УДК 537.525

ОСОБЕННОСТИ КИНЕТИКИ ГЕТЕРОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ТРАВЛЕНИИ КРЕМНИЯ В ПЛАЗМЕ CF₄ И C₂Br₂F₄

© 2022 г. А. В. Мяконьких^{1,} *, В. О. Кузьменко¹, А. М. Ефремов², К. В. Руденко¹

¹ФГБУН Физико-технологический институт им. К.А. Валиева Российской академии наук, Нахимовский просп., 34, Москва, 117218 Россия ²ФГБОУ ВО "Ивановский государственный химико-технологический университет", Шереметевский просп., 7, Иваново, 153000 Россия *E-mail: miakonkikh@ftian.ru Поступила в редакцию 04.07.2022 г. После доработки 14.07.2022 г.

Принята к публикации 14.07.2022 г.

Проведено сравнительное исследование параметров плазмы газового разряда и кинетики гетерогенных процессов (травление, полимеризация), протекающих на поверхности кремния в плазме CF_4 и $C_2Br_2F_4$. Диагностика плазмы методами зондов Ленгмюра и оптической эмиссионной спектроскопии показала, что обе системы характеризуются однотипными зависимостями концентраций ионов и атомов фтора от давления газа. Установлено, что а) кинетика полимеризации соответствует радикально-ионному механизму этого процесса; и б) принципиальными свойствами плазмы $C_2Br_2F_4$ являются сочетание более высокой полимеризационной способности (стационарной толщины полимерной пленки) и скорости травления. Последний факт не согласуется с различиями плотностей потока атомов фтора из плазмы, но может быть обусловлен дополнительной генерацией активного фтора в толстом слое полимера под действием ионной бомбардировки. Сделаны предположения о механизмах процессов, обуславливающих изменение эффективной вероятности взаимодействия и выхода травления.

Ключевые слова: диагностика плазмы, полимерообразующая плазма, диссоциация, ионизация, плазменное травление

DOI: 10.31857/S0544126922700090

1. ВВЕДЕНИЕ

Фторуглеродные газы семейства С_xF_y нашли широкое применение в технологии реактивноионного травления (РИТ) кремния и его соединений при производстве изделий интегральной микро- и нано-электроники [1, 2]. Характерной особенностью плазмы таких газов является одновременное протекание конкурирующих процессов: собственно травления (переход атомов поверхности в газовую фазу в виде летучих соединений с атомами фтора и углерода под действием ионной бомбардировки) и реакций полимеризации, приводящей к формированию сплошной фторуглеродной полимерной пленки на поверхности. Результаты многочисленных исследований закономерностей соответствующих процессов на поверхности кремния (см., например, монографии [3-5] и обзорные статьи [6–9]) могут быть кратко обобщены в виде следующих положений:

 Выходные характеристики процессов РИТ (скорость, селективность по отношению к надили под-лежащему слою, степень анизотропии и форма профиля травления) в значительной степени зависят от параметра у/х во фторуглеродной молекуле C_xF_y плазмообразующего газа [5-7], который определяет соотношение концентраций *n*_F/*n*_{CF} в плазме. Газы с низкой полимеризационной способностью (например, $CF_4 c y/x = 4$ и $n_{\rm F}/n_{\rm CF_v} > 1$ [5, 9, 10]) в диапазоне типичных условий РИТ формируют тонкую (~1-2 нм) полимерную пленку, которая может иметь как сплошную, так и островковую структуру. Такая ситуация способствует высоким скоростям травления, но при этом наблюдается близкий к изотропному профиль травления и низкая селективность на границе SiO₂/Si [2, 3, 11]. В газах с высокой полимеризационной способностью (например, в C_4F_8 с y/x = 2и *n*_F/*n*_{CF_x} < 1 [9, 10]) толщина полимерной пленки в условиях низкого потенциала смещения может достигать десятков нанометров [7, 8]. Соответственно, низкие скорости травления кремния сочетаются с высокой анизотропией процесса (за счет ингибирования реакций травления на боковых стенках формируемого рельефа [2-4]) и высокой селективностью травления оксида кремния по отношению к кремнию (за счет меньшей толщины полимерной пленки на кислородсодержащей поверхности [8, 12]).

