

**ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОЕ ТРАВЛЕНИЕ ОКСИДА КРЕМНИЯ
ПРИ ФОРМИРОВАНИИ КОНТАКТНЫХ ОКОН
С ВЫСОКИМ АСПЕКТНЫМ СООТНОШЕНИЕМ**

О.Ю. Наливайко, канд. техн. наук,

О.В. Карась, К.А. Дорохович, Д.В. Жигулин

*ОАО «ИНТЕГРАЛ» –управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»,
Минск, Беларусь*

Проведено исследование скорости и селективности плазмохимического травления слоев оксида кремния в смеси CHF_3/CF_4 . Установлено, что при увеличении соотношения потоков CHF_3/CF_4 с 0,75 до 3,33 селективность травления $\text{SiO}_2/\text{ПКК}$ монотонно возрастает с 9,34 до 25,5. Это позволяет обеспечить одновременное травление контактных окон с различной глубиной с аспектным соотношением до 1,5 и с наклоном боковых стенок 82–87°.

Ключевые слова: *плазмохимическое травление; контактные окна; селективность.*

При производстве современных интегральных схем для селективного травления контактных отверстий в слоях оксида кремния, где требуется точное управление профилем травления, широко используется фторсодержащая плазма [1, 2]. При этом возникает необходимость одновременного травления контактных окон с различной глубиной (рис. 1). Как видно из рис.1, контактные окна к затвору являются «мелкими», а контактные окна к активным областям в кремниевой подложке – «глубокими». Так как в процессе травления нижележащий материал в «мелких» контактных окнах подвергается длительному воздействию плазмы, требуется высокая селективность травления оксида кремния по отношению к нижележащему слою поликристаллического кремния (ПКК). Повышение селективности травления SiO_2/Si может быть достигнуто за счет использования водорода или фторуглеродных газов, содержащих водород, например CHF_3 , CH_3F и других, что способствует образованию полимера на поверхности кремния [3, 4]. В связи с изложенным, представляет интерес исследование путей повышения селективности травления SiO_2/Si в условиях ограниченной возможности варьирования фторсодержащих газов, которые могут использоваться в серийном производстве.

В качестве подложек использовались пластины монокристаллического кремния КДБ-12 ориентации (100) диаметром 150 мм. На пластины осаждали слой поликристаллического кремния толщиной 0,25 мкм, затем слой SiO_2 , при субатмосферном давлении (СА ХОГФ) (0,6 мкм) и слой плазмохимического SiO_2 с использованием ТЭОС (ПХОТЭОС) толщиной 0,6 мкм. Далее наносили слой фоторезиста толщиной 1,3 мкм и с использованием проекционной фотолитографии формировали микрорисунок для травления контактных окон в слое оксида кремния с аспектным соотношением 1,5. Плазмохимическое травление слоев оксида кремния выполняли на установке Rainbow-4520 в реакторе

с двумя симметричными параллельными электродами. Для создания плазменного разряда используется генератор с частотой 13,56 МГц. В качестве газов для травления использовались хладон-14 (CF₄) и хладон-23 (CHF₃). Соотношение потоков CHF₃/CF₄ изменялось от 0,75 до 3,33.

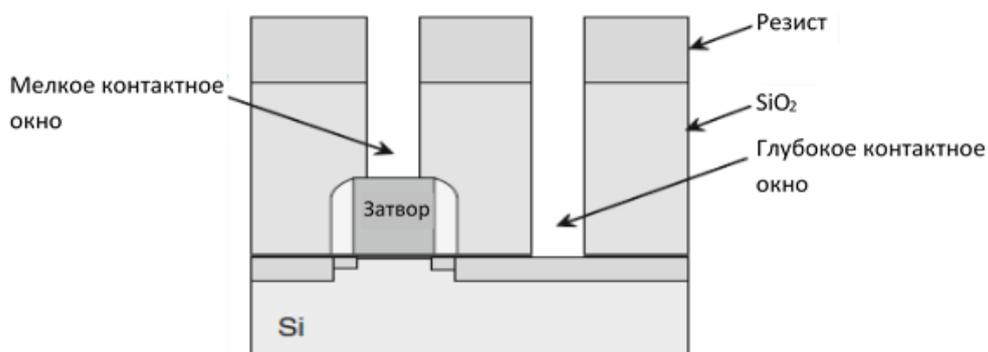


Рисунок 1. – Травление контактных окон

Толщина фоторезиста, пленок оксида кремния (и ПКК) контролировалась на установке OptiProbe-2690 до и после травления. По полученным результатам оценивалась скорость травления, неравномерность травления и селективность. Контроль профиля контактных окон проводился при помощи растровой электронной микроскопии на установке SEM-4800 фирмы Hitachi.

