

Р. А. Мухамадеев, Т. И. Данилина

Моделирование процессов травления микро- и наноструктур с использованием программного модуля «NEMO etching»

Работа посвящена моделированию процессов травления микро- и наноструктур с использованием программного модуля «NEMO etching», который является собственной разработкой авторов. Рассмотрены основные модели травления в области микро- и нанозлектроники, а также микросистемной техники и их возможности. Представлены результаты моделирования жидкостного, ионного, реактивно-ионного травления, а также Bosch процесса при различных параметрах технологического процесса. Данные моделирования проверены на соответствие с реальными экспериментами.

Ключевые слова: травление, моделирование, программный продукт, реактивное ионное травление, ионное травление, изотропное травление, Bosch-процесс.

Процесс травления является ключевой операцией технологического маршрута изготовления устройств микро- и нанозлектроники (это маска для затвора полевого транзистора, межприборная изоляция, сквозные отверстия в подложке, микрорельеф для антиотражающих покрытий и т. д.). В нанозлектронике с помощью данного процесса активно реализуют концепцию «сверху-вниз». Из-за бурного развития полупроводниковой промышленности, технологи непрерывно решают проблему разработки технологии процесса травления с целью получения заданной геометрической конфигурации, необходимой для изготовления новых устройств микро- и нанозлектроники.

Экспериментальный метод разработки требует огромных временных и денежных затрат. Отсюда вытекает потребность в создании компьютерных моделей процессов травления.

Для решения данной проблемы была поставлена цель – разработка программного продукта, способного моделировать различные процессы травления (изотропное, ионное, реактивно ионное травление, а также Bosch-процесс), также данное программное обеспечение должно иметь пользовательский интерфейс и широкие возможности для обеспечения визуализации и измерения выходного рельефа структуры.

При моделировании процессов травления в зависимости от типа травления используют два подхода:

- Модель струны
- Модель Монте-Карло

Модель струны – это метод моделирования, при котором поверхность исходного профиля аппроксимируют набором точек, соединенных между собой прямыми отрезками. На очередном шаге процесса моделирования каждая точка сдвигается на расстояние, которое определяется её текущей координатой, текущей структурой рельефа и совокупностью входных параметров.

При моделировании процесса изотропного травления наиболее удобно использовать модель струны. На рис. 1 (А) продемонстрирована аппроксимация динамики поверхности с помощью данного метода. В случае изотропного травления на каждом шаге происходит движение точек по эквидистанте. Направление движения совпадает с направлением вектора биссектрисы угла. Этот угол образован двумя перпендикулярами, проведенными от ломанной, соединяющей группу точек на предыдущем шаге, и ломанной, соединяющей группу точек на текущем шаге.

Однако при моделировании сложных анизотропных процессов травления (в частности ионное либо реактивное ионное травление) модель струны неэффективно описывает реальные процессы. В этом случае наиболее близкие результаты моделирования с экспериментальными данными можно получить, используя модель Монте-Карло.

Метод Монте-Карло (ММК) – общее название группы численных методов, основанных на получении большого числа реализаций стохастического (случайного) процесса, который формируется таким образом, чтобы его вероятностные характеристики совпадали с аналогичными величинами решаемой задачи.

ММК широко применяют для моделирования процессов травления в плазме. Если в рамках модели рассматривать поведение большого числа частиц в плазме (ион, радикал или ХАЧ) по

отдельности, то можно получить статистическую картину процессов в плазме, которая имеет согласование с реальным экспериментом [1 - 3]. На рис. 1 (Б) продемонстрированы возможные случаи, которые могут произойти с частицей плазмы и которые закладываются в ММК.



Рис. 1. Аппроксимация динамики поверхности структуры в модели струны (а); события, которые могут произойти с частицей плазмы, при моделировании с помощью ММК (б)

В случае моделирования процессов травления, в которых существует два типа частиц – направленные и ненаправленные, например, ионы и радикалы, то наиболее оптимально использовать комбинацию ММК и модели струны. К таким процессам травления можно отнести реактивное ионное травление и Bosch процесс.

При создании программного модуля «NEMO etching» были использованы модель струны, ММК, а также разработана оригинальная модель – комбинация модели Монте-Карло с клеточно-графовой аппроксимацией модели струны.

Далее представлены результаты моделирования жидкостного (рис. 2), реактивно-ионного травления (рис. 3), ионного травления (рис. 4) а также Bosch процесса (рис. 5) при различных параметрах технологического процесса.