2) Взаимодействие атомов фтора с поверхностью кремния в плазме сопровождается образованием летучего продукта SiF₄ и при этом вклад спонтанной химической реакции является существенным. Скорость РИТ кремния в газах с низкой полимеризационной способностью а) следует изменению плотности потока атомов фтора; б) демонстрирует экспоненциальную зависимость от температуры поверхности (при малых степенях загрузки реактора); и в) слабо чувствительна к изменению интенсивности ионной бомбардировки [5]. В то же время, в газах с высокой полимеризанионной способностью лимитирующей стадией процесса травления часто является транспорт атомов фтора в слое полимера [7, 8]. Поэтому кинетика травления может приобретать черты ионно-стимулированного процесса, особенно если ионная бомбардировка является основным каналом деструкции полимера и контролирует его толщину.

Из вышесказанного очевидно, что любое целенаправленное воздействие на кинетику реакций травления и полимеризации является действенным механизмом "подстройки" выходных характеристик РИТ под цели конкретной технологической операции. Инструментом такого воздействия может служить как варьирование параметров технологического процесса (давление, вкладываемая мощность, величина отрицательного смещения на обрабатываемой поверхности, тип и концентрация газа-добавки), так и выбор активного газа из широкой номенклатуры фторуглеродных соединений. В частности, перспективными плазмообразующими средами являются CBrF₃ и C₂Br₂F₄. В работах [13-17] экспериментально показано, что эти газы обеспечивают лучшие (по сочетанию скорость/анизотропия) характеристики травления кремния и позволяют минимизировать повреждения поверхности при травлении пористых диэлектриков из группы "low-k" материалов, используемых в структурах BEOL интегральных схем уровня 45 нм и менее. В то же время, степень изученности физико-химических свойств плазмы и кинетики гетерогенных процессов в данных плазменных системах (и, особенно, в $C_2Br_2F_4$) существенно ниже по сравнению с традиционными фторуглеродными газами, такими, как CF₄. Такая ситуация затрудняет выявление взаимосвязей между условиями проведения и выходными характеристиками процесса, что является необходимым условием для разработки новых и оптимизации существующих технологий РИТ.

Целью данной работы являлось сравнительное исследование параметров плазмы и закономерностей гетерогенных процессов при типичных усло-

виях РИТ в CF₄ и C₂Br₂F₄. Основное внимание было уделено вопросам влияния давления в реакторе на а) параметры электронной и ионной компонент плазмы, определяющие эффективность процессов при электронном ударе и ионной бомбардировки: б) концентрации и плотности потоков атомов фтора; и в) кинетику процессов травления и полимеризации, протекающих на поверхности кремния. Отметим, что плазме тетрафторметана (CF_4) здесь отводится роль объекта сравнения, свойства которого хорошо изучены как в экспериментальном, так и в теоретическом плане. Ранее в работах [18, 19] было показано, что комбинирование известного и малоизученного объектов в рамках единого исследования способствует более эффективному выявлению свойств последнего на основе проводимых сравнений.

2. ЭКСПЕРИМЕНТ

Эксперименты проводились в условиях индукционного ВЧ (2.0 МГц) разряда, в реакторе PlasmaLab 100 (OIPT, UK). В качестве постоянных внешних параметров плазмы выступали скорость потока газа (q = 50 ст. см³/мин) и вкладываемая мощность (W = 2500 Вт), что соответствовало плотности мощности ~0.05 Вт/см³. Варьируемым параметром служило давление в реакторе, которое изменялось в диапазоне 5–20 мтор.

Данные по электрофизическим параметрам плазмы получали с помощью одиночного зонда Ленгмюра (Espion, Hiden Analytical, UK). Для минимизации искажений результатов измерений изза полимеробразования на зондах, перед и после каждого измерения проводилась очистка зондов в плазме 50% Ar + 50% O₂ в течении ~2 мин. Эффективность данной процедуры подтверждается удовлетворительной воспроизводимость результатов в серии последовательных измерений при неизменных условиях возбуждения плазмы. Обработка зондовых вольт-амперных характеристик (ВАХ) с использованием известных положений зондовой теории для разрядов низкого давления [5, 20] обеспечивала данные по температуре электронов (T_e) , суммарной концентрации положительных ионов (n_{\perp}) и концентрации электронов (n_{e}) .

