

04;05;06;11;12

©1993 г.

АНИЗОТРОПНОСТЬ ВЫСОКОВАКУУМНОГО НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПЛАЗМЕННОГО ТРАВЛЕНИЯ КРЕМНИЯ

Р.К.Яфаров, Ш.Т.Мевлют, С.А.Терентьев

Проведены исследования анизотропности низкоэнергетического травления кремния во фторосодержащей плазме СВЧ газового разряда пониженного давления. Выявлены основные факторы, обуславливающие повышение анизотропности травления. Рассмотрена модель высоковакуумного травления с учетом рассеяния частиц от дна вытравливаемой структуры и специфики действия механизмов травления в диапазоне низких давлений и низких энергий ионов. Показано, что высокая анизотропность возникает при преваривании ионно-индуцированного механизма травления над спонтанным химическим травлением.

Введение

В настоящее время в связи с рядом физико-технических приложений [1,2] актуальны исследования процессов взаимодействия химически активной плазмы низкого давления с поверхностью материалов, в частности вакуумно-плазменное травление, используемое для формирования заданного рельефа структур микроэлектроники. Широкое использование методов вакуумно-плазменного травления во многом обусловлено необходимостью обеспечить высокую анизотропность процесса, а именно усиленное травление в глубь слоя при минимальном боковом подтравливании. Переход к субмикронным толщинам функциональных слоев в микроэлектронике, кроме того, требует обеспечения "мягкого" низкоэнергетического воздействия плазмы на поверхность, не приводящее к деградации электрофизических параметров обрабатываемого материала. Наиболее полно этим требованиям удовлетворяет метод высоковакуумного плазменного травления в СВЧ газовом разряде с электронно-циклотронным резонансом [3]. Его достоинствами являются возможность проведения процессов травления при пониженных давлениях плазмообразующих газов (0.01–0.1 Па) и низкоэнергетичность (менее 20 эВ) сопутствующей процессу травления ионной бомбардировки. Это позволяет получать высокое качество обработанной поверхности и не вносить радиационных дефектов в приповерхностные слои материала.

Практическое использование СВЧ плазменного травления в технологии микроэлектроники значительно опережает изучение физико-химических процессов, протекающих при обработке материалов химически активной плазмой. В связи с этим является актуальным выявление преобладающих процессов, определяющих анизотропность травления с последующей корректировкой режимов осуществления технологических процессов. Целью данной работы являлось исследование анизотропности травления кремния во фторосодержащей плазме СВЧ разряда.

Методика эксперимента

Образцы монокристаллического кремния обрабатывались на установке СВЧ вакуумно-плазменного травления [3] при давлениях 0.02–0.1 Па. Конструкция подложодержателя позволяла измерять плотность ионного тока на подложку, температуру поверхности образца и осуществлять нагрев до 200–250°С. В качестве плазмообразующего газа использовались CF_4 и SF_6 . Анизотропность травления изучалась с помощью растрового электронного микроскопа Super Prob-750. Толщина стравленного слоя измерялась с помощью микроскопа-интерферометра МИИ-4.

Результаты и их обсуждение

Исследования показали, что при давлениях 0.01–0.1 Па скорость травления кремния пропорциональна плотности ионного тока на подложку j и практически не зависит от температуры поверхности образца. В плазме CF_4 при $j = 1 \dots 4 \text{ mA/cm}^2$ скорость травления составляет 0.04–0.1 мкм/мин и при $j < 1 \text{ mA/cm}^2$ наблюдается резкое нелинейное снижение скорости травления до 10^{-4} мкм/мин. При использовании SF_6 скорость травления кремния составляет 0.1–0.15 мкм/мин и нелинейного снижения скорости травления в диапазоне малых токов не наблюдается (рис. 1).

