

08

Наноморфологические характеристики поверхности кристаллов кремния (100) при СВЧ-плазменной обработке в условиях слабой адсорбции

© В.Я. Шаныгин, Р.К. Яфаров

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

(Поступило в Редакцию 2 марта 2012 г. В окончательной редакции 20 июля 2012 г.)

Исследованы закономерности влияния режимов и химического состава высокоионизованной плазмы электронного циклотронного резонанса (ЭЦР) СВЧ газового разряда низкого давления на наноморфологию поверхности монокристаллов кремния кристаллографической ориентации (100). Рассмотрены модельные механизмы процессов, обеспечивающих управление основными характеристическими параметрами наноморфологии кристаллов кремния при низкоэнергетичной СВЧ плазменной обработке в условиях слабой адсорбции с использованием химически активной и инертной газовых сред.

Введение

Актуальной задачей современного полупроводникового материаловедения является получение атомно-чистых поверхностей кристаллов — подложек с высоким качеством границы раздела и заданной наноморфологией. Это вызвано высокой чувствительностью электронных свойств материалов к дефектам и неоднородностям структуры, а также перспективой их использования для получения спонтанно упорядоченных наноструктур — равновесных массивов трехмерных островков нанометровых размеров путем предварительного создания мест, предпочтительных для зарождения кластеров. При этом большое значение имеет выбор кристаллографической ориентации, который предопределен особенностями строения решетки полупроводникового материала. Особенности строения решетки и наноморфологии поверхности монокристаллов являются важнейшими факторами, которые управляют процессами роста низкоразмерных эпитаксиальных структур, плотностью стоков для адатомов, поверхностным электронным транспортом и т.д. Использование свойств наноморфологии поверхности кристаллов различных кристаллографических ориентаций открывает возможности для создания принципиально новых квантово-размерных систем в двух- и трехмерных структурах, примером которых являются самоорганизующиеся системы при создании ансамблей квантовых точек, нитей, латеральных поверхностных сверхрешеток, пространственно-упорядоченных низкоразмерных систем [1,2].

Одним из наиболее востребованных материалов современной микро- и нанoeлектроники остается монокристаллический кремний. Так, в последнее время благодаря созданию квантоворазмерных структур на кремнии преодолена трудность его использования в фотоэлектронике из-за низкой вероятности излучательной рекомбинации, обусловленной запретом на прямые переходы носителей, и тем самым получен новый импульс его

широкого применения в различных областях науки и техники [3].

Свойства кремниевых подложек различных кристаллографических ориентаций существенно различаются. В технологическом плане это различие в поверхностных структурах оказывает влияние на результаты плазменной обработки в процессах получения атомно-чистых поверхностей [4], а также возможности их использования для получения высококачественных кремниевых интегральных схем и новых устройств и приборов, работающих с использованием квантоворазмерных явлений [1,2,5].

Целью настоящей работы являлось исследование влияния воздействия высокоионизованной плазмы сверхвысокочастотного (СВЧ) разряда инертных и химически активных газов низкого давления на наноморфологические характеристики поверхности монокристаллов кремния ориентации (100).

Методики и результаты экспериментов

Эксперименты проводились в вакуумной установке с использованием СВЧ-ионно-плазменного источника, описанного в работе [4]. В качестве рабочих газов использовались хладон 14 и аргон. Величины ускоряющих напряжений на подложкодержателе в процессах плазменного травления изменялись в интервале от -100 до -300 В, которые для хладона 14, как было установлено в ранее проведенных исследованиях [4], обеспечивали получение поверхностей кремния с минимальными шероховатостями и относительно высокой производительностью.

Мощность СВЧ-излучения и индукция магнитного поля, соответствующая возникновению в зоне газового разряда электронного циклотронного резонанса (ЭЦР), составляли соответственно 250 Вт и 875 Гс. Давление рабочих газов в процессе плазменной обработки было

равным 0.1 Па и обеспечивало выполнение условий ЭЦР, при котором степень ионизации плазмы составляла около 5% [6].

В экспериментах использовались пластины монокристаллического Si (100) *p*-типа с удельным сопротивлением 0.01–0.02 Ohm·cm. Наноморфология поверхностей пластин изучалась с помощью сканирующего атомно-силового микроскопа Solver-P-47. В качестве зонда использовались стандартные кремниевые кантилеверы CSG10 пирамидальной формы с радиусом закругления 10 nm и жесткостью 0.1 N/m. Поле сканирования составляло 3 × 3 μm при шаге сканирования 8 nm и шаге ЦАП пьезосканера по оси *Y*, равном 0.24 nm. Схема регистрации отклонения кантилевера обеспечивает разрешение 0.1 nm при шаге АЦП пьезосканера по оси *Z*, равном 0.05 nm. Обработка результатов измерений производилась с использованием программного обеспечения этого микроскопа.