Стационарные концентрации атомов фтора определяли методом оптической актинометрии с использованием аналитической пары F 703.8 нм/Аг 750.4 [21, 22]. Для обеих спектральных линий характерны возбуждение прямым электронным ударом и низкое время жизни возбужденного состояния, что позволяет пренебречь процессами не излучательной релаксации [22]. Расчеты концентраций атомов проводили из соотношения

$$\frac{n_{\rm F}}{n_{\rm Ar}} = C_{\rm Ar}^{\rm F} \frac{I_{\rm F}}{I_{\rm Ar}},$$

где I и *n* – интенсивность излучения и концен-

трация соответствующей частицы, $C_{\rm Ar}^{\rm F}$ – актино-метрический коэффициент, определяемый отношением констант возбуждения и вероятностей оптических переходов [22]. Сечения возбуждения и параметры оптических переходов для атомов фтора и аргона хорошо известны по литературным данным [22, 23]. Ранее в нашей работе [21] было показано, что данная методика обеспечивает удовлетворительное согласие измеренных концентраций атомов в плазме CF₄ с величинами, получаемыми при моделировании плазмы. Принимая во внимание хорошую изученность плазмы тетрафторметана в теоретическом плане (надежная кинетическая схема, а также обоснованная система предпосылок и допущений, лежащая в основе модели [24–26]), данный факт может рассматриваться как свидетельство адекватности результатов измерений.

При исследовании закономерностей гетерогенных процессов использовались образцы в виде фрагментов пластин Si(100) размером $\sim 2 \times 2$ см, которые располагались на кремниевой пластиненосителе диаметром 100 мм, прижатой к электроду стола. Встроенная система водяного охлаждения обеспечивала поддержание постоянной температуры ~20°С электрода после зажигания плазмы. В экспериментах по изучению кинетики полимеризации были задействованы образцы с чистой поверхностью, при этом стол был заземлен. Энергия ионной бомбардировки в такой ситуации определялась величиной плавающего потенциала плазмы (в условиях нашего эксперимента 10-15 В), что создавало благоприятные условия для роста пленки. Время экспозиции образца в плазме составляло 100 с, толщина пленки измерялась методом спектральной эллипсометрии (M-2000X, J.A. Woollam Co., USA). Для полимерной пленки наибольшей толщины (~85 нм) в модели Коши были одновременно определены значения толщины и оптические параметры пленки. Толщины остальных пленок были измерены в модели Коши с полученными таким образом оптическими параметрами.

При изучении кинетики травления использовались образцы с предварительно сформированной структурой, которая представляла собой маску SiO₂ (толщиной ~2 мкм и занимающую ~98% от площади поверхности образца) со вскрытыми с перетравом в кремний протяженными канавками шириной ~12 мкм (рис. 1). Эксперименты проводились в условиях постоянного отрицательного смещения на нижнем электроде $-U_{dc} = 100$ В, при этом энергия ионной бомбардировки определяется выражением $e(U_{dc} + U_p) \approx \text{const}$, где U_p – потенциал плазмы. Скорость травления кремния находили по формуле $R = \Delta h/\tau$, где $\tau = 100$ с – время травления, а Δh – глубина про-



Рис. 1. Структуры, используемые при изучении кинетики травления кремния.

травленного слоя. Значения последнего параметра определялись при исследовании скола образца на растровом электронном микроскопе (Smart SEM Supra 55, Carl Zeiss AG). По нашим оценкам, загрузка реактора кремниевой пластиной, на которой располагался образец, приводит к сравнительно малым (~1.4 ст. см³/мин в пересчете на SiF₄) потокам продуктов травления с поверхности в газовую фазу, что составляет менее 3% от входящего потока плазмобразующего газа. Это позволяет заключить, что процесс травления протекает в кинетическом режиме и характеризуется пренебрежимо малым влиянием продуктов травления на параметры плазмы.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Известно, что все эффекты взаимодействия плазмы с обрабатываемой поверхностью формируются потоками и/или энергиями активных частиц, приходящих из газовой фазы. Величины потоков, в свою очередь, однозначно связаны со стационарными концентрациями соответствующих частиц в объеме плазмы, при этом сами концентрации определяются кинетикой физикохимических процессов образования и гибели. Поэтому необходимым условием выявления закономерностей и понимания механизмов гетерогенного взаимодействия является доступность информации по электрофизическим параметрам и составу плазмы.

