

УДК 537.533.2, 004.023

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КИНЕТИКИ САМООРГАНИЗАЦИИ СУБНАНОРАЗМЕРНЫХ УГЛЕРОДНЫХ МАСОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ НА КРИСТАЛЛАХ КРЕМНИЯ (100)

Статья поступила в редакцию 01.12.2018, в окончательном варианте – 28.12.2018.

Яфаров Равиль Кяшиафович, Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук, 410019, Российская Федерация, г. Саратов, ул. Зеленая, 38, доктор технических наук, профессор, e-mail: rirrc@yandex.ru

Шаныгин Виталий Яковлевич, Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук, 410019, Российская Федерация, г. Саратов, ул. Зеленая, 38, кандидат технических наук, научный сотрудник, e-mail: vitairerun@mail.ru

Впервые с использованием методов сканирующей атомно-силовой и электронной микроскопии зафиксирована кинетика самоорганизации наноразмерных доменов при осаждении субмонослойных углеродных покрытий на кремнии (100) в СВЧ плазме паров этанола низкого давления. Исследовано влияние кинетической энергии углеродосодержащих ионов на кинетику структурирования углеродных кластеров на атомно-чистой поверхности кристаллов кремния (100). В рамках кинетического подхода предложена математическая модель, устанавливающая связи между скоростями осаждения углеродных покрытий как функции внешних переменных, характеризующих плазменный процесс, таких как температура подложки и плотность потока адсорбции углеродосодержащих ионов. Показано, что полученные наноразмерные углеродсодержащие домены могут быть использованы в качестве масочных покрытий для получения с использованием высокоанизотропного плазмохимического травления пространственных низкоразмерных систем на монокристаллическом кремнии (100).

Ключевые слова: углеродное покрытие, микроволновая плазма, кремний, плазмохимическое травление, низкоразмерная система, катодная матрица, кинетика самоорганизации, математическая модель

Графическая аннотация (Graphical annotation)



**MATHEMATICAL MODELLING OF KINETICS
OF SELF-ORGANIZATION OF SUBNANODIMENSIONAL
CARBON MASK COVERINGS ON CRYSTALS OF SILICON (100)**

The article was received by editorial board on 01.12.2018, in the final version – 28.12.2018

Yafarov Ravil Kyashshafovich, Saratov Branch of the Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronic of Russian Academy of Sciences, 38 Zelenaya St., Saratov, 410019, Russian Federation, Doct. Sci. (Engineering), Professor, e-mail: pirpc@yandex.ru
Shanygin Vitalii Yakovlevich, Saratov Branch of the Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronic of Russian Academy of Sciences, 38 Zelenaya St., Saratov, 410019, Russian Federation, Cand. Sci. (Engineering), Researcher, e-mail: vitairerun@mail.ru

For the first time with use of methods scanning atomic-force and electronic microscopy the kinetics of self-organization of nanodimensional domains is recorded at sedimentation of submonolayer carbon coverings on silicon (100) in the microwave to plasma of vapors of ethanol of low pressure. Influence of kinetic energy the carbonaceous of ions on kinetics of structuring carbon clusters on a atomic and pure surface of crystals of silicon (100) is investigated. Within kinetic approach the mathematical model establishing connection between speeds of sedimentation of carbon coverings as functions of the external variables characterizing plasma process such as temperature of a substrate and density of a stream of adsorption of carbon-bearing ions is offered. It is shown that the received nanodimensional carboniferous domains can be used in quality the shadow-mask-type of coverings for receiving with use of high anisotropic plasmochemical etching of spatial low-dimensional systems on single-crystal silicon (100).

Key words: carbon covering, microwave plasma, silicon, plasmochemical etching, low-dimensional system, cathode matrix, self-organization kinetics, mathematical model

Введение. Актуальной задачей современного полупроводникового материаловедения является разработка новых методов создания квантово-размерных систем на основе кремния и его соединений [3]. Благодаря наноструктурированию преодолена трудность использования кремния из-за низкой вероятности излучательной рекомбинации, обусловленной запретом на прямые переходы носителей в процессе рекомбинации. Тем самым дан новый импульс широкого применения кремния в опто- и микроэлектронике, а также в качестве катодных матриц для автоэлектронной эмиссии при интеграции элементов вакуумной электроники с кремниевой микроэлектроникой [14].

Не менее актуальным в настоящее время является разработка методов создания пространственно упорядоченных квантово-размерных структур, представителями которых являются фотонные кристаллы и нанокompозитные материалы. Наиболее распространенные сегодня подходы к решению этой задачи заключаются в использовании пористого кремния [10]. Важным фактором, определяющим свойства таких наноматериалов, является влияние матрицы и среды нахождения объектов с размерно-зависимыми свойствами [2]. На их основе возможно создание различных нелинейных оптических наносистем для оптических преобразователей, получение светоперестраиваемых диодов и лазеров с изменением длины волны и др. Такие устройства могут быть использованы, в частности, в информационно-измерительном оборудовании [8,9], в том числе исследовательского назначения.

