого „заращивания“ приведена на рис. 7, *a* (кривые для 3 и 5 ML).

При осаждении углеродных пленок, толщины которых значительно превышают размер шероховатости подложки, в частности при толщине 3.4 nm или 10 ML, их шероховатость становится больше шероховатости подложки (рис. 2, *c*). Это обусловлено тем, что адсорбирующиеся атомы за счет поверхностной миграции при достаточно высокой температуре подложки ( $T_s = 300^\circ\text{C}$ ) в основном поддерживают рост уже образовавшихся зароды-

шей, которые первоначально осели в потенциальных ямах поверхностного рельефа, а не формируют новые (рис. 7, *a*, схема для 10 ML).

При уменьшении температуры осаждения до 200 и 100°C (рис. 3, а также рис. 4, *a, b*) такого „заращивания“ рельефа подложки не происходит. Причиной этого является низкая поверхностная миграция адатомов и островков при низких температурах [6].

Так как конденсация из газовой фазы на относительно холодную твердую поверхность всегда представляет собой неравновесный процесс, идущий с накоплением упругой энергии деформации на границе пленка–подложка, материалы которых имеют различные параметры кристаллической решетки, то последующий высокотемпературный отжиг инициирует новую поверхностную миграцию конденсированных атомов. При отжиге в результате релаксации напряжений изменяются и движущие силы, определяющие направления движения атомов осажденного вещества и приводящие систему в более термодинамически равновесное состояние. В частности, лапласовское давление, возникающее за счет поверхностного натяжения со стороны поверхности с положительной кривизной, вызывает увеличение химического потенциала, которое в свою очередь стимулирует перенос массы в направлении от бугорков к впадинам, т.е. способствует выравниванию поверхности [6]. Схема таких процессов представлена на рис. 7, *b* для 3 и 10 ML.

Как видно из рис. 2–4, такие процессы являются преобладающими при отжиге углеродных покрытий, полученных на пластинах кремния ориентации (100), и менее эффективны на пластинах ориентации (111). В частности, после отжига при 700°C шероховатости субмонослойных покрытий на кремнии (100) уменьшились до уровня ниже исходной шероховатости пластин независимо от температуры осаждения (рис. 4). Для пластин кремния (111) такое наблюдалось только для покрытий, осажденных при  $T_s = 300^\circ\text{C}$  (рис. 2, *a*). Это свидетельствует о том, что на кремнии (100) сумма поверхностной энергии углеродного слоя  $\gamma_2$  и энергии границы раздела  $\gamma_{12}$  меньше, чем энергия поверхности подложки  $\gamma_1 + \gamma_{12} < \gamma_1$ , и осажденный материал (индекс 2) смачивает подложку (индекс 1).

Изменение режима смачиваемости, которое наблюдается при  $T_a = 700^\circ\text{C}$  на пластинах ориентации (111) с осажденным субмонослойным углеродным покрытием, обусловлено изменением величины  $\gamma_2 + \gamma_{12}$  в зависимости от условий осаждения и отжига. Как известно, это может приводить к переходу от режима Франк-ван-дер-Мерве к режиму Фолмера–Вебера, при котором имеет место островковый (трехмерный) рост материала пленки на поверхности подложки. В результате этого при отжиге за счет диспергирования сплошной, но разнотолщинной (шероховатой) пленки, шероховатость покрытия может усиливаться. Схема таких процессов представлена на рис. 7, *a, b* для 5 ML.

Основными факторами, контролирующими диспергирование субмонослойной пленки, являются напряжения на

