

Прекурсорная самоорганизация при СВЧ вакуумно-плазменном осаждении субмонослойных углеродных покрытий на кристаллах кремния (100)

© Р.К. Яфаров[†]

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

(Получена 29 апреля 2014 г. Принята к печати 17 августа 2014 г.)

Методами сканирующих атомно-силовой и электронной микроскопии исследована кинетика самоорганизации наноразмерных доменов при осаждении субмонослойных углеродных покрытий на кремнии (100) в СВЧ плазме паров этанола низкого давления. Предложены модельные механизмы формирования кремний-углеродных доменов, которые основаны на использовании модели адсорбции Ленгмюра из прекурсорного состояния и современных представлений о модификации равновесной структуры верхнего атомного слоя кристаллических полупроводников под влиянием внешних воздействий.

1. Введение

Актуальной задачей современного полупроводникового материаловедения является разработка новых методов создания пространственных квантово-размерных систем на основе кремния и его соединений, представителями которых являются фотонные кристаллы, нанокомпозитные и нанопористые материалы. Основными методами создания таких структур в микро- и нанoeлектронике, включая нуль-мерные и пространственные, являются молекулярно-лучевая эпитаксия и осаждение из газовой фазы, которые основываются на самоорганизации наноструктур в процессе роста по механизму Странского–Крастанова. К сожалению, достигнутый на сегодня уровень поверхностной плотности самоорганизованных квантовых точек составляет всего $10^9 - 10^{10} \text{ см}^{-2}$; их максимальная объемная плотность также очень мала ($10^{15} - 10^{16} \text{ см}^{-3}$). Это не обеспечивает необходимого уровня эффективности приборов, созданных на их основе [1].

Одним из новых направлений разработки технологии получения 3D наноструктур со сверхвысокой поверхностной плотностью являются плазменные процессы конденсации из газовой фазы, использующие явление самоорганизации и особенности строения атомно-чистых поверхностей кристаллов — подложек различных кристаллографических ориентаций, которые позволяют управлять процессами зарождения и роста низко-размерных эпитаксиальных структур, плотностью стоков для адатомов. Использование свойств атомно-чистых поверхностей полупроводниковых кристаллов открывает новые возможности для создания не только сверхплотных поверхностных, но и принципиально новых пространственных квантово-размерных систем на их основе. В частности, полученные таким образом 3D островки в последующем при условии достаточной селективности травления могут быть использованы в качестве маскирующего покрытия для получения наноразмерных столбча-

тых наносистем путем высокоанизотропного травления материала матрицы. Примером таких покрытий являются углеродные островковые масочные покрытия на кремнии [2].

Целью работы — исследование кинетики структурирования субмонослойных углеродных покрытий на кристаллах кремния (100) для создания пространственных квантово-размерных систем путем использования высокоразрешающего плазмохимического травления и самоорганизующихся 3D углеродных островков в качестве нелитографических масочных покрытий суб-10 нм размера.

2. Методика и результаты исследования

Эксперименты, связанные с получением атомно-чистых поверхностей кристаллов кремния (100), осаждением субмонослойных углеродных покрытий и высокоанизотропным сухим травлением кремния с использованием полученных покрытий в качестве масочных, проводились в одном вакуумном технологическом цикле в установке с СВЧ ионно-плазменным источником на частоте 2.45 Гц [3]. Мощность СВЧ излучения и индукция магнитного поля составляли соответственно 250 Вт и 875 Гс. В качестве рабочего газа для получения атомно-чистой поверхности кристаллов кремния использовался аргон, травление пластин монокристаллического кремния с углеродным масочным покрытием осуществлялось в хладоне-14. Давление газов в процессах подготовки поверхности и сухого высокоанизотропного травления кремния было равным 0.1 Па и обеспечивало выполнение условий электронного циклотронного резонанса (ЭЦР), при котором степень ионизации плазмы составляла около 5%. СВЧ плазменная обработка в аргоне осуществлялась при смещении — 100 В в течение 5 мин. В этом случае высота микровыступов на атомно-чистой поверхности кремния является минимальной и

