

04;05;11;12

Получение атомарно-чистых поверхностей кремния в низкоэнергетичной СВЧ-плазме низкого давления

© 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 28 января 2009 г.)

Исследованы закономерности влияния режимов и химического состава низкоэнергетичной высокоионизованной плазмы электронно-циклотронного резонанса СВЧ газового разряда низкого давления на скорость травления и наноморфологию поверхности монокристаллического кремния различных кристаллографических ориентаций. Рассмотрены модельные механизмы процессов, обеспечивающих управление скоростью и качеством атомарно-чистых поверхностей травления кремниевых кристаллов заданных ориентаций.

PACS: 52.77.Bn

Введение

Актуальными задачами современного полупроводникового материаловедения являются получение атомарно-чистых поверхностей, создание туннельно-тонких пленок и гетерограниц с заданными составом, уровнем легирования и высоким качеством структуры границ раздела. Это обусловлено высокой чувствительностью электронных свойств материалов к дефектам и неоднородностям структуры. Особенно важным представляется структурный аспект полупроводниковой поверхности: контролируемое создание наноморфологии поверхности кристаллов-подложек, что необходимо для управления плотностью стоков для адатомов; определение механизмов формирования субмонослойных покрытий в процессах получения низкоразмерных эпитаксиальных структур; определение принципиально новых возможностей создания квантово-размерных систем, примером которых могут служить самоорганизующиеся системы при создании квантовых проволок, латеральных поверхностных сверхрешеток и квантовых точек. Все эти задачи обусловлены тенденциями развития твердотельной электроники, направленными на повышение степени интеграции и переходу к использованию квантово-размерных явлений в двумерных кристаллах.

Существуют различные методы получения атомарно-чистых поверхностей материалов [1]. Каждый из них имеет определенные преимущества и недостатки. Поэтому универсальной процедуры очистки не существует. Для каждого материала, как правило, требуется индивидуальная методика или даже комбинация нескольких методик. В настоящее время наиболее перспективным методом получения атомарно-чистых поверхностей представляется низкоэнергетичное ионное и плазмохимическое травление.

Одним из наиболее востребованных материалов современной микро- и нанoeлектроники остается монокристаллический кремний. Так, в последнее время, благодаря созданию квантово-размерных структур на кремнии

преодолена трудность его использования в фотоэлектронике из-за низкой вероятности излучательной рекомбинации, обусловленной запретом на прямые переходы носителей в процессе рекомбинации, и тем самым получен новый импульс его широкого применения в названных областях науки и техники.

В производстве кремниевых интегральных схем (ИС) кроме качества структуры поверхности большое значение имеет выбор кристаллографической ориентации кристаллов-подложек, который предопределен особенностями строения решетки полупроводникового материала и изготавливаемых на его основе приборов. Так, традиционно биполярные схемы формируют на подложках кремния с ориентацией $\{111\}$, а МОП-приборы — на подложках с ориентацией $\{100\}$. Свойства кремниевых подложек различных ориентаций существенно различаются. Например, плоскости $\{111\}$ окисляются быстрее, чем $\{100\}$, вследствие большей поверхностной плотности упаковки атомов, способных вступать в реакцию окисления [2]. Естественно предположить, что это различие в поверхностных структурах может оказать влияние и на результаты их плазменной обработки в процессах получения атомарно-чистых поверхностей и создания ИС.

В последние годы среди большого многообразия плазменных технологий, используемых для производства ИС с субмикронными и субполумикронными ($0.1\text{--}0.5\ \mu\text{m}$) размерами элементов, важное место занимают технологии на основе СВЧ газового разряда с электронно-циклотронным резонансом (ЭЦР). Основными преимуществами применения СВЧ-плазмы для получения атомарно-чистых поверхностей полупроводниковых материалов являются высокая вакуумная чистота процесса, так как плазма является безэлектродной, а рабочие давления в ней могут составлять от 0.01 до 0.1 Па, высокая степень ионизации, которая может достигать 5–7% и низкая собственная энергия ионов, определяемая плавающим потенциалом плазмы в 20–30 eV [3,4].

В связи с вышеизложенным целью настоящей работы являлось исследование влияния режимов воздействия безэлектродной низкоэнергетичной плазмы СВЧ газового разряда низкого давления в магнитном поле и состава плазмообразующего газа на скорость сухого травления и наноморфологию поверхности монокристаллического кремния различных кристаллографических ориентаций.