Ранее в работе [21] мы провели детальное сравнение электрофизических параметров плазмы и концентраций основных активных частиц в CF_4 , $CBrF_3$ и $C_2Br_2F_4$ при одинаковых условиях возбуждения разряда. Поэтому остановимся кратко лишь на основных моментах, имеющих принципиальное значение для целей данного исследования:



Рис. 2. Электрофизические параметры и концентрации активных частиц в плазме CF_4 (1) и $C_2Br_2F_4$ (2): (*a*) температура электронов; (*б*) концентрация электронов; (*в*) плотность потока ионов; и (*г*) плотность потока атомов фтора.

1) Снижение температуры электронов с ростом давления (рис. 2а) в обоих случаях однозначно связано с увеличением потерь энергии при увеличении частоты столкновений электронов с частицами газа. Очевидно, что аналогичным образом изменяются и константы скоростей ионизации электронным ударом всех нейтральных компонент плазмы, что приводит к снижению суммарной частоты ионизации и эффективности генерации заряженных частиц. Результатом этого является падение концентрации электронов (рис. 2δ) и положительных ионов, которое отражается на поведении плотности их потока (рис. 2в). Более низкие значения T_e и более высокие n_+ в плазме С2Вr2F4 обусловлены, вероятно, высокими концентрациями многоатомных продуктов диссоциации вида C_xBr_yF_z. Логично предположить, что крупные частицы обеспечивают большие, по сравнению с радикалами CF_x, потери энергии на возбуждение и ионизацию, а также отличаются более высокими значениями констант скоростей ионизации в силу высоких сечений и/или низких пороговых энергий данного процесса. Более рез-

кое падение n_e в плазме $C_2Br_2F_4$ (рис. 26) можно отнести к увеличению скорости гибели электронов в процессах диссоциативного прилипания из-за резкого роста концентраций электроотрицательных частиц. В качестве последних могут выступать Br_2 , эффективное образование которых обеспечивается а) преимущественной диссоциацией компонентов вида $C_x Br_y F_z$ по связи C–Br (из-за меньшей энергии разрыва связи по сравнению с C–F [23]); и б) высокой скоростью гетерогенной рекомбинации атомов брома по механизму 2Br \rightarrow Br₂ (из-за высокой вероятности рекомбинации [25, 27, 28]).

2) Увеличение концентрации атомов фтора n_F (и, следовательно, плотности их потока Γ_F , как показано на рис. 2*г*) с ростом давления в обоих случаях обусловлено аналогичным изменением скорости образования атомов в процессах электронного удара. Очевидно, что константы скоростей диссоциации нейтральных компонент плазмы слабо чувствительны к изменению T_e в силу низких пороговых энергий процесса, поэтому увеличение концентрации фторсодержащих частиц с избытком компенсирует совокупный эффект снижения температуры и концентрации электронов. Соответственно, более низкие значения $n_{\rm F}$ в плазме $C_2 Br_2 F_4$ по сравнению с CF_4 могут быть обусловлены а) меньшими скоростями диссоциации однотипных частиц из-за отмеченных выше различий T_e и n_e ; и б) эффективной гибелью атомов фтора в объемной реакции F + Br₂ \rightarrow Br + BrF. Высокая константа скорости последней (~2 × 10⁻¹⁰ см³/с [29]) обеспечивает реальную конкуренцию гетерогенной рекомбинации атомов при $n_{\rm Br} > 10^{12}$ см⁻³.