[†] E-mail: pirpc@yandex.ru

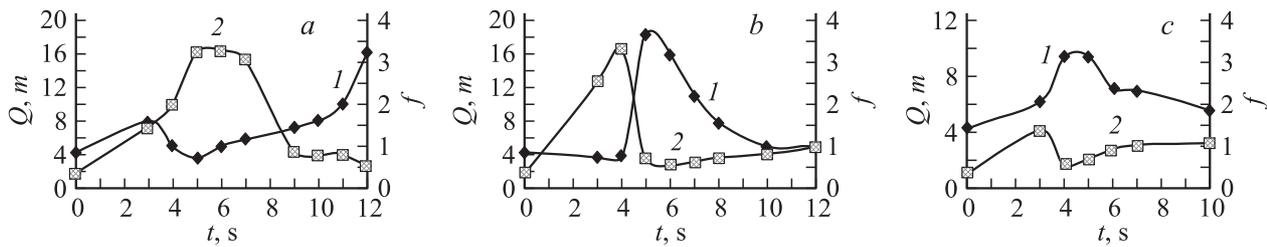


Рис. 1. Зависимости плотностей (1) и высот (2) выступов на кремнии (100) от длительности осаждения углеродного покрытия при различных температурах подложки, °С: *a* — 100, *b* — 200, *c* — 300.

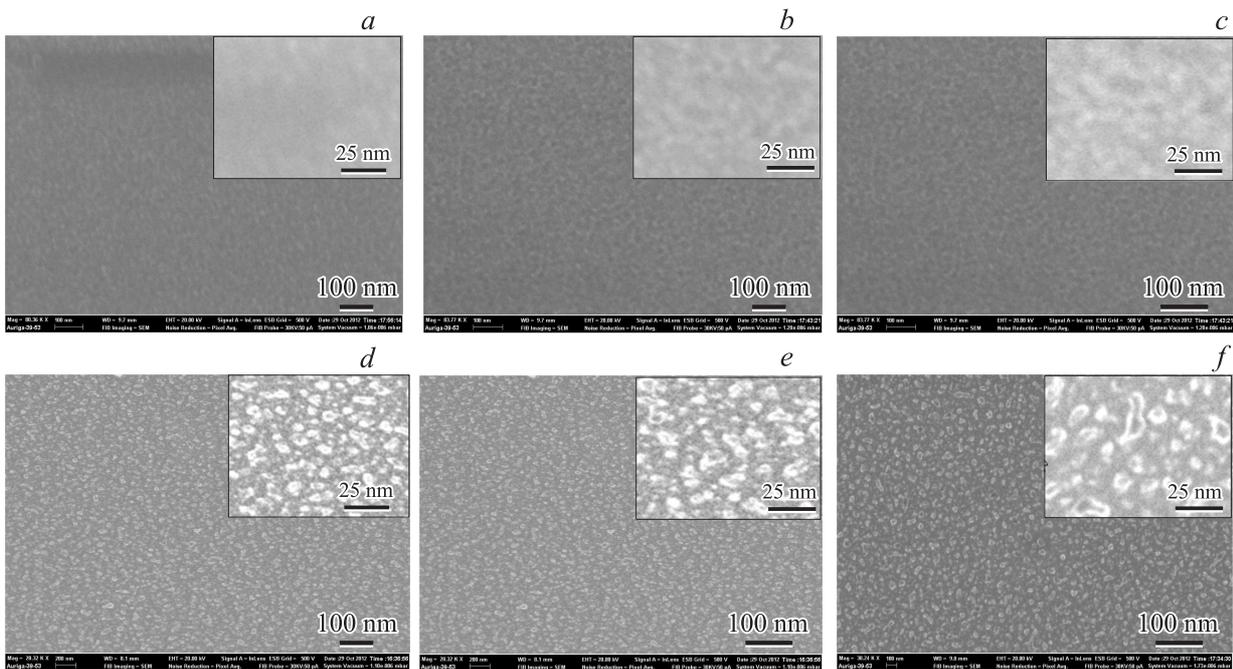


Рис. 2. СЭМ-изображения наноморфологий пластин кремния после травления в хладоне-14 с использованием самоорганизованных углеродных масочных покрытий, полученных при $T_s = 100^\circ\text{C}$ и различных длительностях осаждения, с: *a* — 3, *b* — 4, *c* — 5, *d* — 6, *e* — 7, *f* — 10.

составляет 0.2 нм, а их поверхностная плотность равна $4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ [4].