1. Экспериментальная установка и методика исследований

Эксперименты проводились в вакуумной установке с использованием СВЧ ионно-плазменного источника, в котором для увеличения диаметра обрабатываемой пластины применялся ступенчатый согласованный переход с одномодового волновода для низшего типа волны H_{11} на частоте 2.45 GHz на открытый многомодовый волновод диаметром 178 mm. Магнитное поле вдоль оси плазмотрона создавалось с помощью двухсекционного электромагнита, установленного на одномодовой части волновода в зоне керамического окна, через которое осуществляется регулируемый ввод СВЧ-энергии. Керамическое окно отделяет часть пространства одномодового волновода от атмосферного воздуха и обеспечивает возможность создания с помощью вакуумных средств откачки в операционной камере установки давления в диапазоне от 10^{-3} до 1 Pa. Ввод плазмообразующих газов в вакуумную камеру осуществляется в помощью регуляторов расхода газа с пределами регулирования 0.2–10 l/h. Контроль падающей и отраженной СВЧ-мощности производится ваттметрами с использованием направленных ответвителей.

Плазменный процесс сухого травления в установке осуществляется следующим образом. После предварительного вакуумирования через реактор производится прокачка плазмообразующего газа. В разрядном пространстве плазмотрона под действием СВЧ электромагнитных волн круговой поляризации с определенной напряженностью электрического поля и внешнего магнитного поля происходит электрический газовый пробой. В созданной продольно намагниченной плазме электроны, ионы, радикалы химически активного плазмообразующего газа переносятся потоком или дрейфуют, при приложении внешнего электрического поля, к пластине и осуществляют ее обработку. Образующиеся летучие продукты реакций откачиваются вакуумной системой.

В качестве плазмообразующих газов для травления монокристаллического кремния кристаллографических ориентаций (100) и (111) использовался хладон-14 и смесь хладона-14 с кислородом ($CF_4 + 20\% O_2$). Мощность СВЧ-излучения и индукция магнитного поля, соответствующая возникновению в зоне газового разряда ЭЦР составляли соответственно 250 W и 875 Gs. Давление рабочих газов в процессе сухого травления кремния было равным 0.1 Pa и обеспечивало выполнение условий ЭЦР, при котором степень ионизации плазмы

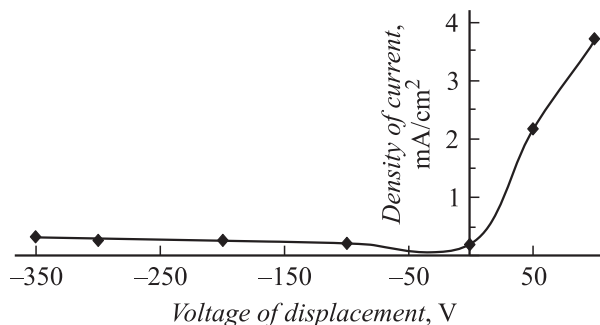


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика СВЧ газового разряда при ЭЦР в хладоне-14.

составляла около 5% [5]. Вольт-амперная характеристика СВЧ газового разряда, полученного при этих условиях, приведена на рис. 1.

Для определения толщины стравленного слоя использовался интерференционный микроскоп МИИ-4. Наноморфология поверхности кремния после плазмохимического травления изучалась с использованием сканирующего атомно-силового микроскопа Solver-P-47. Обработка результатов измерений производилась с использованием программного обеспечения этого микроскопа.

2. Результаты экспериментов

На рис. 2 приведены зависимости от электрического смещения на подложкодержателе скоростей травления в СВЧ-плазме CF_4 и смеси газов $CF_4 + 20\% O_2$ пластин монокристаллического кремния кристаллографических ориентаций (100) и (111). На рис. 2, а в зависимости от величины и знака смещения можно выделить три области, в которых скорости травления кремния различных ориентаций изменяются друг относительно друга. При увеличении положительных смещений (область 1, названная нами областью спонтанного химического травления) скорость травления кремния наиболее низкая, имеет устойчивую тенденцию к уменьшению, причем скорость травления кремния ориентации (111) выше. При небольших отрицательных смещениях (от 0 до -300 V — область 2, названная областью ионно-индуцированного травления), напротив, скорость травления кремния с ориентацией (100) выше. В третьей области (при смещениях более -350 V, названная областью ионно-активационного травления) наблюдается превышение скорости травления кремния ориентации (111) над скоростью травления кремния (100). Скорость травления кремния (100) в исследованном диапазоне отрицательных смещений практически не зависит от их величины.

