

## ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК КИСЛОРОДА НА СКОРОСТЬ И АНИЗОТРОПИЮ ПРИ ГЛУБИННОМ ТРАВЛЕНИИ КРЕМНИЯ В ПЛАЗМЕ ГЕКСАФТОРИДА СЕРЫ

В. В. Гладковский, к. ф.-м. н. О. А. Федорович

Институт ядерных исследований НАН Украины  
Украина, г. Киев  
vvglad@yahoo.com

*Приведены результаты исследований влияния количества кислорода в смеси с гексафторидом серы на скорость и анизотропию травления кремния в плазмохимическом реакторе с управляемым магнитным полем. Разработан и оптимизирован процесс глубинного плазмохимического травления кремния. Давление в рабочей камере составляло  $6 \cdot 10^{-3}$  —  $2 \cdot 10^{-2}$  Торр. Энергия химически активных ионов составляла 50—80 эВ. Удалось протравить кремний на глубину 100 мкм с анизотропией 10 при использовании никелевой маски толщиной 0,4—1,0 мкм.*

*Ключевые слова:* глубинное травление кремния, энергия ионов, плазмохимия, анизотропия.

Важнейшими технологическими задачами микроэлектроники являются процесс анизотропного плазмохимического травления; возможность управления профилем поверхности боковых стенок; глубокое травление различных материалов.

Исследование влияния кислорода на процесс травления в смеси  $\text{CF}_4\text{--O}_2$  показало, что при содержании в смеси 25% и более кислорода на поверхности кремния образуется слой хемосорбированного кислорода, который замедляет процесс травления. При дальнейшем увеличении количества кислорода в объеме реактора наблюдается гистерезисный эффект травления [1].

Кинетика химических реакций и их продуктов в плазме  $\text{SF}_6\text{--O}_2$  в целом аналогична  $\text{CF}_4\text{--O}_2$ . Основным различием является преобладание диссоциативного прилипания. При электронных ударах возникает значительно больше атомарного фтора и происходит реакция  $\text{SF}_6$  с кислородом с образованием оксифторидов фтора и продуктов реакций кремния с фтором [2, 3]. Использование плазмы  $\text{SF}_6\text{--O}_2$  способствует образованию радикалов  $\text{F}^*$ , которые обеспечивают химическое травление кремния путем образования летучих соединений кремния с фтором. Одновременно образуются радикалы  $\text{O}^*$ , которые обеспечивают пассивацию поверхности кремния, образуя диоксид кремния ( $\text{SiO}_2$ ) и оксифториды ( $\text{SiO}_x\text{F}_y$ ), которые используются в качестве маски для уменьшения скорости травления кремния [4].

В [5] показано, что различное соотношение  $\text{O}_2$  в плазме является основным фактором, влияющего на профиль травления кремния. Таким образом, анизотропией можно управлять с помощью соответствующих изменений соотношения  $\text{O}_2/\text{SF}_6$ , а также напряжением автосмещения. Необходимый профиль травления был достигнут, когда содержание  $\text{O}_2$  в плазме  $\text{SF}_6$  составило 10%.

Целью настоящей работы является исследование влияния добавок кислорода на процесс плазмохимического травления кремния и поиск оптимальных его режимов в плазмохимическом реакторе с управляемой энергией ионов.

Глубинное травление проводилось на установке, описание которой приведено в [6], при токе разряда 8 А, давлении в рабочей камере  $6 \cdot 10^{-3}$  —  $2 \cdot 10^{-2}$  Торр. Энергия химически активных ионов составляла 50—80 эВ. Низкая энергия ионов необходима для обеспечения целостности никелевой маски толщиной 0,4—1 мкм для травления кремния на глубину порядка 100 мкм.

Учитывая, что кремний был покрыт пленкой  $\text{SiO}_2$  толщиной 1 мкм, травление проводилось без добавок кислорода. Скорость травления термической пленки  $\text{SiO}_2$  при напряжении автосмещения 80 В составляла 0,1 мкм/мин. После стравливания  $\text{SiO}_2$  в камеру добавлялся кислород. Вертикальная скорость травления кремния составляла 0,5—1,0 мкм/мин. Отметим, что увеличивать разрядный ток для увеличения скорости опасно, поскольку увеличение тепловой нагрузки приведет к отслаиванию

защитной маски от поверхности  $\text{SiO}_2$  за счет различных коэффициентов теплового расширения и низкой адгезии.