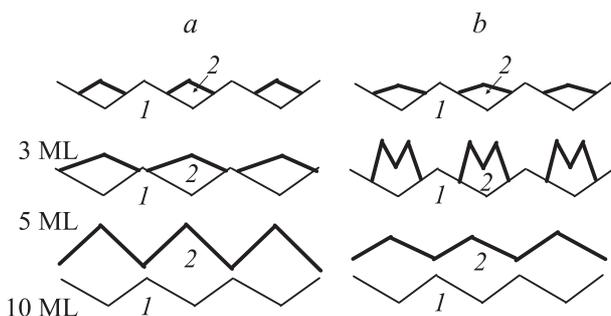


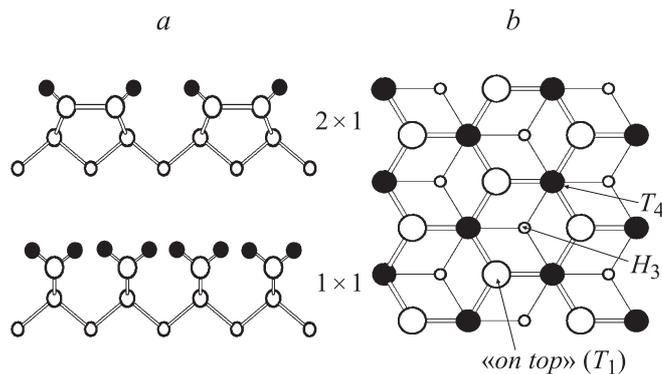
Рис. 7. Схемы структурирования на поверхности кремния (1) осажденных субмонослойных углеродных покрытий (2) различных толщин до (а) и после отжига (б).

границе раздела фаз, температура отжига, которая определяет диффузионные характеристики пленки, а также анизотропия упругих и химических свойств подложки, определяемых кристаллографической ориентацией пластин кремния и режимами (энергией ионов) ее ионно-химического травления [6]. О последнем свидетельствует, в частности, уменьшение периода „волнистости“ шероховатости кремниевых пластин, полученное при больших смещениях (рис. 1) (согласно [5], это может интерпретироваться большей величиной механических напряжений, возникающих в приповерхностных слоях кремния при обработке ионами с большей энергией). В результате действия всех этих факторов упругие искажения в прилегающей области подложки по периферии островка возрастают с увеличением размеров последнего. Это изменяет закономерности присоединения адатомов к островку, изменяя его скорость роста и форму. Такое усиление шероховатости покрытий после вакуумного отжига при температуре  $700^{\circ}\text{C}$ , согласно полученным экспериментальным данным, характерно для кремния ориентации (111) при толщине углеродной пленки в 5 ML (рис. 2, *b*), полученной при  $T_s = 300^{\circ}\text{C}$ , а также при толщине 3 ML, полученной при минимальной температуре подложки  $T_s = 100^{\circ}\text{C}$ , когда процесс реализуется в наиболее неравновесных условиях и напряжения в системе пленка-подложка достигают максимального значения.

Как известно, структура поверхности полупроводниковых кристаллов сильно модифицирована по отношению к соответствующим атомным плоскостям в объеме [7]. Так, идеальная объемоподобная поверхность Si (100) представляет собой квадратную решетку, образованную верхними атомами Si, каждый из которых связан с двумя атомами второго слоя и имеет две 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  $2 \times 1$  (рис. 8, *a*).

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

При осаждении углеродных покрытий на пластины кремния, очищенные предварительным ПХТ от хемосорбированных инородных атомов, нескомпенсированные связи на их поверхностях насыщаются в результате взаимодействия с атомами углеродного адсорбата. В результате такого взаимодействия поверхности кремния могут быть вновь реконструированы. Так, при воздействии атомарного углерода или его иона на поверхность кремния (100) наиболее вероятным после насыще-



**Рис. 8.** Схематическое изображение основных адсорбционных мест на поверхностях Si (100) (*a*) ( $2 \times 1$  — после димерной реконструкции Si (100)  $2 \times 1$ ,  $1 \times 1$  — идеальной нереконструированной Si (100)  $1 \times 1$ ) и объемоподобных поверхностях Si (111) (*b*) ( $T_4$  — положение между тремя атомами верхнего слоя над атомами второго слоя;  $H_3$  — положение между тремя атомами верхнего слоя над атомами четвертого слоя;  $T_1$  — положение над атомом первого слоя).

ния нескомпенсированных связей поверхностных атомов кремния в структуре Si (100)  $2 \times 1$  (рис. 8, *a*), ранее занятых инородными атомами, является разрыв слабых поверхностных  $\sigma$  связей в димерах Si = Si и насыщение образовавшихся свободных связей с образованием поверхностной фазы типа Si (100)  $1 \times 1$ -C. В результате этого поверхностная структура Si может вернуться к исходной объемоподобной. 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 объемоподобная поверхность Si (100) представляет собой квадратную решетку, то растущий углеродный островок в целом будет повторять ту же конфигурацию. Это соответствует формам углеродных островков, которые наблюдаются на рис. 6, *b*.