Из рис. 2, б можно видеть, что добавка кислорода в CF_4 оказывает влияние на увеличение скорости травления кремния (111) преимущественно при небольших отрицательных смещениях. Использование таких смесей

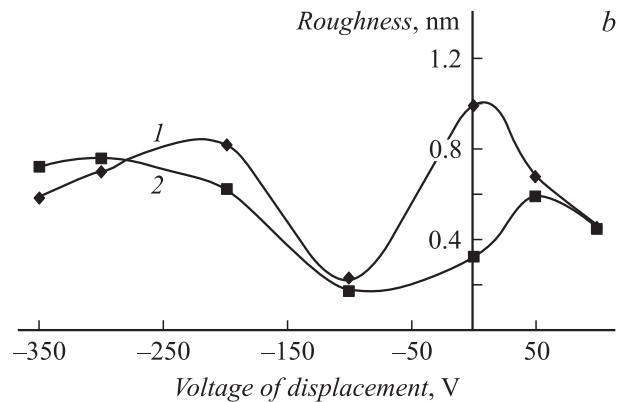
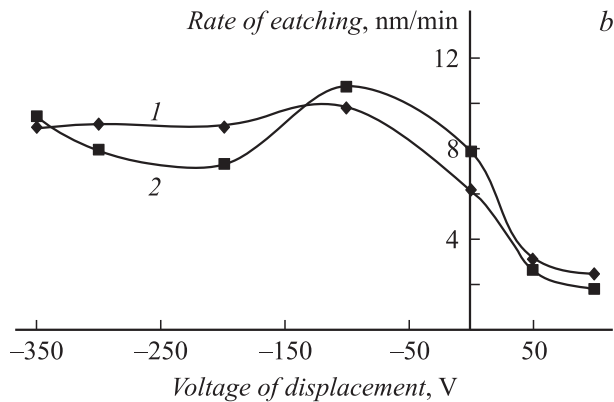
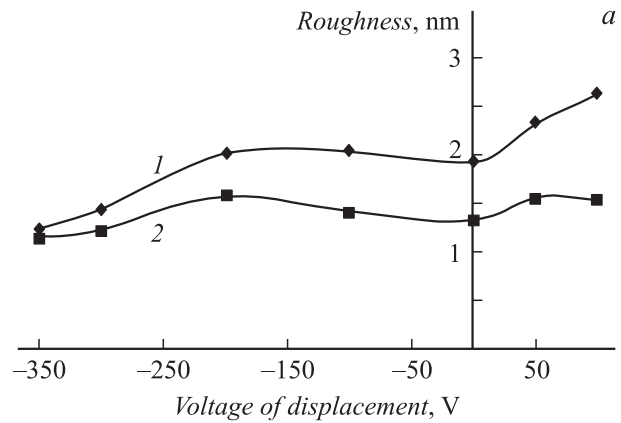
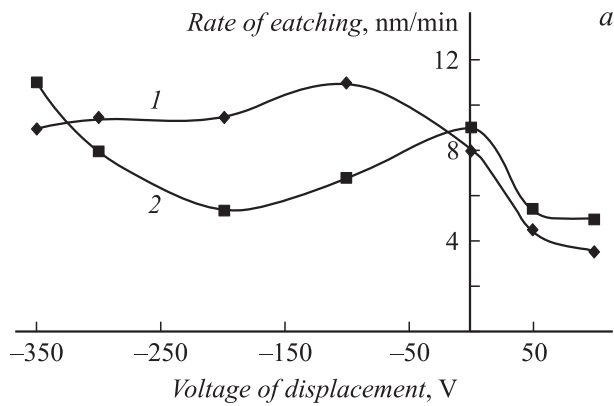


Рис. 2. Зависимости скорости травления кремния ориентации (100) (1) и (111) (2) в ЭЦР СВЧ-плазме CF_4 (a) и $CF_4 + 20\% O_2$ (b) от потенциала смещения на подложкодержателе.

Рис. 4. Зависимости шероховатости поверхностей кремния ориентации (100) (1) и (111) (2) от ускоряющего потенциала подложкодержателя в процессе СВЧ ВПТ в CF_4 (a) и $CF_4 + O_2(20\%)$ (b).

