

## Моделирование электростатического поля в элементе памяти

В работе [1] показано, что процесс очистки в кипящей деионизованной воде микросхем на кремниевых пластинах, содержащих элементы памяти на основе самоформирующихся наноструктур (ЭПСН), сильно влияет на их электрические характеристики. В частности, ухудшаются условия для процесса электроформовки и повышается вероятность пробоя ЭПСН. Для объяснения эффекта влияния указанной очистки было высказано предположение, что молекулы воды проникают в рабочий торец диэлектрического слоя ЭПСН, изменяя его электрические свойства, а это в свою очередь ведёт к перераспределению электрического поля в изолирующем зазоре. Однако, непосредственные физические измерения в структуре ЭПСН затруднены малыми размерами, как самой структуры, так и нанометровой глубиной увлажнённого слоя торца диэлектрика, поэтому для проверки предположения было решено выполнить компьютерное моделирование поля с помощью пакета «ELCUT» [2].

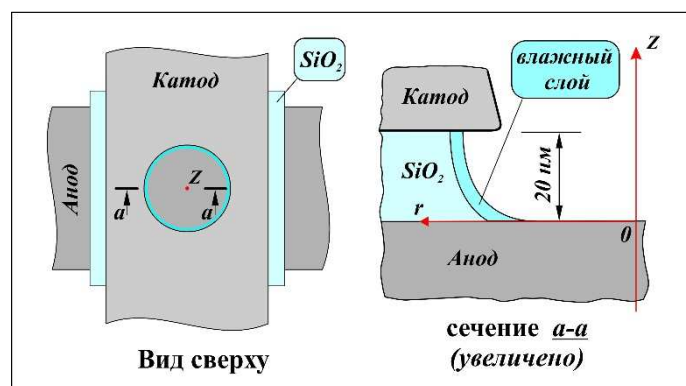


Рис. 1.

В упрощённом виде ЭПСН (рис. 1) представляет собой плоскопараллельную конденсаторную систему электродов, разделённых слоем тонкого (несколько десятков нанометров)

твёрдого диэлектрика, в нашем случае это двуокись кремния ( $\text{SiO}_2$ ). Из верхнего электрода и диэлектрика жидкостным методом травления сформирована ступенчатая структура катод – торец слоя  $\text{SiO}_2$ , нижний электрод является анодом. В ЭПСН такая структура обычно обеспечивает хорошие условия для возникновения автоэлектронной эмиссии при довольно низких напряжениях  $5 \div 15$  В. В зависимости от способа нанесения  $\text{SiO}_2$  и технологических режимов формирования поверхностные слои

торца диэлектрика получают различной степени пористости, что определяет объём и глубину проникновения влаги.

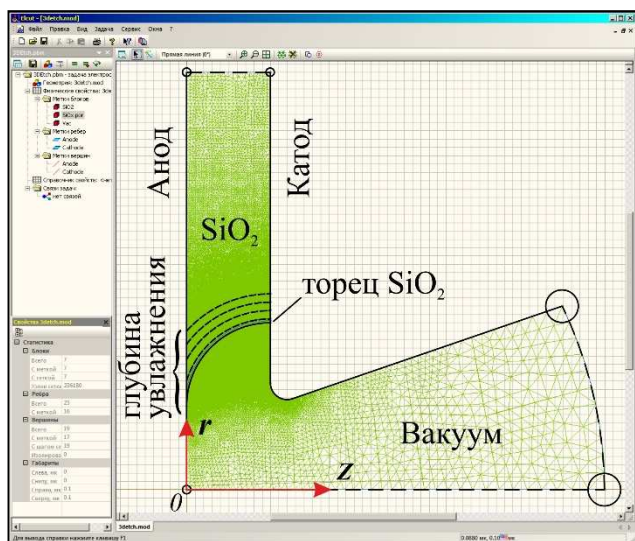


Рис.2.