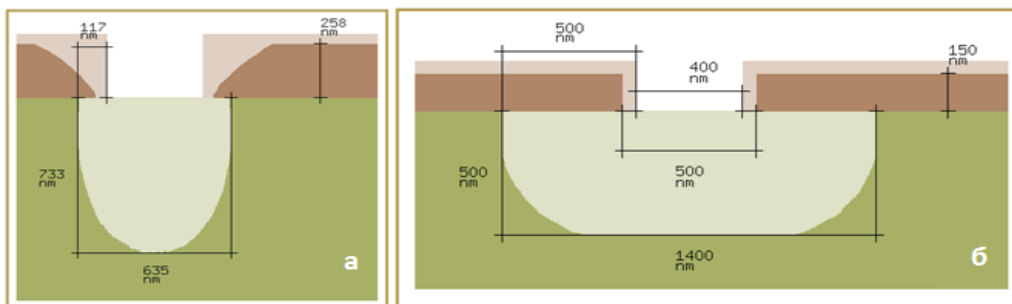


Рис. 2. Реактивное ионное травление (а), жидкостное травление (б)

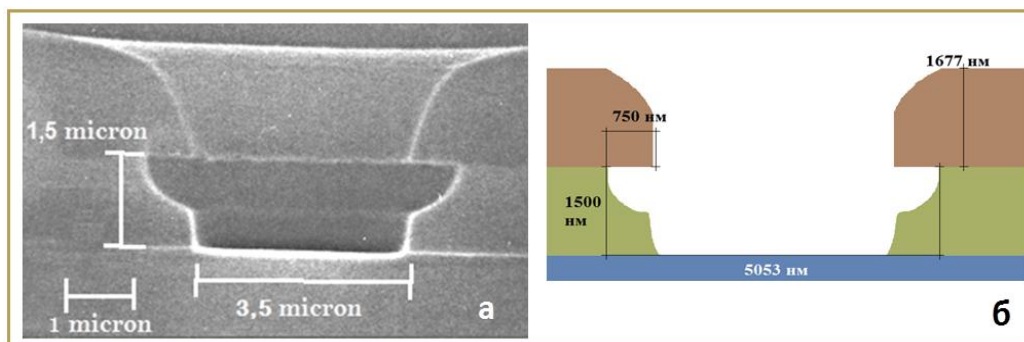


Рис. 3. Реальный эксперимент двухстадийного реактивного ионного травления (а), результат моделирования данного двухстадийного реактивного ионного травления

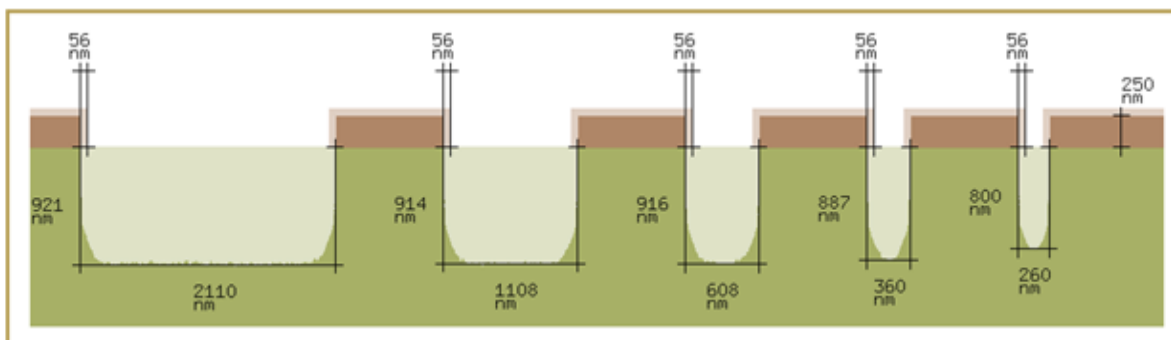


Рис. 4. Ионное травление

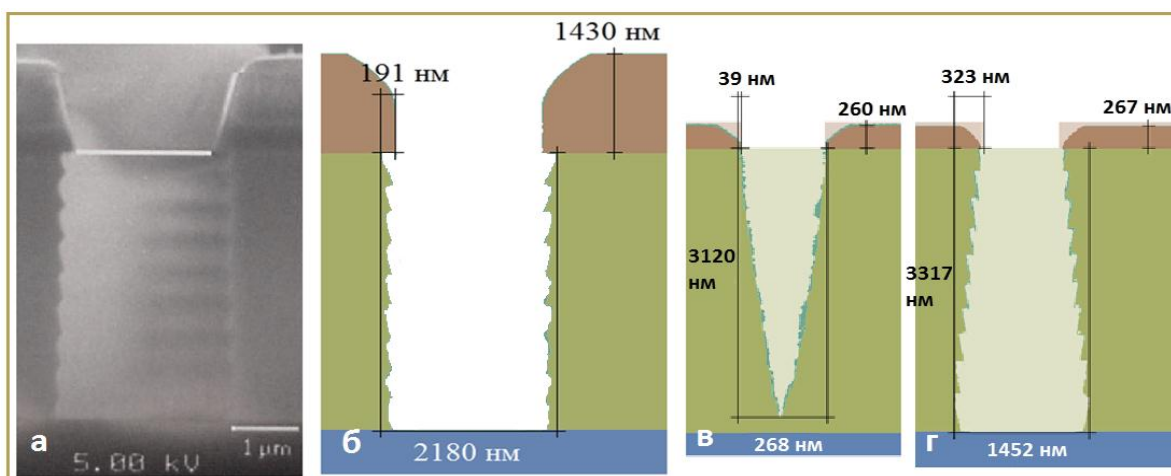


Рис. 5. Реальный эксперимент Bosch процесса при сбалансированном соотношении времен травления и осаждения (а) [4], результат моделирования данного реального эксперимента (б), время осаждения преобладает (в), время травления преобладает (г)

На рис. 2 – 5 полупрозрачными оттенками показан исходный рельеф структуры (данная возможность позволяет оценить подтрав маски). Отрезками на данном рисунке обозначены размеры травимой структуры.