В настоящее время известно [8], что одним из основных управляющих факторов, способствующих упорядочению 3D-островков при создании квантово размерных систем как по размерам, так и по их пространственному распределению, является наноморфология поверхности, на которой эти островки формируются. Одним из путей управления параметрами поверхности является литография: создание окон на подложке, ограничивающих область сбора адатомов в островки и отделяющих островки друг от друга. Однако существующие литографические методы высокого разрешения обладают недостатками, которые ограничивают область их использования экспериментальными исследованиями [7]. 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 при создании масочных наноструктур с использованием атомной структуры чистых поверхностей полупроводниковых кристаллов [15]. Получение равновесных массивов трехмерных островков нанометровых размеров инородных материалов со сверхвысокой поверхностной плотностью и последующее их использование в качестве самоорганизованных масочных покрытий для высокоразрешающего травления не только открывают широкие возможности создания упорядоченных нанообъектов на поверхности и в объеме кристалла без применения литографических методов, но и вносят новое понимание в структурные процессы на поверхности кристаллов. Особенности строения решетки и наноморфологии поверхности монокристаллов являются факторами, которые могут обеспечить управление процессами зарождения и роста низкоразмерных эпитаксиальных структур, плотностью стоков для адатомов [6, 9]. Таким образом, использование свойств наноморфологии атомно-чистых поверхностей кристаллов различных кристаллографических ориентаций открывает возможности для создания принципиально новых двух- и трехмерных квантово-размерных систем [1, 9].

В связи с этим целью работы является исследование кинетики структурирования субмонослойных углеродных покрытий на кристаллах кремния (100) для создания пространственных квантово-размерных систем путем использования высокоразрешающего плазмохимического травления и самоорганизующихся островковых масочных покрытий суб-10 нм размера.

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 (рис. 1) на частоте 2,45 ГГц [13]. Мощность СВЧ излучения и индукция магнитного поля составляли, соответственно, 250 Вт и 875 Гс. Получение экспериментальных образцов включало следующие стадии технологического процесса: 1 – подготовка (очистка) поверхности кремния от естественных защитных покрытий методами низкоэнергетического плазмохимического травления (ПХТ) [4,5,11]; 2 – осаждение островкового субмонослойного углеродного покрытия; 3 – высокоанизотропное СВЧ ПХТ пластин кремния с осажденным углеродным масочным покрытием [12]. 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%. Плазмохимическое осаждение углеродных покрытий осуществлялось в условиях малой адсорбции при давлении паров этанола около 0,05 Па. Температуры осаждения варьировались в диапазоне от 100⁰С до 300⁰С с интервалом 100⁰С. Потенциал смещения на подложкодержателе в процессах осаждения изменялся в диапазоне от -100 до – 300 В (рис. 1).

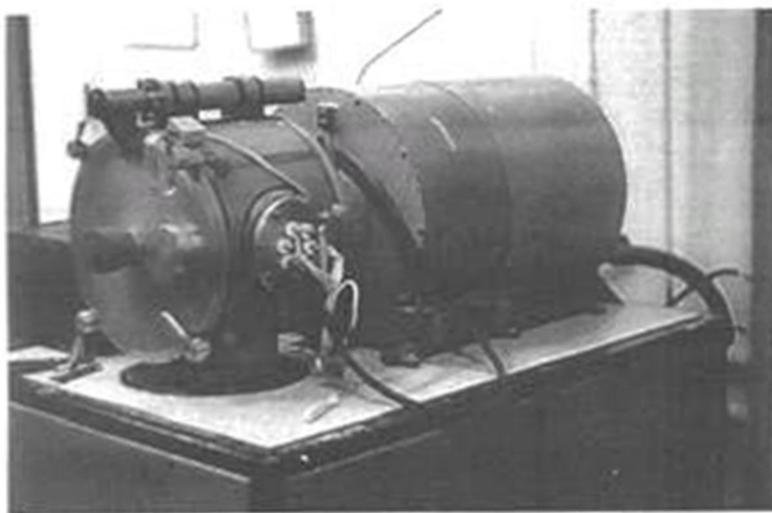


Рисунок 1 – Экспериментальная установка СВЧ вакуумно-плазменного травления и осаждения субнаноразмерных углеродных масочных покрытий

Наноморфология поверхностей пластин 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 0,1Н/м. Поле сканирования составляло 3 x 3 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 этого микроскопа.