На основании рассмотренных данных можно заключить, что обе плазменные системы характеризуются однотипными изменениями параметров плазмы при варьировании давления газа, при этом отмеченные количественные различия обусловлены спецификой химических свойств (и, соответственно, механизмов плазмохимических превращений) исходных молекул. На этом фоне вполне ожидаемым представляется тот факт, что кинетика травления и полимеризации в плазме данных газов также является качественно подобной. Так, в экспериментах по изучению закономерностей полимеризации было найдено, что стационарная толщина фторуглеродной полимерной пленки *h*_{pol} в обоих случаях монотонно снижается с ростом давления в реакторе, при этом плазма C₂Br₂F₄ обеспечивает значительно более высокие абсолютные значения h_{pol} (рис. 3a). Напротив, отрицательные значения h_{pol} в плазме CF₄ при p > 7 мтор означают травление поверхности кремния, что очевидно свидетельствует об отсутствии сплошного полимерного покрытия. Ранее в работах [24, 30] было показано, что увеличение давления в диапазоне 5—20 мтор в плазме CF_4 сопровождается ростом концентраций фторуглеродных радикалов в газовой фазе и, несомненно, вызывает аналогичное изменение суммарной плотности потока полимеробразующих частиц на обрабатываемую поверхность. По нашему мнению, отсутствие согласия в поведении данного параметра и величины *h*_{pol} свидетельствует о доминировании радикально-ионного механизма полимеризации, скорость которого лимитируется образованием свободных связей на границе плазма/полимер под действием ионной бомбардировки. Соответственно, в плазме обоих газов имеет место симбатное изменение толщины полимерной пленки и плотности потока ионов. На основании этого можно предположить, что более толстое полимерное покрытие на поверхности кремния в плазме C₂Br₂F₄ обусловлено не только преимуществом в концентрации полимеробразующих частиц в силу различий отношений F/C в исходных молекулах, но и отражает более высокую вероятность полимеризации из-за более высоких значений Γ_+ (рис. 2*в*).

Эксперименты по исследованию кинетики травления кремния показали монотонное снижение скорости травления с ростом давления, при этом более высокие абсолютные значения также наблюдаются в плазме $C_2Br_2F_4$ (рис. 36). В общем случае, в качестве причин последнего эффекта можно рассматривать а) особенности кинетики гетерогенных процессов с участием атомов фтора; и/или б) существование параллельных каналов химического взаимодействия с участием атомов брома. В то же время, из результатов работ [31, 32] однозначно следует, что вероятность спонтанного химического взаимодействия в системе Si + Br существенно ниже, чем для Si + F. Причину такой ситуации обычно относят к большему размеру атомов брома, что затрудняет проникновение этих частиц в поверхностные слои обрабатываемого материала [32]. В результате, основными продуктами взаимодействия являются труднолетучие соединения вида SiBr_x (x < 4) [31, 33], удаление которых с поверхности требует ионной бомбардировки. Таким образом, принимая во внимание соотношение $n_{\rm Br} < n_{\rm F}$ в плазме C₂Br₂F₄ для исследуемого диапазона условий [21], наиболее реалистичным нам представляется первый из предложенных вариантов. Сравнение данных рис. 2г и 3δ показывает, что более высокие значения $R_{\rm Si}$ в плазме C₂Br₂F₄ наблюдаются при более низких значениях плотности потока атомов фтора. Очевидно, что такая ситуация соответствует значительным различиям эффективных вероятностей взаимодействия (рис. 3в), определяемых как $\gamma_R = R_{\rm Si}/\Gamma_{\rm F}$. Характерные величины $\gamma_R \sim 0.1$, наблюдаемые нами в плазме CF₄, хорошо согласуются с результатами независимых исследований для плазменных систем с низкой полимеризационной способностью (например, для $CF_4 + Ar B$ диапазоне 0-80% Ar и C_4F_8 + Ar при содержаниях аргона более 60-70% [9, 34]). Это позволяет полагать, что данная величина γ_R действительно характеризует кинетику гетерогенной химической реакции Si + $xF \rightarrow SiF_x$ при малом возмущающем действии сторонних факторов, таких как интенсивность ионной бомбардировки и/или толщина полимерного покрытия. Кажущимся противоречием данного вывода является тот факт, что поведение скорости травления кремния не коррелирует с зависимостью $n_F = f(p)$, но согласуется с поведением Г₊, что является формальным признаком ионно-стимулированного процесса. По нашему мнению, снижение эффективной вероятности взаимодействия и скорости травления с ростом давления может быть связано со снижением доли свободных центров адсорбции для атомов фтора из-за конкурентной адсорбции нереагирующих частиц. В качестве последних можно рас-



Рис. 3. Кинетические характеристики процессов травления и полимеризации в плазме $CF_4(1)$ и $C_2Br_2F_4(2)$: (*a*) толщина полимерной пленки; (*b*) скорость травления кремния; (*b*) эффективная вероятность взаимодействия (как отношение скорости травления к плотности потока атомов фтора); и (*c*) выход травления (как отношение скорости травления к плотности потока ионов).