В CF_4 показатель анизотропии $A = v/v_b$ (v — скорость травления в глубь слоя, v_b — скорость бокового травления) при температуре подложки 50°С и малых плотностях ионного тока ($< 0.3 \text{ mA/cm}^2$) составляет около 10 (рис. 2,а) и возрастает с увеличением плотности ионного тока (рис. 3) до 40 и более (рис. 2,б). Нагрев образцов до температуры

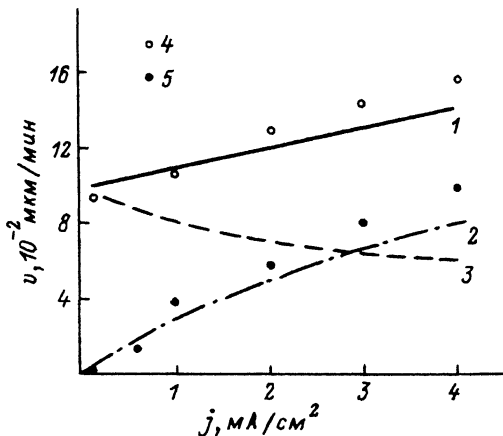


Рис. 1. Зависимость скорости травления кремния от плотности ионного тока на подложку.

$T = 50^\circ\text{C}$, $P = 0.1 \text{ Па}$; кривые — расчет согласно предлагаемой модели: 1 — результирующая скорость травления, 2 — скорость травления по ионно-индуцированному механизму, 3 — скорость травления по спонтанному механизму; 4, 5 — экспериментальные значения при использовании SF_6 и CF_4 соответственно.

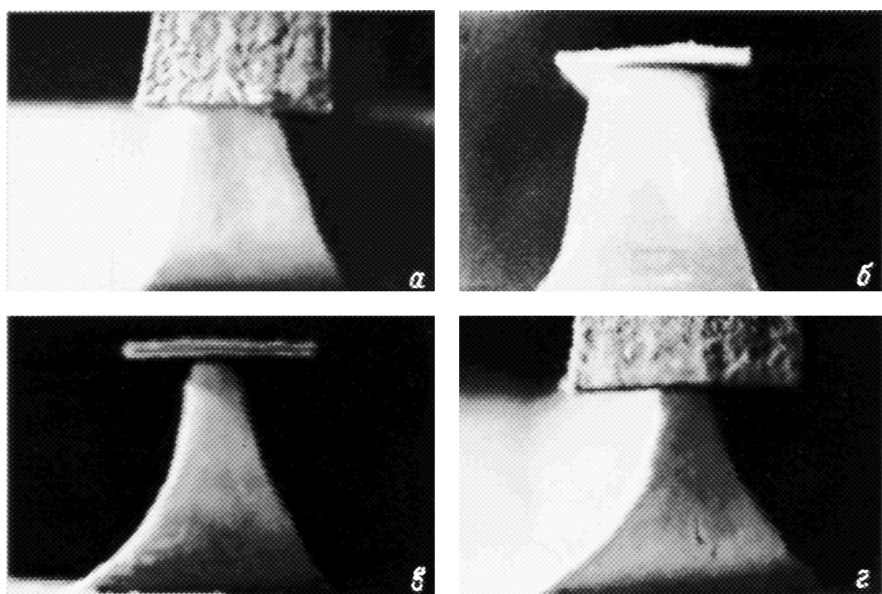


Рис. 2. Микрофотографии профилей структур, полученных травлением через металлическую маску в плазме СВЧ разряда при давлении 0.1 Па.

a-e — SF_4 , *z* — SF_6 ; *T*, °C: *a, b, z* — 50, *e* — 250; *j*, MA/cm^2 : *a* — 0.25, *b-z* — 2.0.

200–250° C приводил к снижению анизотропности до 6–8 (рис. 2, *e*), причем увеличение плотности ионного тока при повышенных температурах слабо влияло на анизотропность (рис. 3). При использовании SF_6 анизотропность травления не превышала 2–4 (рис. 2, *z*).

Для объяснения экспериментальных результатов рассмотрим действие механизмов травления на дне и на боковой стенке канавки травления.

