

Расчёт электрических полей в ультратонких диэлектриках с неоднородной границей в среде TCAD Sentaurus

Г.В. Перов, В.И. Сединин

Разработана графическая и технологическая модель перепрограммируемого элемента памяти управляющего устройства приёмника Глонасс-навигатора в среде TCAD Sentaurus. Выполнен расчёт распределения электрических полей в тонких диэлектриках на поверхности затвора с неоднородным горизонтальным и вертикальным профилем рельефа. Модель может быть использована для расчёта электронных и ионных токов проводимости ультратонких диэлектриков цифровых и аналоговых микросхем в зависимости от неоднородности границы и определения их контрольных пределов по отказам.

Ключевые слова: пакет САПР TCAD Sentaurus, диэлектрики на поверхности затворов элемента памяти управляющей матрицы кристалла, усиление электрического поля на неоднородностях затвора.

1. Введение

К изолирующим плёнкам в активных областях аналоговых и цифровых электронных компонентов микросхем, включая микроконтроллеры приёмного модуля ГЛОНАСС, предъявляются жёсткие требования по электрической проводимости (рис.1) [1]. Требования по обеспечению минимальных утечек при нормальной и повышенной температуре относятся прежде всего к диэлектрикам, изолирующим затворы из алюминия или поликремния от соседних элементов.

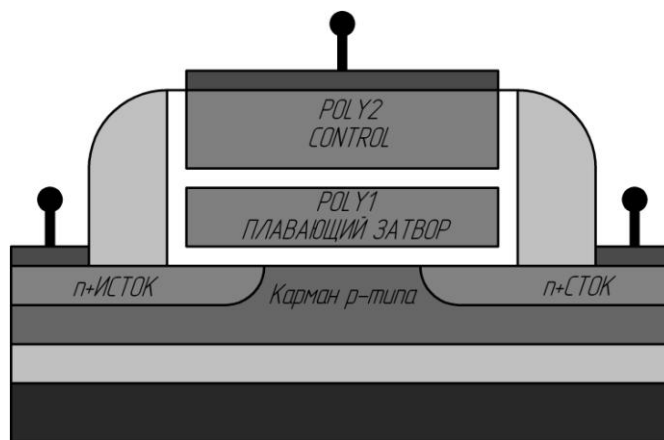


Рис.1. Схема базовой ячейки цифрового NAND-элемента памяти

При изготовлении современных микросхем с многослойной архитектурой компонентов и ультратонкими размерами компонентов 0.18-0.13 мкм возникает ряд проблем, связанных с неоднородностями рельефа.

Получение однородных тонких неорганических кремнийсодержащих изолирующих слоёв из нитрида кремния, диоксида кремния или силикатных стёкол, осаждённых из газовой фазы (ХОГФ) на рельефных поверхностях и заполнение ими узких зазоров отнесено к одной из важнейших задач при изготовлении микросхем с многоуровневой алюминиевой системой коммутации [2].

При низкотемпературном термическом окислении наблюдалось утонение диэлектрика и в предельном случае его разрыв в нижнем торце затворного блока из поликремния [3 – 6].

Острия на горизонтальной и вертикальной поверхности затворов изменяют карту распределения электрических полей в изолирующей плёнке, что приводит к увеличению её проводимости и отказу микросхемы.

В [7 – 9] разработаны математические модели расчёта коэффициента усиления электрического поля на остриях проводящей структуры заданной конфигурации в форме эллипсоида вращения или иглы. Однако полученные в этих работах результаты академичны и оторваны от технологических особенностей изготовления активного элемента микросхемы. Модели позволяют рассчитать изменения коэффициентов усиления электрического поля в локальных областях инжектирующей поверхности.

Таким образом, задача построения рабочей модели расчёта аналоговых и цифровых элементов кремниевых матриц, учитывающей неоднородности рельефа диэлектрических плёнок в микросхеме, является актуальной.

Целью настоящей работы является разработка универсальной технологической и графической рабочей модели расчёта карты распределения электрических полей ультратонких (менее 50 нм) изолирующих плёнок на неоднородных поверхностях в активных областях на примере ФЛЭШ-элемента памяти (ЭП).

