

04;06;12

©1993 г.

МЕХАНИЗМ ВЫСОКОВАКУУМНОГО НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ТРАВЛЕНИЯ ВО ФТОРСОДЕРЖАЩЕЙ ПЛАЗМЕ

Р.К.Яфаров, Ш.Т.Мевлют, С.А.Терентьев

Рассмотрены особенности действия механизмов плазменного травления в условиях пониженного давления и интенсивной низкоэнергетической ионной бомбардировки. Предложена модель травления с учетом поверхностной миграции первичных продуктов химических реакций и проведена ее экспериментальная проверка. Предсказаны и подтверждены экспериментально режимы высоковакуумного травления, предотвращающие проявление поверхностных дефектов обрабатываемого материала.

Введение

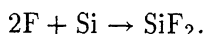
Высоковакуумное плазменное травление с использованием СВЧ газового разряда с электронно-циклотронным резонансом является перспективным методом создания полупроводниковых структур микроэлектроники с субмикронными размерами элементов. Его достоинствами являются возможность проведения процессов травления при пониженных давлениях плазмообразующих газов (0.01–0.1 Па) и, как следствие, высокая анизотропность травления и низкоэнергетичность (20–50 эВ) сопутствующей процессу ионной бомбардировки [1].

Практическое использование высоковакуумного ПТ в технологии микроэлектроники значительно опережает изучение физико-химических процессов, протекающих при обработке материалов химически активной плазмой. Существующие теоретические описания механизмов вакуумно-плазменного травления являются пока явно не достаточными. В связи с этим являются актуальными выявление превалирующих процессов, определяющих высоковакуумное плазменное травление в интервале параметров плазмы, представляющих практический интерес, и разработка адекватной модели с последующей корректировкой существующих технологических процессов.

В данной работе предложена феноменологическая модель ПТ кремния во фторосодержащей плазме с учетом специфики действия различных механизмов травления в диапазоне низких давлений и низких энергий, облучающих подложку ионов, проведено сопоставление результатов расчетов с экспериментом.

В рассматриваемых условиях травления атомы кремния могут удаляться с поверхности различными механизмами.

1) Спонтанное химическое травление. Действие данного механизма заключается в протекании гетерогенной реакции между химически активными частицами плазмы и поверхностными атомами материала, конечным продуктом которой является летучее соединение SiF_4 . На первой ступени данной реакции происходит образование первичных продуктов — адсорбционных комплексов SiF_2 [2]



Дальнейшее присоединение атомов фтора, поступающих из газовой фазы, к данному адсорбционному комплексу (механизм Или-Ридила) энергетически затруднено вследствие сильного разворота валентных связей атома кремния в решетке [3]. Поэтому образование летучего соединения SiF_4 происходит по механизму Ленгмюра-Хиншелвуда в результате латерального взаимодействия между двумя адкомплексами



При высоковакуумном плазменном травлении процесс происходит в условиях дефицита поступления химически активных частиц на поверхность, что снижает степень заполнения поверхности адкомплексами. В этом случае для протекания реакции (1) необходима поверхностная миграция адкомплексов до попадания двух из них в ближайшее соседнее положение. Это приводит к появлению дополнительной лимитирующей стадии, которую необходимо учитывать при рассмотрении механизма спонтанного травления в диапазоне низких давлений.

2) Ионно-индуцированное травление. В рассматриваемом диапазоне энергий ионов (20–50 эВ) физическим распылением материала и механизмом ионно-активационного травления, основанного на внесении радиационных дефектов в приповерхностные слои материала ионной бомбардировкой, можно пренебречь [4]. Однако при совместном действии химически активной плазмы и низкоэнергетической ионной бомбардировки возможна десорбция низколетучих (промежуточных) продуктов химических реакций ионным ударом (химическое распыление) [5], т.е. в нашем случае возможна реакция



Вследствие относительно слабой связи адкомплекса SiF_2 с поверхностью (пороговая энергия радиационно-стимулированной десорбции менее 20 эВ [6]) при достаточно интенсивном ионном облучении реакция (2) протекает с большой вероятностью.

