

КИНЕТИКА И МЕХАНИЗМЫ РЕАКТИВНО-ИОННОГО ТРАВЛЕНИЯ
Si И SiO₂ В ПЛАЗМЕ СМЕСИ HBr + O₂© 2020 г. А. М. Ефремов^{a, b, *}, В. Б. Бетелин^b, К.-Н. Кwon^c^aФГБОУ ВО «Ивановский государственный химико-технологический университет»,
Шереметевский просп., 7, г. Иваново, 153000 Россия^bФГУ ФНЦ НИИСИ Российской АН, Нахимовский просп., 36, корп. 1, г. Москва, 117218 Россия^cKorea University, Sejong, 339-700 South Korea

*e-mail: amefremov@mail.ru

Поступила в редакцию 19.03.2020 г.

После доработки 16.05.2020 г.

Принята к публикации 20.05.2020 г.

Проведено исследование кинетики и механизмов реактивно-ионного травления Si и SiO₂ в плазме смеси HBr + O₂ переменного начального состава в условиях индукционного ВЧ (13.56 МГц) разряда. При экспериментальном и теоретическом (модельном) исследовании параметров плазмы выявлены ключевые плазмохимические процессы, формирующие стационарный состав газовой фазы, а также определены плотности потоков активных частиц на обрабатываемую поверхность. Установлено, что увеличение доли O₂ в плазмообразующей смеси сопровождается снижением кинетических коэффициентов (эффективной вероятности взаимодействия и выхода травления), характеризующих гетерогенные стадии процесса травления. Предположено, что основным механизмом данного эффекта является окисление продуктов травления SiBr_x в низко летучие соединения вида SiBr_xO_y.

DOI: 10.31857/S0544126920060034

1. ВВЕДЕНИЕ

Плазма галогенсодержащих газов нашла широкое применение в технологии интегральной микро- и нано-электроники для размерного структурирования поверхностей полупроводниковых пластин и функциональных слоев различной природы [1, 2]. В частности, в процессах реактивно-ионного травления кремния и его соединений (SiO₂, Si₃N₄ и SiC) традиционно используется плазма фторуглеродных газов, при этом широкая номенклатура соответствующих соединений (CF₄, C₂F₆, C₄F₈, CHF₃ и др.) позволяет эффективно оптимизировать выходные характеристики процесса – скорость травления, анизотропию и селективность по отношению к над или под-лежащему слою. В то же время, существенным недостатком фторной химии является возможность спонтанной реакции атомов фтора с кремнием, что обеспечивает близкий к изотропному профиль травления данного материала [2, 3]. Таким образом, поиск альтернативных плазмообразующих сред для реактивно-ионного травления Si и SiO₂ является актуальной задачей, направленной на оптимизацию как технологических, так и функциональных параметров конечных изделий. Неотъемлемой частью такой задачи, на наш взгляд, является изучение взаимосвязей между внешними параметрами плазмы, ее составом и кинетикой процессов на обрабатываемой поверхности.

Это обеспечивает комплексное понимание механизма взаимодействия в системе плазма-поверхность и, как следствие, возможность целенаправленного воздействия на его результат.

В настоящее время существует ряд работ, посвященных исследованием закономерностей травления Si и SiO₂ в плазме на основе HBr [5–12]. Результаты этих работ могут быть обобщены в виде следующих положений:

– Спонтанная химическая реакция в системе SiO₂ + Br термодинамически невозможна [4, 5] из-за того, что энергия связи Si–O (~800 кДж/моль [6]) значительно выше по сравнению с Si–Br (~358 кДж/моль [6]). Как следствие, травление SiO₂ в плазме HBr следует механизму ионно-стимулированной химической реакции, в которой ионная бомбардировка обеспечивает образование (через разрыв Si–O связей) и очистку (через распыление труднолетучих ненасыщенных продуктов взаимодействия SiBr_x) центров адсорбции для атомов брома [3, 4, 8, 9].

– Вероятность спонтанной химической реакции в системе Si + Br значительно ниже по сравнению с Si + F [5, 7]. Причина такого различия, скорее всего, связана с большим размером атома брома, затрудняющим его внедрение в решетку кремния. Поэтому стационарный режим травления Si в плазме HBr также обеспечивается ионно-стимулированной химической реакцией [10–12]

и отличается значительно более низкими абсолютными значениями скоростей процесса по сравнению с фторной химией.

