

0.4; 0.5; 11

© 1992

ПРОЯВЛЕНИЕ ДЕФЕКТОВ ПОВЕРХНОСТИ
ПРИ ВЫСОКОВАКУУМНОМ ПЛАЗМЕННОМ
ТРАВЛЕНИИ КРЕМНИЯР.К. Я ф а р о в, Ш.Т. М е в л ю т,
С.А. Т е р е н т ь е в

При вакуумно-плазменном травлении кремниевых структур одним из важнейших параметров является качество обработанной поверхности. Существующие методы плазменного травления (ПТ), использующие ВЧ-газовый разряд при давлениях рабочего газа 10–100 Па или высокоэнергетические пучки ионов (>1 кВ), не обеспечивают, в большинстве случаев, требуемого качества поверхности. Это обусловлено в первом случае реакциями газификации приповерхностного слоя кремния, что приводит к образованию грубой зернистой текстуры поверхности [1]. Во-втором случае в материал вносятся радиационные дефекты, поверхность материала аморфизуется [1]. Разработка высоковакуумных (менее 0.1 Па) и низкоэнергетических (менее 20 эВ) методов травления с использованием СВЧ-газового разряда [2] делает актуальными исследования влияния высоковакуумного ПТ на качество поверхности кремния.

Целью настоящей работы являлось исследование качества поверхности кремния после травления в плазме СВЧ-разряда. Образцы обрабатывались на уровне СВЧ ВПТ [2] при давлениях CF_4 0.05–0.1 Па. Качество обработанной поверхности изучалось с помощью растрового электронного микроскопа *Super Prob-750*. Конструкция подложкодержателя позволяла измерять плотность ионного тока на подложку, температуру поверхности образца и осуществлять нагрев до 200–250 °С.

Исследования качества поверхности после травления показали, что при температуре подложки 50 °С и малых плотностях ионного тока ($j < 0.3$ мА/см²) на поверхности кремния наблюдаются дефекты в виде ямок травления (открытых пор) (рис. 1, а). Увеличение плотности ионного тока приводит к снижению концентрации „ямки“ на поверхности и при $j > 1$ мА/см² достигается полирующий характер травления (рис. 1, б). При нагреве образцов до температуры 200 °С и плотности ионного тока менее 0.3 мА/см² размеры „ямки“ значительно больше, чем при температуре подложки 40–60 °С (1, в). Увеличение плотности ионного тока до максимальной (4 мА/см²) не приводило к существенному изменению размеров ямок травления.

Для анализа экспериментов рассмотрим механизмы травления кремния во фторсодержащей плазме при низком давлении. В условиях СВЧ ВПТ травление материала осуществляется постадийно.

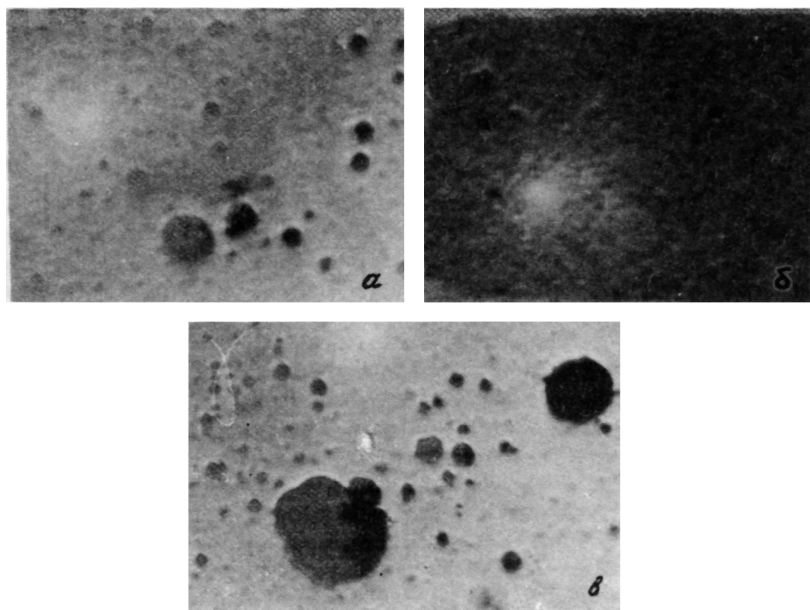


Рис. 1. Качество поверхности кремния после высоковакуумного плазменного травления при: а - $T=50\text{ }^{\circ}\text{C}$, $j=0.3\text{ mA/cm}^2$; б - $T=50\text{ }^{\circ}\text{C}$, $j=1.2\text{ mA/cm}^2$; в - $T=200\text{ }^{\circ}\text{C}$, $j=0.3\text{ mA/cm}^2$.

На первой стадии на поверхности образуются адсорбционные комплексы SiF_2 . Далее происходит образование летучего соединения SiF_4 из двух адкомплексов SiF_2 по механизму Ленгмюра-Хиншелвуда (спонтанное травление), либо десорбция SiF_2 ионным ударом (ионно-индуцированное травление) [3].