На рис. 1 приведены зависимости от электрического смещения на подложкодержателе скоростей травления в СВЧ-плазме хладона 14 и аргона пластин монокристаллического кремния кристаллографической ориентации (100). Можно видеть, что с увеличением ускоряющих напряжений скорости травления кремния имеют тенденцию к увеличению. При одинаковых параметрах режима травления скорость травления в хладоне в 2.5–3 раза выше, чем в аргоне.

На рис. 2 приведено изображение поверхности кремния (100), полученное с помощью атомно-силовой микроскопии (АСМ) после СВЧ-плазмохимического травления (ПХТ) в среде CF₄ в течение 2 min при напряжении смещения на подложкодержателе –200 V, а также распределения поверхностных плотностей разновысотных микровыступов на кристаллах Si (100) до и после СВЧ ПХТ при различных смещениях на подложкодержателе. Из рис. 2, *b* можно видеть, что на стандартной (не обработанной в плазме) поверхности кремния (100) максимальную поверхностную плотность (ρ_{\max}), равную $3 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2}$, имеют выступы высотой (h_{\max}) около 0.6 nm при разбросе высот (Δh) на уровне $0.1\rho_{\max}$

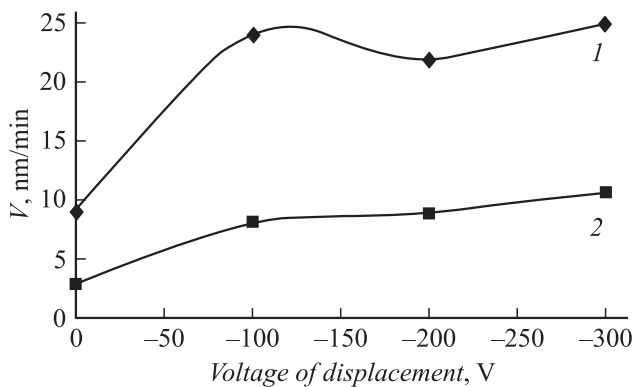


Рис. 1. Влияние состава газовых сред на скорости травления в СВЧ-плазме пластин монокристаллического кремния ориентации (100): 1 — хладона 14, 2 — аргона.

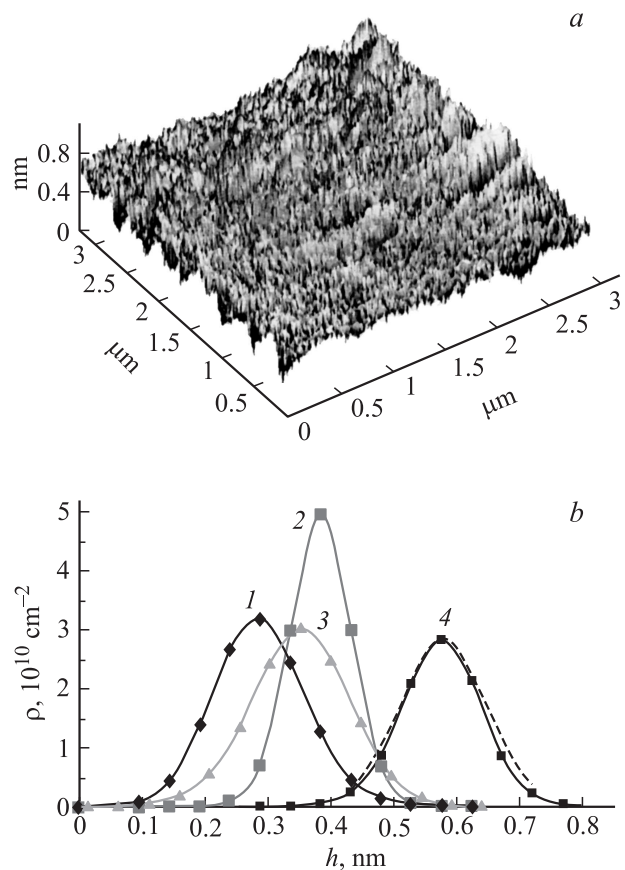


Рис. 2. АСМ-изображение поверхности кремния (100) после СВЧ ПХТ в среде CF₄ в течение 2 min при напряжении смещения –200 V (*a*) и типовые распределения поверхностных плотностей разновысотных микровыступов на кристаллах Si (100) до (4) и после СВЧ ПХТ в CF₄ в течение 2 min при различных напряжениях смещений на подложкодержателе (*b*) *U*, V: 1 — –100, 2 — –200, 3 — –300 (штрихом изображена функция распределения Гаусса с экспериментальными значениями параметров для кривой 4).