Для $U_{см} = -100$ В (кривые 1 рис. 2) зависимость плотности микровыступов от длительностей осаждения имеет два участка роста, разделенные между собой областью, в которой они находятся на уровне исходной (без осаждения углерода) плотности выступов поверхности кремния. В интервале длительностей осаждения от 5 до 7 с высоты выступов имеют один максимум, после чего они уменьшаются и при $t > 9$ с достигают постоянных значений, аналогичных тем, что были до осаждения углерода, а плотность выступов растет по степенному закону. Экстремумы плотностей и высот выступов реализуются в практически одинаковых интервалах длительностей процессов осаждения углерода, которые находятся между 4 и 7 с.

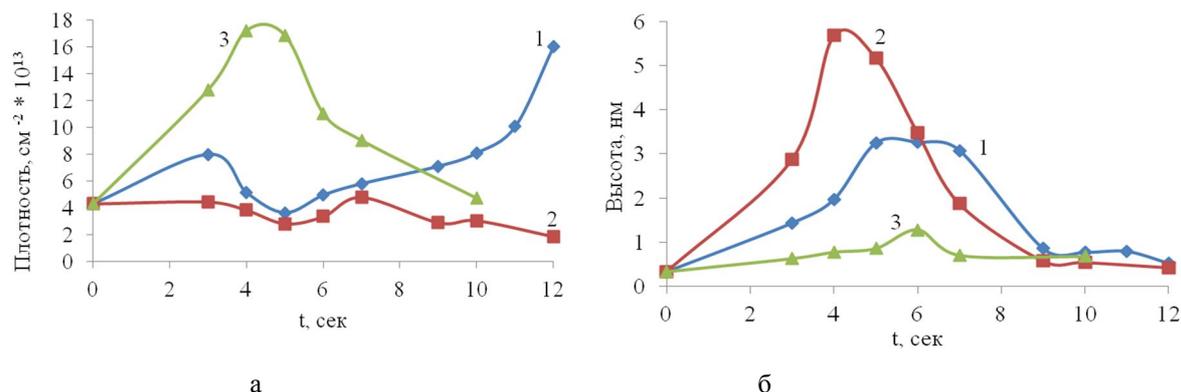


Рисунок 2 – Зависимости плотностей (а) и высот микровыступов (б) от длительности осаждения углерода на пластины кремния (100) при $T_n = 100^\circ\text{C}$ и различных смещениях на подложкодержателе: 1 – $U_{cm} = -100\text{В}$; 2 – $U_{cm} = -200\text{В}$; 3 – $U_{cm} = -300\text{В}$

При $U_{cm} = -200\text{ В}$ для плотностей выступов при больших длительностях осаждения углерода наблюдается небольшой экстремум с последующим уменьшением. Другим принципиальным различием зависимостей для $U_{cm} = -100\text{ В}$ и $U_{cm} = -200\text{ В}$ является то, что экстремум высот выступов в последнем случае является более острым, большим по величине почти в 2 раза и реализуется он при меньших длительностях осаждения равных 4–5 с (рис. 2б). Сдвиг длительностей с экстремумами высот в меньшую сторону составляет около 2 с.

При увеличении смещения до -300 В (кривые под номером 3) на зависимости для плотностей выступов наблюдается один ярко выраженный экстремум - максимум, величина которого в 2–4 раза больше, по сравнению с режимами с меньшими U_{cm} . Максимум реализуется при длительностях осаждения равных 4–5с, после которого происходит достаточно быстрое уменьшение плотности до величины равной плотности микровыступов на пластине кремния после ее травления в плазме аргона. Высоты микровыступов для всех длительностей осаждения остаются практически одинаковыми и близкими к высоте микровыступов на исходной пластине кремния. Это свидетельствует о практически послойно-равномерном осаждении углеродного покрытия в течение всех длительностей процессов.

Видно, что для $U_{cm} = -100\text{ В}$ (рис. 3) при коротких длительностях осаждения (3–4 с) плотности выступов, в отличие от более низкой температуры осаждения, не увеличиваются с увеличением длительностей процессов, а уменьшаются. Резкий рост плотностей наблюдается при длительностях осаждения 5–6 с, после чего они вновь уменьшаются по степенному закону и при длительностях больше 7 с стабилизируются на уровне, близком к плотности выступов на исходной кремниевой пластине. Нарастание высот выступов с увеличением длительности осаждения происходит более интенсивно, чем при $T_n = 100^\circ\text{C}$, однако их максимальная величина не изменяется. В обоих случаях она не превышает 3,5 нм. Следует отметить, что резкий рост плотности и резкий спад высот выступов реализуются одновременно. Спад высот и их стабилизация при $T_n = 200^\circ\text{C}$ начинаются при длительностях больше 4 с, что на 3 с раньше, чем при $T_n = 100^\circ\text{C}$.