Результаты анализа скоростей травления оксида кремния и ПКК, неравномерности травления и селективности травления SiO₂/ПКК для пластин без запечатки приведены в Таблице. Видно, что с увеличением соотношения потоков CHF₃/CF₄ скорость травления оксида кремния незначительно уменьшается (с 8,96 до 8,4 нм/с), в то время как скорость травления ПКК монотонно уменьшается с 0,96 до 0,33 нм/с, что приводит к повышению селективности травления SiO₂/Si. Таким образом, как видно из рисунка 2, при увеличении соотношения потоков CHF₃/CF₄ от 0,75 до 3,33 селективность травления SiO₂/ПКК монотонно возрастает с 9,34 до 25,5. При этом неравномерность травления SiO₂ составляет (±2,1 – ±3,2) %.

При проведении травления оксида кремния на пластинах с запечатанными контактными окнами селективность травления SiO₂/ПКК уменьшилась с 25,5:1 до 20:1 по сравнению с пластинами без запечатки, при незначительном уменьшении скорости травления. На рис. 3 представлен профиль глубокого контактного окна. Угол наклона боковой стенки составляет от 82–84 в центре до 85–87 градусов на краю пластин.

Таблица. – Скорость, неравномерность, селективность процессов ПХТ SiO₂

Режим	1	2	3	4	5
Соотношение потоков CHF ₃ /CF ₄ , отн.ед.	0,75	1,0	1,6	2,27	3,33
Скорость травления SiO ₂ , нм/с	8,96	8,74	8,49	8,57	8,41
Неравномерность травления SiO ₂ , %	2,05	3,14	4,9	3,2	2,18
Скорость травления ПКК, нм/с	0,96	0,68	0,42	0,36	0,33
Неравномерность травления ПКК, %	5,71	7,21	13,68	10,34	10,11
Селективность SiO ₂ /ПКК, отн. ед	9,34	12,85	20,11	23,8	25,52

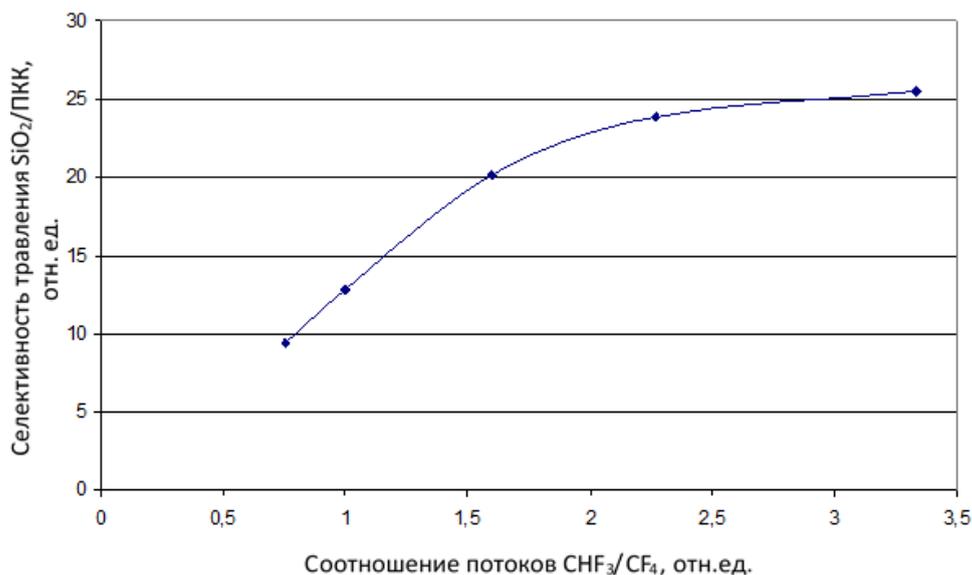


Рисунок 2. – Зависимость селективности травления SiO₂/ПКК от соотношения потоков CHF₃/CF₄

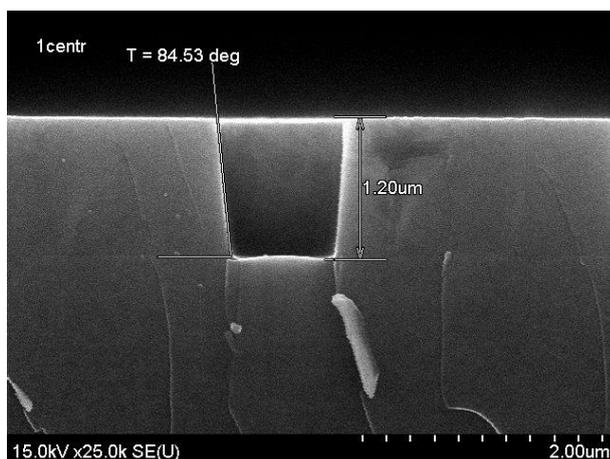


Рисунок 3. – Профиль и глубина контакта (без фоторезиста)