от 0.42 до 0.72 nm, что составляет 0.3 nm, а СВЧ-плазменная обработка существенно изменяет эти наноморфологические характеристики. Так, например, плазменная обработка приводит к уменьшению, по сравнению с исходной пластиной, высот выступов, имеющих максимальную поверхностную плотность (h_{\max}). Другие результаты обработки полученных АСМ-распределений концентраций выступов в зависимости от их размеров после СВЧ-травления пластин кремния (100) в хладоне 14 и аргоне с различными длительностями процессов и электрическими смещениями на подложкодержателях приведены на рис. 3, 4.

На рис. 3 приведены экспериментальные зависимости максимальных поверхностных плотностей микровыступов ρ_{\max} , а также высот микровыступов с $\rho_{\max}(h_{\max})$ от длительности СВЧ ПХТ кремния (100) в различных газовых средах при смещениях на подложкодержателе –200 V. Можно видеть, что с увеличением дли-

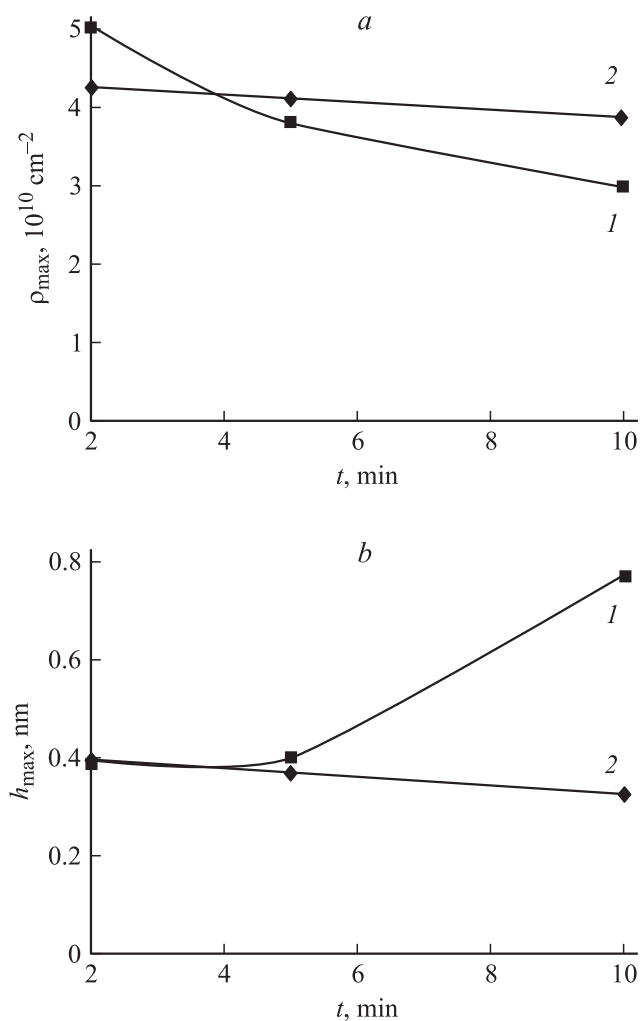


Рис. 3. Влияние длительности СВЧ ПХТ в CF_4 (1) и аргоне (2) на морфологические параметры поверхности кремния (100): *a* — максимальную поверхностную плотность ρ_{\max} , *b* — на высоту микровыступов с ρ_{\max} ($h_{\rho \max}$).

тельности обработки ρ_{\max} как при обработке в CF_4 , так и в аргоне уменьшаются. При обработке в CF_4 со смещением на подложкодержателе -100 V максимальные поверхностные плотности выступов ρ_{\max} при больших длительностях обработки меньше, чем ρ_{\max} на необработанной пластине. При обработке в плазме аргона этого не наблюдается. Темпы уменьшения ρ_{\max} при обработке в плазме аргона зависят от величины смещения — они тем меньше, чем больше смещения. Это свидетельствует о том, что при больших смещениях процесс изменения ρ_{\max} быстро стабилизируется и при обработках более 2 min от длительности практически не зависит.