Осаждение углеродных покрытий осуществлялось в СВЧ плазме в условиях малой адсорбции с использованием в качестве рабочего вещества паров этанола при давлении 0.05 Па. Температуры осаждения варьировались в диапазоне от 100 до 300°C с интервалом 100°C. Потенциал смещения на подложкодержателе в процессах осаждения был равен -100 В .

Наноморфология поверхностей пластин кремния с углеродными покрытиями изучалась с помощью сканирующих атомно-силового (АСМ) и электронного микроскопов: Solver-P-47 и Auriga. В качестве зонда для АСМ использовались стандартные кремниевые кантилеверы CSG10 пирамидальной формы с радиусом закругления 10 нм и жесткостью 0.1 Н/м. Поле сканирования составляло $3 \times 3 \text{ мкм}$ при шаге сканирования 8 нм и шаге ЦАП пьезосканера по оси *Y*, равном 0.24 нм.

Схема регистрации отклонения кантилевера обеспечивает разрешение 0.1 нм при шаге АЦП пьезосканера по оси *Z*, равном 0.05 нм. Обработка результатов измерений производилась с использованием программного обеспечения АСМ.

На рис. 1 приведены кинетические зависимости параметров наноморфологии поверхности кремния (100) после осаждения углерода в СВЧ плазме паров этанола при различных температурах подложки. (Значениям координат при $t = 0$ соответствуют плотности и высоты микровыступов на кремниевых пластинах после их предварительной обработки в СВЧ плазме аргона). Общей характерной особенностью полученных зависимостей является наличие экстремумов высот выступов и их поверхностных плотностей, которые реализуются для каждой температуры осаждения при одинаковых длительностях процессов. Видно, что для $T_s = 100^\circ\text{C}$ минимумы значений плотностей и максимумы высот

выступов реализуются в практически одинаковых интервалах длительностей осаждения углерода, которые находятся между 4 и 7 с. Для $T_s = 200^\circ\text{C}$ (рис. 1, *b*) экстремумы реализуются при длительностях осаждения 5–6 с. Увеличение высот выступов с увеличением длительности осаждения при $T_s = 200^\circ\text{C}$ происходит более интенсивно, чем при $T_s = 100^\circ\text{C}$, однако их максимальная величина не изменяется. В обоих случаях она не превышает 3.5 нм. Спад высот и их стабилизация при $T_s = 200^\circ\text{C}$ начинаются при длительностях больше 4 с, что на 3 с раньше, чем при $T_s = 100^\circ\text{C}$. Для $T_s = 300^\circ\text{C}$ (рис. 1, *c*) наблюдается, так же как и для $T_s = 200^\circ\text{C}$, смещение экстремумов плотностей и высот микровыступов на 1–2 с в сторону меньших длительностей осаждения. Величины поверхностных плотностей и высот выступов в 1.5–2 раза меньше, чем при осаждении углеродного покрытия на более холодные подложки.

На рис. 2 приведены СЭМ-изображения наноморфологии пластин кремния (100) с углеродными покрытиями после высокоанизотропного СВЧ плазмохимического травления в хладоне-14 в течение 30 мин. Видно, что структурирование поверхности кремния после травления наблюдается только для длительностей осаждения, превышающих 5–6 с. Поверхностная плотность пространственных кремниевых наноструктур составляет при этом $(5-8) \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$. Согласно данным, приведенным на рис. 1, при таких длительностях осаждения высоты углеродных выступов достигают наибольших размеров (3–3.5 нм). При длительностях осаждения более 10 с использование углеродных покрытий в качестве масочных представляет меньший интерес из-за их однородности по толщине.

3. Обсуждение результатов

При вакуумно-плазменном осаждении из паров этанола (структурная формула $\text{CH}_3-\text{CH}_2-\text{OH}$) формирование углеродных покрытий на кристаллах кремния может осуществляться только в результате разложения и активации молекул и атомов, которые происходят за счет соударения с ускоренными электромагнитным полем электронами, и последующей адсорбции углерода на подложке. Основными процессами активации молекул паров этанола являются простая и диссоциативная ионизации, которые приводят к накоплению в плазме положительных углеродосодержащих ионов: CH_n^+ , где $n = 0, 1, 2, 3$, а также ионов водорода H^+ и групп OH^- . Поток углеродосодержащих ионов в течение 1 с при условии, что все они однозарядные, может быть определен из выражения

$$I_{c^+} = \alpha \frac{J}{q}, \quad (1)$$

где J — измеряемая плотность тока однозарядных ионов на подложку, q — заряд электрона, α — доля углеродосодержащих ионов в общем потоке ионов на подложку, которая, исходя из элементного состава