Полученные результаты можно объяснить с учетом механизма процесса травления, описанного в работах [3, 4]. Первоначально, после зажигания плазмы, происходит осаждение фторуглерода на материал подложки. Осажденная фторуглеродная пленка будет подвергаться ионной бомбардировке при приложении высокочастотного смещения. Ионная бомбардировка приведет к разрыву связей во фторуглеродном материале и, таким образом, к высвобождению фтора, который является отравителем как для фторуглерода, так и для исследуемых материалов подложки. В плазме CF₄ разлагается на ионы CF₃⁺, радикалы CF₃ и радикалы F⁺. Радикалы CF₃, адсорбированные на поверхности SiO₂, разлагаются на C и F при воздействии ионов CF₃⁺. Так как сила связи C-O больше силы связи Si-O углерод реагирует с кислородом в SiO₂, образуя CO, который затем десорбируется с поверхности SiO₂. В свою очередь кремний, который слабо связан, реагирует с фтором, образуя SiF₄, который десорбируется с поверхности SiO₂. Реакции между фторуглеродом и SiO₂ приводят к потреблению большей части осажденного фторуглеродного материала во время реакций травления. Поэтому удаление фторуглерода плазмой не является ограничивающим фактором для чистого

травления SiO_2 . С другой стороны, при травлении Si , где подложка не может способствовать удалению углерода во время травления, скорость травления фторуглерода является ограничивающим фактором. При добавлении в реакционную смесь CHF_3 радикалы водорода взаимодействуют с фтором, и в результате на поверхности кремния образуются фторуглеродные полимеры, что приводит к снижению скорости травления кремния и, как следствие, к повышению селективности травления SiO_2/Si . Впоследствии фторуглеродные полимеры легко удаляются в кислородной плазме.

При уменьшении проектных норм до 25 нм и менее перспективным методом травления является атомно-слоевое травление (ALE) – это циклический плазменный процесс, используемый в производстве полупроводников, который имеет потенциал для удаления одного слоя атомов в течение каждого цикла [5]. В самоограничивающемся идеальном ALE один монослой материала последовательно удаляется в каждом цикле, обычно выражаемом как EPC (травление за цикл). В плазменном ALE диэлектриков, таких как SiO_2 и Si_3N_4 , с использованием смесей фторуглеродных газов травление происходит путем осаждения тонкого полимерного слоя, и последующего травления, при этом процесс не является строго самоограниченным. В результате EPC сильно зависит от процесса и особенно чувствителен к толщине полимерного слоя. Однако такой процесс позволяет проводить плазмохимическое травление контактных окон с малыми размерами и высоким аспектным соотношением.

Заключение. Проведено исследование скорости и селективности плазмохимического травления слоев оксида кремния на установке Rainbow-4520 в смеси CHF_3/CF_4 . Установлено, что при увеличении соотношения потоков CHF_3/CF_4 с 0,75 до 3,33 селективность травления $\text{SiO}_2/\text{ПКК}$ монотонно возрастает с 9,34 до 25,5 при незначительном изменении скорости травления. Это позволяет обеспечить одновременное травление контактных окон с различной глубиной с аспектным соотношением до 1,5 и с наклоном боковых стенок $82\text{--}87^\circ$ и может использоваться в производстве интегральных микросхем с проектными нормами 0,6 мкм и выше.

ЛИТЕРАТУРА

1. Cho, B.-O. Angular dependence of SiO_2 etching in a fluorocarbon plasma / B.-O. Cho et al. // J. Vac. Sci. Technol. A, 2000. Vol. 18, iss. 6. P. 2791–2798.
2. Dry Etching Technology for Semiconductors / K. Nojiri // Springer International Publishing, Switzerland. 2015. 116p.
3. Tachi S., Chemical sputtering of silicon by F^+ , Cl^+ , and Br^+ ions: Reactive spot model for reactive ion etching // J. Vac. Sci. Technol. B, 1986. Vol. 4, iss. 2. P. 459–467.
4. Schaepkens, M. Study of the SiO_2 -to- Si_3N_4 etch selectivity mechanism in inductively coupled fluorocarbon plasmas and a comparison with the SiO_2 -to- Si mechanism / M. Schaepkens et al // J. Vac. Sci. Technol. – 1999. – A 17.1. – P. 26–37.
5. Wang, X., Scaling of atomic layer etching of SiO_2 in fluorocarbon plasmas: Transient etching and surface roughness / X. Wang, M. Wang, P. Biolsi, and M.J. Kushner // J. Vac. Sci. Technol. – 2021. – A 39(3). – 18 pp.