– Добавка кислорода к НВг снижает скорость травления кремния, но способствует увеличению анизотропии процесса [10, 12]. Экспериментально показано, что последний эффект достигается за счет маскирования боковых стенок формируемого рельефа соединениями вида SiBr_xO_y , которые обладают еще меньшей летучестью (и, следовательно, меньшими коэффициентами распыления) по сравнению с SiBr_x [10].

К сожалению, практически все упомянутые исследования выполнены в рамках чисто экспериментального подхода и не анализируют гетерогенные эффекты на обрабатываемой поверхности во взаимосвязи с параметрами газовой фазы. В такой ситуации, большинство заключений о механизмах травления, в том числе – Si и SiO_2 в плазме смеси НВг + O_2 , носят декларативный характер и требуют независимой верификации. В наших предшествующих работах [13, 14] был проведен комплексный (с использованием методов диагностики и моделирования плазмы) анализ кинетики и механизмов травления Si и SiO_2 в плазме трехкомпонентной смеси НВг + Cl_2 + O_2 , отличающейся одновременным действием двух типов химически активных частиц – атомов брома и хлора. Основная идея данной работы заключается в использовании аналогичного подхода для исследования бинарной системы НВг + O_2 с целью определить, как начальный состав смеси влияет на а) кинетику травления Si и SiO_2 ; б) электрофизические параметры и состав плазмы; в) механизмы гетерогенного взаимодействия.

2. МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

2.1. Оборудование и техника эксперимента

Эксперименты по травлению и исследованию параметров плазмы проводились в реакторе планарного типа [15] с рабочей камерой из нержавеющей стали при возбуждении индукционного ВЧ (13.56 МГц) разряда. В качестве неизменных внешних параметров плазмы выступали общий расход плазмообразующего газа $q = 40$ станд. $\text{см}^3/\text{мин}$, его давление $p = 6$ мтор (~ 0.8 Па) и вкладываемая мощность $W = 700$ Вт. Варьируемым параметром являлся начальный состав плазмообразующей смеси НВг + O_2 , задаваемый соотношением индивидуальных расходов ее компонентов. В частности, изменение q_{O_2} в диапазоне 0–30 станд. $\text{см}^3/\text{мин}$ обеспечивало долю кислорода в подаваемом газе $y_{\text{O}_2} = 0$ –75%. Данные по электрофизическим параметрам плазмы получали с помощью двойного зонда Лангмюра (DLP2000, PlasmartInc., Korea). Обработка измеренных вольт-амперных характеристик (ВАХ) с использованием известных поло-

жений теории двойного зонда [16] обеспечивала данные по температуре электронов (T_e) и плотности ионного тока (J_+). Отрицательное смещение на нижнем электроде ($-U_{dc}$), задаваемое независимым ВЧ (12.56 МГц) генератором с постоянной мощностью смещения $W_{dc} = 200$ Вт, измерялось высоковольтным зондом (AMN-CTR, Youngsin Eng, Korea). Эксперименты показали, что варьирование W_{dc} в диапазоне 0–200 Вт не оказывает принципиального влияния на вид зондовых ВАХ и, следовательно, на параметры газовой фазы разряда.

В качестве объектов травления использовались фрагменты не окисленных и окисленных пластин Si(100) со средней площадью ~ 4 см^2 . Обрабатываемые образцы располагались в центральной части нижнего электрода, температура которого поддерживалась на постоянном уровне с помощью системы водяного охлаждения. Скорость травления определяли как $R = \Delta h/\tau$, где τ – время травления и Δh – высота ступеньки травления на границе маскированной и немаскированной областей поверхности образца. В качестве маскирующего покрытия использовался фоторезист AZ1512. Величина Δh измерялась профилометром (Alpha-step D-500, KLA-Tencor, USA). Предварительные эксперименты показали, что даже пятикратное увеличение площади обрабатываемой поверхности не сопровождается существенными (в пределах погрешности эксперимента) изменениями зондовых ВАХ и не вызывает снижения скоростей травления Si и SiO_2 . Таким образом, в исследованном диапазоне условий процесс травления обоих материалов отвечает кинетическому режиму ионно-стимулированной химической реакции и характеризуется пренебрежимо малым влиянием продуктов травления на параметры газовой фазы.