Таким образом, возможными механизмами высоковакуумного низкоэнергетического плазменного травления могут быть спонтанное химическое и ионно-индуцированное типы травления.

Пусть на однородную поверхность кремния с концентрацией центров адсорбции N_s из фторосодержащей плазмы СВЧ разряда поступают химически активные частицы в виде нейтрального атомарного фтора и ионов фтора. В результате хемосорбции на поверхности образуются адкомплексы SiF_2 со средней скоростью изменения поверхностной концентрации F_a . Одновременно идет процесс травления материала, что приводит к удалению фтора с поверхности в виде соединений SiF_4 , SiF_2 . Термической десорбцией хемосорбированного фтора можно пренебречь. Тогда для стационарного случая можно записать следующее выражение адсорбционно-десорбционного баланса:

$$F_a = F_s + F_j, \quad (3)$$

где F_s, F_j — скорости изменения поверхностной концентрации адкомплексов SiF_2 в результате спонтанного и ионно-индуцированного травления соответственно.

Скорость изменения концентрации адкомплексов SiF_2 за счет хемосорбции фтора на обрабатываемой поверхности можно представить в виде

$$F_a = 1/2(F \cdot S_n + jS_i) \cdot (1 - \theta), \quad (4)$$

где θ — степень заполнения поверхности адкомплексами, S_n и S_i — коэффициенты хемосорбции для нейтрального фтора и ионов фтора соответственно, j — поток ионов на поверхность; F — поток нейтрального фтора на поверхность.

Скорость изменения поверхностной концентрации SiF_2 в результате образования летучего соединения SiF_4 , которое происходит при столкновении двух адкомплексов SiF_2 в процессе их миграции по поверхности, можно представить формулой

$$F_s = 1/2N_s\nu \exp\left(-\frac{E_m}{kT}\right) \Upsilon \theta^2, \quad (5)$$

где E_m — энергия активации миграции адкомплекса SiF_2 , ν — частота колебаний адкомплекса в положении равновесия, T — температура подложки, k — постоянная Больцмана, Υ — константа скорости химической реакции образования соединения SiF_4 .

Скорость изменения концентрации SiF_2 в результате десорбции в виде соединения SiF_2 под действием ионной бомбардировки можно представить в виде

$$F_j = Kj\theta, \quad (6)$$

где K — коэффициент химического распыления, т.е. вероятность десорбции комплекса SiF_2 при попадании в него иона.

Подставляя выражения (4)–(6) в уравнение (3), получаем уравнение баланса адсорбции и десорбции фтора с поверхности

$$\frac{1}{2}(F \cdot S_n + jS_i) \cdot (1 - \theta) = \frac{1}{2}N_s\nu \exp\left(-\frac{E_m}{kT}\right) \Upsilon \theta^2 + Kj\theta. \quad (7)$$

Решая уравнение баланса (7) относительно θ , определяем степень заполнения поверхности и изменения поверхностных концентраций SiF_2 по

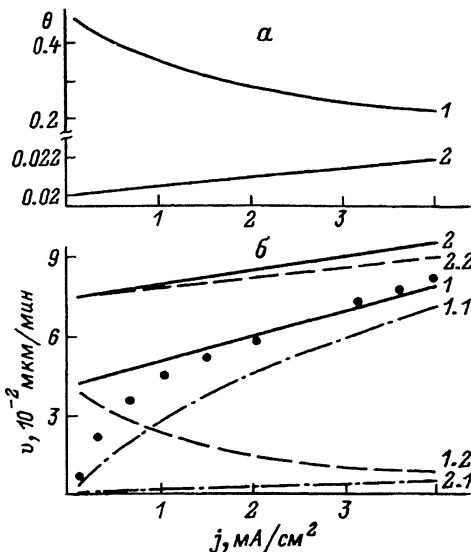


Рис. 1. Расчетные зависимости степени заполнения поверхности от плотности тока ионного облучения при давлении 0.1 Па при температуре подложки (а) и скоростей травления кремния по различным механизмам травления (б).