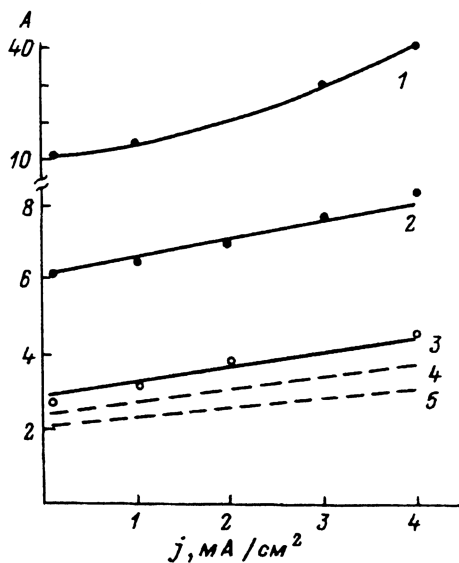


Рис. 3. Зависимость показателя анизотропии травления кремния от плотности ионного тока на подложку при давлении плазмообразующего газа 0.1 Па.

1 — CF_4 , $T = 50^\circ \text{C}$; 2 — CF_4 , $T = 250^\circ \text{C}$; 3 — SF_6 , $T = 50^\circ \text{C}$; 4, 5 — теоретический расчет при $T = 50$ и 250°C соответственно.

При высоковакуумном низкоэнергетическом плазменном травлении процесс взаимодействия химически активных частиц плазмы с поверхностью обрабатываемого материала характеризуется следующими особенностями [4]: вследствие большой длины свободного пробега частиц плазмы при пониженных давлениях можно считать, что все частицы поступают нормально на обрабатываемую поверхность, а поступление химически активных частиц на боковую стенку определяется рассеянием от дна канавки травления; при низких давлениях дефицит химически активных частиц в газовой фазе определяет малое заполнение поверхности ($Q < 0.5$) первичными продуктами химических реакций — адкомплексами SiF_2 [5] и их поверхностную миграцию; низкая энергия сопутствующей процессу травления ионной бомбардировки позволяет исключить из рассмотрения физическое распыление материала подложки и ионно-активационный механизм травления [6]. В данном диапазоне энергий ионов наиболее вероятны процессы “химического распыления”: десорбция ионным ударом адкомплексов SiF_2 (ионно-индуцированный механизм травления) и диссоциация адсорбированных на поверхности химически активных частиц [7].

Таким образом, дно канавки травления может вытравливаться по механизму ионно-индуцированного травления и механизму поверхностного спонтанного травления, заключающемуся в латеральном взаимодействии между мигрирующими адкомплексами SiF_2 с образованием летучего соединения SiF_4 (механизм Ленгмюра–Хиншельвуда). На боковой стенке возможно только действие спонтанного механизма травления, так как здесь отсутствует ионная бомбардировка из-за нейтрализации иона при первичном взаимодействии с дном канавки.

Рассмотрим следующую модель низкоэнергетического травления кремния в плазме фтора. Пусть нормально на дно канавки травления из плазмы разряда поступают атомарный и ионизированный фтор с плотностями потоков F и J соответственно. Одновременно идет процесс травления и фтор удаляется с поверхности в виде соединений SiF_2 и SiF_4 . Тогда для дна канавки в стационарном случае справедливо уравнение адсорбционно-десорбционного баланса

$$F_a = F_s + F_j,$$

$$F_a = \frac{1}{2}(F \cdot S_n + J \cdot S_i) \cdot (1 - \theta),$$

$$F_s = \frac{1}{2} N_s \nu \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) Y \cdot \theta^2,$$

$$F_j = K J \theta, \quad (1)$$

где F_a , F_s , F_j — скорости изменения поверхностной концентрации SiF_2 в результате хемосорбции, спонтанного травления и ионно-индуцированного травления; 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 — энергия активации поверхностной миграции адкомплекса SiF_2 ; T — температура подложки; k — постоянная Больцмана; Y — константа скорости

химической реакции образования соединения SiF_4 ; K — вероятность десорбции комплекса SiF_2 при попадании в него иона.