2.2. Моделирование плазмы

Для получения данных по кинетике плазмохимических процессов и составу плазмы НВг + O_2 использовалась 0-мерная кинетическая модель, подробно описанная в наших работах [13, 14]. Базовая кинетическая схема (набор реакций и соответствующих констант скоростей) для смеси НВг + O_2 была позаимствована из работы [14]. Адекватность данной кинетической схемы при описании кинетики плазмохимических процессов в индивидуальных газах-компонентах смеси подтверждена ранее в работах [17, 18] удовлетворительным согласием результатов диагностики и моделирования плазмы. В качестве входных параметров модели выступали данные зондовой диагностики плазмы по T_e и J_+ . Выходные параметры модели служили усредненными по объему реактора скорости процессов образования и гибели частиц, их концентрации и плотности потоков на поверхность, контактирующую с плазмой.

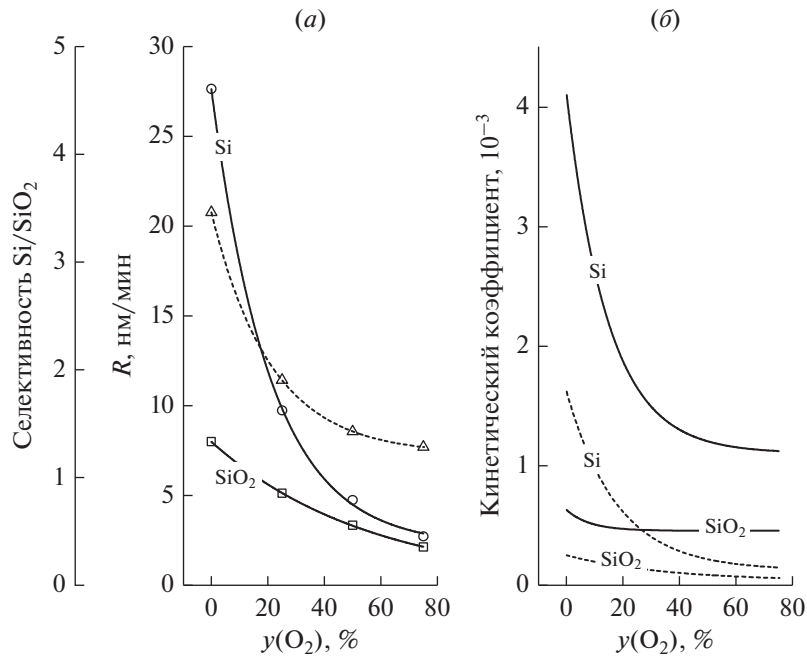


Рис. 1. Кинетика травления Si и SiO₂ в плазме смеси HBr + O₂ переменного начального состава: *a* – скорость травления R (сплошные линии) и селективность травления R_{Si}/R_{SiO_2} (пунктир); *б* – кинетические коэффициенты $\gamma_R = R/\Gamma_{Br}$ и $Y_R = R/\sqrt{M_i \epsilon_i} \Gamma_+$, характеризующие химическую и физическую составляющие гетерогенного взаимодействия.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 приведены данные по влиянию начального состава смеси HBr + O₂ на кинетику травления Si и SiO₂. Из рис. 1а можно видеть, что скорости травления обоих материалов монотонно снижаются с ростом y_{O_2} (27.8–2.7 нм/мин, или в ~10 раз для Si и 8.0–2.1 нм/мин, или в ~4 раза для SiO₂ при 0–75% O₂), при этом характер снижения более резок в области $y_{O_2} < 30\%$. Такое поведение скоростей травления соответствует снижению селективности травления Si/SiO₂ в диапазоне 3.1–1.2 при 0–75% O₂. Таким образом, добавка кислорода к HBr способствует “выравниванию” скоростей травления исследованных материалов, что качественно аналогично эффектам, достигаемым в плазме фторуглеродных газов с высокой полимеризационной способностью [1–3, 19]. Из анализа работ [19–21] можно заключить, что изменение скорости реактивно-ионного процесса при варьировании соотношения компонентов в плазмообразующей смеси может быть вызвано действием нескольких факторов, а именно: а) изменениями концентраций и плотностей потоков активных частиц (атомов брома, положительных ионов) из-за изменений кинетики плазмохимических процессов в газовой фазе; и б) влиянием начального состава смеси на кинетические характеристики (вероятности, константы скоростей) гетерогенного взаимодействия. Поэтому корректная интерпретация данных рис. 1а требует

информации по электрофизическим параметрам и составу плазмы.