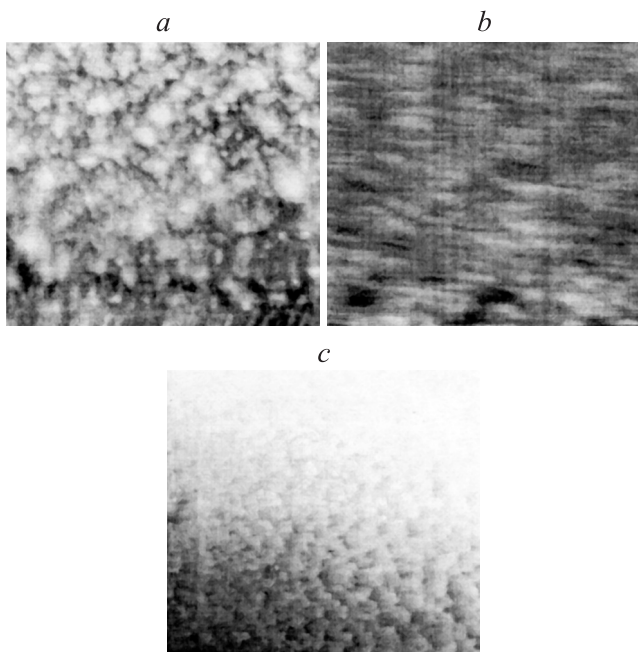


Рис. 3. АСМ-изображения поверхности кремния (100) после СВЧ ВПТ в CF_4 при различных смещениях на подложкодержателе: а) $U_{acc} > 0 V$; б) $-300 V < U_{acc} < 0 V$; в) $U_{acc} < -300 V$.

при положительных смещениях не является целесообразным, так как скорость травления кремния обеих ориентаций при этом снижается: для ориентации (100) примерно на 25%, а для ориентации (111) — более чем в два раза.

На рис. 3 в качестве примера приведены АСМ-изображения поверхностей кремния (100) после травления в СВЧ-плазме CF_4 для названных областей смещений. Можно видеть существенное различие между ними в характере образующейся наноморфологии поверхности. В частности, с увеличением отрицательного смещения все более заметным становится текстурирование поверхности и переход от волнистой наноморфологии (ряби) к наноразмерной островковой (ячеистой).

На рис. 4 приведены зависимости от смещения на подложкодержателе степени шероховатости поверхности кремния ориентации (100) и (111) после травления в CF_4 и $CF_4 + 20\% O_2$. Можно видеть, что для кремния ориентации (100) при всех смещениях в процессе СВЧ плазменного травления в CF_4 она выше, чем у кремния (111). Различие в шероховатости и сама шероховатость возрастают при увеличении положительных смещений и уменьшаются при увеличении отрицатель-

ных смещений. При травлении в $\text{CF}_4 + 20\% \text{O}_2$ характер зависимостей шероховатостей существенно иной. Главными отличиями существенное снижение шероховатости в области небольших отрицательных смещений и ее монотонное снижение при увеличении положительных смещений.

3. Обсуждение результатов

Процесс вакуумно-плазменного травления (ВПТ) с использованием химически активных газов, к которым, в частности, относится хладон-14, при травлении кремния осуществляется в результате протекания гетерогенных химических реакций на поверхности обрабатываемого материала при поступлении на нее из плазмы ионов, радикалов и нейтральных атомов рабочих газов [5]. Вид, плотность тока и энергия заряженных частиц (электронов и химически активных ионов), поступивших на поверхность обработки, зависят от величины и знака потенциала смещения на подложкодержателе. Это хорошо видно из вольт-амперной характеристики СВЧ газового разряда при условиях травления (см. рис. 1): при положительных смещениях их во много раз больше, чем при отрицательных. Интегральным результатом протекания гетерогенных химических реакций между поверхностными атомами и структурными частицами плазмы является ослабление связей поверхностных атомов с подложкой и их удаление в результате образования летучих продуктов реакций или активированной десорбции под воздействием ионной или электронной бомбардировки.