При увеличении смещения до $U_{cm} = -200\text{В}$ плотности выступов при длительностях осаждения больше 3с монотонно увеличиваются с точкой перегиба около 7 с. Скорость увеличения высот и их абсолютные значения меньше, чем при $U_{cm} = -100\text{В}$. Экстремум высот неровностей покрытия реализуется позже. Однако участки наиболее резкого роста плотностей выступов и спада высот реализуются, как и в предыдущем случае, практически одновременно, но с задержкой на 1 с.

При увеличении U_{cm} до -300 В характер зависимостей, по сравнению с предыдущим случаем, практически не изменяется. Отличием является то, что при длительностях больше 7 с плотности выступов выходят практически на насыщение. Насыщение реализуется при плотностях выступов порядка $2,4 \cdot 10^{14}\text{ см}^{-2}$, что весьма близко к предельной расчетной поверхностной плотности ненасыщенных связей на кремнии (100). Высоты выступов, хотя и повторяют ход зависимостей для $U_{cm} = -200\text{В}$, но остаются на уровне высот выступов исходной пластины. То есть, так же как при $T_n = 100^\circ\text{C}$, наблюдается практически послойно-равномерное осаждение углеродного покрытия для всех длительностей процессов.

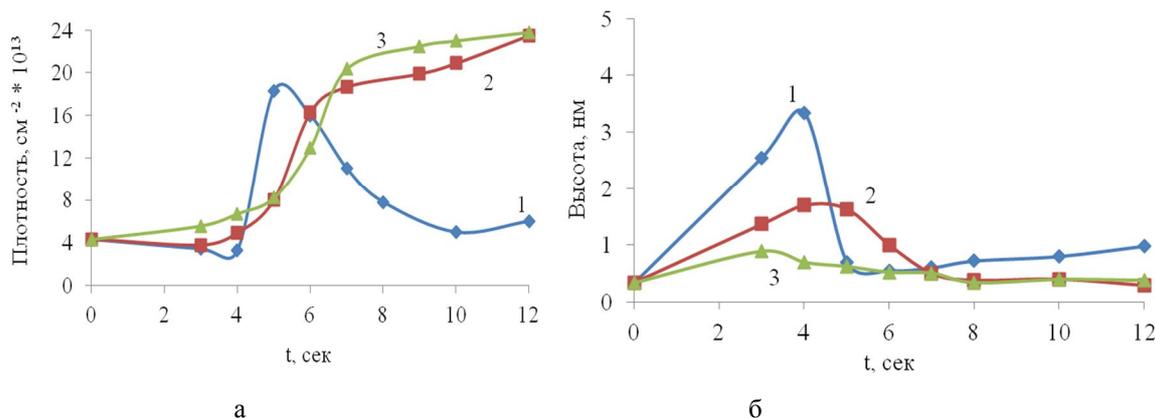


Рисунок 3 – Зависимости плотностей (а) и высот микровыступов (б) от длительности осаждения углерода на пластины кремния (100) при T_п = 200°C и различных смещениях на подложкодержателе: 1 – U_{см} = -100 В; 2 – U_{см} = -200 В; 3 – U_{см} = -300 В.

Обсуждение полученных результатов. При вакуумно-плазменном осаждении из паров этанола в условиях малой адсорбции формирование углеродных покрытий на кристаллах кремния может осуществляться только в результате разложения и активации молекул и атомов паров этанола (структурная формула C₂H₅OH или CH₃-CH₂-OH), которые происходят за счет соударения с ускоренными электромагнитным полем электронами, и последующей адсорбции углеродосодержащих ионов на подложке. Поток таких ионов в течение 1с при условии, что все они однозарядные, может быть определен из выражения:

$$I_+ = \alpha \frac{J}{q}, \tag{1}$$

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 парциального состава плазмы паров этанола, составляет величину близкую к 0,5. Величина J определяется характеристиками плазмы и величиной ускоряющего потенциала на подложкодержателе.

Согласно модели адсорбции Ленгмюра [12], скорость адсорбции R можно представить как произведение потока адсорбции углеродосодержащих ионов на их коэффициент прилипания s :

$$R = s I_{c+}, \tag{2}$$

где I_{c+} – поток адсорбции углеродосодержащих ионов.

Общее выражение для коэффициента прилипания в случае активационной адсорбции записывается, согласно [6], как:

$$\tag{3}$$

где σ – коэффициент конденсации, который отвечает за передачу энергии адсорбированных частиц; – функция, зависящая от покрытия, которая описывает вероятность адсорбата найти свободное адсорбционное состояние; – Больцмановский член, который обусловлен энергетикой активационной адсорбции.