При диагностике плазмы было найдено, что разбавление HBr кислородом в условиях $p = \text{const}$ вызывает незначительный рост температуры электронов (3.2–3.3 эВ при 0–75% O₂), но более заметное увеличение плотности ионного тока (1.7–2.5 мА/см², или в ~1.5 раза при 0–75% O₂) (рис. 2а). Первый эффект является следствием того, что снижение потерь энергии электронов на возбуждение и ионизацию основных молекулярных компонентов плазмы чистого HBr практически полностью компенсируется аналогичными процессами для O₂. В то же время, последние характеризуются меньшими потерями энергии на колебательное возбуждение по сравнению с HBr и H₂ [22], что и обеспечивает слабый рост T_e . Характер изменения J_+ с ростом y_{O_2} ожидаемо следует поведению суммарной концентрации положительных ионов (7.5×10^{10} – 9.0×10^{10} см⁻³ при 0–75% O₂, см. рис. 2б), при этом формальное различие форм соответствующих кривых обеспечивается уменьшением эффективной массы ионов. Расчеты показали, что основной причиной роста n_+ является снижение частоты объемной гибели положительных ионов в процессах вида $A^+ + B^- \rightarrow A + B$ (из-за $n_- = 3.5 \times 10^{10}$ – 1.9×10^{10} см⁻³ при 0–75% O₂) на фоне малых изменений суммарной частоты ионизации. Последнее обеспечивается близкими значениями констант скоростей ионизации

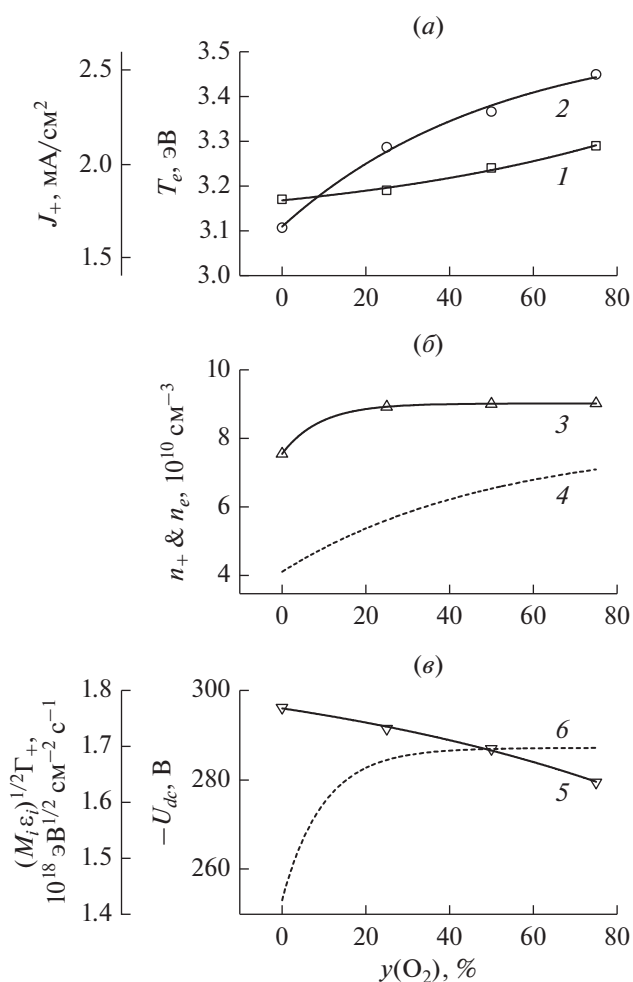


Рис. 2. Электрофизические параметры плазмы смеси HBr + O₂ переменного начального состава: 1 – температура электронов; 2 – плотность ионного тока; 3 – суммарная концентрация положительных ионов; 4 – концентрация электронов; 5 – отрицательное смещение на подложкодержателе; 6 – параметр $\sqrt{M_i \epsilon_i} \Gamma_+$, характеризующий плотность потока энергии ионов.