Параллельными исследованиями с использованием методов масс-спектропии и эмиссионной спектроскопии установлено [6], что при СВЧ ВПТ кремния в CF_4 фиксируются радикалы F^* и CF_n^* (где $n = 0, 1, 2, 3$), которые являются продуктами ступенчатой диссоциации CF_4 , а также CO с длиной волны излучения 515 nm и SiF ($\lambda = 440 \text{ nm}$), которые являются продуктами гетерогенных химических реакций. Ионный состав плазмы образуют положительные ионы CF_n^+ (где $n = 0, 1, 2, 3$), а также, в связи с высокой электроотрицательностью, ионы фтора F^- . Поэтому в зависимости от знака электрического смещения на пластины кремния могут поступать:

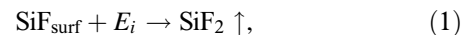
а) при положительном смещении преимущественно электроны, в связи с их высокой подвижностью, и отрицательные ионы фтора, а также нейтральные и активированные частицы фтора и CF_n (где $n = 0, 1, 2, 3, 4$);

б) при отрицательном смещении — ионы CF_n^+ (где $n = 0, 1, 2, 3$), а также те же нейтральные и активированные частицы фтора и CF_n .

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. В режимах СВЧ ВПТ при энергиях ионов,

не превышающей 100 eV, когда процессами физического распыления можно пренебречь, травление кремния во фторсодержащей плазме может начаться только в результате образования связей Si–F, которые значительно сильнее связей Si–S. Однако удаление комплексов Si–F с поверхности кремния по той же причине является сложной задачей. Наиболее вероятными вариантами 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-единицы электрон-вольт) могут быть десорбированы с поверхности кремния ионным ударом:



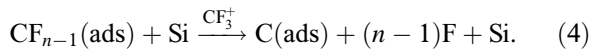
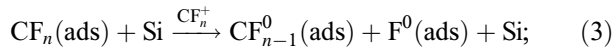
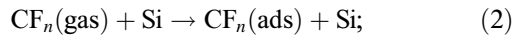
где: E_i — энергия иона, необходимая для десорбции SiF_{surf} ;

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

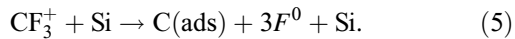
В первом варианте скорость травления кремния, очевидно, будет пропорциональна плотности тока на подложку и степени заполнения поверхности адкомплексами SiF_2 [2]. Второй вариант процесса является преимущественным в случае высокой степени заполнения поверхности адкомплексами SiF_2 , их интенсивной поверхностной диффузии и слабого электронно-ионного воздействия плазмы на поверхность материала.

При положительных смещениях скорость травления кремния различных ориентаций в обоих составах рабочих газовых смесей в СВЧ-плазме уменьшается с увеличением плотности тока на подложкодержатель (см. рис. 1) и является наиболее низкой во всем исследованном диапазоне смещений. Это свидетельствует о том, что процесс, вероятнее всего, развивается по второму варианту и механизмом травления кремния в данном случае является спонтанное химическое травление с образованием легко летучего соединения SiF_4 и достаточно развитой шероховатости поверхности (см. рис. 2, а и 4, а). В этой области смещений шероховатость поверхности кремния при травлении в СВЧ-плазме CF_4 в результате протекания химических реакций между кремнием и адсорбированным фтором, изотропных по своей природе и имеющих сравнительно низкую поверхностную плотность очагов (островков) реакций, наиболее высока. При увеличении положительного смещения эти тенденции усиливаются (см. рис. 4, а), так как возрастает эффективность поверхностной диссоциации в результате электронного удара адсорбированных нейтральных фторсодержащих частиц. Травление приобретает ярко выраженный островковый характер. Перепад высот между фторсодержащими „наноямками“ и остальной поверхностью кремния, покрытой углеродсодержащим адсорбционным слоем, в этом случае достигает 15–20 Å и более при величине положительного смещения 50–100 V.

При отрицательных смещениях отрицательные ионы фтора на поверхность кремния не поступают. Она покрывается адсорбционными слоями CF_n (где $n = 0, 1, 2, 3, 4$) и непосредственное образование связей Si-F затруднено. В этом случае развитие процесса травления кремния в плазме CF_4 может происходить благодаря адсорбции и ударной диссоциации — как другими ионами, так и самого молекулярного иона следующим образом:



Реакции (3) и (4) происходят преимущественно в случае так называемой сильной адсорбции молекул рабочего газа или молекул продуктов реакции. В случае слабой адсорбции молекул рабочего газа к бомбардируемой поверхности (низкие рабочие давления) более вероятным является процесс, при котором молекулярный ион, например CF_3^+ , при ударе о поверхность сам диссоциирует на атомы углерода и фтора, которые адсорбируются на активных центрах (ионно-индуцированная (ударная) диссоциация самого молекулярного иона):