Высоты выступов с ρ_{\max} (h_{\max}) с увеличением длительности обработки в плазме CF_4 имеют тенденцию к увеличению, темп которого определяется приложенным смещением. При обработке в СВЧ-плазме аргона h_{\max} с увеличением длительности обработки уменьшаются, а

темп уменьшения от смещения практически не зависит. Интервалы разброса высот выступов на уровне $0.1\rho_{\max}$ в обоих случаях имеют тенденцию к небольшому увеличению и находятся в интервале $0.25\text{--}0.35 \text{ nm}$, причем при обработке в аргоне Δh могут быть меньше, чем при обработке в CF_4 .

Из рис. 4, на котором приведены зависимости от смещения на подложкодержателе при различных длительностях СВЧ ПХТ в CF_4 кремния (100) в различных газовых средах максимальной поверхностной плотности выступов и их высот с ρ_{\max} , можно видеть, что для всех длительностей обработок в плазме CF_4 зависимости для ρ_{\max} и $h(\rho_{\max})$ имеют максимумы при смещении -200 V . Наибольшие плотности выступов реализуются при минимальной длительности процесса, равной 2 min. В отличие от этого максимальные высоты реализуются при наибольших длительностях обработки, равных 10 min. При этом все интервалы разброса высот выступов

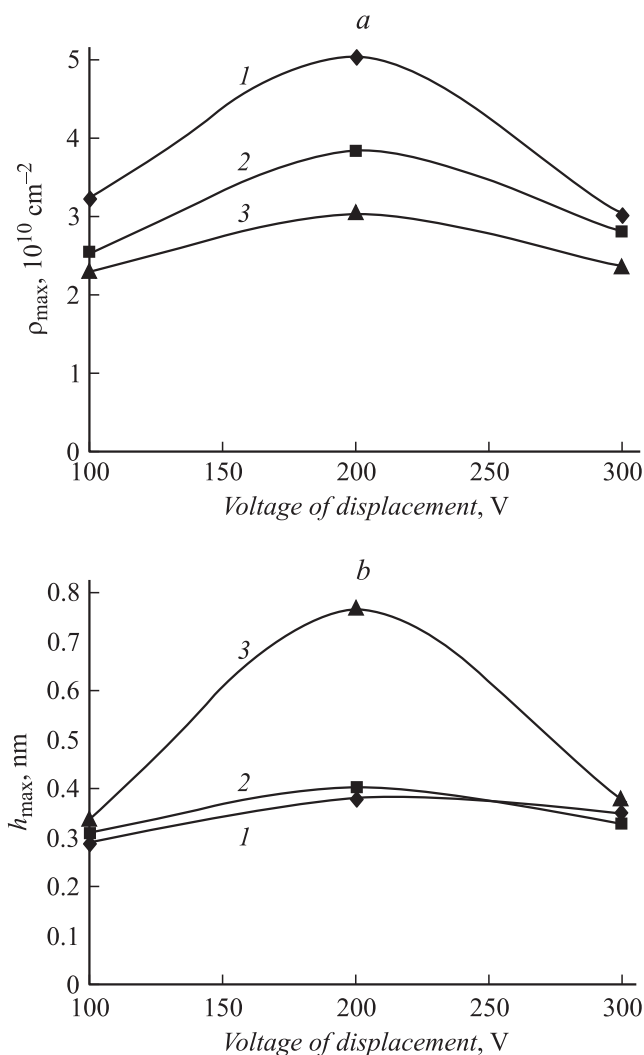


Рис. 4. Влияние смещения на максимальную поверхностную плотность выступов ρ_{\max} (a) и их высоту с ρ_{\max} ($h_{\rho \max}$) (b) при различных длительностях СВЧ ПХТ кремния (100) в плазме CF_4 : 1 — 2, 2 — 5, 3 — 10 min.

составляли около 0.3 nm и от смещения практически не зависели.

При небольших длительностях обработки (2 и 5 min) в СВЧ-плазме аргона ρ_{\max} с увеличением смещения монотонно уменьшаются, при больших длительностях микрообработки (10 min) $\rho_{\max} = 4 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ и от смещения не зависят. Высоты микровыступов $h(\rho_{\max})$ от смещения не зависят, а интервалы разброса высот для всех длительностей обработок с увеличением смещения линейно увеличиваются.

Построение зависимостей шероховатостей наноморфологий кремниевых пластин (100), представляющих собой среднеквадратичные отклонения, от длительности СВЧ ПХТ и смещений, полученных автоматической обработкой результатов измерений программным обеспечением АСМ Solver-P-47, показало, что их характер изменений совпадает с характером зависимостей интервалов разброса высот микровыступов на уровне $0.1\rho_{\max}$ от этих же параметров процессов.