На рис. 2 показан результат моделирования жидкостного травления рис. 2, а и реактивного ионного травления рис. 2, б. В эксперименте реактивного ионного травления рис. 2, а преобладало воздействие ионов, следовательно, было проведено анизотропное травление. Однако наличие радикалов в данном процессе привело к тому, что появился небольшой боковой подтрав (117 нм). В эксперименте рис. 2, б глубина травления равна боковому подтраву, это связано с изотропностью процесса жидкостного травления.

На рис. 3, а приведен реальный эксперимент двухстадийного реактивного ионного травления, рис. 3, б – результат моделирования данного процесса травления. В реальном эксперименте до половины травимого слоя процесс травления был изотропный (за счет количественного преобладания радикалов в плазме), а затем до подложки – анизотропным (за счет количественного преобладания ускоренных ионов в плазме). Соответственно при таких же условиях технологического процесса проведено моделирование.

Рис. 4 демонстрирует результат моделирования ионного травления. В данном эксперименте было использовано высокое напряжение смещения к подложке. Это привело к тому, что почти все ионы попадали на подложку строго вертикально. Следовательно, боковой подтрав получился очень мал (56 нм).

Рис. 5 показывает моделирование Bosch процесса. Из анализа рис. 5, в и рис. 5, г следует, что при значительном увеличении времени стадии травления по отношению ко времени стадии пассивации получают расширяющиеся канавки. Это обусловлено тем, что пассивирующая пленка быстро травится и становится неспособной сдерживать воздействие ХАЧ и ионов. При значительном увеличении времени стадии пассивации по отношению ко времени стадии травления получают

сужающиеся канавки. В этом случае ионы не успевают стравить пассивирующую пленку, чтобы открыть область ХАЧ, поэтому травление в основном обусловлено физическим распылением и при этом скорость травления быстро уменьшается и со временем процесс травления прекращается. Однако оптимально подобранное соотношение времен травления и пассивации позволяет получить вертикальные стенки. Оптимальное соотношение подобрано в реальном эксперименте, представленном на рис. 5, а. На рис. 5, б представлен результат моделирования данного реального эксперимента (моделирование проводилось при соответствующих параметрах технологического процесса).

Рис. 3 и рис. 5 свидетельствуют о хорошем согласовании результатов моделирования с реальным экспериментом и, следовательно, показывают адекватность моделей заложенных в программный модуль «NEMO etching».

Данная программа зарегистрирована в государственном реестре программ для ЭВМ (свидетельство № 2013618599, дата регистрации 12.06.2013). Работа апробирована при выполнении договора (хоз. договор 5/001/23003/901) кафедры ФЭ с корпорацией «Роснано» по разработке образовательного модуля «Диэлектрики в технологии нанозлектроники».

Литература

1. Королев М.А. Технология, конструкции и методы моделирования кремниевых интегральных микросхем. 2 часть / М.А. Королев, Т.Ю. Крупкина, В.И. Шевяков, М.Г. Путря. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. – 429 с.
2. Галперин В.А. Процессы плазменного травления в микро- и нанотехнологиях / В.А. Галперин, Е.В. Данилкин, А.И. Мачалов, В.П. Тимошенко. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010. – 288 с.
3. Айнспрук Н. В. Плазменная технология в производстве СБИС / Н. В. Айнспрук, Д. Л. Браун. – М.: Мир, 1987. – 469 с.
4. Simulation of the Bosch process with a string-cell hybrid method / Z. Rongchun, Z. Haixia, H. Yilong, W. Yangyuan. // Journal of micromechanics and microengineering, 2004. – Т. 14 – С. 851–858.

Мухамадеев Руслан Азатович

Магистрант 1 года обучения кафедры физической электроники ТУСУРа

Тел.: +7 (913) 102-73-59

Эл. почта: Ruslan910425@gmail.com

Данилина Тамара Ивановна

Профессор кафедры физической электроники ТУСУРа, к. т. н.

Тел.: +7 (960) 971-27-43

Эл. почта: p.e.troyan@mail.ru

Mukhamadeev R. A., Danilina T. I.

Simulating of etching process using «NEMO etching» software

This paper about simulating of etching process using «NEMO etching» software. Essential etching models in the microelectronics, nanoelectronics, and microelectromechanical systems was investigated. The result of wet etching, ion milling, reactive ion etching, and Bosch process simulating on different condition was shown. Simulation data are checked for compliance with real experiments.

Keywords: etching, simulation software, reactive ion etching, ion milling, isotropic etching, Bosch-process.