сматривать радикалы CF_x , плотность потока которых с давлением также возрастает.

Что касается плазмы $C_2Br_2F_4$, наблюдаемые значения γ_R представляются нам необоснованно высокими, вплоть до не имеющего физического смысла условия $\gamma_R > 1$ при p = 5-7 мтор. По нашему мнению, наиболее вероятной причиной такой ситуации является дополнительная генерация атомов фтора в слое полимера под действием ионной бомбардировки. В результате, реальная плотность потока атомов фтора на границе полимер/кремний оказывается выше величины Г_F, определяемой по концентрации атомов фтора в газовой фазе. Ранее в работе [8] было экспериментально показано, что при толщине полимерной пленки ~100 нм ионностимулированное дефторирование полимера оказывает существенное влияние на кинетику травления кремния, при этом количественно величина эффекта в условиях $h_{pol} = \text{const}$ зависит от энергии ионов (фактически, от эффективной длины их пробега, на которой сохраняется способность генерации атомов). Косвенным свидетельством в пользу данного механизма в нашем случае является симбатное изменение величин γ_R и h_{pol} в условиях постоянства энергии бомбардирующих ионов.

В заключение отметим, что существует альтернативный подход к описанию кинетики РИТ, рассматривающий данный процесс не как ионностимулированную химическую реакцию, а как химически-стимулированное распыление [31, 35]. Основной кинетической характеристикой в последнем случае является выход распыления Y_R , определяемый отношением скорости травления к плотности потока ионов. Из рис. Зг можно видеть, что характерные значения Y_R в плазме обоих газов существенно превышают коэффициент распыления кремния в чисто физическом процессе (~0.05-0.2 атом/ион при бомбардировке ионами Ar⁺ с энергиями 100-200 эВ [36]). Это позволяет заключить, что в химически реагирующей системе объектами распыления служат либо молекулы продуктов реакции, либо частично фторированные атомы кремния с ослабленными поверхностными связями. Соответственно, более высокие значения Y_R в плазме C₂Br₂F₄ обусловлены более высокими вероятностями химической реакции в данной системе, как это следует и рис. 3в, при этом увеличение выхода травления с ростом давления газа согласуется со снижением толщины полимерной пленки. Очевидно, что последний эффект сопровождается ростом энергии ионов, достигающих поверхности. В пользу этого предположения свидетельствует тот факт, что аналогичная зависимость в плазме CF₄ выражена гораздо слабее.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено исследование влияния давления газа на параметры газовой фазы и кинетику гетерогенных процессов на поверхности кремния в плазме CF_4 и $C_2Br_2F_4$. Установлено, что в обоих случаях имеют место качественно подобные изменения а) параметров электронной компоненты плазмы, плотности потока ионов и атомов фтора; б) стационарной толщины фторуглеродной полимерной пленки, формирующейся по радикально-ионному механизму; и в) скорости травления кремния. Найдено, что принципиальными свойствами плазмы С₂Вr₂F₄ являются сочетание более высокой полимеризационной способности и скорости травления. Формальной причиной последней особенности является аномально высокая эффективная вероятность гетерогенной реакции $Si + xF \rightarrow SiF_{x}$, обусловленная дополнительной генерацией атомов фтора в слое полимера под действием ионной бомбардировки. Показано, что отсутствие корреляции в поведении скорости травления и плотности потока атомов фтора с ростом давления газа в обоих случаях обусловлено снижением эффективной вероятности взаимодействия. Наиболее реалистичными причинами этого являются снижение толщины полимерной пленки (в плазме $C_2Br_2F_4$) и конкурентная адсорбция нереагирующих частиц, приводящая к снижению доли свободных центров адсорбции для атомов фтора (в плазме CF₄).