Из приведенных выражений следует, что температурная зависимость коэффициента прилипания, представленная в (3), может определяться только температурной зависимостью скорости адсорбции, которая в каждый момент времени зависит от поверхностной концентрацией хемосорбированных атомов (кластеров) углерода на кремнии. И наоборот, экспериментальная зависимость поверхностной плотности кремний-углеродных кластерных образований от температуры подложки, с точностью до некоторого постоянного коэффициента (потока адсорбции углеродосодержащих ионов), будет определять зависимость коэффициента прилипания от температуры.

Согласно модели адсорбции Ленгмюра [12], изменение характеров зависимостей коэффициентов прилипания от температуры свидетельствует об изменении механизмов хемосорбции (рис. 4).

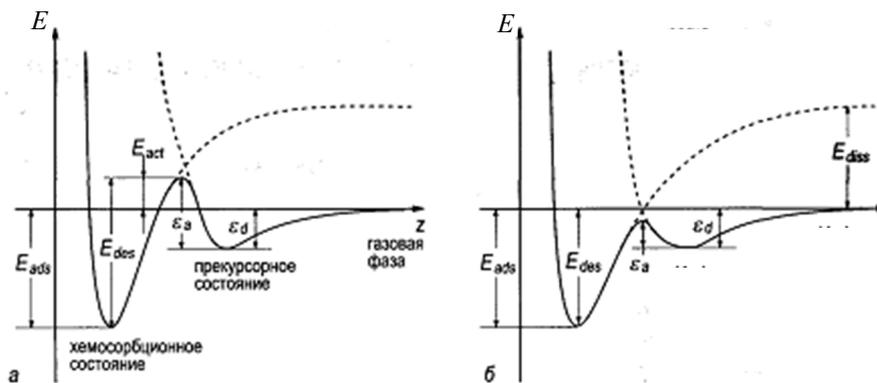


Рисунок 4 – Схематическое изображение кривых потенциальной энергии для прекурсорной хемосорбции [12]: а – активационная хемосорбция с активационным барьером б – безактивационная хемосорбция, когда $\varepsilon_a < E_{act}$ – энергия связи в хемосорбированном состоянии, E_{des} – барьер для десорбции из хемосорбированного состояния, E_{diss} – энергия диссоциации (ионизации) молекулы в газовой фазе

С увеличением длительностей осаждения при остальных фиксированных параметрах режима наблюдаются переходы от активационной хемосорбции из прекурсорного состояния к безактивационной хемосорбции. Длительности, при которых осуществляются переходы от одного механизма к другому зависят от температуры подложки и смещения в процессе плазменного осаждения. Переходы между механизмами адсорбции сопровождаются на кинетических зависимостях синхронным скачкообразным ростом поверхностных плотностей выступов на кремнии и снижением их высот (рис. 2, 3).

Уменьшение длительностей осаждения, при которых осуществляется переход от активационной хемосорбции из прекурсорного состояния к безактивационной (диффузионной) хемосорбции, с увеличением температуры подложки обусловлено увеличением пересыщения за счет термической диссоциации на поверхности и поверхностной миграции адатомов, позволяющих быстрее преодолевать активационные барьеры.

Коэффициенты прилипания, кроме температуры, зависят также от роста кинетической энергии углеродосодержащих ионов. Наиболее существенно эффективность хемосорбции увеличивается при $U_{см} > -200$ В (рис. 5).

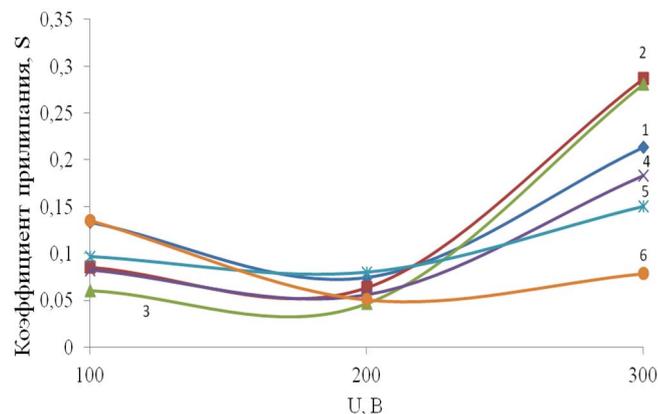


Рисунок 5 – Зависимости коэффициентов прилипания от потенциала смещения при $T_n = 100^\circ\text{C}$ для различных длительностей осаждения углерода из паров этанола на кремний (100): 1–3 с; 2–4 с; 3–5 с; 4–6 с; 5–7 с; 6–10 с

Основной причиной изменения механизма хемосорбции при увеличении смещения является повышение кинетической энергии бомбардирующей поверхность кремния углеродосодержащих ионов, которая, также как и нагрев подложки, приводит к повышению энергии адсорбированных на подложке частиц и уменьшению активационного барьера $E_{act} = \varepsilon_a - \varepsilon_d$ вплоть до отрицательных значений.