Обсуждение результатов

Анализ распределений поверхностных плотностей выступов по высоте на поверхности кремния (100) как до, так и после плазменной обработки, приведенных на рис. 2, b, показывает, что они имеют вид симметричных функций распределения Гаусса. Концентрация наноморфологических выступов в зависимости от их высоты $\rho(h)$ может быть представлена выражением

$$\rho(h) = \rho(h_{\max}) \exp \left[-\frac{(h - h_{\max})^2}{(2\Delta h_0^2)} \right], \quad (1)$$

где $\rho(h_{\max})$ — поверхностная плотность выступов, имеющих высоту h_{\max} , Δh_0 — среднеквадратичное отклонение или рассеяние распределения. Построение функции распределения Гаусса поверхностных плотностей выступов по высоте на поверхности кремния (100) до плазменной обработки с использованием экспериментальных значений параметров $\rho(h_{\max})$ и h_{\max} , приведенных на рис. 2, b, и Δh_0 , определенным программным обеспечением микроскопа и равным 0.07 nm (штриховая кривая), показывает хорошее совпадение с экспериментальной кривой 4. Оценки, сделанные из этих АСМ-измерений, схема которых приведена на рис. 5, свидетельствуют, что при поверхностной плотности выступов-острий на кристаллах кремния (100) порядка 10^{11} cm^{-2} и радиусе закругления кончика кантилевера $\sim 10 \text{ nm}$ расстояние между остриями на глубине погружения кантилевера может составлять менее 10 nm. Радиус же закругления таких острий может иметь значения порядка нескольких параметров кристаллической решетки.

Эти результаты измерения и оценки параметров наноморфологии свидетельствуют о том, что независимо от режима и рабочей среды, в которых осуществляется СВЧ-плазменная микрообработка атомно-чистой

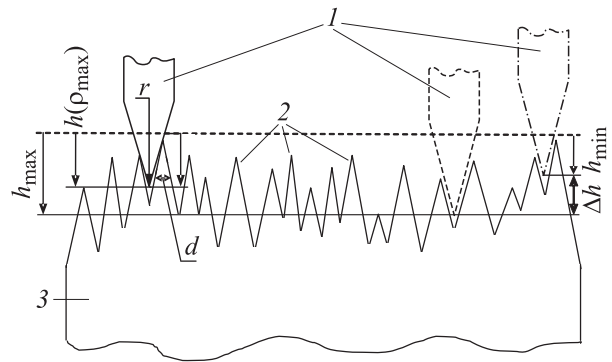


Рис. 5. Схема АСМ-измерений и оценки основных морфологических характеристик поверхности пластин кремния: 1 — положения кантилевера, 2 — острия-выступа, 3 — фрагмент исследуемой поверхности кремния (r — радиус закругления кончика кантилевера, d — расстояние между остриями на глубине погружения кантилевера).

поверхности кристаллов кремния (100), масштабы образующихся неровностей поверхности остаются сопоставимыми с параметрами кристаллической решетки. Причиной этого является следующее.

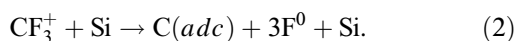
Наличие поверхности в твердых телах вызывает нарушение симметрии распределения масс и сил, действующих на поверхностный атом со стороны других атомов. Компенсация нарушения симметрии на поверхности осуществляется благодаря атомной перестройке, которая в зависимости от абсолютной величины и характера искажений подразделяется на два вида: релаксацию и реконструкцию [7]. Атомы на перестроенной поверхности, характерной для ковалентных кристаллов, существенно смещены относительно позиций, равновесных для объемных атомов (межплоскостные расстояния в приповерхностной области могут отличаться примерно на 10% от соответствующих значений в объеме). Смещение атомов приводит к возникновению механических напряжений в решетке, что увеличивает свободную энергию поверхности. При этом связи, характерные для объема кристалла, могут нарушаться и заменяться специфическими поверхностными связями. Для кристаллических кремния и германия характерным является процесс консервативной реконструкции, при которой число атомов на поверхности сохраняется, но их положение изменяется. При изменении параметров внешней среды (температуры, давления и др.) структура и свойства реконструированной поверхности могут изменяться. Причем эти изменения могут происходить не монотонно, а резко или даже скачкообразно так, что можно говорить о критических явлениях в этих системах, которые являются фазовыми переходами [7].