Br ($\sim 1.9 \times 10^{-10}$ см³/с при $T_e = 3$ эВ) и O₂ ($\sim 1.3 \times 10^{-10}$ см³/с при $T_e = 3$ эВ), как доминирующих нейтральных компонентов газовой фазы (рис. 3а). Из рис. 2б можно видеть также, что концентрация электронов в условиях $n_-/n_e < 1$ следует изменению n_+ . Фактически, это является следствием снижения эффективного коэффициента диффузии и частоты диффузионной гибели электронов при уменьшении электроотрицательности плазмы ($n_-/n_e = 0.85-0.26$ при 0–75% O₂) из-за соответствующих различий констант скоростей процессов R1: HBr + e → H + Br⁻ ($k_1 \sim 3.0 \times 10^{-10}$ см³/с при $T_e = 3$ эВ) и R2: O₂ + e → O + O⁻ ($k_2 \sim 2.1 \times 10^{-11}$ см³/с при $T_e = 3$ эВ). Отметим также, что суммарный эффект от снижения отрицательного смещения на нижнем электроде ($-U_{dc} = 296-280$ В при 0–

75% O₂, см. рис. 2в) и эффективной массы ионов с избытком компенсируется увеличением плотности потока ионов (рис. 3б). В результате, с ростом y(O₂) имеет место увеличение параметра $\sqrt{M_i \epsilon_i} \Gamma_+$ (рис. 2в), характеризующего интенсивность ионной бомбардировки обрабатываемой поверхности [13, 14].

При анализе кинетики нейтральных частиц было найдено, что в исследованном диапазоне условий плазма HBr сохраняет практически все особенности, отмеченные ранее в работах [17, 23, 24]. В частности, расчеты показали, что реакции R3: HBr + e → H + Br + e ($k_3 \sim 1.6 \times 10^{-9}$ см³/с при $T_e = 3$ эВ) и R4: Br₂ + e → 2Br + e ($k_4 \sim 1.2 \times 10^{-8}$ см³/с при $T_e = 3$ эВ) являются близкими по эффективности источниками атомов брома даже в условиях $n_{Br_2} < n_{HBr}$. В то же время, низкая константа скорости R5: H₂ + e → 2H + e ($k_5 \sim 8.1 \times 10^{-10}$ см³/с при $T_e = 3$ эВ) в сочетании с быстрой гибелью атомов водорода в атомно-молекулярных процессах R6: HBr + H → H₂ + Br ($k_6 \sim 1.2 \times 10^{-11}$ см³/с) и R7: Br₂ + H → HBr + Br ($k_7 \sim 1.2 \times 10^{-10}$ см³/с) приводят к $n_H \ll n_{Br}$. Кроме этого, выполнение условия $k_4 \gg k_6$ и эффективное образование молекул H₂ по R6 обеспечивают $n_{H_2} > n_{Br_2}$ (рис. 3а). Разбавление HBr кислородом сопровождается как ростом частот диссоциации молекулярных частиц в процессах электронного удара (например, $k_3 n_e = 72-137$ с⁻¹ и $k_4 n_e = 512-938$ с⁻¹ при 0–75% O₂), так и появлением механизмов ступенчатой диссоциации с участием O и OH. Наиболее эффективными среди последних являются R8: HBr + OH → H₂O + Br ($k_8 \sim 8.0 \times 10^{-12}$ см³/с), R9: Br₂ + O → BrO + Br ($k_9 \sim 1.3 \times 10^{-11}$ см³/с) и R10: Br₂ + OH → HOBr + Br ($k_{10} \sim 3.1 \times 10^{-11}$ см³/с). Это приводит к быстрому снижению концентраций HBr и Br₂ (в ~ 4 раза и ~ 7 раз, соответственно, при 0–50% O₂), но к значительно более медленному изменению величины n_{Br} (в ~ 1.5 раза при 0–50% O₂). Аналогичное поведение характерно и для плотности потока атомов брома на обрабатываемую поверхность Γ_{Br} (рис. 3б).