2. Моделирование технологии ФЛЭШ-элемента памяти в среде TCAD Sentaurus

В качестве инструмента выбран современный программный продукт моделирования технологии электронных компонентов СБИС – TCAD Sentaurus. Он позволяет наиболее полно учесть технологические особенности построения элемента, физические процессы роста плёнок, расчёта их электрических свойств. Технологическая модель строилась по установленному алгоритму [10] (рис.2):

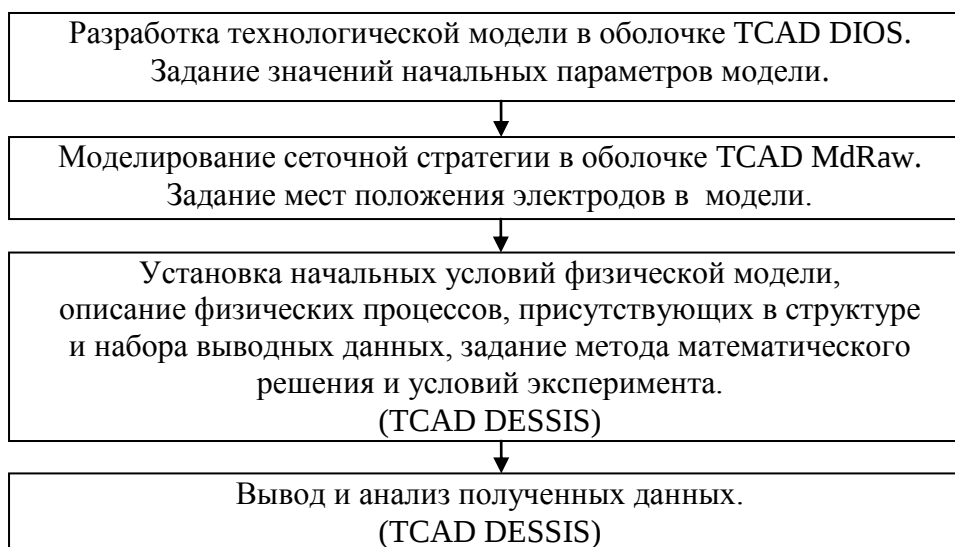


Рис.2. Алгоритм действий разработчика функциональных компонентов микросхем в среде TCAD Sentaurus

Параметры технологической модели ЭП стандартного формата введены в подпрограмме DIOS пакета:

- толщина приповерхностной области подложки, в которой происходят электрические процессы – 10 мкм;
- концентрация примесей в подложке – 10^{15} см^{-3} , истоке, стоке транзистора – 10^{20} см^{-3} ;
- толщины диэлектриков на кремнии 10 – 50 нм, на поликремнии – 10 – 50 нм.
- толщина поликремниевого плавающего затвора – 500 нм;
- концентрация примеси фосфора в поликремниевом затворе – 10^{20} см^{-3} .

Неоднородность поверхности поликремниевого затвора моделировалась дополнительной фотолитографией по слою и его травлением с заданным соотношением глубины и ширины неоднородности.

Рельеф неоднородности горизонтальной поверхности затвора ЭП формировался в треугольной или эллипсоидной конфигурации (рис.3).