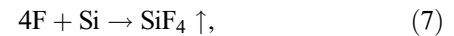
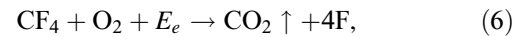


Далее процесс травления кремния идет уже известным путем через образование связей Si-F и адкомплексов SiF_2 с последующей их десорбцией в результате ионной бомбардировки или образования летучего соединения SiF_4 . Однако из реакции (4) и (5) можно видеть, что в процессе травления при отрицательных смещениях на поверхности кремния происходит накопление атомов углерода, который в результате поверхностной миграции может образовывать наноостровки, препятствующие равномерному травлению пластины. В результате этого скорость травления кремния (особенно ориентации (111), см. рис. 2, а, кривая 2) при небольших отрицательных смещениях снижается. При дальнейшем увеличении отрицательного смещения за счет увеличения энергии бомбардирующих ионов CF_n^+ наряду с ударной диссоциацией усиливается процесс физического распыления атомов углерода, а также адкомплексов SiF_2 . В результате этого скорость травления кремния вновь возрастает (для кристаллографической ориентации (111)), шероховатость поверхности травления при потенциале смещения больше -300 V имеет тенденцию к уменьшению (рис. 4). При этом заметно возрастает коэффициент распыления кремния и снижается химическая составляющая процесса травления — возникает режим ионно-активационного травления [5].

Кроме физического распыления удаление адатомов углерода с поверхности кремния можно осуществить химическим методом (без увеличения энергии бомбардирующих ионов), а значит, при меньшем радиационном повреждении поверхностной структуры. Для этого

процесс травления проводится в смеси газов, обычно $CF_4 + 20\% O_2$. В этом случае удаление хемосорбированных атомов углерода происходит в результате образования летучих соединений CO и CO_2 . При этом освобождаются оборванные связи кремния, которые вместе с фтором могут образовывать новые летучие продукты реакций, и возрастает скорость травления.

Наиболее заметен этот эффект для плотноупакованной поверхности кремния ориентации (111), при небольших отрицательных смещениях, пока отрицательные ионы кислорода еще имеют возможность преодоления потенциальных барьеров, вызванных подачей смещений на подложкодержатель (рис. 2, б, кривая 2). Обобщенные химические реакции при этом имеют вид:



где E_e — энергия диссоциации молекулы CF_4 .

В результате удаления адсорбированных островков углерода характер зависимостей скорости травления и шероховатостей от смещения в плазме $CF_4 + 20\% O_2$ существенно изменяется. Она улучшается как при небольших отрицательных, так и при положительных смещениях. В последнем случае это происходит за счет частичной пассивации кислородом оборванных связей поверхностного кремния (образования химических связей Si-O), снижающей интенсивность образования легко летучих соединений SiF_4 , что одновременно выражается и в снижении почти в два раза скорости спонтанного химического травления кремния различных ориентаций.

Механизм травления кремния в низкоэнергетической высокоионизованной плазме СВЧ газового разряда низкого давления, очевидно, носит универсальный характер и не зависит от его кристаллографической ориентации. Наблюдаемое различие в скорости и шероховатостях поверхностей кремния различных ориентаций, полученных в одних и тех же режимах СВЧ плазменного травления, обусловлено, по-видимому, различной плотностью оборванных связей и структурой реконструированной поверхности. Это различие может влиять на протекание стадий процесса травления, связанных с кинетикой образования на поверхности и десорбцией адкомплексов SiF_2 и летучего соединения SiF_4 .

Структура реконструированной поверхности полупроводниковых кристаллов сильно модифицирована по отношению к структуре соответствующих атомных плоскостей в объеме кристалла. Это связано с тем, что объемоподобная свободная поверхность нестабильна из-за наличия большого количества ненасыщенных (оборванных) связей. Для того чтобы уменьшить свободную энергию поверхности, атомы смещаются из своих первоначальных положений, чтобы, образовав связи друг с другом, насытить оборванные связи. Дальнейшее уменьшение поверхности происходит за счет переноса заряда между оставшимися ненасыщенными связями (в результате некоторые из них становятся незаполненными, а

другие — заполненными). Этот механизм называют автокомпенсацией [1]. С другой стороны, смещение атомов приводит к возникновению механических напряжений в решетке, что увеличивает свободную энергию поверхности. Результат противодействия этих двух тенденций и определяет конкретную структуру реконструированной поверхности.