плазмы паров этанола и близких по величине значений энергий ионизации ее различных компонентов, может быть принята равной 0.5. Плотность тока J определяется характеристиками плазмы и величиной ускоряющего потенциала на подложкодержателе [3]. При СВЧ плазменном осаждении с плотностью тока 0.2 mA/cm^2 поток углеродосодержащих ионов на поверхность кремниевой пластины, рассчитанный по формуле (1), составляет $6.25 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$.

По аналогии с моделью адсорбции Ленгмюра [5] скорость адсорбции R при вакуумно-плазменном осаждении углеродных покрытий из этанола, которая определяется в каждый момент времени поверхностной концентрацией хемосорбированных атомов, можно представить произведением потока адсорбции углеродосодержащих ионов на их коэффициент прилипания s :

$$R = sI_{c^+}, \quad (2)$$

где, согласно [5],

$$s = \sigma f(\theta) \exp(-E_c/kT), \quad (3)$$

σ — коэффициент конденсации, который отвечает за передачу энергии адсорбированных частиц; $f(\theta)$ — функция, зависящая от покрытия, которая описывает вероятность адсорбата найти свободное адсорбционное состояние; $\exp(-E_c/kT)$ — бoльцмановский член, который обусловлен энергетикой активационной адсорбции; I_{c^+} — поток адсорбции углеродосодержащих ионов, который, согласно (1), определяется характеристиками плазмы и от температуры подложки не зависит. Отсюда следует, что экспериментальная зависимость поверхностной плотности кремний-углеродных кластеров, полученных при небольших длительностях осаждения, от температуры подложки с точностью до некоторого постоянного коэффициента (потока адсорбции углеродосодержащих ионов) будет определять зависимость коэффициента прилипания от температуры.

Так как осаждение углеродных покрытий на кремний (100) в СВЧ плазме осуществляется в условиях слабой адсорбции, то наиболее вероятным является механизм, при котором молекулярный углеродосодержащий ион, например CH_n^+ , где $n = 1, 2, 3$, при ударе о поверхность сначала диссоциирует до атомов углерода и водорода (диссоциативная адсорбция), которые в свою очередь затем хемосорбируются на активных центрах (оборванных поверхностных связях атомов) кристалла кремния. Энергия химической связи Si–C (4.55 эВ/молекулу) существенно больше, чем Si–H (3.13 эВ/молекулу). Это означает, что атомы водорода могут быть в конечном счете десорбированы в результате последующей бомбардировки углеродосодержащими ионами с образованием на этом месте более устойчивого химического соединения Si–C. Одновременно с процессом замещения атомов водорода может идти процесс спонтанного разрастания углеродосодержащих кластеров на связях Si–C \equiv , так как энергия химических связей атомов углерода между

собой (энергия связи С–С составляет 2.74 эВ/молекулу) существенно меньше, чем энергия, необходимая для хемосорбции углерода непосредственно на атомах кремния, а также разрыв относительно слабых димерных поверхностных связей атомов кремния с образованием более сильных связей Si–С.

Таким образом, хемосорбция атомов углерода на поверхностных атомах кремния может происходить не только прямо (случай простой неактивационной адсорбции), а через промежуточные (прекурсорные) состояния [5]. Прекурсорные состояния реализуются также и в том случае, когда на поверхность углерод попадает в виде ионов, свободных атомов или радикалов, которые могут диссоциировать и мигрировать по поверхности до тех пор, пока не займут хемосорбированное состояние с большей энергией связи. Процесс хемосорбции для этих случаев может быть представлен в виде энергетической диаграммы, когда потенциальная энергия взаимодействия адсорбата и атомов подложки