Процесс низкоэнергетичного СВЧ-вакуумно-плазменного травления с использованием химически активных газов, к которым, в частности, относится хладон 14 при травлении кремния, осуществляется в результате протекания гетерогенных химических реакций на по-

верхности обрабатываемого материала при поступлении на нее из плазмы ионов, радикалов и нейтральных атомов рабочего газа. Вид, плотность тока и энергия заряженных частиц (электронов и химически активных ионов), поступивших на поверхность, зависят от величины и знака потенциала смещения на подложкодержателе. Интегральным результатом протекания гетерогенных химических реакций между поверхностными атомами и структурными частицами плазмы являются ослабление связей поверхностных атомов с подложкой и их удаление в результате образования летучих продуктов реакций или активированной десорбции под воздействием электронно-ионной бомбардировки.

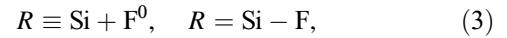
При повышении энергии ионов выше 100 eV наряду с гетерогенными химическими реакциями на поверхности увеличивается в 10^3 – 10^4 раз интенсивность процесса физического распыления и достигает одного–четырех выбитых атомов на десять падающих ионов. При $E_i > 100$ eV ионы начинают внедряться в решетку материала мишени. В результате этого кроме активации за счет образования на поверхности возбужденных атомов с оборванными связями возникают различные точечные дефекты кристаллической решетки, включая атомы внедрения, которые повышают ее свободную энергию и инициируют протекание различных процессов физической и химической адсорбции, а также диффузии химически активных частиц (ХАЧ) в ближайшем приповерхностном слое. Это приводит к его газификации, т. е. насыщению ХАЧ-плазмы, и переносу химических реакций в приповерхностный объем материала. В результате этого при продолжительном плазменном воздействии в приповерхностном слое возникают ямки травления, количество которых с увеличением длительности процесса увеличивается, расстояние между ними уменьшается и поверхность становится шероховатой [6].

При ионно-плазменной обработке в плазме CF_4 химически активными частицами плазмы являются ионы C^+ , CF_n^+ , где $n = 1-4$, а также радикалы и нейтральные атомы фтора и CF_n [4]. Поступление из плазмы двух видов частиц — нейтральных и ионизированных — определяет и два вида взаимодействия их с поверхностными атомами: гетерогенные химические реакции с образованием летучих соединений и физические эффекты, связанные с ионной бомбардировкой. При СВЧ-плазменной обработке с давлениями рабочих газов около 0.1 Па реализуется режим слабой адсорбции, который характеризуется низкой степенью заполнения поверхности адсорбированными газовыми частицами [6]. В этом случае наиболее вероятным является процесс травления, при котором ускоренный электрическим смещением молекулярный ион, например CF_3^+ , при ударе о поверхность диссоциирует на атомы углерода и фтора (ионно-индуцированная (ударная) диссоциация молекулярного иона):



В режимах СВЧ ВПТ при энергиях ионов около 100 eV, когда процессами физического распыления мож-

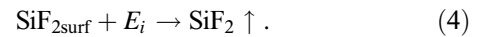
но пренебречь, травление кремния во фторсодержащей плазме может начаться только в результате образования связей Si–F



где R — кристаллическая решетка кремния.

Удаление комплексов Si–F с поверхности кремния в связи с большой энергией связи является сложной задачей. Наиболее вероятными механизмами их удаления с поверхности являются:

1 — образование промежуточных продуктов химических реакций — адкомплексов SiF_2 , которые уже сравнительно легко (пороговая энергия радиационно-стимулированной десорбции для них составляет доли 1 eV) могут быть десорбированы с поверхности кремния ионным ударом



где E_i — энергия иона, необходимая для десорбции SiF_{2surf} ;

2 — образование легко летучего соединения SiF_4 в результате взаимодействия двух адкомплексов SiF_2 между собой.

В первом варианте скорость травления кремния, называемая скоростью ионно-индуцированного травления (V_j), согласно [6], пропорциональна плотности тока на подложку и степени заполнения поверхности адкомплексами SiF_2

$$V_j = K j \theta \alpha, \quad (5)$$

где K — коэффициент распыления, т. е. вероятность десорбции комплекса SiF_2 при попадании в него иона, j — поток ионов фтора на поверхность кристалла, θ — степень заполнения поверхности адкомплексами SiF_2 , $\alpha = M/(N_0 \rho)$, M — молярная масса кремния, ρ — плотность материала, N_0 — число Авогадро.