Геометрия нашей модели в «ELCUT» рис. 2. соответствует рис. 1 (сечение a-a повернуто). Размеры и физические параметры структуры выбраны типичными, которые обычно получают в нашем техпроцессе. В отличие от работы [1] здесь задача имеет аксиальную симметрию и поэтому её можно решить в трёхмерном виде (в «ELCUT» ось вращения  $z$  горизонтальная). Для упрощения модели сделаны некоторые допущения. Поскольку применялось жидкостное травление, было принято, что режим травления окисла изотропный, поэтому поверхность торца диэлектрического слоя в сечении можно представить в виде части окружности. Дополнительным обоснованием такого представления послужили наблюдения торца диэлектрика в электронном микроскопе. Шаг дискретизации грубой части сетки равен  $4\text{ нм}$  (большие круги) и  $1\text{ нм}$  (меньшие круги). Наименьший шаг сетки  $0,02\text{ нм}$  выбран для наиболее интересной области увлажнённого торца. Далее считалось, что при увлажнении торца граница раздела сухого и влажного диэлектрика сдвигается внутрь структуры эквидистантно торцевой поверхности, а весь слой равномерно увлажнён по объёму. Чтобы выполнить численный расчёт кроме геометрии модели необходимо задать физические свойства элементов модели – диэлектрические постоянные сред. В нашем случае для  $\text{SiO}_2$  принято  $\varepsilon = 3,8$ , выбор же для увлажнённого слоя сложнее. Было предложено рассматривать увлажнённый слой как композитную среду с некоторой эффективной диэлектрической постоянной  $\varepsilon^*$ , где окись кремния играет роль матрицы, содержащей включения в виде пор, заполненных водой с  $\varepsilon = 81$  (при  $20\text{ }^\circ\text{C}$ ). Возможен также предельный случай, когда шероховатая поверхность окисла покрыта тонкой плёнкой воды,

тогда вода – это матрица, а выступы – включения. Точный расчёт  $\epsilon^*$  такой среды довольно сложная, часто невыполнимая задача, даже если известна геометрия пор. Однако есть возможность оценить границы, в которых лежат значения  $\epsilon^*$ , тем более что в нашем случае как раз нужна оценка эффекта. Такую возможность дают формулы Хашина-Штрикмана [3], полученные на основе вариационных принципов.

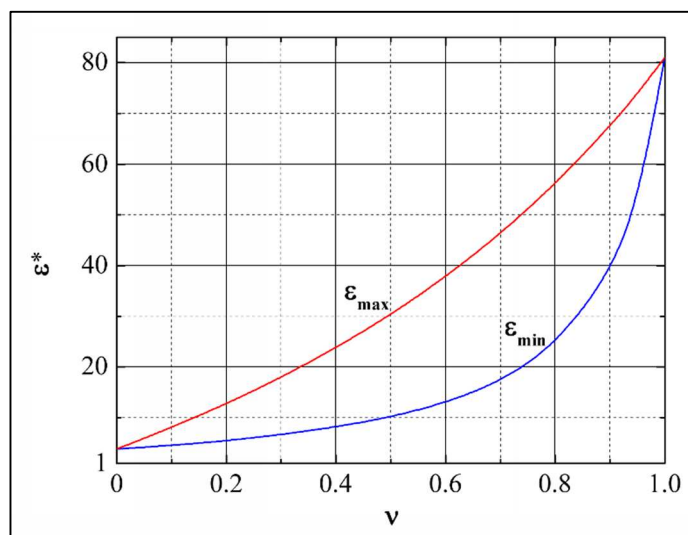


Рис. 3.

В нашем случае эта оценка даёт границы, показанные на рис. 3, для возможной пористости  $\text{SiO}_2$  вплоть до покрытия поверхности сплошной тонкой плёнкой воды. На рис. 3  $\epsilon^*$  – эффективная проницаемость смеси,  $\epsilon_{\min}$  – граница минимальных значений  $\epsilon^*$ ,  $\epsilon_{\max}$  – граница максимальных значений,  $\nu$  –

объёмная концентрация воды.

С помощью программы «ELCUT Профессиональный» были промоделированы поля, возникающие в зазоре ЭПСН при напряжении между анодом и катодом 10 В, для ряда глубин  $h$  увлажнения торца: 0, 0.5, 1, 3, 5 и 7 нм. Полученные картины электростатических полей представлены на рис. 4, 5. Для наглядности распределение напряжённости электрического поля показано в градациях цветов, где интенсивность поля соответствует плотности цветовой шкалы. (См. цветные иллюстрации на диске.) На картинах полей видно, что наибольшая напряжённость наблюдается вблизи острия катода, как и должно быть из общих соображений для проводящих поверхностей с большой кривизной. Но вблизи точки 2 (рис. 5) также наблюдается повышенная напряжённость поля и причиной этого, по-видимому, является присутствие слоя с более высокой диэлектрической проницаемостью над нижним слоем исходного диэлектрика. Рис. 6 показывает значительный рост поля около точки 2 в зависимости от параметров увлажнённого слоя, где  $E_{\text{tip}}$  – максимум поля на

острие при данных  $h$  и  $\varepsilon^*$ ,  $E_2$  – поле вблизи точки 2.