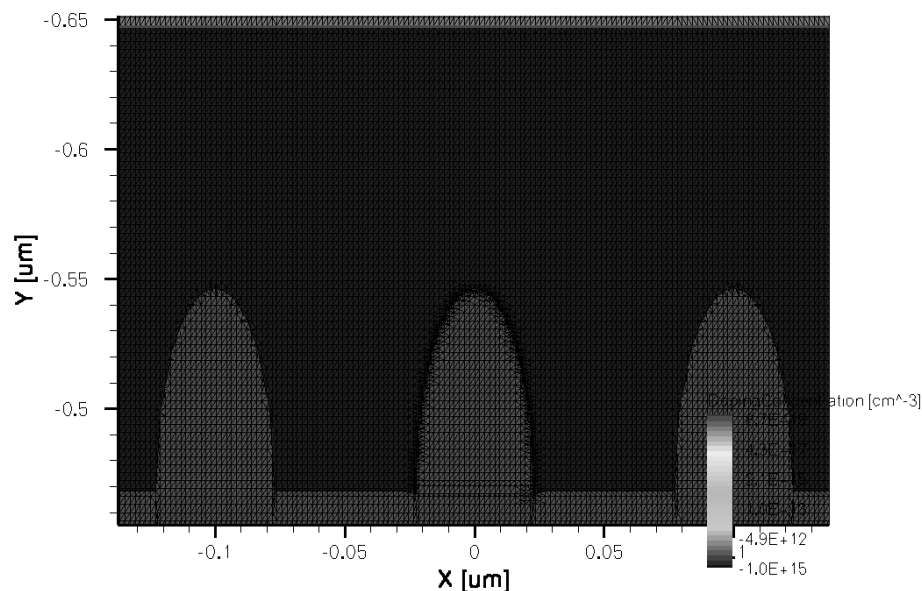


Рис. 3. Построение неоднородностей рельефа затвора эллипсоидной формы в технологическом редакторе TCAD Sentaurus

3. Моделирование сеточной стратегии при построении графической структуры ЭП с учётом неоднородности рельефа затвора

Сеточная стратегия при построении графической структуры ЭП моделировалась с помощью подпрограммы MdRaw пакета TCAD. Графическая сетка ФЛЭШ ЭП составлена из расчёта уплотнения в областях (рис. 4):

- граней плавающего затвора из поликристаллического кремния;
- неоднородностей горизонтальной поверхности затвора;
- повышенной концентрации примеси вблизи границ истока – стока.

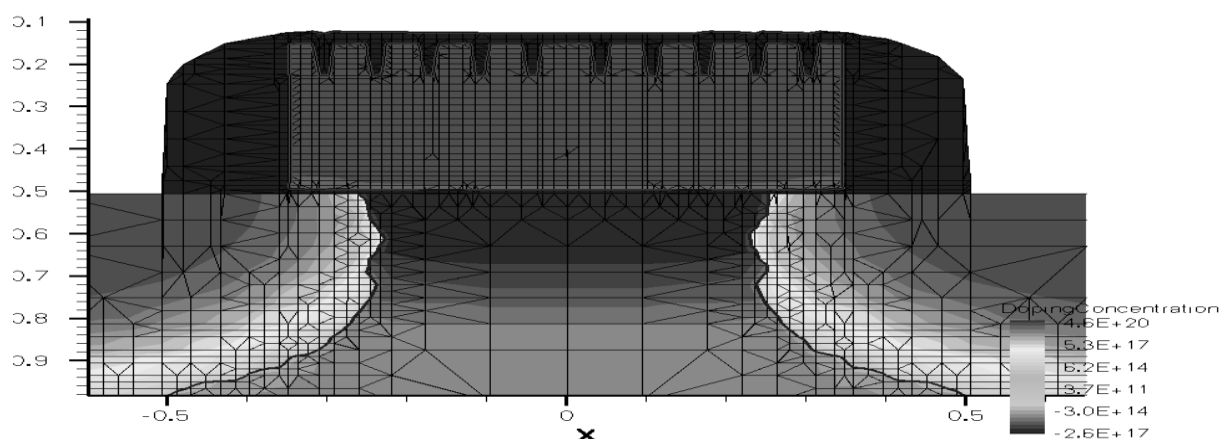


Рис. 4. Поперечное сечение ЭП с неоднородной горизонтальной поверхностью плавающего затвора

4. Моделирование электронных процессов в многослойной структуре ЭП с использованием программы DESSIS

Моделирование электронных процессов в областях межзатворного диэлектрика плавающего и управляющего затворов ЭП проводилось в формате стандартной структурной схемы пакета DESSIS (рис. 5).