На рисунках 6, 7 приведены СЭМ – изображения кремниевых наноструктур, полученных после высокоанизотропного СВЧ плазмохимического травления в хладоне – 14 в течение 30 минут пластинок кремния с самоорганизованными углеродными масочными покрытиями в виде наноразмерных островковых образований. Из рисунка 6 видно, что наноструктурирование поверхности кремния после травления наблюдается только для длительностей осаждения в 6 с и больше. Этот результат соответствует данным,

приведенным на рисунке 2, согласно которым высоты углеродных кластеров достигают наибольших размеров (3–3,5 нм) именно при таких длительностях осаждения, а плотности наноструктур остаются на одинаковом уровне. При длительностях осаждения менее 6 с использование углеродных островковых образований в качестве масочных покрытий представляет меньший интерес из-за недостаточной селективности травления кремния и углерода в хладоне 14. Из рисунка 7б можно видеть, что глубина травления кремния через самоорганизованное углеродное островковое покрытие может достигать 50 нм при диаметре выступов 20–30 нм. Поверхностная плотность пространственных кремниевых наноструктур составляет в этом случае $(2-5) \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$.

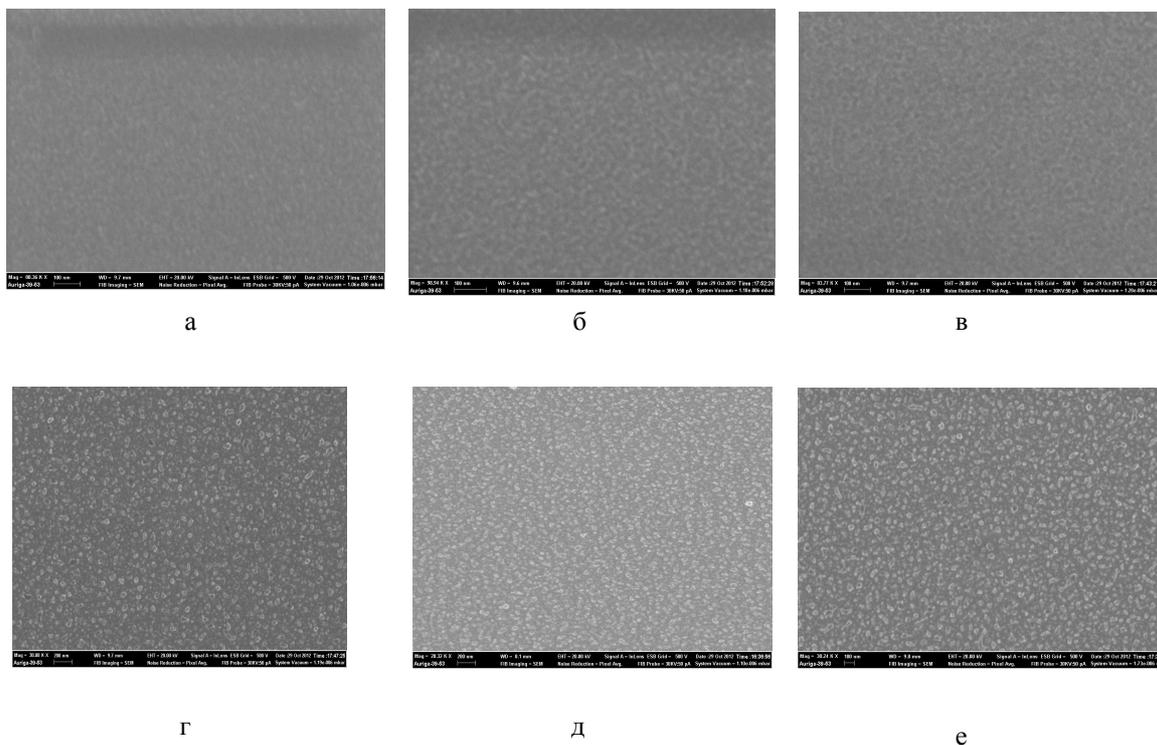


Рисунок 6 – СЭМ – изображения наноморфологий после травления пластин кремния в хладоне – 14 с использованием самоорганизованных углеродных масочных покрытий, полученных при $U_{CM} = -100 \text{ В}$ и $T_{II} = 100^\circ\text{C}$ и различных длительностях процессов: а – 3 с; б – 4 с; в – 5 с; г – 6 с; д – 7 с; е – 10 с