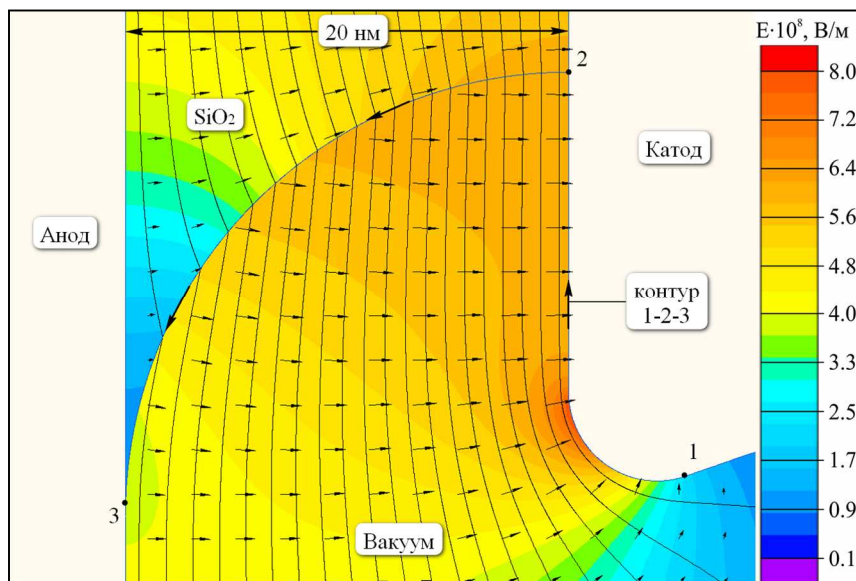


Рис. 4

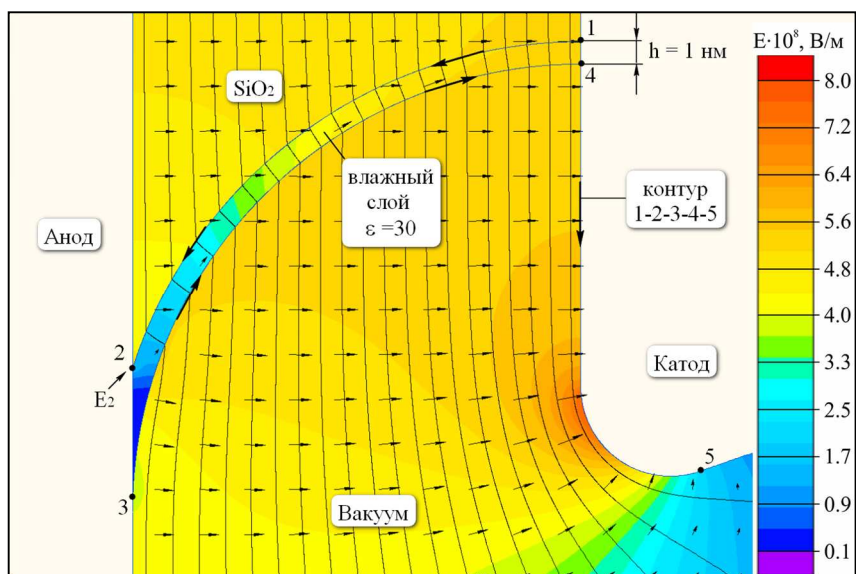


Рис. 5

Кроме того, происходит существенное перераспределение поля вдоль границы торца диэлектрического слоя. Для иллюстрации этого рассчитана девиация модуля трансверсальной составляющей поля на контуре, определяемом точками 2-3 (рис. 4), по формуле:

$$\Delta_h(L) = (E_h(L) - E_0(L))/E_0(L),$$

где  $E_0(L)$  – модуль напряжённости поля вдоль контура 2-3 при  $h = 0$  и  $\varepsilon = 3,8$ , то есть увлажнённый слой

отсутствует, а  $E_h(L)$  – поле при  $h \neq 0$  и  $\varepsilon^* = 30$ . Переменная  $L$ –длина, отсчитываемая вдоль контура от точки 1 к точке 3. Зависимость  $\Delta_h(L)$  для различных  $h$  представлена на рис. 7.

