

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КРИОГЕННОГО ТРАВЛЕНИЯ КРЕМНИЕВЫХ ВЫСОКОАСПЕКТНЫХ СТРУКТУР

© 2016 г. В.Ф. ЛУКИЧЁВ, Т.В. ЧАСОВСКОЙ, М.И. МАНЬШИН,  
Д.С. ДЬЯКОВ, М.Э. ГМЫЗИН

Физико-технологический институт РАН, г. Москва,  
Московский технологический университет (МИРЭА)

### Введение

В процессе изготовления микро- и нанoeлектронных структур актуальным является процесс криогенного травления [1, 2] элементов с различными геометрическими размерами, например, круглых отверстий в кремнии. При этом более узкие отверстия травятся с меньшей скоростью, чем широкие. Аспектная зависимость в травлении кремниевых структур является одной из главных проблем в создании кремниевых микроструктур различного назначения.

В данной работе изучается зависимость скорости травления от аспектного соотношения на примере круглых отверстий, тренчей и их пересечений. Глубокое травление используется при изготовлении элементов рентгеновской оптики, конденсаторов для памяти DRAM, микроэлектромеханических систем и также используется в технологии 3D интеграции. Хотя травление кремния было изучено более 30 лет назад, оно остается актуальной проблемой и сейчас, особенно для увеличения производительности микроструктур и для создания новых, оригинальных микроструктур.

### Результаты эксперимента

Травление кремниевых пластин было произведено на кластерной установке реактивного плазмохимического травления PlasmaLab 100 Dual ICP Etch 380 (Oxford Instruments Plasma Technology) в плазме смеси газов кислорода и гексафторида серы. Температура образца в ходе травления поддерживалась равной  $-110^{\circ}\text{C}$ . Всего было протравлено 4 пластины с одинаковыми параметрами процесса, но разным временем травления для каждой (10, 20, 30 и 80 мин). Давление в реакторе  $p = 10$  мТорр, концентрация плазмы  $n = 10^{13}$  ч/см<sup>3</sup>, энергия ионов фтора получалась равной  $E = 100$  эВ.

Изучение высокоаспектных кремниевых структур происходило с помощью интерференционного микроскопа ZYGO New View 5000. Такой микроскоп позволяет получать субмикронное разрешение, как по глубине, так и в латеральной плоскости. Образцы были из монокристаллического кремния с маской SiO<sub>2</sub> толщиной 1,5 мкм. В маске фотолитографией были сделаны наборы отверстий и тренчей по разработанному шаблону.

Образцы измерялись в порядке возрастания их длительности травления (далее Т): 10, 20, 30, 40, 80 минут.

Построение графиков полученных данных и их аппроксимация МНК проводилась функцией вида:

$$Y = a * [1 - \exp(-b * X)] , \quad (1)$$

в программе OriginPro 2015, где Y – измеренная микроскопом глубина в мкм, а X – время травления в минутах одного размера отверстия в разных образцах (на графике 1 - W и T соответственно). А скорости травления аппроксимировались линейной функцией.

