

## Клеточно-автоматная модель воздействия кислородсодержащей плазмы на макроскопическую диэлектрическую проницаемость пористого SiOCH диэлектрика

А.А. Резванов<sup>1,2</sup>, И.В. Матюшкин<sup>2</sup>, О.П. Гуцин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский физико-технический институт (государственный университет)

<sup>2</sup>НИИ молекулярной электроники

### Введение

Для повышения быстродействия СБИС в современной микроэлектронике был совершен переход к медной металлизации (так как Cu имеет меньшее удельное сопротивление  $\rho=1,7$  мкОм\*см по сравнению с алюминием  $\rho=2,8$  мкОм\*см) и к новым *low-k* диэлектрикам (с диэлектрической постоянной  $\epsilon \sim 2,5-2,8$  ниже, чем у диоксида кремния). Одними из наиболее распространенных *low-k* диэлектриков являются пористые органосиликатные стекла (SiOCH) [1]. При этом некоторые операции VEO-технологии предполагают воздействие плазмы на *low-k* диэлектрик. В частности, наибольшее повреждение диэлектрика происходит во время удаления остатков фоторезиста с поверхности диэлектрической пленки (Рис.1) при плазмохимическом травлении в кислородной плазме [2] при типичных условиях 270-300<sup>0</sup>С в DSP реакторах. Целью данной работы являются определение как глубины проникновения радикалов кислорода в поры диэлектрика, так и определение изменений интегральных свойств пористого SiOCH диэлектрика (в частности, макроскопической диэлектрической проницаемости). Для этого нами была разработана математическая модель этих процессов, сформулированная на языке клеточных автоматов[3]. Модель позволяет учесть исходное распределение ионов плазмы по скоростям и углам падения.

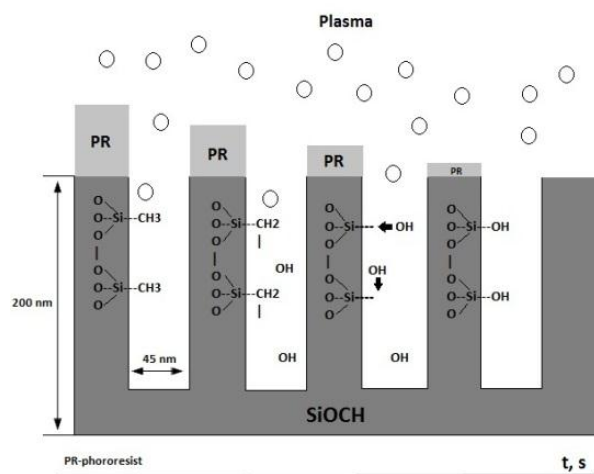


Рис. 1. Процесс удаления фоторезиста с поверхности low-k диэлектрика

### Качественный анализ физической ситуации

Нами принят естественный постулат о том, что макроскопические свойства диэлектрика определяются его микроскопическими свойствами. В частности, для вычисления макроскопической  $\epsilon$  можно использовать обобщение формулы Дебая-Ланжевена:

$$\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon+2} = \frac{4\pi}{3} \frac{\left[ \sum_i N_i \left( \alpha_i + \frac{d_i^2}{3kt} \right) + N_0 \alpha_0 \right]}{\sum_i N_i + N_0} \quad (1)$$

где  $i=1,2,3$  и обозначает тип связи Si-O, Si-OH, Si-CH<sub>3</sub> соответственно, первый член в сумме  $\alpha_i$  – электронная/ионная поляризуемость, второй член – ориентационная

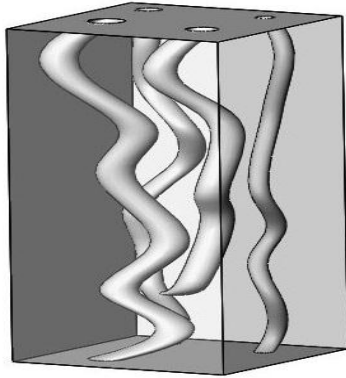
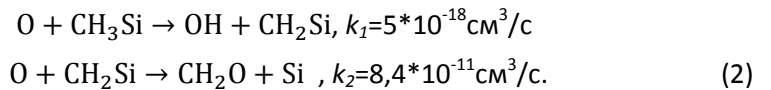