Отметим, что для выбранной формы сечения торца диэлектрика сильные экстремумы наблюдаются для толщин увлажнённого слоя лежащих вблизи  $h = 1$  нм, в отличие от двумерного случая [1], когда максимум девиации наблюдается вблизи  $h = 3$  нм. Значком ~ обозначена ситуация, когда весь диэлектрик имеет проницаемость  $\varepsilon^* = 30$ .

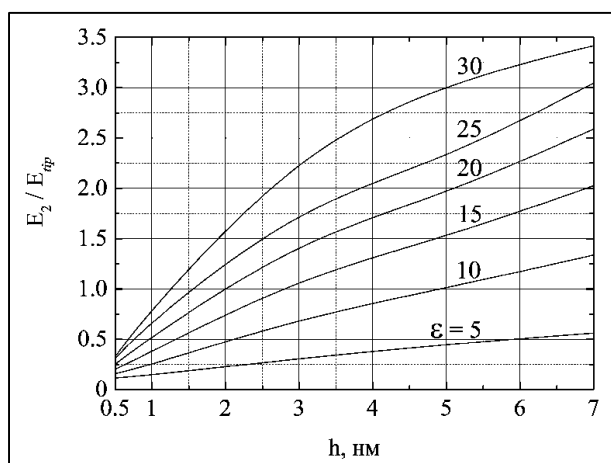


Рис. 6

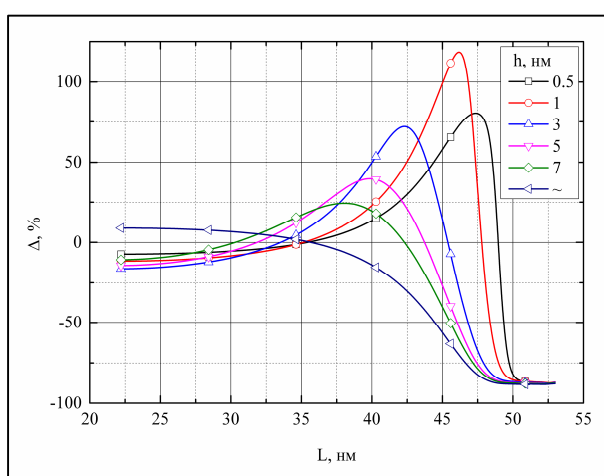
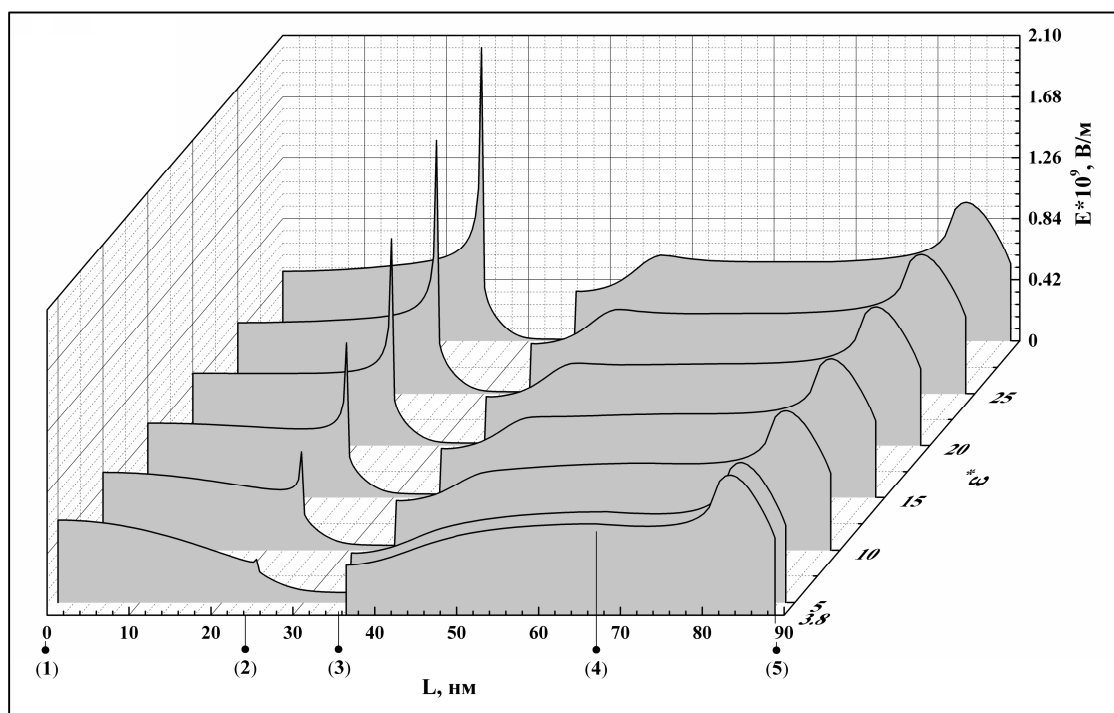