Сравнение данных рис. 1, 2 и 3 позволяет заключить, что монотонное снижение скоростей травления Si и SiO₂ с ростом y(O₂) противоречит поведению $\sqrt{M_i \epsilon_i} \Gamma_+$, но качественно согласуется с характером изменения Γ_{Br} . Такая ситуация характерна для ионно-стимулированной химической реакции в режиме лимитирования потоком нейтральных частиц [19, 20], скоростью которой может быть представлена как $\gamma_R \Gamma_{Br}$, где γ_R – эффективная вероятность взаимодействия. Из рис. 1б можно видеть, что увеличение доли кислорода в смеси HBr + O₂ вызывает монотонное снижение γ_R для Si и SiO₂, при этом характер снижения су-

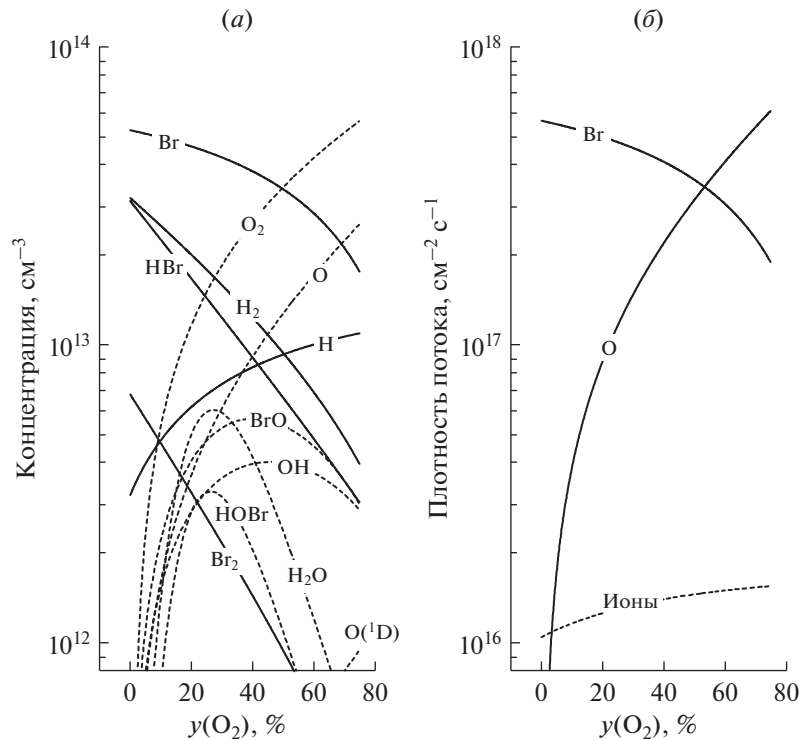
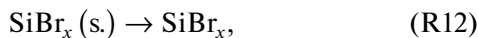
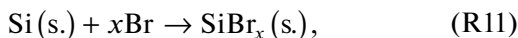
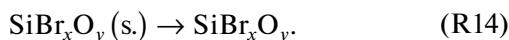
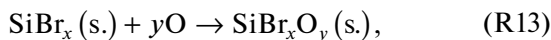


Рис. 3. Концентрации (а) и плотности потоков (б) активных частиц в плазме смеси HBr + O₂ переменного начального состава.

ществено замедляется в области $y_{O_2} > 30-40\%$. Принимая во внимание, что последний эффект коррелирует с насыщением на соответствующей зависимости плотности потока энергии ионов (рис. 2в), механизмы травления Si и SiO₂ в исследованном диапазоне условий могут быть интерпретированы следующим образом. В бескислородной плазме, травление обеспечивается химической реакцией кремния с атомами брома с последующей ионно-стимулированной десорбцией продуктов взаимодействия:

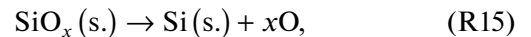


где индекс (s.) отвечает состоянию частицы на поверхности. Введение кислорода в плазмообразующий газ инициирует окисление бромидов кремния и, соответственно, добавляет в процесс травления две гетерогенных стадии:



Очевидно, что увеличение y_{O_2} вызывает аналогичное изменение скорости R13 и, таким образом, способствует увеличению доли SiBr_xO_y среди продуктов взаимодействия. Низкая летучесть SiBr_xO_y по сравнению с SiBr_x обуславливает снижение эффективного выхода ионно-стимулированной десорбции продуктов, которое в области $y_{O_2} < 30-40\%$ с избытком компенсирует рост интенсивности