При низких давлениях дефицит поступления химически активных частиц (ХАЧ) на подложку обуславливает малую степень заполнения поверхности адкомплексами SiF_2 . При этом возможно влияние поверхностных дефектов материала на процесс травления. Для теоретических расчетов разработана модель травления кремния во фторсодержащей плазме, основанная на расчете баланса адсорбции фтора на поверхности и десорбции продуктов реакций. Уравнение баланса для бездефектной поверхности можно представить в виде:

$$F_{\alpha} = F_s + F_j, \quad (1)$$

где F_{α} , F_s , F_j - скорости изменения поверхностной концентрации SiF_2 в результате: хемосорбции; спонтанного травления и ионно-индуцированного травления. Изменения поверхностной концентрации выражаются через параметры обрабатываемого материала и плазмы:

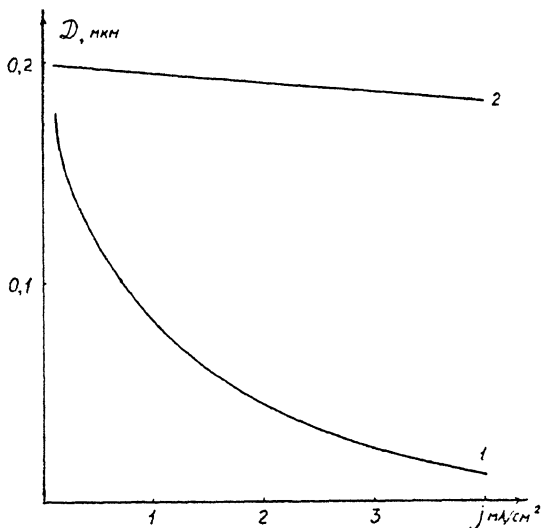


Рис. 2. Расчетные зависимости среднего размера ямок травления от плотности тока ионного облучения при температурах подложки: 1 - 50 °С, 2 - 200 °С.

$$F_{\alpha} = \frac{1}{2}(F \cdot S_n + j \cdot S_i) \cdot (1 - \theta),$$

$$F_S = \frac{1}{2} N_S \cdot \nu \cdot \exp\left(-\frac{E_M}{kT}\right) \gamma \cdot \theta^2,$$

$$F_j = k j \theta,$$

(2)

где F и j - потоки атомарного фтора и ионов фтора на поверхность; S_n и S_i - коэффициенты хемосорбции для нейтрального фтора и ионов фтора; θ - степень заполнения поверхности адкомплексами; N_S - концентрация центров адсорбции на поверхности; ν - частота колебаний адкомплекса в положении равновесия; E_M - энергия активации поверхностной миграции адкомплекса SiF_2 ; T - температура подложки; k - постоянная Больцмана; γ - константа скорости химической реакции образования соединения SiF_4 ; k - вероятность десорбции комплекса SiF_2 при попадании в него иона.

Численно решая уравнение (1), определяем степень заполнения и скорости травления поверхности по различным механизмам: $V_S = \frac{1}{2} F_S \cdot \alpha$ и $V_j = F_j \alpha$, где $\alpha = \frac{M}{N_0 \rho}$ (M - молярная масса кремния, N_0 - число Авогадро, ρ - плотность),

Поверхностные дефекты материала являются центрами более эффективной адсорбции ХАЧ плазмы и обладают повышенной химической активностью по сравнению с бездефектной поверхностью [1]. Это определяет повышенную скорость травления дефектной области

и на начальной стадии травления на поверхности образуются ямки травления размером - d_0 . Дальнейшее растравливание ямки, образованной на дефекте, происходит со скоростью $= AV_s$ (где A - коэффициент анизотропности травления, обусловленный меньшей вероятностью попадания ХАЧ плазмы на боковые стенки ямки). Тогда диаметр ямки травления (D) связан с толщиной травленного слоя (h) и со скоростями травления бездефектной поверхности формулой

$$D = d_0 + 2h \frac{AV_s}{V_s + V_j} \quad (3)$$

Результаты расчетов диаметра ямок травления, отнесенных к толщине травленного слоя $h=1$ мкм в зависимости от плотности ионного тока при различных температурах подложки, представлены на рис. 2. Из рис. 2 и формулы (3) делаем следующий вывод:

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, рис. 2).

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, рис. 2), что совпадает с экспериментальными результатами.

Таким образом, в результате исследований показано, что проявление дефектов поверхности материала при высоковакуумном травлении определяется повышенной скоростью травления дефектной области на начальной стадии травления и дальнейшим растравливанием по спонтанному механизму травления. Увеличение плотности ионного тока и снижение температуры подложки позволяют получать высокое качество обработанной поверхности.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Плазменная технология в производстве СБИС: Пер. с англ./ Под ред. Машковой Е.С. М.: Мир, 1987. 466 с.
- [2] Гуляев Ю.В., Яфаров Р.К. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. В. 24. С. 2211-2214.
- [3] Petit V., Pelletier J., Pomot C. // Revue de Physique Appliquee. 1986. Т. 21. N 6. P. 377-384.

Поступило в Редакцию
17 мая 1992 г.