Рис. 7



Более наглядная картина перераспределения поля вдоль контура обхода 1-2-3-4-5 (рис. 5) и роста поля вблизи точки 2 в зависимости от  $\epsilon^*$  увлажнённого слоя толщиной 1 нм представлена на рис. 8. Базовые точки контура заключены в скобки, а все острые пики напряжённости поля соответствуют точке 2.

Следует отметить, что все рассмотренные оценки полей существенно зависят от величины эффективной диэлектрической проницаемости увлажнённого слоя, и поэтому при расчётах должны учитываться границы, в которых она может находиться. Учёт этого факта особенно важен для оценки полей в

Рис. 8

критических точках, таких как точка 2 (рис. 8). Из кривых рис. 9 видно, что отношение возможных значений полей может отличаться более чем в два раза для соответствующих границ эффективной проницаемости слоя.

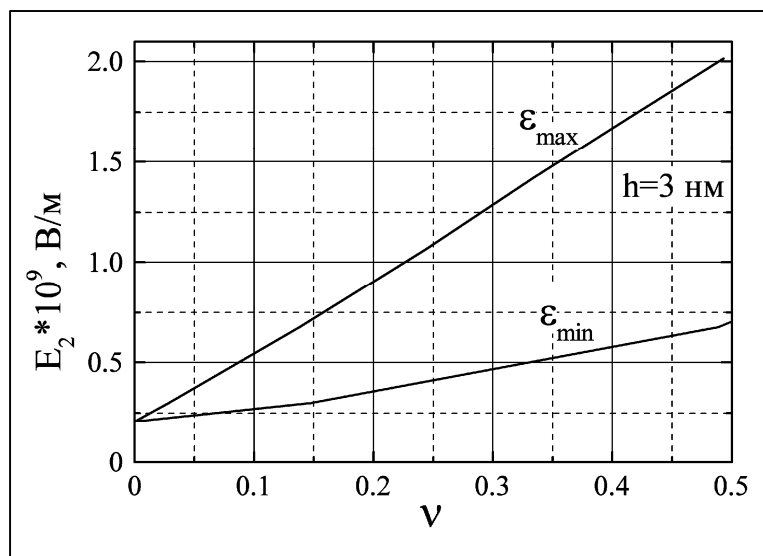


Рис. 9

В результате проведённого моделирования показано, что образование на торце диэлектрика увлажнённого слоя с повышенной диэлектрической проницаемостью приводит к перераспределению поля в изолирующем зазоре структуры ЭПСН. При этом

существенно изменяются условия электроформовки поверхности торца диэлектрика и кроме того образуются области с повышенной напряжённостью поля вблизи анода, что увеличивает вероятность пробойных явлений.

### Литература

V.L. Levin, V.M. Mordvintsev, S.E. Kudryavtsev, International Conference “Micro- and Nanoelectronics – 2012”, Abstracts, 2012, P2-21.

<http://elcut.ru>

Z. Hashin, S. Shtrikman, J. Appl. Phys., Vol. 33, p.3125, 1962.

### Об авторе

**Левин Валерий Львович**, Ярославский Филиал Института Физики и Технологии РАН, г. Ярославль, Россия