а: 1 — 50, 2 — 200° С;
 б: 1, 2 — результирующие скорости травления;
 1.1, 2.1 — скорости ионно-индуцированного травления;
 1.2, 2.2 — скорости спонтанного травления;
 точки — эксперимент.

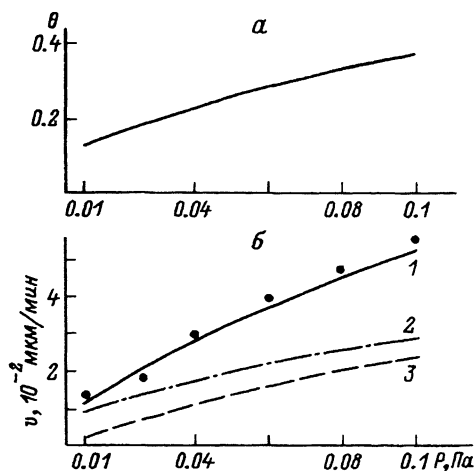


Рис. 2. Расчетные зависимости степени заполнения поверхности (а) и скоростей травления кремния по различным механизмам от давления рабочего газа при постоянной плотности ионного тока 1 мА/см² и температуре подложки 50° С (б).

1 — результирующая скорость травления,
 2 — скорость ионно-индуцированного травления,
 3 — скорость спонтанного травления, точки — эксперимент.

различным механизмам. Изменения поверхностных концентраций переведем в скорости травления кремния

$$V_s = 1/2 F_s \alpha; \quad V_j = F_j \alpha; \quad V = V_s + V_j, \quad (8)$$

где V_s — скорость спонтанного травления; V_j — скорость ионно-индуцированного травления; V — расчетная скорость травления кремния; $\alpha = M/N_0 \rho$ (M — молярная масса кремния, ρ — плотность, N_0 — число Авогадро).

Численные расчеты производились на ПЭВМ и основные результаты представлены на рис. 1–3. При этом использовались следующие численные значения параметров: $S_n = 4.26 \cdot 10^{-2}$, $S_i = 0.1$ [7], $N_s = 10^{15} \text{ см}^{-2}$, $\nu = 10^{12} \text{ с}^{-1}$, $E_m = 0.98 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$, $\Upsilon = 0.1$ [8], $K = 0.8$ [9].

Результаты расчетов

Анализ результатов численного расчета показывает, что в рассматриваемом диапазоне степень заполнения поверхности и вклад каждого из механизмов в общую скорость травления зависят от соотношения между основными параметрами процесса (давление, температура подложки и плотность ионного тока).

При фиксированном давлении $P = 0.1$ Па и $T = 50^\circ\text{C}$, что соответствует реальной температуре подложки при ПТ без дополнительного нагрева, расчетная степень заполнения поверхности адкомплексами SiF_2 не превышала 0.5 и плавно снижалась при увеличении плотности ионного тока (кривая 1 на рис. 1,а). Вид данной зависимости определяется увеличением десорбции SiF_2 при росте плотности ионного тока согласно (6).

Увеличение температуры подложки (до 200°C) приводит к снижению на порядок расчетной степени заполнения поверхности адкомплексами SiF_2 и изменению характера зависимости $\theta(j)$ на противоположный (кривая 2 на рис. 1,а). Это связано с экспоненциальным возрастанием скорости поверхностной миграции адкомплексов SiF_2 при увеличении температуры подложки (см.(5)), что обуславливает возрастание скорости спонтанного травления и снижение скорости ионно-индуцированного травления.

При фиксированной плотности ионного тока ($j = 1$ мА/см²) и температуре подложки 50°C (рис. 2,а) θ возрастает с ростом давления, что определяется увеличением потока ХАЧ на поверхность.