На боковую поверхность химически активные частицы поступают в результате рассеяния от дна вытравливаемой канавки. Предполагая, что рассеяние близко к изотропному, плотность их потока на боковую стенку n_b можно представить в виде

$$n_b = \frac{(F + J - F_a)}{\pi} \operatorname{arctg} \left(\frac{b}{h} \right), \quad (2)$$

где b и h — полуширина и высота канавки травления.

Для боковой стенки канавки с учетом отсутствия здесь ионной бомбардировки уравнение адсорбционно-десорбционного баланса имеет вид

$$F_a^b = F_s^b,$$

$$F_a^b = \frac{1}{2} n_b \cdot S_n \cdot (1 - \theta_b),$$

$$F_s^b = \frac{1}{2} N_s \nu \exp \left(-\frac{E}{kT} \right) \cdot Y \cdot \theta_b^2, \quad (3)$$

где F_a^b , F_s^b — скорости изменения поверхностной концентрации SiF_2 на боковой поверхности в результате хемосорбции и спонтанного травления соответственно; θ_b — степень заполнения боковой поверхности ад-комплекса SiF_2 .

Так как вероятность хемосорбции при соударении с поверхностью значительно ниже единицы ($F \gg F_a$), то из (2), (3) следует, что F_a и F_a^b — величины одного порядка и на боковую поверхность в результате рассеяния поступает достаточно много атомарного фтора.

Показатель анизотропии согласно (1), (3) можно представить в виде

$$A = \frac{KJ\theta + \beta\theta^2}{\beta\theta_b^2}, \quad (4)$$

где

$$\beta = \frac{1}{2} N_s \nu \exp \left(-\frac{E}{kT} \right) Y.$$

Из (4) следует, что анизотропность возрастает при увеличении плотности ионного тока и снижении температуры подложки. При увеличении температуры подложки вследствие экспоненциального возрастания β влияние ионной бомбардировки на анизотропность травления снижается, в этом случае $A \rightarrow \theta^2/\theta_b^2$.

Результаты численного расчета по формулам (1)–(4) и экспериментальные значения представлены на рис. 1,3. При расчетах использовались следующие численные значения параметров: $S_n = 4.26 \cdot 10^{-2}$, $S_i = 0.1$ [8]; $N_s = 10^{15} \text{ см}^{-2}$, $\nu = 10^{12} \text{ с}^{-1}$, $E = 0.98 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$, $Y = 0.1$ [9]; $K = 0.8$ [7].

Из рис. 1 следует, что теоретически рассчитанная скорость травления (кривая 1 на рис. 1), представляющая собой сумму скоростей травления по спонтанному и ионно-индуцированному механизмам, согласуется с экспериментальными значениями, полученными при использовании рабочего газа SF_6 . При использовании CF_4 экспериментальная скорость травления близка к расчетной скорости травления только по ионно-индуцированному механизму. Таким образом, при использовании SF_6 в процессе участвуют оба механизма травления, а при использовании CF_4 действие механизма спонтанного травления не эффективно и основной вклад вносит ионно-индуцированный механизм травления.

Из рис. 3 следует, что расчетный показатель анизотропии лежит в пределах 2,3–4, плавно возрастает с увеличением плотности ионного тока на подложку и снижается при увеличении температуры подложки. Расчетные значения A коррелируют с экспериментальными, полученными в плазме SF_6 .

Из сравнения реакционных свойств плазмообразующих газов и анализа расчетных и экспериментальных данных следует, что наблюдаемые при использовании CF_4 закономерности можно объяснить пассивацией химически неактивными радикалами CF_n ($n = 1 \dots 3$) обрабатываемой поверхности. Хемосорбированные радикалы CF_n препятствуют миграции адкомплекс SiF_2 по поверхности и тем самым снижают вероятность травления по спонтанному механизму травления. В этом случае скорость травления в основном определяется действием ионно-индуцированного механизма (рис. 1). На боковой поверхности канавки травления ионная бомбардировка отсутствует и при использовании CF_4 она быстро покрывается пассивирующим слоем радикалов CF_n , что объясняет наблюдаемую высокую анизотропность травления.