Второй вариант развития процесса является преимущественным в случае высокой степени заполнения поверхности адкомплексами SiF_2 и интенсивной их поверхностной диффузии. Скорость травления кремния, обусловленная этим механизмом, называемая скоростью спонтанного, изотропного по своей природе процесса, согласно [6], пропорциональна квадрату степени заполнения поверхности адкомплексами SiF_2

$$V_s \approx \theta^2. \quad (6)$$

Из реакции (2) можно видеть, что в процессе травления в плазме CF_4 при отрицательных смещениях на поверхности кремния образуются атомы углерода, которые на начальных стадиях процесса способствуют восстановлению и удалению в виде CO естественного окисла на кремнии, а затем за счет поверхностной миграции могут образовывать наноостровки C–C и адкомплексы Si–C, препятствующие процессу травления. При увеличении отрицательного смещения благодаря увеличению энергии бомбардирующих ионов CF_n^+ наряду с

ударной диссоциацией усиливается процесс физического распыления адкомплексов углерода, возрастает коэффициент распыления кремния и снижается химическая составляющая процесса травления — возникает режим ионно-активационного травления [6].

Наличие, атомарных потенциальных барьеров (стенок углублений) затрудняет свободную поверхностную диффузию и способствует повышению концентрации атомов химического адсорбата в углублениях. Повышенная степень заполнения поверхности углублений химически активными адкомплексами SiF_2 увеличивает скорость растравливания углублений в результате изотропного по своей природе химического процесса, так как $V_s \approx \theta^2$, где V_s — скорость изотропного плазмохимического травления. При усилении направленного потока ионов растравливание осуществляется со скоростью $V = V_s + AV_j$, где A — коэффициент анизотропности травления, обусловленный различной вероятностью взаимодействия химически активных частиц плазмы с боковыми стенками углублений различного наклона.

С увеличением длительности процесса обработки в плазме СВЧ-разряда CF_4 за счет продольного и бокового растравов стенок между отдельными углублениями плотности выступов уменьшаются, а их высоты увеличиваются (рис. 3). Интенсивность изменения наноморфологии зависит от соотношения скоростей изотропного химического и направленного ионно-химического травления. Увеличение энергии и плотности ионного потока на подложку, а также уменьшение ее температуры должны приводить, согласно [6], к общему увеличению скорости травления поверхности и относительному снижению скорости бокового растрав. В результате этого поверхностная плотность выступов и их высоты в зависимости от смещения могут увеличиваться и иметь максимум, после которого их снижение будет обусловлено появлением механизма ионно-активационного травления. Энергия ионов при смещениях выше -200 V приводит к увеличению в приповерхностном слое концентрации радиационных дефектов, которые ускоряют процессы локального травления кремния. Его действие интенсифицирует в основном ионно-физическое травление атомно-тонких острых выступов прямым поступлением ХАЧ из плазмы (рис. 3). Совместное динамическое воздействие этих механизмов физико-химического травления кремния обеспечивает со временем стабилизацию интервалов разброса высот выступов и их независимость от потенциалов смещения в процессах длительной обработки. При $U = -100\text{ V}$ из-за преобладающего и практически не управляемого в этих условиях химического механизма травления интервалы разброса высот микровыступов на уровне $0.1\rho_{\text{max}}$ (шероховатость) являются наиболее высокими по сравнению с обработкой при других направлениях смещения.

В случае использования плазмы аргона травление кремния осуществляется по ионно-физическому механизму за счет эффектов переотражения на наклонных стенках углублений и распыления атомов кремния и

частиц его естественного окисла ускоренными ионами. При наклонном падении ионов на поверхность мишени скорость травления определяется выражением

$$V(\alpha) = 6.25 \cdot 10^{25} \left[\frac{j_i S(\alpha) A}{N_A \rho} \right] \cos \alpha, \quad (7)$$

где A — атомный вес распыляемого материала, g/mol ; N_A — число Авогадро, at/mol ; ρ — плотность материала, g/cm^3 ; j_i — плотность ионного тока в сечении, перпендикулярном направлению поступления ионов, A/cm^2 ; $S(\alpha)$ — коэффициент распыления материала при угле падения ионов α относительно нормали к поверхности.

Практически у всех материалов с увеличением угла падения ионов на поверхность распыляемого материала от 0 до $60-70^\circ$ наблюдается увеличение коэффициента распыления, которое, например в случае травления окислов кремния, может достигать пятикратного значения относительно нормального падения ионов аргона [8]. За счет различной интенсивности распыления, обусловленной статистической неоднородностью геометрии и толщины стенок углублений, отдельные выступы с увеличением длительностей обработки исчезают. Это приводит к уменьшению поверхностных плотностей выступов и увеличению интервалов разброса их высот Δh (рис. 3, *a* (кривая 2)). Основным фактором, влияющим на увеличение разброса высот, является смещение, так как оно определяет плотность потока ионов и коэффициент распыления S . Из-за преимущественного распыления наклонных боковых стенок высоты микровыступов с максимальной поверхностной плотностью при плазменной обработке в атмосфере аргона с большими длительностью и смещением всегда меньше, чем на не обработанной пластине. С увеличением длительности обработки их высота для всех смещений постепенно уменьшается со скоростью около 0.01 nm/min (рис. 3, *b*, кривая 2).