Работа выполнена в рамках Государственного задания ФТИАН им. К.А. Валиева РАН Минобрнауки РФ по теме № FFNN-2022-0019 и частично поддержана грантом РФФИ 20-07-00832А.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Nojiri K.* Dry etching technology for semiconductors, Tokyo: Springer International Publishing, 2015.
- 2. *Wolf S., Tauber R.N.* Silicon Processing for the VLSI Era. Volume 1. Process Technology, New York: Lattice Press, 2000.
- Coburn J.W. Plasma etching and reactive ion etching, New York: AVS Monograph Series, 1982.
- 4. Roosmalen J., Baggerman J.A.G., Brader S.J.H. Dry etching for VLSI, New-York: Plenum Press, 1991.

МИКРОЭЛЕКТРОНИКА том 51 № 6 2022

- Rudenko K.V., Miakonkikh A.V., Orlikovsky A.A. Plasma Etching of poly-Si/SiO₂/Si Structures: Langmuir-Probe and Optical-Emission-Spectroscopy Monitoring // Russian Microelectronics. 2007. V. 36. № 3. pp. 179–192.
- Kay E., Coburn J., Dilks A. Plasma chemistry of fluorocarbons as related to plasma etching and plasma polymerization. In: Veprek S., Venugopalan M. (eds.) Plasma Chemistry III. Topics in Current Chemistry. V. 94. Berlin, Heidelberg: Springer, 1980.
- Stoffels W.W., Stoffels E., Tachibana K. Polymerization of fluorocarbons in reactive ion etching plasmas // J. Vac. Sci. Tech. A. 1998. V. 16. pp. 87–95.
- Standaert T.E.F.M., Hedlund C., Joseph E.A., Oehrlein G.S., Dalton T.J. Role of fluorocarbon film formation in the etching of silicon, silicon dioxide, silicon nitride, and amorphous hydrogenated silicon carbide // J. Vac. Sci. Technol. A. 2004. V. 22. pp. 53–60.
- Efremov A., Lee B. J., Kwon K.-H. On relationships between gas-phase chemistry and reactive-ion etching kinetics for silicon-based thin films (SiC, SiO₂ and Si_xN_y) in multi-component fluorocarbon gas mixtures // Materials. 2021. V. 14. pp. 1432(1–27).
- 10. *Efremov A.M., Murin D.B., Kwon K.-H.* Concerning the Effect of Type of Fluorocarbon Gas on the Output Characteristics of the Reactive-Ion Etching Process // Russian Microelectronics. 2020. V. 49. № 3. pp. 157–165.
- Matsui M., Tatsumi T., Sekine M. Relationship of etch reaction and reactive species flux in C₄F₈-Ar-O₂ plasma for SiO₂ selective etching over Si and Si₃N₄ // J. Vac. Sci. Technol. A. 2001. V. 19. pp. 2089–2096.
- Li X., Ling L., Hua X., Fukasawa M., Oehrlein G.S., Barela M., Anderson H.M. Effects of Ar and O₂ additives on SiO₂ etching in C₄F₈-based plasmas // J. Vac. Sci. Technol. A. 2003. V. 21. pp. 284–293.
- Matsuo S. Selective etching of Si relative to SiO₂ without undercutting by CBrF₃ plasma // Appl. Phys. Lett. 1980. V. 36. pp. 768–773.
- Engelhardt M., Schwarz S. A new CBrF₃ process for etching tapered trenches in silicon // J. Electrochem. Soc. 1987. V. 134. pp. 1985–1992.
- Flamm D.L., Cowan P.L., Golovchenko J.A. Etching and film formation in CF₃Br plasmas: some qualitative observations and their general implications // J. Vac. Sci. Tech. 1980. V. 17. pp. 1341–1348.
- Lopaev D.V., Mankelevich Yu.A., Rakhimova T.V., Zotovich A.I., Zyryanov S.M., Baklanov M.R. Damage and etching of ultra low-k materials in fluorocarbon plasma at lowered temperatures // J. Phys. D: Appl. Phys. 2017. V. 50. p. 485202.
- Rezvanov A., Miakonkikh A.V., Vishnevskiy A.S., Rudenko K.V., Baklanov M.R. Cryogenic etching of porous low-k dielectrics in CF₃Br and CF₄ plasmas // J. Vac. Sci. Technol. B. 2017. V. 35. p. 021204.
- 18. Lim N., Choi Y.S., Efremov A., Kwon K.-H. Dry etching performance and gas-phase parameters of $C_6F_{12}O + Ar$ plasma in comparison with $CF_4 + Ar //$ Materials. 2021. V. 14. pp. 1595(1–15).
- 19. Lim N., Efremov A., Woo B., Kwon K.-H. Comparative Study of $CF_4 + O_2$ and $C_6F_{12}O + O_2$ Plasmas for Reactive-Ion Etching Applications // Plasma Processes and Polymers. 2022. V. 19. pp. 2100129(1–13).