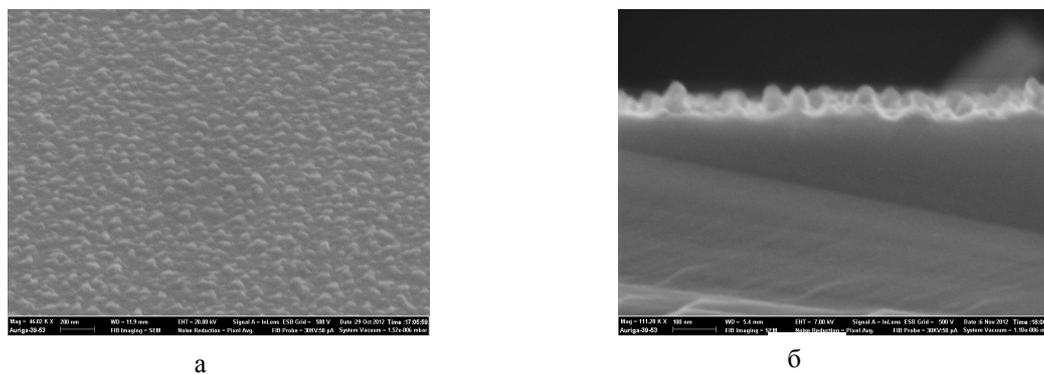


Рисунок 7 – СЭМ – изображения пространственных наноструктур после травления пластин кремния в хладоне – 14 с использованием самоорганизованных углеродных масочных покрытий, осажденных в течение 7с в СВЧ плазме паров этанола при $U_{CM} = -100 \text{ В}$ и $T_{II} = 100^\circ\text{C}$: а – вид под углом 63° ; б – изображение на сколе пластины

Заключение. При осаждении углеродных покрытий на кристаллах кремния (100) из паров этанола в микроволновой плазме в условиях слабой адсорбции основными процессами при малых длительностях осаждения являются не классические диффузионные механизмы зародышеобразования и роста тонких пленок из газовой фазы активированной электрическим разрядом, а процессы, которые могут быть интерпретированы в рамках предложенной математической модели, основанной на атомных механизмах адсорбции и десорбции Лэнгмюра. Установление строгой аналитической взаимосвязи между характеристиками процессов плазменного осаждения и параметрами модели Лэнгмюра позволяет адекватно описать механизмы формирования углеродных покрытий, а также определить способы воздействия для получения заданных характеристик покрытий.

Выполненные экспериментальные исследования свидетельствуют, что самоорганизованные наноструктурные углеродные образования, формирующиеся при осаждении из паров этанола в СВЧ плазме в условиях слабой адсорбции, могут быть использованы в качестве нелитографических масочных покрытий для получения путем последующего высокоанизотропного травления пространственных субнаноразмерных систем в кристаллах кремния (100).

Библиографический список

1. Бонч-Бруевич В.Л. Физика полупроводников / В.Л. Бонч-Бруевич, С.Г. Калашников. М.: Наука, 1977. 672 с.
2. Гальперин В.А. Процессы плазменного травления в микро- и нанотехнологиях : учебное пособие / В.А. Гальперин. М., БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010, с.283.
1. Герасименко Н.Н. Кремний – материал нанoeлектроники/ Н.Н. Герасименко, Ю.Н. Пархоменко. М. Техносфера, 2007. 352 с.
2. Горбатов Ю.Б. Ионное травление кремния в присутствии потока фторосодержащих радикалов / Ю.Б. Горбатов, В.И. Зиненко, А.Ф. Вяткин // Поверхность, 1990.-№7.- С.98-103.
3. Ивановский Г.Ф. Ионно-плазменная обработка материалов / Г.Ф. Ивановский, В.И. Петров. М.: Радио и связь, 1986. - 232 с.
4. Иевлев В.М. Структурные превращения в тонких пленках / В.М. Иевлев, Л.И. Трусов, В.А. Холмянский. М., Metallurgiya. 1982. 247 с.
5. Карасев П.А. Влияние ионной бомбардировки на фазовый состав и механические свойства алмазоподобных пленок / П.А. Карасев, О.А. Подсвилов, А.И. Титов и др. // Поверхность. – 2014. – №1. – С. 49-53.
3. Леденцов Н.Н. Гетероструктуры с квантовыми точками: получение, свойства, лазеры. Обзор / Н.Н. Леденцов, В.М. Устинов, В.А. Шукин и др. // ФТП, 32 (4), 385 (1998).
6. Оура К. Введение в физику поверхности / К. Оура, В.Г. Лифшиц, А.А. Саранин, и др.М.: Наука. 2006. 490 с.
7. Турищев С.Ю. Известия ВУЗов. Материалы электронной техники / Турищев С.Ю. и др. №2, 2011
8. Шаныгин В.Я. Получение атомарно-чистых поверхностей кремния в низкоэнергетичной СВЧ-плазме низкого давления / В.Я. Шаныгин, Р.К. Яфаров // ЖТФ, 2009.- Т.79.- Вып.12.- С.73-78.
9. Шаныгин В.Я. Структурирование субмонослойных углеродных покрытий, осажденных в СВЧ плазме низкого давления на монокристаллическом кремнии // В.Я. Шаныгин, Р.К. Яфаров // ФТП, 2011.- Т.45.- Вып.11.- С.1542-1548.
10. Яфаров Р.К. Физика СВЧ вакуумно-плазменных нанотехнологий / Р.К. Яфаров Ф М.: Физматлит, 2009 - 216 с.
4. Koshida N. Device applications of silicon nanocrystals and nanostructures / ed. by N. Koshida. – Springer Science – Business Media. LLC., 2009.
11. Woll A.R. Self-organized quantum dots / A.R. Woll, P. Rugheimer, M.G Lagally // International Journal of High Speed Electronics and Systems, Vol. 12, No. 1 (2002) p.45-78.

