

ИЗУЧЕНИЕ ЖИДКОСТНОГО ТРАВЛЕНИЯ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ С ПОМОЩЬЮ АТОМНО-СИЛОВОГО МИКРОСКОПА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ.

А. А. Можанова, Н. И. Нургазизов, А. А. Бухараев

Казанский физико-технический институт КНЦ РАН

e-mail: mozhanova@kfti.knc.ru

Как нами было показано ранее, с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ) можно исследовать *in situ* кинетику процессов жидкостного травления диоксида кремния в водных растворах HF при комнатной температуре [1]. В частности, используя специально созданные структуры в виде отдельно расположенных на Si фрагментов SiO₂, можно получать абсолютные значения скорости травления диоксида кремния при концентрации HF от 0.01 до 5%, измеряя толщину SiO₂ в процессе травления. Изучение процессов травления и растворения при различных температурах позволяет глубже понять механизмы таких процессов, выработать конкретные рекомендации по использованию различных температурных режимов в технологиях производства изделий микро- и нанoeлектроники.

В настоящей работе приведены первые результаты по исследованию с помощью АСМ *in situ* процесса травления SiO₂ субмикронной толщины на подложке из Si в интервале температур от 20 до 60°C. Более высокие температуры не использовались из-за сравнительно быстрого испарения раствора в жидкостной ячейке микроскопа. В экспериментах использовались образцы, описанные в работе [1] и представляющие собой выступы из диоксида кремния, толщиной 100 нм и шириной 1.5 мкм, сформированные на подложке из кристаллического кремния, который как известно не травится в плавиковой кислоте. Применялся водный раствор с концентрацией HF 0.25%. Исследования проводились на микроскопе Solver P-47 фирмы "Нанотехнология-МДТ" с полем сканирования 50x50 мкм. Сконструированная нами жидкостная ячейка представляет собой кювету, на дно которой помещается образец, над кюветой расположено кварцевое окно, к которому крепится кантилевер. Жидкостная ячейка размещается на нагревателе (рис.1), входящем в комплект микроскопа Solver P47. Нагреватель управляется с помощью компьютера и программы, обеспечивающей работу микроскопа. Контроль температуры жидкости в кювете осуществлялся независимо с помощью термопары. Специально проведенные исследования показали, что температура жидкости в ячейке только на один градус ниже, чем заданная с компьютера. Точность задания постоянной температуры раствора находится в пределах одного

градуса. Достаточно большое поле сканирования микроскопа позволило, кроме обычных измерений, проводить в такой ячейке также эксперименты по фототравлению Si в жидкой среде. При этом кантилевер не затенял исследуемую поверхность образца от воздействия луча внешнего He-Ne лазера (рис.1) в перерывах между сканированиями. Получая последовательно АСМ-изображения одного и того же участка поверхности в различные моменты времени, можно было наблюдать *in situ* за процессом трансформацией поверхности при растворении и фототравлении. Скорость травления определялась по изменению высоты травящегося выступа диоксида кремния относительно подложки из кремния по методике, описанной в работе [1].

На рис. 2 а представлены зависимости изменения выступа из SiO₂ при травлении *in situ* в 0.25% растворе HF при 20, 30, 40, 50 и 60°C. Хорошо видно, что при любых температурах эти зависимости имеют линейный характер и скорость травления увеличивается с ростом температуры от 0.9 нм/мин при 20°C до 4.5 нм/мин при 60°C.

В большинстве случаев скорость процесса травления ограничивается либо диффузией компонентов травителя или продуктов реакции в растворе, либо непосредственно скоростью поверхностной химической реакции [2]. В зависимости от того, какая стадия процесса, диффузная или кинетическая, протекает наиболее медленно, характер и результаты процесса травления оказываются различными. Если бы скорость нашей реакции была ограничена диффузионной стадией процесса, то при перемешивании раствора скорость бы значительно возросла, а незначительное увеличение температуры не сказывалось бы на процессе. Эксперименты с перемешиванием раствора проводились нами как *ex situ*, так и *in situ*, при этом заметного увеличения скорости травления при перемешивании не наблюдалось. Эксперименты *in situ* с перемешиванием проводились следующим образом: для осуществления процесса перемешивания необходимо постоянно проводить сканирование поверхности во время травления, при этом микрозонд будет перемешивать жидкость. В экспериментах без перемешивания, сканирование проводилось поперек выступа и изображение представляло собой профиль из несколько сканов, достаточных для определения высоты ступеньки. Скорость, определенная из таких экспериментов оставалась постоянной.