Вид зависимости θ от j и P определяет вид аналогичной зависимости для скорости спонтанного травления — V_s , так как, согласно (5), $V_s \approx \theta^2$. Скорость ионно-индуцированного травления, согласно (6), прямо пропорциональна θ и j (кривая 1.1 на рис. 1,б), что обуславливает близкую к линейной зависимость результирующей скорости травления поверхности от плотности ионного тока при низких температурах подложки (кривая 1 на рис. 1,б).

При увеличении температуры подложки ($T = 200^\circ\text{C}$) происходят увеличение скорости спонтанного и одновременное снижение скорости ионно-индуцированного травления (кривые 1 и 2 на рис. 1,б).

Травление локальных неоднородностей поверхности в высоковакуумной низкоэнергетической плазме

При высоковакуумном низкоэнергетическом плазменном травлении следует ожидать изменений в характере влияния обработки на качество травленной поверхности по сравнению с методами травления, использующими ВЧ газовый разряд или высокоэнергетическую ионную бомбардировку. Это обусловлено, с одной стороны, низкой энергией, сопутствующей процессу травления ионной бомбардировки, что исключает образование радиационно-стимулированных дефектов травления [10], которые выражаются в виде мелкозернистой шероховатости обработанной поверхности и аморфизации приповерхностного слоя. С другой стороны, при высоковакуумном плазменном травлении снижается диффузия атомарного фтора в приповерхностные слои кремния, что позволяет исключить образование под поверхностью материала газонаполненных пор (блистеров) [11], которые являются причиной появления грубозернистой текстуры поверхности при обработке кремния в диапазоне высоких давлений [10]. Поэтому влияние низкоэнергетического высоковакуумного плазменного травления на качество обработанной поверхности требует специального рассмотрения.

Поверхностный характер взаимодействия и малая степень заполнения поверхности при высоковакуумной обработке обуславливают влияние локальных неоднородностей поверхности (дефектов роста и предва-

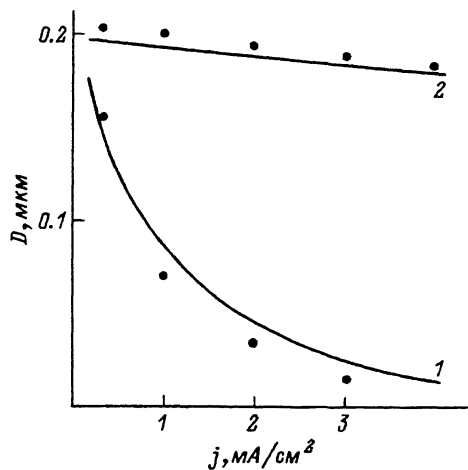


Рис. 3. Расчетные зависимости среднего размера ямок травления от плотности тока ионного облучения при температурах подложки 50 (1) и 200° С (2).

рительной обработки) на процесс травления. Поверхностные дефекты материала являются центрами более эффективной адсорбции химически активных частиц плазмы и обладают повышенной химической активностью по сравнению с бездефектной поверхностью [12]. Это определяет повышенную скорость травления дефектной области, и на начальной стадии травления на поверхности образуются ямки травления размером $d_0 \approx 100$ нм [10]. Дальнейшее растравливание ямки происходит со скоростью $= AV_s$ (где $A \approx 0.1$ — коэффициент анизотропности травления, обусловленный меньшей вероятностью попадания ХАЧ плазмы на боковые стенки ямки). Тогда диаметр ямки травления D связан с толщиной стравленного слоя h и со скоростями травления бездефектной поверхности формулой

$$D = d_0 + 2h \frac{AV_s}{V_s + V_j}. \quad (9)$$

Результаты расчетов диаметра ямок травления, отнесенных к толщине стравленного слоя $h = 1$ мкм, в зависимости от плотности ионного тока при различных температурах подложки представлены на рис. 3. Из рис. 3 и формулы (9) следует следующее.