Рис. 2. 3D изображение пористого SiOCH диэлектрика

поляризуемость,  $N_0\alpha_0$  - постоянная поляризуемости матрицы. В ходе травления электронейтральные радикалы кислорода  $O^*$  глубоко проникают вглубь пористого диэлектрика (Рис.2), реагируют с гидрофобными группами ( $\equiv\text{Si-CH}_3$ ) и удаляют их с поверхности пор [2]. В результате реакции с метильными группами образуются гидроксиды, которые впоследствии занимают свободные химические связи на стенках пор:



Таким образом, *low-k SiOCH* диэлектрик становится гидрофильным и значение диэлектрической постоянной сильно возрастает [4]. Стоит отметить, что поры не связаны между собой диффузионно, так как коэффициент диффузии кислорода в SiO<sub>2</sub> равен  $D(O) = 5,94 \cdot 10^{-18} \text{ м}^2/\text{с}$  [5].

Поэтому можно ограничиться рассмотрением лишь одной изолированной поры, которая моделируется цилиндром длины  $L=200$  нм и радиуса  $R=1$  нм, пренебрегая кривизной (Рис.3).

Модель представляет собой взаимодействие пары клеточных автоматов,

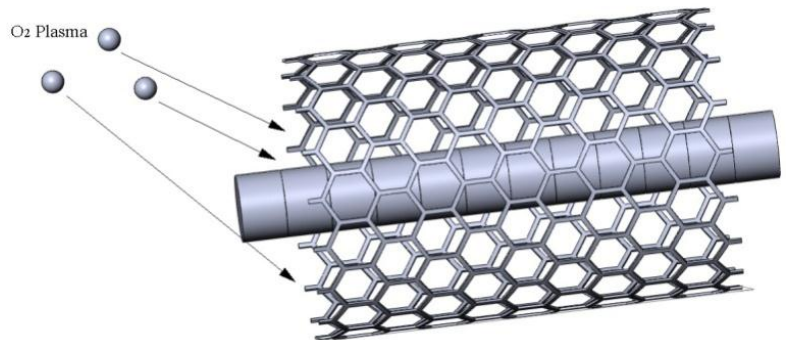


Рис. 3. Вид композиции двух клеточных автоматов

первый из которых 1D, располагается по оси цилиндра и репрезентирует пул молекул внутри объема поры, а второй – 2D и представляет собой гексагональную сетку, свернутую по поверхности цилиндра, элементы которой моделируют процессы поверхностной диффузии (с учетом термокинетической активации) и хемосорбционного взаимодействия на дискретно-атомарном уровне.

## Выводы

Предварительные результаты показали, что увеличение диэлектрической постоянной в процессе удаления остатков фоторезиста составило около 30%, что согласуется с результатами, полученными ранее [6]. В дальнейшем предполагается усовершенствовать модель путем учета наличия фоторезиста на поверхности диэлектрика (учет его состава) и рассмотрение множества пор.

## Литература

- [1] *K. Maex, M. R. Baklanov, D. Shamiryani, F. Iacopi, S. H. Brongersma, and Z. S. Yanovitskaya*, *Journal of Applied Physics*, **93**, 8793, 2003.
- [2] *O. V. Braginsky, A. S. Kovalev, D. V. Lopaev, E. M. Malykhin, Yu. A. Mankelevich, T. V. Rakhimova, A. T. Rakhimov, A. N. Vasilieva, S. M. Zyryanov, and M. R. Baklanov*, *Journal of Applied Physics*, **108**, 073303 (2010).
- [3] *Красников Г.Я., Зайцев Н.А., Матюшкин И.В.* Математическое моделирование кинетики высокотемпературного окисления кремния и структуры пограничного слоя в системе Si--SiO<sub>2</sub> Физика и техника полупроводников. 2003. Т. 37. № 1. С. 44-49.
- [4] *M. A. Worsley, S. F. Bent, S. M. Gates, N. C. M. Fuller, W. Volksen, M. Steen, and T. Dalton*, *J. Vac. Sci. Technol. B* **23**, 395, 2005
- [5] *O.V. Aleksandrov, A.I. Dusj*, *Semiconductor Physics and Technology*, V. 42, № 11 (2008)
- [6] *M.Darnon*, PhD dissertation, BDI ST Microelectronics (2007)