Явление значительного увеличения скорости травления при увеличении температуры и постоянства скорости при перемешивании раствора говорит о том, что в нашем случае процесс травления ограничивается кинетической стадией процесса. В случае ограничения скорости процесса за счет кинетической стадии, суммарная скорость процесса описывается формулой Аррениуса:

$$v = A \exp(-E/kT),$$

где v - скорость травления, E - энергия активации процесса, T - температура по шкале Кельвина, k - постоянная Больцмана, A - константа.

На рис. 2 б представлены экспериментальные точки скоростей травления при различной температуре. Их аппроксимация экспоненциальной зависимостью выполнена с помощью компьютера, когда по известным экспериментальным значениям скорости и температуры и формуле Аррениуса была произведена оптимизация параметров A и E . В результате энергия активации процесса травления составила 0.3 эВ с точностью до 10%, что хорошо согласуется с литературными данными определения энергии активации, когда толщина слоя SiO_2 на подложке из Si определялась методами эллипсометрии [3,4].

Таким образом, впервые были проведены *in situ* АСМ-эксперименты по определению скорости травления диоксида кремния при различной температуре раствора. Было установлено, что процесс растворения диоксида кремния в водных растворах HF лимитируется кинетической стадией процесса. Продемонстрировано, что по результатам таких экспериментов довольно просто можно определять энергию активации процесса с достаточно высокой точностью.

Авторы выражают благодарность сотруднику лаборатории физики и химии поверхности КФТИ Д.В.Овчинникову за полезные обсуждения.

Исследования поддержаны РФФИ (грант 98-03-32753), Министерством науки и технологий РФ (Программа “Перспективные технологии и устройства микро- и нанoeлектроники”, грант 02.04.3.1.40.Э.22).

Литература

1. Бухараев А. А., Нургазизов Н. И., Можанова А. А., Овчинников Д. В. // Микроэлектроника. 1999, т.28, № 5. С. 385-394.
2. Пичугин И. Г., Таиров Ю. М. Технология полупроводниковых приборов / М.: Высшая школа. 1984. 287с.
3. Валиев К.А., Махвалидзе Т.М., Раков А.В. // ДАН СССР. 1986, Т. 289, № 4. С. 867-871.
4. Валиев К.А., Махвалидзе Т.М., Раков А.В. //Микроэлектроника. 1986, Т.15, № 5, С. 392-397.