Диаметр ямки травления определяется соотношением скоростей травления поверхности и бокового спонтанного травления. Увеличение плотности ионного тока на подложку приводит к возрастанию скорости травления поверхности и снижению скорости спонтанного травления, что определяет значительное уменьшение диаметра ямок травления при низких температурах подложки (кривая 1 на рис. 3).

Увеличение температуры подложки приводит к незначительному возрастанию скорости травления поверхности и значительному возрастанию скорости спонтанного травления, что определяет больший диаметр ямок травления при высоких температурах подложки (кривая 2 на рис. 3).

Таким образом, переход к полирующему травлению должен наблюдаться при низких температурах подложки и достаточно высоких (более 1 мА/см^2) плотностях ионного тока на подложку.

Экспериментальная проверка теоретической модели проводилась на установке СВЧ ВПТ [13]. В качестве плазмообразующего газа использовался CF_4 . Толщина стравленного слоя определялась с помощью микроскопа-интерферометра МИИ-4, качество обработанной поверхности изучалось с помощью растрового электронного микроскопа Super Proh-750.

На рис. 1, 2 в виде точек представлены экспериментальные результаты скорости высоковакуумного ПТ кремния в плазме CF_4 .

Рассчитанная по модели скорость травления хорошо согласуется с экспериментальной при плотностях ионного тока, превышающих 1 mA/cm^2 . В диапазоне $j < 1 \text{ mA/cm}^2$ рассчитанная скорость травления снижается медленнее, чем экспериментальная, и при $j < 0.5 \text{ mA/cm}^2$ рассчитанные значения скорости травления на 40–50% больше, чем в эксперименте (рис. 1). Это может являться следствием пассивации химически неактивными компонентами рабочего газа обрабатываемой поверхности, что не учитывалось в модели. В случае использования рабочего газа CF_4 такими частицами являются радикалы CF_n ($n = 1, 2, 3$). При достаточно интенсивной ионной бомбардировке происходит ионно-стимулированная диссоциация CF_n и концентрация фтора на обрабатываемой поверхности близка к расчетной. Очевидно, что при снижении плотности ионного тока пассивация поверхности радикалами CF_n возрастает, что и приводит к более низким скоростям травления, наблюдаемым в экспериментах при малых плотностях ионного тока, по сравнению с рассчитанными.

Исследования качества поверхности после травления показали, что при температуре подложки 50°C и малых плотностях ионного тока ($j < 0.3 \text{ mA/cm}^2$) на поверхности кремния наблюдаются дефекты в виде ямок травления (открытых пор) (рис. 4, а). Увеличение плотности ионно-

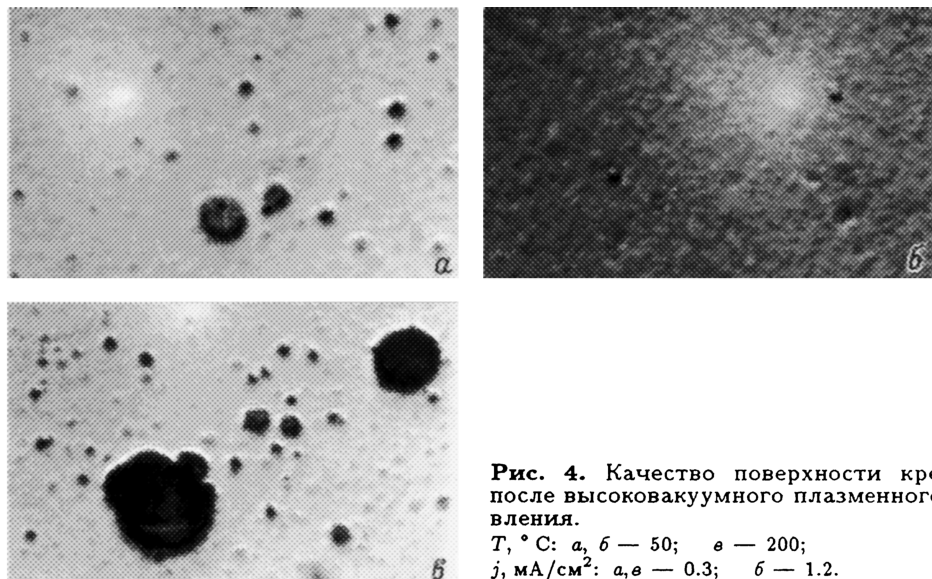


Рис. 4. Качество поверхности кремния после высоковакуумного плазменного травления.