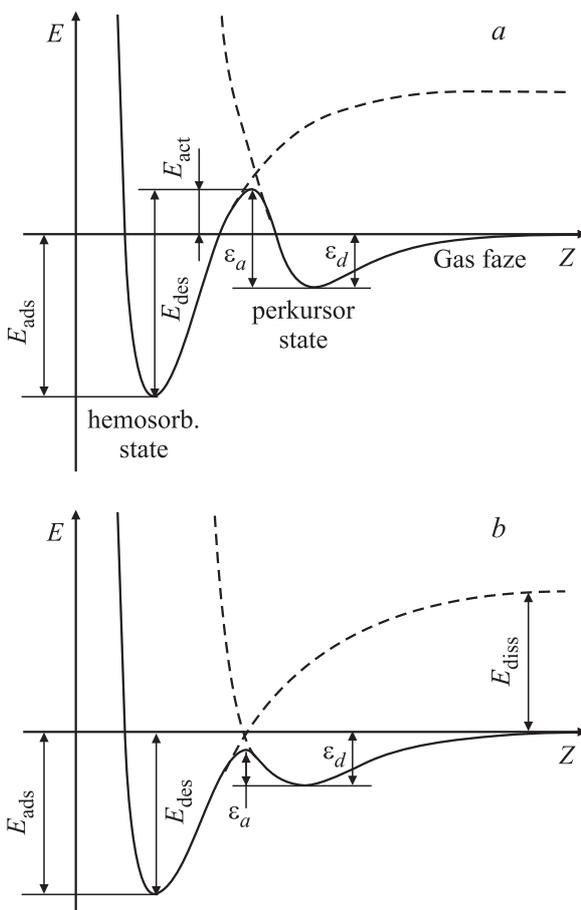


Рис. 3. Схематическое изображение кривых потенциальной энергии для прекурсорной хемосорбции [5]: *a* — активационная хемосорбция с активационным барьером $E_{act} = \epsilon_a - \epsilon_d$; *b* — безактивационная хемосорбция, когда $\epsilon_a < \epsilon_d$. E_{act} — энергия связи в хемосорбированном состоянии, E_{des} — барьер для десорбции из хемосорбированного состояния, E_{diss} — энергия диссоциации (ионизации) молекулы в газовой фазе.

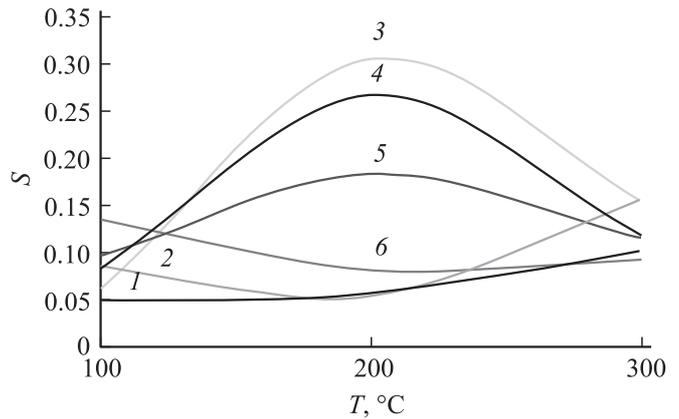


Рис. 4. Зависимости коэффициентов прилипания от температуры пластин кремния для $U_{sm} = -100$ В и различных длительностях осаждения углерода из плазмы паров этанола, с: 1 — 3, 2 — 4, 3 — 5, 4 — 6, 5 — 7, 6 — 10.

содержит две ямы: мелкую яму для физичесорбционного прекурсорного состояния и глубокую яму для конечного хемосорбированного состояния (рис. 3). Эти ямы разделены активационным барьером, величина которого и определяет температурную зависимость коэффициента прилипания.

Начальный коэффициент прилипания при прекурсорной хемосорбции, согласно [5], может быть записан в виде

$$s_0 = \left[1 + \frac{v_d}{v_c} \exp\left(-\frac{\epsilon_d - \epsilon_c}{kT}\right) \right]^{-1}, \quad (4)$$

где v_a и v_d — константы скоростей адсорбции и десорбции соответственно, ϵ_a и ϵ_d — барьеры для адсорбции и десорбции из прекурсорного состояния соответственно, $\epsilon_a - \epsilon_d$ — активационный барьер для хемосорбции. Если $\epsilon_d < \epsilon_a$, т.е. в случае активационной адсорбции, s_0 увеличивается с увеличением температуры. Если $\epsilon_d > \epsilon_a$, т.е. в случае безактивационной адсорбции, s_0 уменьшается с увеличением температуры.