References

5. Bonch-Bruyevich V.L., Kalashnikov S.G. Fizika poluprovodnikov [Physics of semiconductors]. М.: Nauka, 1977. 672 p.
6. Galperin V. A. Protsessy plazmennogo travleniya v micro i nanotekhnologiyakh: uchebnoe posobie [Processes of plasma etching in micro and nanotechnologies: manual]. М, BINOM. Laboratoriya znaniy, 2010, p. 283.
7. Gerasimenko N.N., Parkhomenko Yu.N. Kremniy – material nanoelektroniki [Silicon – nanoelectronics material]. М. Tekhnosfera, 2007. 352 p.
8. Gorbатов Yu.B., Zinenko V.I., Vyatkin A.F. Ionnoe travlenie kremniya v prisutstvii potoka ftorsoderzhashikh radikalov [Ionic etching of silicon in the presence of a stream of fluorine-containing radicals] //Poverkhnost [Surface], 1990.-№7. – P. 98-103.
9. Ivanovsky G.F., Petrov V.I. Ionno-plazmennaya obrabotka materialov [Ion-plasma processing of materials]. М.: Radio i svyaz, 1986. - 232 p.
10. Iyevlev V.M., Trusov L.I., Holmyansky V.A. Strukturnie prevrasheniya v tonkikh plenkakh [Structural transformations in thin films]. М, Metallurgiya. 1982. 247 p.
11. Karasyov P.A., Podsvirov O.A., Titov A.I. i dr. Vliaynie ionnoi bombardirovki na fazoviy sostav i mekhanicheskie svoystvaalmazopodobnykh plenok [Influence of an ionic bombardirovka on phase structure and mechanical properties of diamondlike films] //Poverkhnost [Surface]. – 2014. – No. 1. – P. 49-53.

12. Ledentsov N.N., Ustinov V.M., Schukin V.A. i dr. Geterostrukturi s kvantovimi tochkami: poluchenie, svoistva, lazери. Obzor [Heterostructures with quantum points: receiving, properties, lasers. Review] // FTP [Semiconductors]. 32 (4), 385 (1998).
13. Oura K., Liphshiz V.G., Saranin A.A. i dr. Vvedenie v fiziku poverkhnosti [Introduction to surface physics]. M.: Nauka, 2006. 490 p.
14. Turishchev S. Yu. i dr. Ivestiya vyzov. Materiali elektronnoi tekhniki [News of Higher Education Institutions. Materials of the electronic equipment]. No. 2, 2011
15. Shanygin V.Ya., Yafarov R.K. Poluchenie atomarno-chistykh poverkhnostei kremniya v nizkoenergetichnoi SVCH-plazme nizkogo davleniya [Receiving atomic and clean surfaces of silicon in low energy microwave plasma of low pressure] // ZhTF [Journal of Applied Physics]. 2009. - V.79. – I. 12. – P. 73-78.
16. Shanygin V.Ya., Yafarov R.K. Strukturirovanie submonosloinykh uglerodnykh pokrytii, osazhdennykh v SVCH plazme nizkogo davleniya [Structuring the submonolayer carbon coverings besieged in the microwave plasma of low pressure on single-crystal silicon] // FTP [Semiconductors]. 2011. - V.45. - I. 11. - P. 1542-1548.
17. Yafarov R.K. Fizika SVCH vakuumno-plazmennykh tekhnologiy [Physics of the microwave plasma of vacuum and plasma nanotechnologies]. M.: Fizmatlit, 2009. 216 p.
18. Device applications of silicon nanocrystals and nanostructures / ed. by Nobuyoshi Koshida. – Springer Science – Business Media. LLC., 2009
19. Woll A.R. Self-organized quantum dots / A.R. Woll, P. Rugheimer, M.G Lagally // International Journal of High Speed Electronics and Systems, Vol. 12, No. 1 (2002) p.45-78.