$T, ^\circ\text{C}$: а, б — 50; φ — 200;
 $j, \text{ mA/cm}^2$: а, в — 0.3; б — 1.2.

го тока приводит к снижению концентрации "ямок" на поверхности, и при $j > 1 \text{ мА/см}^2$ достигается полирующий характер травления (рис. 4,б).

При нагреве образцов до температуры 200°C и плотности ионного тока менее 0.3 мА/см^2 размеры "ямок" значительно больше, чем в аналогичных режимах травления, но при температуре подложки $40-60^\circ \text{C}$ (4,в). Увеличение плотности ионного тока до максимальной ($j = 4 \text{ мА/см}^2$) при $T = 200^\circ \text{C}$ не приводило к изменению размеров ямок травления, что согласуется с расчетами.

Выводы

Предложена модель высоковакуумного низкоэнергетического травления кремния во фторосодержащей плазме с учетом малого заполнения и поверхностной миграции первичных продуктов химических реакций. Показано, что процесс спонтанного химического травления имеет место в области низких степеней заполнения поверхности ($\theta < 0.5$). На основе численного расчета модели объяснены и подтверждены экспериментально следующие особенности высоковакуумного плазменного травления: близкая к линейной зависимость скорости травления материала от плотности ионного тока, характерная для широкого круга плазмохимических процессов, проводимых при низких давлениях; изменение механизма травления с ростом температуры подложки от преимущественно ионно-индуцированного при низких температурах ($40-100^\circ \text{C}$) до спонтанного при высоких температурах (более 200°C); возможность проявления дефектов поверхности материала при низких плотностях ионного тока и высокой температуре обрабатываемой пластины.

Предсказаны и подтверждены экспериментально режимы высоковакуумного низкоэнергетического плазменного травления, предотвращающие проявление дефектов поверхности.

Список литературы

- [1] Вигдорович В.Н., Гуляев Ю.В., Яфаров Р.К. // ДАН СССР. 1988. Т. 300. № 3. С. 604-606.
- [2] Winters H.F., Coburn J.W. // J. Vac. Sci. Technol. 1985. Vol. B3. N 5. P. 1376-1382.
- [3] Petit B., Pelletier J., Pomot C. // Rev. de Phys. Appliquee. 1986. Vol. 21. N 6. P. 377-384.
- [4] Donnelly V.M., Flamm D.L., Dautremont-Smith W.C., Werder W.J. // J. Appl. Phys. 1984. Vol. 55. N 1. P. 242-249.
- [5] Фундаментальные и прикладные аспекты распыления твердых тел / Под ред. Е.С.Машковой. М.: Мир, 1989. 349 с.
- [6] Кустов В.Л., Пекарчук С.Б. // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. 1983. Вып. 9(357). С. 52.
- [7] Тренел Б. Хемосорбция. М.: ИЛ, 1958. 326 с.
- [8] Адамсон А. Физическая химия поверхности. М.: Мир, 1979. 569 с.
- [9] Фундаментальные и прикладные аспекты распыления твердых тел / Под ред. Е.С.Машковой. М.: Мир, 1989. 349 с.
- [10] Плазменная технология в производстве СВИС / Под ред. Е.С.Машковой. М.: Мир, 1987. 466 с.
- [11] Яфаров Р.К., Терентьев С.А. // Поверхность. 1991. № 5. С. 146.
- [12] Моррисон Дж. Физическая химия поверхности. М.: Мир, 1986. 388 с.
- [13] Гуляев Ю.В., Яфаров Р.К. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. Вып. 24. С. 2211-2214.