Заключение

Низкоэнергетичная высокоионизованная СВЧ-плазменная обработка в зависимости от режима и химического состава используемой газовой фазы позволяет различным образом модифицировать наноморфологию поверхности пластин кремния (100). Взаимосвязь морфологических характеристик свободной поверхности кремния как до, так и после плазменной микрообработки может быть описана с помощью симметричной функции распределения Гаусса. Параметры распределения, которые характеризуют энергетическое состояние поверхности, зависят от режима микрообработки и используемых рабочих газовых сред. При низкоэнергетичной СВЧ-плазменной микрообработке за счет снижения свободной энергии поверхности обрабатываемого кристалла происходит уменьшение поверхностных плотностей и высот микровыступов, имеющих максимальную поверхностную плотность на пластине в $1.5-2$ раза по срав-

нению с исходной, полученной с применением стандартных методов физико-химической обработки пластин кремния для микроэлектроники.

Наилучшие значения максимальных поверхностных плотностей выступов „перестраиваемой“ наноморфологии кристаллов кремния (100) реализуются при кратковременных СВЧ-плазменных обработках, когда упругие напряжения в поверхностном слое имеют наибольшие значения. С увеличением длительности обработки они монотонно уменьшаются до уровней, характерных для данных сочетаний режимов плазменного воздействия и рабочих сред. Наилучшие результаты по однородности высот микровыступов достигаются при кратковременной (2–5 min) СВЧ-плазменной обработке в аргоне со смещением -100 V. В этом случае разброс высот Δh составляет около 0.2 nm. С увеличением длительности обработки и смещения интервалы разброса высот выступов увеличиваются, хотя сами высоты при этом уменьшаются.

При СВЧ-плазменной обработке в хладоне из-за конкуренции различных механизмов травления (изотропного химического, ионно-индуцированного и ионно-активационного), интенсивности действия которых зависят от смещения на подложкодержателе, получение заданных высот выступов, их однородности и поверхностной плотности требуют оптимизации режима обработки. Минимальные высоты выступов реализуются при минимальных длительностях обработки в хладоне 14 со смещением $U_d = -100$ V. Однако из-за практически не управляемого в этих условиях химического механизма травления интервалы разброса высот микровыступов на уровне $0.1\rho_{\max}$ (шероховатость) являются наиболее высокими по сравнению с обработкой при других напряжениях смещения. Максимумы поверхностной плотности и высот выступов реализуются при обработке в низкоэнергетичной СВЧ-плазме хладона 14 при $U = -200$ V. При смещениях больше -200 V максимальная поверхностная плотность наноморфологических выступов и их высоты уменьшаются за счет роста ионно-активационной составляющей механизма травления кремния.

Список литературы

- [1] Леденцов Н.Н., Устинов В.М., Шукин В.А., Копьев П.С., Алферов Ж.И., Бимберг Д. // ФТП. 1998. Т. 32. № 4. Стр. 385–410.
- [2] Шаныгин В.Я., Яфаров Р.К. // ФТП. 2011. Т. 45. Вып. 11. С. 1542–1548.
- [3] Герасименко Н.Н., Пархоменко Ю.Н. Кремний — материал нанoeлектроники. М.: Техносфера, 2007. 352 с.
- [4] Шаныгин В.Я., Яфаров Р.К. // ЖТФ. 2009. Т. 79. Вып. 12. С. 73–78.
- [5] Технология СВИС. В 2-х кн. Пер. с англ. / Под ред. С. Зи. М.: Мир, 1985. 404 с.
- [6] Яфаров Р.К. Физика СВЧ-вакуумно-плазменных нанотехнологий. М.: Физматлит, 2009. 216 с.
- [7] Оура К., Лифшиц В.Г., Саранин А.А., Зотов А.В., Катаяма М. Введение в физику поверхности. М.: Наука, 2006. 490 с.
- [8] Ивановский Г.Ф., Петров В.И. Ионно-плазменная обработка материалов. М.: Радио и связь, 1986. 232 с.