При осаждении субмонослойных углеродных покрытий в различных режимах ионно-плазменного воздействия и температуры подложки, образующиеся кремний-углеродные поверхностные фазы будут обладать различной стабильностью. Наиболее устойчивой является фаза типа Si (100)  $2 \times 1$ -C, которая является наименее напряженной из-за меньшего количества связей поверхностных атомов кремния с атомами углеродного адсорбата. Как следствие, это вызывает минимальные релаксационные изменения шероховатости углеродных покрытий, полученных при  $T_s \geq 200^{\circ}\text{C}$  на пластинах (100) при  $700^{\circ}\text{C}$  отжиге (см. рис. 4, *c*, кривые 2 и 3), и глобальные микроструктурные изменения при  $T_a = 900^{\circ}\text{C}$  (рис. 4, *b, c*, кривые 4). Это происходит из-за сильной поверхностной миграции незакрепленных связями с атомами кремния адатомов углерода, приводящей к островковой коалесценции покрытия (рис. 5, *c*).

При ионно-химическом воздействии ионов и атомарного углерода в процессе его осаждения на кремний ориентации (111), наиболее вероятным является формирование не одной структуры, а целого семейства различных поверхностных фаз типа Si (111)  $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ , имеющих адатомный тип или описываемых сотовой моделью тримеров [7]. В случае структуры  $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$  адатомного типа атомы адсорбированного углерода располагаются на практически объемоподобной поверхности Si (111) и занимают положение между тремя атомами верхнего слоя над атомами второго слоя (положение  $T_4$ ) (рис. 8, *b*). В случае, если атомы адсорбата расположены в положениях „сверху“ ( $T_1$ ), они также за счет образования между собой связей C = C могут сместиться к общему центру в положение  $T_4$ , в результате чего образуют тример. Закрепленные такими способами атомы углерода могут быть центрами новой углеродной островковой фазы.

В обоих видах адсорбции кремний–(углеродная фаза) на кремнии (111) будет иметь вид сотовой структуры в общем случае с несколькими сцепленными тримерами („звездочками“, см. рис. 6, *a*), каждый из которых имеет центр в положении  $T_4$ . При высокотемпературном (900°C) отжиге такой структуры в результате фазового перехода, который, как 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 (кривые 4 на рис. 3).

Таким образом, в зависимости от температуры осаждения и толщины покрытия, энергии ионно-химического воздействия в процессе плазмохимической подготовки атомно-чистой поверхности пластин кремния, а также их кристаллографической ориентации можно получать различные по размерам и форме конфигурации структурированных субмонослойных углеродных покрытий. Их использование в качестве масочных покрытий в процессе низкоэнергетичного высокоанизотропного СВЧ ПХТ позволяет получать в пластинах кремния интегральные наносистемы с заданными плотностью, размерами и формой пространственно-упорядоченных наноструктур.

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

## Список литературы

- [1] Леденцов Н.Н., Устинов В.М., Щукин В.А., Копьёв П.С., Алфёров Ж.И., Бимберг Д. // ФТП. 1998. Т. 32. № 4. С. 385–410.
- [2] Герасименко Н.Н., Пархоменко Ю.Н. Кремний — материал нанoeлектроники. М. Техносфера, 2007. 352 с.
- [3] Шаныгин В.Я., Яфаров Р.К. // ЖТФ. 2009. Т. 79. Вып. 12. С. 73–78.
- [4] Яфаров Р.К. Физика СВЧ вакуумно-плазменных нанотехнологий. М.: Физматлит, 2009. 216 с.

- [5] Болховитянов Ю.Б., Пчеляков С.И., Чикичев С.И. // УФН. Т. 171. № 7. С. 689–715.
- [6] Иевлев В.М., Трусов Л.И., Холмянский В.А. Структурные превращения в тонких пленках. М.: Металлургия, 1982. 247 с.
- [7] Оура К., Лифшиц В.Г., Саранин А.А., Зотов А.В., Катаяма М. Введение в физику поверхности. М.: Наука, 2006. 490 с.