Идеальная объемоподобная поверхность Si(100) представляет собой квадратную решетку, образованную верхними атомами Si, каждый из которых связан с двумя атомами 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 2×1 , которая была впервые обнаружена с помощью метода дифракции медленных электронов.

На атомарно-чистой поверхности Si(111) наблюдаются две основные реконструкции: 2×1 и 7×7 . Структура 2×1 метастабильная и необратимо переходит в реконструкцию 7×7 при прогреве до температуры около 400°C .

При сколе Si вдоль грани (111) происходит радикальная перестройка поверхности, в которой связи между половиной атомов второго и третьего слоев перестраиваются таким образом, что шестичленные кольца объемоподобной поверхности преобразуются в последовательность семи- и пятичленных колец. В результате атомы Si первого и второго слоев образуют зигзагообразные цепочки. Атомы Si в перхних цепочках связаны друг с другом π -связями и поочередно смещены вверх и вниз, делая π -связанные цепочки слегка покоробленными (buckled).

Таким образом, реконструированная поверхность Si(100) 2×1 имеет значительно больше оборванных поверхностных связей, чем поверхность Si(111) 2×1 . Это повышает вероятность ее пассивации различными примесными частицами плазмы (например, кислородом остаточной атмосферы при положительных смещениях на подложкодержателе), затрудняет процесс образования адкомплексов SiF₂ и ухудшает качество травления поверхности. Поэтому при положительных смещениях скорость травления Si(100) 2×1 в CF₄ ниже, а шероховатость выше, по сравнению с Si(111) 2×1 (рис. 2, *a* и 4, *a*). Если травление производится в смеси CF₄ + 20% O₂, то при тех же положительных смещениях усиливается бомбардировка ионами кислорода, которые становятся способными к разрыву и пассивации относительно слабых π -связанных цепочек, в большом количестве присутствующих на реконструированной поверхности Si(111) 2×1 . В связи с этим скорость травления Si(111) при положительных смещениях становится ниже, чем у Si(100) 2×1 (рис. 2, *b*). По той же причине при малых положительных смещениях более защищенной от влияния плазменного воздействия оказывается поверхность Si(100) 2×1 , которая имеет стабильное количество оборванных поверхностных связей, в то время

как на реконструированной поверхности Si(111) 2×1 их количество зависит как от дозы, так и от энергии ионного воздействия. Поэтому скорость травления пластин Si(100) 2×1 при одинаковом по величине положительном смещении в результате добавок кислорода в CF₄ уменьшается меньше, чем скорость травления пластин ориентации Si(111) 2×1 . По этой же причине и в связи с неплоскостностью слоев атомов кремния, которая облегчает их отрыв от решетки атомами фтора, скорость плазменного травления Si(111) 2×1 при больших отрицательных смещениях становится выше, а шероховатость больше, чем у Si(100) 2×1 (рис. 2, 4).

Таким образом, оптимальными с точки зрения получения бездефектных атомарно-чистых поверхностей пластин кремния различных кристаллографических ориентаций с использованием низкоэнергетической ЭЦР СВЧ-плазмы низкого давления являются режимы ионно-плазменной обработки с использованием небольших отрицательных смещений на подложкодержателе (-50 — -70 В) или режимы с использованием интенсивной электронной бомбардировки в условиях слабой адсорбции, которые реализуются в СВЧ-плазме при положительных смещениях в интервале от 70 до 100 В.

Список литературы

- [1] Оура К., Лифшиц В.Г., Саранин А.А., Зотов А.В., Катаяма М. Введение в физику поверхности. М.: Наука, 2006. 490 с.
- [2] *Технология СБИС* / Под ред. С. Зи. М.: Мир, 1985. 404 с.
- [3] Вигдорovich В.Н., Гуляев Ю.В., Яфаров Р.К. // ДАН. 1988. Т. 300. № 3. С. 604.
- [4] Гуляев Ю.В., Яфаров Р.К. // Зарубежная электронная техника. 1997. № 1. С. 77.
- [5] Данилин Б.С., Киреев В.Ю. // Применение низкотемпературной плазмы для травления и очистки материалов. М.: Энергоатомиздат, 1987. 264 с.
- [6] Гуляев Ю.В., Яфаров Р.К. Эффективность использования мощности в установках СВЧ вакуумно-плазменной обработки структур микроэлектроники. М., 1989. 53 с.