При травлении кремния в плазме гексафторида серы без кислорода наблюдается растрав верхней части образца, а угол наклона стенки к вертикали составляет  $20\text{--}25^\circ$ . Добавление кислорода в количестве до 10% приводит к практически вертикальному травлению, растрав составляет порядка 10% в горизонтальном направлении. Дальнейшее увеличение содержания кислорода до 40% приводит к резкому уменьшению вертикальной скорости травления. Горизонтальная скорость при этом увеличивается, что приводит к сильному растраву и увеличению линейных размеров канавок. Из вышесказанного следует, что для решения поставленной задачи более всего подходит режим травления кремния в смеси гексафторида серы с 10%  $\text{O}_2$ .

Скорость травления кремния зависит от его удельного сопротивления, эффекта загрузки плазмохимического реактора, температуры подложки и других факторов. При увеличении обрабатываемой площади кремниевой пластины до  $30 \cdot 10^3 \text{ мм}^2$  скорость травления уменьшается в 4 раза. Также на скорость травления влияет глубина и ширина вытравливаемого отверстия. При увеличении глубины и уменьшении диаметра отверстия скорость травления уменьшается.

Проведенные масс-спектрометрические исследования коррелируют с результатами, полученными в [7]. Установлено, что  $\text{SiF}_4$  не является основным продуктом, который десорбирует с поверхности подложки. Полученные данные свидетельствуют о том, что  $\text{SiF}_2$ , а также  $\text{SiF}_3$  являются первичными продуктами травления.

Проведенные исследования показали возможность глубинного травления кремния в газовой смеси  $\text{SF}_6\text{--O}_2$  в плазмохимическом реакторе с низкой энергией химически активных ионов. Удалось провести травление  $\text{SiO}_2$  на глубину 1 мкм, а кремния — на 100 мкм без повреждения защитной маски толщиной 0,4 мкм. Травление кремния проведено с максимальной анизотропией (10), что позволило получить практически вертикальные стенки с минимальным поперечным изменением размеров.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Mogab C. J., Adams A. C., Flamm D. L. Plasma etching of Si and  $\text{SiO}_2$  — the effect of oxygen additions to  $\text{CF}_4$  plasmas // Journal of Applied Physics.— 1978.— Vol. 49.— P. 3796.
2. D'Agostino R., Flamm D. L. Plasma etching of Si and  $\text{SiO}_2$  in  $\text{SF}_6\text{--O}_2$  mixtures // Journal of Applied Physics.— 1981.— Vol. 52.— P. 162
3. Костин Е.Г., Усталов В.В., Федорович О.А. Масс-спектрометрические исследования химически активной плазмы высокочастотных разрядов в управляемых магнитных полях // Труды ИЯИ.— 2004.— №2 (13).— С. 86—95.
4. J. Yoo, K. Kim, M. Thamilselvan, N. Lakshminarayn, Y. K. Kim K. J. Yoo, J. Yi. RIE texturing optimization for thin c-Si solar cells in  $\text{SF}_6/\text{O}_2$  plasma // J. Phys. D: Appl. Phys.— 2008.— Vol. 41.— 125205.
5. Shrok A., Abd-allatar A. Effect of oxygen on Si etch profile using dc  $\text{SF}_6$  plasma micromachining // Proc. of the First Engineering Scientific Conference.— College of Engineering, University of Diyala, 2010.— P. 57—66.
6. Усталов В.В., Коновал В.М., Федорович О.А. Плазмохимический реактор с замкнутым дрейфом электронов для производства элементов с субмикронными размерами // Труды VI Междунар. конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (Крымико-96)».— Севастополь, Крым, Украина.— 1996.— С. 285—288.
7. Flamm D. L., Donnelly V. M., Mucha J. A. The reaction of fluorine atoms with silicon // Journal of Applied Physics.— 1981.— Vol. 52.— P. 3633.

V. V. Hladkovskiy, O. A. Fedorovich

#### **The effect of oxygen supplements on the rate and anisotropy at deep etching of silicon in a sulfur hexafluoride plasma**

*The paper presents research results on the effect of the amount of oxygen in the mixture with sulfur hexafluoride on the speed and anisotropy of etching of silicon in plasma-chemical reactor with controlled magnetic field. The authors designed and optimized the process of deep plasma chemical etching of silicon. The pressure in the chamber was  $6 \cdot 10^{-3}$  —  $2 \cdot 10^{-2}$  Torr. The energy of chemically active ions was 50—80 eV. It was possible to etch the silicon to a depth of 100 microns with the anisotropy of 10 using a nickel mask of 0,4—1 microns.*

*Keywords: deep etching of silicon, ion energy, plasma chemistry, anisotropy.*