- 20. *Shun'ko E.V.* Langmuir Probe in Theory and Practice, Boca Raton: Universal Publishers, 2008.
- Miakonkikh A., Kuzmenko V., Efremov A., Rudenko K. A comparison of CF₄, CBrF₃ and C₂Br₂F₄ Plasmas: Physical Parameters and Densities of Atomic Species // Vacuum. 2022. V. 200. P. 110991 (1–7)
- Lopaev D.V., Volynets A.V., Zyryanov S.M., Zotovich A.I., Rakhimov A.T. Actinometry of O, N and F atoms // J. Phys. D: Appl. Phys. 2017. V. 50. pp. 075202 (1–17).
- 23. Handbook of Chemistry and Physics, Boca Raton: CRC press, 1998.
- Kimura T., Ohe K. Probe measurements and global model of inductively coupled Ar/CF₄ discharges // Plasma Sources Sci. Technol. 1999. V. 8. pp. 553–560.
- Efremov A., Lee J., Kwon K.-H. A comparative study of CF₄, Cl₂ and HBr + Ar Inductively Coupled Plasmas for Dry Etching Applications // Thin Solid Films. 2017. V. 629. pp. 39–48.
- Chun I., Efremov A., Yeom G.Y., Kwon K.-H. A comparative study of CF₄/O₂/Ar and C₄F₈/O₂/Ar plasmas for dry etching applications // Thin Solid Films. 2015. V. 579. pp. 136–143.
- Serdyuk N.K., Gutorov V.V., Panfilov V.N. Studies of the Reactions of Br(²P_{3/2}) and Br(²P_{1/2}) with SiH₄ // React. Kinet. Catal. Lett. 16 (1981) 393–397.
- Kota G.P., Coburn G.W., Graves D.B. Heterogeneous recombination of atomic fluorine and bromine // J. Vac. Sci. Technol. A. 1999. V. 17. pp. 282–291.

- 29. NIST Chemical Kinetics Database, https://kinetics. nist.gov/kinetics/index.jsp (28.06.2022)
- *Kimura T., Ohe K.* Model and probe measurements of inductively coupled CF₄ discharges // J. Appl. Phys. 2002. V. 92. pp. 1780–1787.
- Vitale S.A., Chae H., Sawin H.H. Silicon etching yields in F₂, Cl₂, Br₂, and HBr high density plasmas // J. Vac. Sci. Technol. A. 2001. V. 19. pp. 2197–2206.
- Belen R.J., Gomez S., Kiehlbauch M., Aydil E.S. Feature scale model of Si etching in SF₆/O₂/HBr plasma and comparison with experiments // J. Vacuum. Sci. Technol. A. 2006. V. 24. pp. 350–361.
- Jin W., Vitale S.A., Sawin H.H. Plasma-surface kinetics and simulation of feature profile evolution in Cl₂ + HBr etching of polysilicon // J. Vac. Sci. Technol. A. 2002. V. 20. pp. 2106–2114.
- 34. Efremov A.M., Betelin V.B., Mednikov K.A., Kwon K.-H. Gas-phase parameters and reactive-ion etching regimes for Si and SiO₂ in binary Ar + CF₄/C₄F₈ mixtures // Chem. Chem. Tech. 2021. V. 64(6). pp. 25–34.
- Tachi S., Okudaira S. Chemical sputtering of silicon by F⁺, Cl⁺, and Br⁺ ions: Reactive spot model for reactive ion etching // J. Vac. Sci. Technol. B. 1986. V. 4. pp. 459–487.
- 36. A simple sputter yield calculator, https://www.iap.tuwien.ac.at/www/surface/sputteryield (28.06.2022)