Так как для большинства хемосорбированных систем $E_{ads} = E_{des} \gg kT_s$, то коэффициент прилипания для простой неактивационной адсорбции, как правило, практически не зависит от температуры подложки.

На рис. 4 на основании экспериментальных данных, приведенных на рис. 1, построены зависимости коэффициентов прилипания, определенных с использованием выражения (2), от температуры пластин кремния (100) при различных длительностях процессов. Согласно модели адсорбции Ленгмюра [5], наблюдаемые изменения характеров зависимостей коэффициентов прилипания от температуры свидетельствуют об изменениях механизмов хемосорбции, которые определяются величинами барьеров для адсорбции ϵ_a и десорбции ϵ_d из прекурсорного состояния. На рис. 5 приведены расчетные зависимости активационного барьера для хемосорбции $E_{act} = \epsilon_a - \epsilon_d$ от длительностей осаждения, полученные из экспериментальных графиков Аррениуса $(1/s_0 - 1)$,

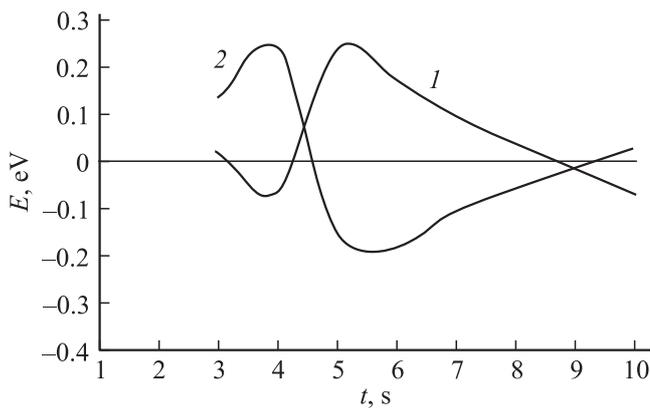


Рис. 5. Зависимости активационных барьеров хемосорбции от длительностей осаждения углеродных покрытий в СВЧ плазме паров этанола в различных интервалах температур пластин кремния (100), °С: 1 — (100–200), 2 — (200–300).

как функции $1/T$, для двух различных интервалов температур. Видно, что в интервале от 100 до 200°С при длительности осаждения 3 с $E_{act} \approx 0$. Это означает, что реализуется простая неактивационная адсорбция, при которой коэффициенты прилипания не зависят от температуры и имеют минимальные значения. При $t = 4$ и 10 с имеет место безактивационная хемосорбция с $\epsilon_a < \epsilon_d$. При длительностях осаждения от 5 до 7 с реализуется активационная хемосорбция из прекурсорного состояния. Изменение активационного барьера E_{act} при переходе от безактивационной хемосорбции к активационной в интервале длительностей от 4 до 5 с составляет более 0.3 эВ. Этот скачок E_{act} , связанный с изменением механизма хемосорбции, сопровождается, как следует из рис. 1, *b*, синхронным резким увеличением поверхностной плотности и уменьшением высот выступов в зависимости от длительностей осаждения углерода.

В интервале температур от 200 до 300°С активационная хемосорбция из прекурсорного состояния реализуется при длительностях осаждения 3 и 4 с. Увеличение E_{act} при увеличении длительности осаждения от 3 до 4 с обусловлено формированием на поверхности кремния большего по величине адсорбционного слоя углеродосодержащих атомов и радикалов, для активации перехода которых в хемосорбированное состояние требуется больше энергии. Следствием этого является то, что при $T_s = 300^\circ\text{C}$ коэффициент прилипания при 4 с в 2 раза больше, чем в предыдущем случае (рис. 5).

При длительностях осаждения от 5 до 7 с наблюдается безактивационная хемосорбция, при которой энергия адатомов превышает активационный барьер для прекурсорной хемосорбции. Это позволяет углероду диффузионным путем занять хемосорбционное состояние с образованием SiC≡ кластера. Изменение E_{act} при переходе от активационной к безактивационной хемосорбции в интервале длительностей от 4 до 5 с, так же как для интервала температур от 100 до 200°С, является

резким и составляет около 0.4 эВ. На кинетических зависимостях (рис. 1, *b*) при этом наблюдаются скачкообразные изменения поверхностной плотности выступов и их высот, которые могут быть интерпретированы как поверхностный фазовый переход [5].