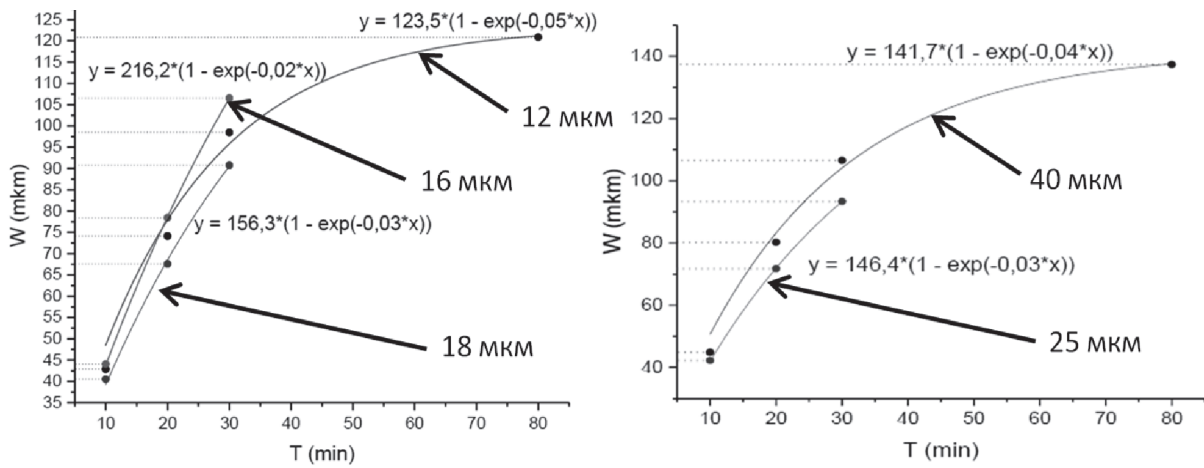


Рис. 1. Аппроксимация функцией (1) зависимости глубины тренчей шириной 8, 12, 16 мкм от времени травления. И аппроксимация функцией (1) зависимости глубины отверстий от времени травления диаметрами 25 и 40 мкм.

Для тренчей 8 и 16 мкм не удалось измерить больше данных, поэтому говорить о точности такой аппроксимации не имеет смысла. А вот для тренча 12 мкм приближение довольно точно.

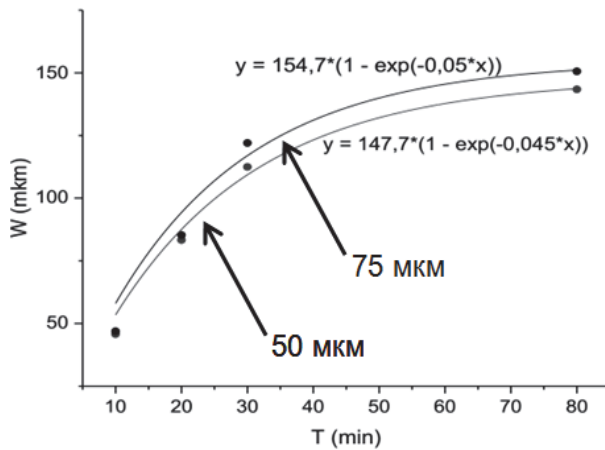


Рис. 2. Результаты аппроксимации зависимости глубины от времени травлений отверстий 50 и 75 мкм.

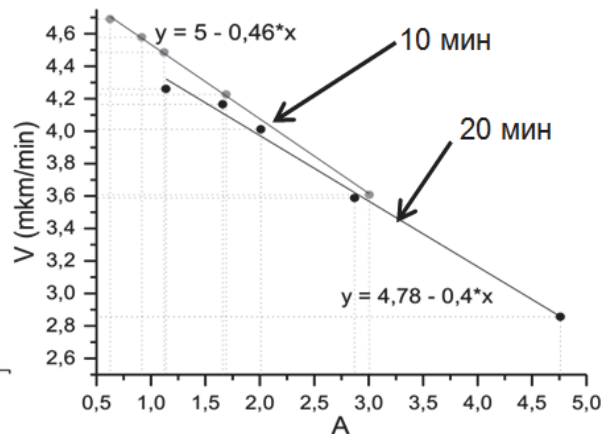


Рис. 3. Зависимость скорости травления 5 отверстий (от 12 до 75 мкм) от аспектного соотношения для T=10, 20 мин.