ионной бомбардировки поверхности. Это вызывает снижение γ_R из-за уменьшения доли свободной поверхности, доступной для адсорбции атомов Br. Можно предположить, что в области $y_{O_2} > 30-40\%$ доминирующим продуктом взаимодействия становится SiBr_xO_y, при этом эффект R13 на состав продуктов взаимодействия и эффективный выход их ионно-стимулированной десорбции существенно ослабевает. В таких условиях, малые изменения γ_R согласуются с соответствующей зависимостью параметра $\sqrt{M_i \epsilon_i} \Gamma_+$. Отметим также, что в области $y_{O_2} < 30-40\%$ величина y_{R, SiO_2} характеризуется более слабой зависимостью от содержания кислорода в смеси по сравнению $\gamma_{R, Si}$ (рис. 1б). По нашему мнению, это связано с тем, что травление SiO₂ инициируется ионным процессом



эффективность которого не связана с изменением состава продуктов взаимодействия. На рис. 1б также представлены данные по влиянию начального состава смеси HBr + O₂ на эффективный выход травления Y_R , определенный как отношение скорости травления к параметру $\sqrt{M_i \epsilon_i} \Gamma_+$. Так как последний учитывает непостоянство энергии и эффективной массы ионов, характер зависимости $Y_R = f(y_{O_2})$ отражает лишь изменение свойств распыляемой поверхности. Таким образом, монотонное снижение Y_R с ростом концентрации и

плотности потока атомов кислорода подтверждает предположение об окислении продуктов травления в низколетучие соединения вида SiBr_xO_y .

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследовано влияние начального состава смеси $\text{HBr} + \text{O}_2$ на кинетику и механизмы реакционно-ионного травления Si и SiO_2 в условиях индукционного ВЧ (13.56 МГц) разряда. Найдено, что увеличение доли кислорода в смеси сопровождается монотонным снижением как скоростей травления, так и кинетических коэффициентов характеризующих химическую (эффективная вероятность взаимодействия) и физическую (эффективный выход травления) составляющие гетерогенного взаимодействия. Последнее обеспечивается монотонным, но более медленным по сравнению со скоростью травления, снижением плотности потока атомов брома, а также увеличением плотности потока энергии ионов. Наличие удовлетворительной корреляции изменений гетерогенных кинетических коэффициентов с плотностью потока атомов кислорода позволяет предположить, что имеет место окисление продуктов травления в низколетучие соединения вида SiBr_xO_y . Это сопровождается снижением как коэффициента ионно-стимулированной десорбции (распыления) продуктов травления, так и доли свободной поверхности, доступной для адсорбции атомов брома.