При использовании плазмообразующего газа SF_6 в плазме отсутствуют пассивирующие частицы, поэтому дно канавки травления травится по двум механизмам (спонтанному и ионно-индуцированному) одновременно, а боковая стенка канавки только по спонтанному механизму. Несмотря на направленное движение ХАЧ к подложке, обусловленное низким давлением, за счет рассеяния от дна канавки на боковую поверхность, согласно (2), поступает достаточно много атомарного фтора, что и объясняет низкую анизотропность травления кремния в плазме SF_6 .

Выводы

На основе экспериментальных исследований и теоретического анализа выявлены и объяснены основные факторы, обуславливающие повышение анизотропности высоковакуумного низкоэнергетического травления кремния во фторосодержащей плазме.

Показано, что использование низкого давления плазмообразующего газа (менее 0,2...0,1 Па), исключающее возможность прямого попадания ХАЧ плазмы на боковые стенки канавки травления, является необходимым, но не достаточным фактором получения высокой анизотропности травления.

Вторым важнейшим фактором являются правильный подбор состава плазмообразующего газа. В состав газа должны входить частицы — пассиванты, ослабляющие действие спонтанного механизма травления. Например, радикалы CF_n , которые разлагаются при низкоэнергетической ионной бомбардировке с выделением атомарного фтора, но препятствуют действию механизма спонтанного химического травления вследствие

снижения возможности миграции первичных продуктов химических реакций — адкомплексов SiF_2 по поверхности.

Из полученных выражений, подтвержденных экспериментом, следует, что анизотропность травления пропорциональна плотности ионного тока на обрабатываемую поверхность, т.е. определяется преварированием ионно-индуцированного механизма травления над спонтанным. Для ее повышения необходимо снижать температуру подложки и максимально увеличивать степень ионизации плазмы. Последнее может быть достигнуто увеличением частоты электрического поля, вводимого в разряд вплоть до СВЧ диапазона; применением магнитных полей специальных конфигураций, обеспечивающих резонансное поглощение электромагнитной энергии плазмой или внешних электрических полей, способствующих увеличению вытягиваемых из плазмы ионов. Наиболее полно эти условия реализуются при использовании метода СВЧ вакуумно-плазменного травления, что делает его применение перспективным в прецизионном травлении структур субмикронных размеров.

Список литературы

- [1] Applications of plasma processes to VLSI technology // Ed. by T.Sugano. New York: Wiley Intersci. Publ., 1985. 394 p.
- [2] Плазменная технология в производстве СБИС / Под ред. Н.Айнспрука, Д.Брауна. М.: Мир, 1989. 469 с.
- [3] Гуляев Ю.В., Яфаров Р.К. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. Вып. 24. С. 2211–2214.
- [4] Яфаров Р.К., Мевлют Ш.Т., Терентьев С.А. // ЖТФ. 1993. Т. 63. Вып. 6. С. 000.
- [5] Petit B., Pelletier J., Pomot C. // Rev. de Phys. Appliquee. 1986. Vol. 21. N 6. P. 377–384.
- [6] Winters H.F., Coburn J.M. // J. Vac. Sci. Technol. 1985. Vol. B3. N 5. P. 1376–1381.
- [7] Фундаментальные и прикладные аспекты распыления твердых тел / Под ред. Е.С.Машковой. М.: Мир, 1989. 349 с.
- [8] Тренел Б. Хемосорбция. М.: ИЛ, 1958. 326 с.
- [9] Адапсон А. Физическая химия поверхности. М.: Мир, 1979. 569 с.

Институт радиотехники и электроники
Саратов

Поступило в Редакцию
6 июля 1992 г.