При длительностях осаждения около 10 с для обоих интервалов температур E_{act} уменьшается и стремится к нулю. Поверхностные плотности и высоты выступов от длительностей осаждения при этом достигают минимальных значений (рис. 1). Это свидетельствует о том, что механизм хемосорбции для обоих интервалов температур при больших длительностях осаждения становится одинаковым и близким к случаю простой неактивационной адсорбции [5].

Согласно рассмотренным механизмам адсорбции и кинетике изменения активационного барьера E_{act} , полученные экспериментальные результаты по структурированию субмонослойных углеродных покрытий на кремнии (100) можно представить следующим образом. При коротких длительностях осаждения (3–4 с) в интервале температур от 100 до 200°С в результате простой неактивационной и безактивационной хемосорбции из прекурсорного состояния углеродосодержащих ионов и радикалов на атомно-чистой поверхности кремния (100) образуется разреженный массив практически не взаимодействующих друг с другом Si–C-кластеров (рис. 3, *a, b*). Поверхностная плотность этого массива определяется плотностью тока и энергией углеродосодержащих ионов, бомбардирующих подложку, сечением их взаимодействия с поверхностными атомами кремния, температурой подложки, коэффициентом аккомодации и рядом других факторов [3].

После образования массива Si–C-кластеров условия для осаждения углеродосодержащих ионов и радикалов плазмы паров этанола существенно изменяются. Изменение условий хемосорбции определяет более быстрый рост выступов по сравнению с ростом их поверхностной плотности. Так, из рис. 1, *a* и *b*, видно, что в течение 3–4 с осаждения высоты выступов увеличиваются больше чем на порядок (от 0.2 до 3.5 нм), а их поверхностная плотность — всего в 0.8–2 раза. Рост выступов на Si–C-кластерах осуществляется в результате формирования и разрастания островков гидрогенизированной углеродной фазы, состоящей из различных комплексов вида, Si–C–Si, C–C, C–CH_n и др. Такая поверхностная фаза на кремнии за счет разнородности химических связей является механически напряженной и имеет повышенную свободную энергию. Возникающие упругие деформации, при определенных размерах (высоте) выступов, делают систему энергетически невыгодной. В результате этого поверхностный кремний-углеродосодержащий слой испытывает фазовую перестройку, которая сопровождается уменьшением свободной энергии и формированием на поверхности кремния взамен димерных Si=Si связей новой доменной Si–C поверхностной фазы (рис. 3, *d, e*). Такая перестройка выражается в скачкообразном изменении наномор-

фологии поверхностного слоя (рис. 1). Фазовая перестройка сопровождается переходом хемосорбированных на связях C—C углеродных атомов (из прекурсорного состояния) в хемосорбированное Si—C состояние с большей энергией связи. После перестройки (при больших длительностях осаждения) поверх Si—C доменной фазы формируется более термодинамически стабильная гидрогенизированная углеродная поверхностная фаза. Кинетика изменения наноморфологии и активационного барьера E_{act} при этом характеризуется постепенным уменьшением — уменьшаются плотности выступов и их высоты (рис. 1, *b, c*). Это является признаком уменьшения напряжений в формирующемся покрытии углерода на углероде [1]. Энергия активации хемосорбции при этом существенно меньше, чем при формировании SiC соединений.

Динамика самоорганизации хемосорбированного поверхностного слоя на кремнии (100) зависит от температуры подложки и длительности процесса осаждения. Так, при низких температурах подложки ($T_s = 100^\circ\text{C}$) за счет низкой диффузионной подвижности адатомов фазовая перестройка поверхностного слоя начинается позже, чем при более высоких температурах, и характеризуется плавным изменением со временем высоты и поверхностной плотности островков старой и новой поверхностных фаз (рис. 1, *a* и 3). Наиболее резко поверхностная фазовая перестройка осуществляется при $T_s = 200^\circ\text{C}$. Она характеризуется резким и синхронным изменением как высоты, так и поверхностной плотности островковых нанобразований (рис. 1, *b*). При более высоких температурах подложек ($T_s \geq 200^\circ\text{C}$) из-за сильной поверхностной диффузии и большего пересыщения, вызванного термической диссоциацией адсорбированных атомов и радикалов, превалирующими становятся диффузионные механизмы перестройки поверхности покрытия в процессе осаждения [6], которые способствуют снижению механических напряжений в поверхностном слое еще в процессе его формирования. В результате этого поверхностная плотность и высоты неровностей наноморфологии поверхности в 1.5–2 раза меньше, чем при осаждении при более низких температурах подложек (рис. 1, *c*).