Публикация выполнена в рамках государственного задания ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН (проведение фундаментальных научных исследований) по теме № 0065-2019-0006 “Фундаментальные и прикладные исследования в области субволновой голографической литографии, физико-химических процессов травления 3D нанометровых диэлектрических структур для развития критических технологий производства ЭКБ”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Advanced plasma processing technology. John Wiley & Sons Inc. N.Y. 2008. 479 p.
- Wolf S., Tauber R.N. Silicon Processing for the VLSI Era. Volume 1. Process Technology. Lattice Press. N.Y. 2000. 416 p.
- Nojiri K. Dry etching technology for semiconductors. Springer International Publishing. Tokyo. 2015. 116 p.
- Coburn J.W. Plasma etching and reactive ion etching (AVS Monograph Series). IOP Publishing. N.Y. 1982. 83 p.
- Vitale S.A., Chae H., Sawin H.H. Silicon etching yields in F_2 , Cl_2 , Br_2 , and HBr high density plasmas // J. Vac. Sci. Technol. A. 2001. V. 19(5). P. 2197–2206.
- Handbook of chemistry and physics. CRC Press. N.Y. 2003–2004. 2475 p.
- Belen R.J., Gomez S., Kiehlbauch M., Aydil E.S. Feature scale model of Si etching in $\text{SF}_6/\text{O}_2/\text{HBr}$ plasma and comparison with experiments // J. Vacuum. Sci. Technol. A. 2006. V. 24(2). P. 350–361.
- Tokashiki K., Ikawa E., Hashimoto T., Kikkawa T., Terakawa Y., Nishiyama I. Influence of Halogen Plasma Atmosphere on SiO_2 Etching Characteristics // Jpn. J. Appl. Phys. 1991. V. 30(11b). P. 3174–3177.
- Donnelly V.M., Klemens F.P., Sorsch T.W., Timp G.L., Baumann F.H. Oxidation of Si beneath thin SiO_2 layers during exposure to HBr/O_2 plasmas, investigated by vacuum transfer x-ray photoelectron spectroscopy // Appl. Phys. Lett. 1999. V. 74(9). P. 1260–1262.
- Cunge G., Kogelschatz M., Joubert O., Sadeghi N. Plasma-wall interactions during silicon etching processes in high-density $\text{HBr}/\text{Cl}_2/\text{O}_2$ plasmas // Plasma Sources Sci. Technol. 2005. V. 14(2). P. S42–S52.
- Yeom G.Y., Ono Y., Yamaguchi T. Polysilicon Etchback Plasma Process Using HBr , Cl_2 , and SF_6 Gas-Mixtures for Deep-Trench Isolation // J. Electrochem. Soc. 1992. V. 139(2). P. 575–579.
- Kim D.K., Kim Y.K., Lee H. A study of the role of HBr and oxygen on the etch selectivity and the post-etch profile in a polysilicon/oxide etch using HBr/O_2 based high density plasma for advanced DRAMs // Mat. Sci. Semicon. Proc. 2007. V. 10(1). P. 41–48.
- Lee B.J., Efremov A., Kim J., Kim C., Kwon K.-H. Peculiarities of Si and SiO_2 etching kinetics in $\text{HBr} + \text{Cl}_2 + \text{O}_2$ inductively coupled plasma // Plasma Chem. Plasma Proc. 2019. V. 39(1). P. 339–358.
- Lee B.J., Efremov A., Kwon K.-H. Plasma parameters, gas-phase chemistry and Si/ SiO_2 etching mechanisms in $\text{HBr} + \text{Cl}_2 + \text{O}_2$ gas mixture: Effect of HBr/O_2 mixing ratio // Vacuum. 2019. V. 163. P. 110–118.
- Son J., Efremov A., Yun S.J., Yeom G.Y., Kwon K.-H. Etching Characteristics and Mechanism of SiN_x Films for Nano-Devices in $\text{CH}_2\text{F}_2/\text{O}_2/\text{Ar}$ Inductively Coupled Plasma: Effect of O_2 Mixing Ratio // J. Nanosci. Nanotechnol. 2014. V. 14. P. 9534–9540.
- Shun'ko E.V. Langmuir probe in theory and practice. Universal Publishers. Boca Raton. 2008. 245 p.
- Kwon K.-H., Efremov A., Kim M., Min N.K., Jeong J., Kim K. A Model-Based Analysis of Plasma Parameters and Composition in HBr/X ($\text{X} = \text{Ar}, \text{He}, \text{N}_2$) Inductively Coupled Plasmas // J. Electrochem. Soc. 2010. V. 157(5). P. H574–H579.
- Hsu C.C., Nierode M.A., Coburn J.W., Graves D.B. Comparison of model and experiment for Ar , Ar/O_2 and $\text{Ar}/\text{O}_2/\text{Cl}_2$ inductively coupled plasmas // J. Phys. D: Appl. Phys. 2006. V. 39(15). P. 3272–3284.
- Lieberman M.A., Lichtenberg A.J. Principles of plasma discharges and materials processing. John Wiley & Sons Inc. N.Y. 2005. 730 p.
- Jin W.D., Vitale S.A., Sawin H.H. Plasma-surface kinetics and simulation of feature profile evolution in $\text{Cl}_2 + \text{HBr}$ etching of polysilicon // J. Vac. Sci. Technol. A. 2002. V. 20(6). P. 2106–2114.
- Gray D.C., Tepermeister I., Sawin H.H. Phenomenological modeling of ion-enhanced surface kinetics in fluorine-based plasma-etching // J. Vac. Sci. Technol. B. 1993. V. 11(4). P. 1243–1257.
- Chistophorou L.G., Olthoff J.K. Fundamental electron interactions with plasma processing gases. Springer Science + Business Media. N.Y. 2004. 780 p.
- Efremov A., Kim Y., Lee H.W., Kwon K.-H. A Comparative Study of $\text{HBr}-\text{Ar}$ and $\text{HBr}-\text{Cl}_2$ Plasma Chemistries for Dry Etch Applications // Plasma Chem. Plasma Proc. 2011. V. 31(2). P. 259–271.
- Efremov A., Lee J., Kwon K.-H. A comparative study of CF_4 , Cl_2 and $\text{HBr} + \text{Ar}$ inductively coupled plasmas for dry etching applications // Thin Solid Films. 2017. V. 629. P. 39–48.