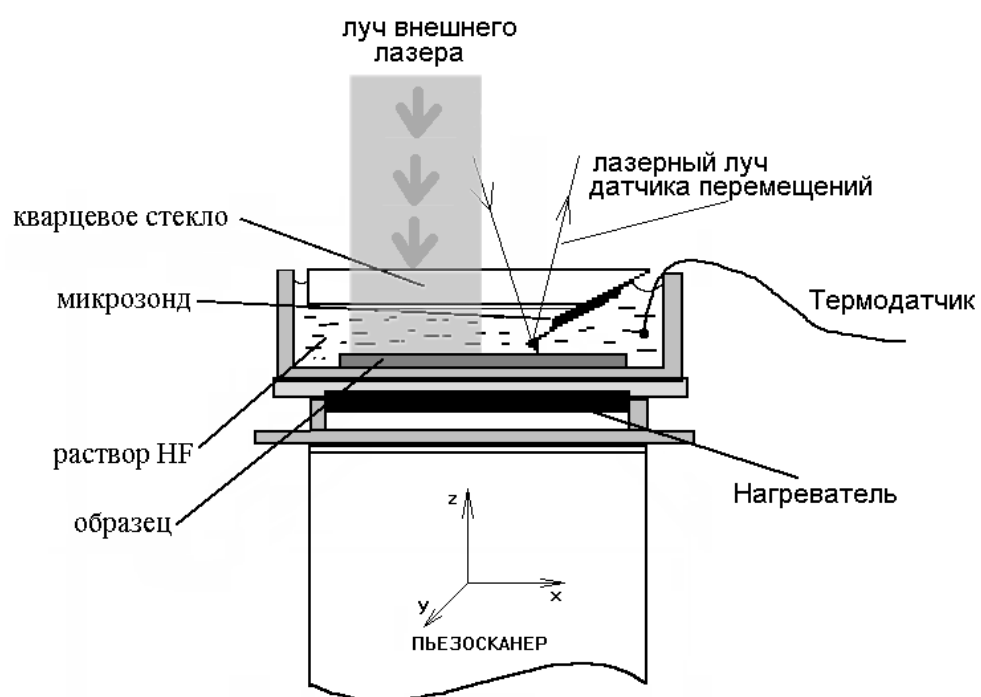
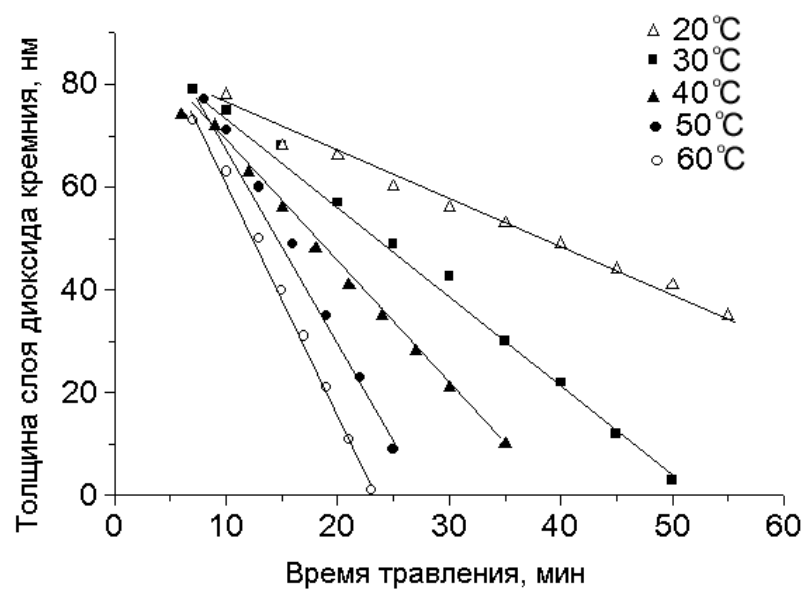
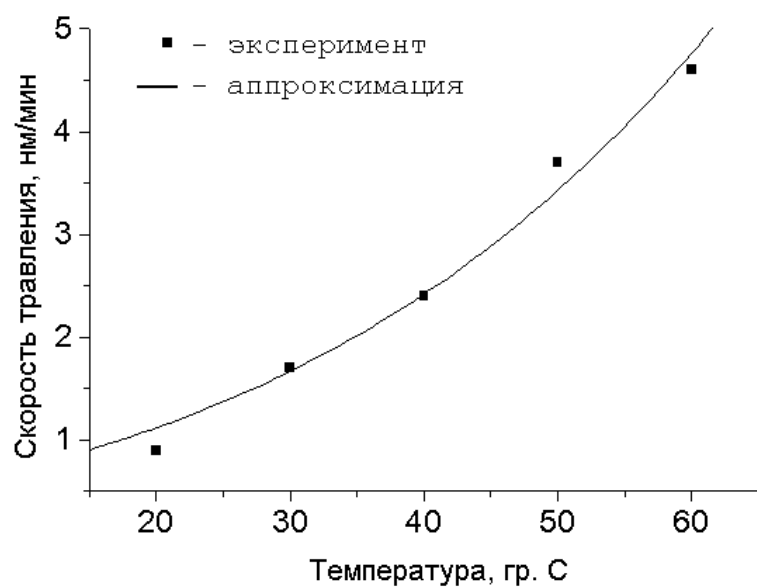


Рис.1. Жидкостная ячейка АСМ, размещенная вместе с термостойником на пьезосканере микроскопа.



а



б

Рис.2. Кинетика травления диоксида кремния в 0.25% водном растворе HF при различных температурах. а - изменение *in situ* толщины слоя SiO₂ при 20, 30, 40, 50 и 60°C. б - аппроксимация изменения скорости травления с температурой экспоненциальной зависимостью.