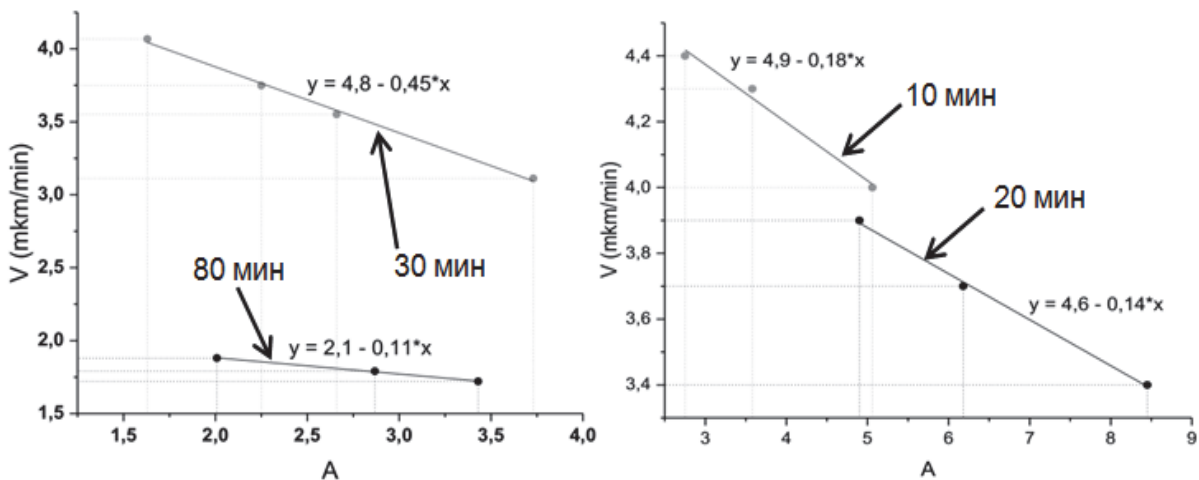


Рис. 4. Зависимость скорости травления от аспектного соотношения отверстий в процессе с T=30, 80 мин. И тренчей T=10, 20 мин.

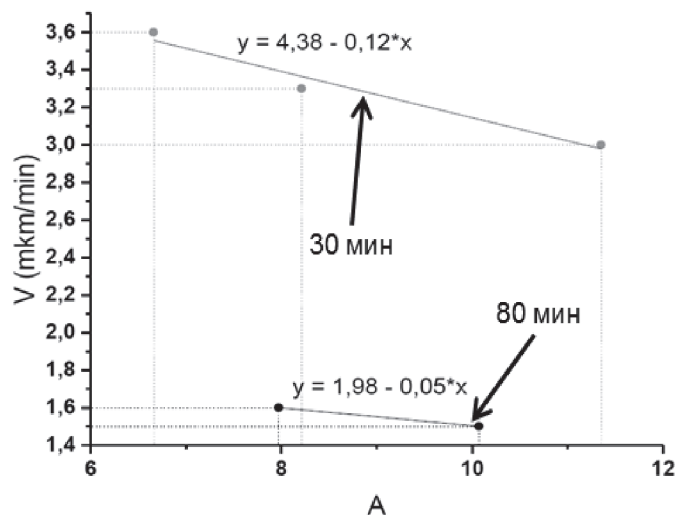


Рис. 5. Зависимость скорости травления от аспектного соотношения тренчей в криопротекторе с T=30 мин и T=80 мин.

Как видно из представленных выше графиков средняя скорость травления отверстий при T = 20 мин примерно в 1,5 раза меньше скорости травления в процессе с T = 10 мин (рис. 3). Скорость травления при T = 80 мин в 2 раза меньше чем при T = 30 мин (рис. 4). Для тренчей эти соотношения меньше (в 1,1 и 1,8 раза меньше соответственно; рис. 4 и 5). Стоит отметить, что эти соотношения ничего не говорят о самой зависимости скорости травления от размеров структур, а характеризуют лишь общую тенденцию поведения скорости травления при увеличении длительности процесса. Также у тренчей травление более независимое от аспектного соотношения, чем у отверстий, т.к. типичный коэффициент наклона прямой у тренчей  $\approx -0,1$  (рис.4 и 5); а у отверстий  $\approx -0,4$  (рис.3 и 4).

### Заключение

Методом криогенного плазмохимического травления кремния в плазме смеси газов SF<sub>6</sub> и O<sub>2</sub> были получены структуры, представляющие собой тренчи и отверстия. Структуры были изучены методом интерференционной профилометрии на микроскопе Zygo NewView 5000. Анализ полученных результатов позволил сделать следующие выводы:

1. Зависимость глубины отверстий и тренчей от времени травления хорошо описывается функцией вида  $Y=a*[1-\exp(-b*X)]$ .
2. Также чем больше отношение глубины к диаметру (в случае отверстий) или к ширине (в случае тренчей), тем меньше среднее значение скорости травления, но вместе с тем явление аспектно-зависимого травления менее выражено. Т.е. эффективность травления разных структур при одной и той же длительности процесса больше при травлении узких отверстий или тренчей, нежели более широких.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Dussart R., Tillocher T., Lefauchaux P. and Boufnichel M.* Plasma cryogenic etching of silicon: from the early days to today's advanced technologies, *Journal of Physics D: Applied Physics*: 47 (2014) 123001.
2. *Boufnichel M., Aachboun S.* Profile control of high aspect ratio trenches of silicon: I. Effect of process parameters on local bowing, *Journal of Vacuum Science & Technology. B* vol. 20 (No. 4) 1508 (July/Aug 2002) doi: 10.1116/1.1495505.