Атомная перестройка поверхности кремния с образованием наноразмерных SiC доменов является причиной наблюдаемого в экспериментах резкого изменения активационного барьера E_{act} и механизмов хемосорбции углерода в зависимости от температуры подложки и длительности осаждения. Так, при температуре подложки 100°C с увеличением длительностей осаждения от 5 до 7 с механизм является активационным с уменьшающейся величиной барьера для прекурсорной хемосорбции (рис. 5). Это обусловлено переходом от формирования Si—C поверхностных связей к формированию C—C связей с равномерно слоевым ростом толщины покрытия. Максимальный коэффициент прилипания, равный 0.3, реализуется в момент поверхностной фазовой перестройки.

При длительностях осаждения больше 7 с, когда покрытие кремния углеродом с образованием SiC доменов $\Theta \rightarrow 1$, превалирующим становится механизм зародышеобразования и роста слоя углерода на углероде. Первоначально рост слоев углерода осуществляется на границе монослоев Si—C \equiv , обладающих повышенной поверхностной энергией из-за разности параметров химической связи Si—C и C—C, который вызывает новый рост плотности островковых образований (рис. 1, *a*). В результате на границе с Si—C формируется переходный (релаксационный) гидрогенизированный углеродный слой с постепенным заравниванием впадин (пустот) между островками. Это уменьшает высоты выступов по сравнению со случаем только адсорбционного роста с образованием Si—C \equiv кластеров.

При $T_s \geq 200^\circ\text{C}$ (рис. 1, *b*) за счет увеличения пересыщения и миграции происходит более быстрое покрытие поверхности кремния SiC \equiv кластерами и разрастание на них углеродосодержащей фазы. Из-за этого хемосорбция приобретает активационный характер уже при длительностях осаждения 3 и 4 с. При длительностях больше 5 с из-за фазовой поверхностной перестройки и формирования C—C слоя на SiC-доменах осуществляется практически безактивационное и равномерное по толщине осаждение углерода на углероде с высотой выступов, не превышающей 1 нм. При этом преобладающим механизмом, как уже говорилось, становится простая неактивационная хемосорбция углерода на углероде, приводящая в процессе роста углеродной фазы к релаксации контактных механических напряжений и уменьшению свободной энергии поверхности. В результате этого плотность зародышей углеродной фазы убывает по мере снижения контактных механических напряжений с последующей стабилизацией на некотором более низком стационарном уровне, соответствующем заданному ионно-плазменному энергетическому воздействию (рис. 1, *b, c*).

При увеличении температуры подложки до 300°C атомная перестройка поверхностного слоя кремния с формированием промежуточного Si—C \equiv монослоя и рост гидрогенизированного углеродного покрытия осуществляются в более термодинамически равновесных условиях. Это выражается, по сравнению с конденсацией на более холодных подложках, в меньших поверхностных плотностях выступов и их высот (рис. 1, *c*).

Высокая селективность травления кремния и углерода в некоторых химически активных газовых средах позволяет использовать образующиеся углеродные островки в качестве безлитографических масочных покрытий для получения интегральных наноразмерных столбчатых структур в кристаллах кремния (100) с использованием высокоразрешающего плазмохимического травления.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ.

Список литературы

- [1] Н.Н. Герасименко, Ю.Н. Пархоменко. *Кремний — материал наноэлектроники* (М., Техносфера, 2007).
- [2] В.Я. Шаныгин, Р.К. Яфаров. *ФТП*, **45** (11), 1542 (2011).
- [3] Р.К. Яфаров. *Физика СВЧ вакуумно-плазменных нанотехнологий* (М., Физматлит, 2009).
- [4] В.Я. Шаныгин, Р.К. Яфаров. *ФТП*. **47** (4), 447 (2013).
- [5] К. Оура, В.Г. Лифшиц, А.А. Саранин, А.В. Зотов, М. Катаяма. *Введение в физику поверхности* (М., Наука, 2006).
- [6] В.М. Иевлев, Л.И. Трусов, В.А. Холмянский. *Структурные превращения в тонких пленках* (М., Металлургия, 1982).

Редактор Т.А. Полянская