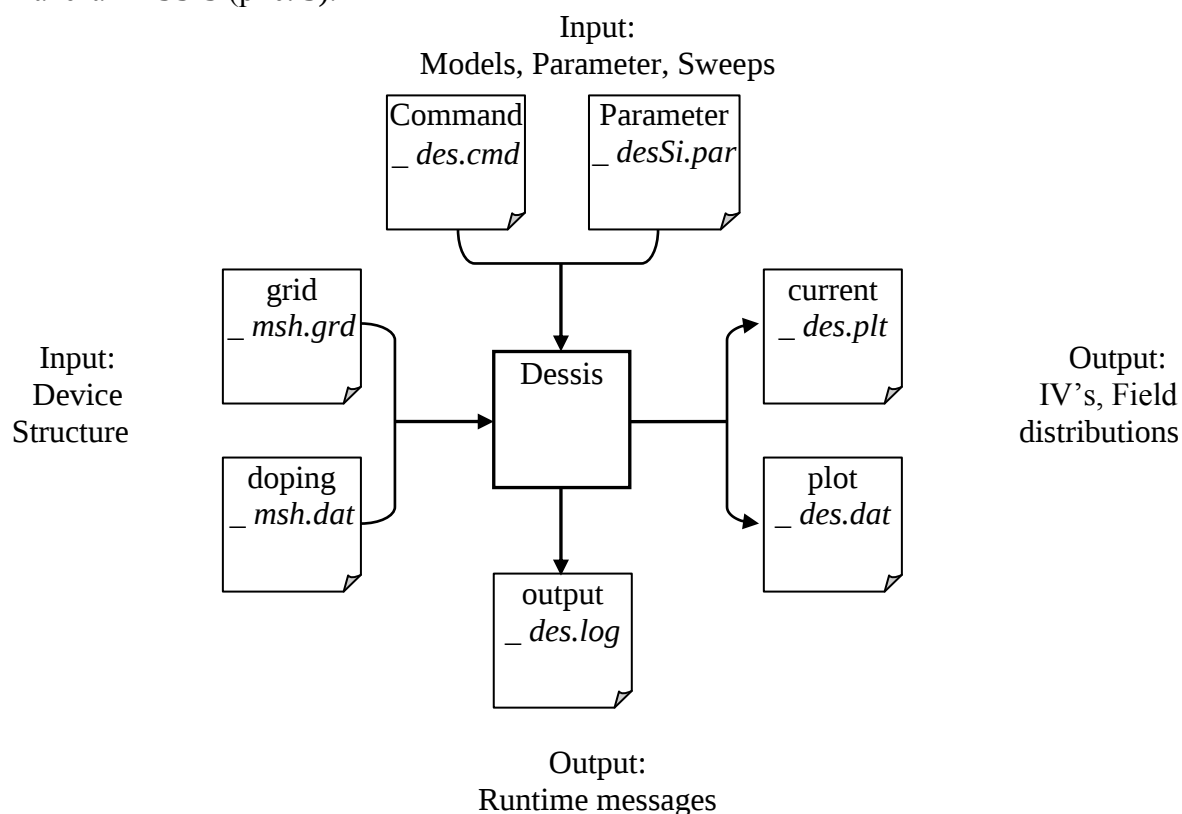


Рис. 5. Структурная схема взаимодействия файлов при исполнении DESSIS

Структура прибора задана во входном файле (grid), массивы исходных данных для неё в файле (doping).

Файл grid содержит информацию о геометрии прибора, об основных точках: «узлах» («nodes») или «вершинах» («vertices») сетки. Расширение файла по умолчанию – grd.

Файл doping содержит информацию о профилях распределения примеси. Расширение по умолчанию такого файла – dat. Файлы doping генерированы с использованием программы

MESH (MdRaw, SDE, Devise). В процессе расчёта DESSIS сгенерированы несколько файлов. Файл current состоит из электрических выходных данных токов, напряжений, зарядов, связанных с каждым из контактов. Окончательное пространственное решение для всех переменных в структуре распределения электронов, дырок и потенциалов в последней точке изменения напряжения на электродах реализовано в файле plot. Вся текстовая информация сформирована в выходном файле output, сохраняемом DESSIS во время расчёта, включая имена физических моделей, используемых при расчёте, значения параметров, и т.д., а также сведения о сходимости вычислений. Граничные и начальные условия для электрических контактов прибора заданы в разделе Electrode программы.

5. Расчёт карты распределения электрических полей в диэлектриках с неоднородным рельефом поверхности затвора ФЛЭШ ЭП в среде TCAD Sentaurus

Проведены 2D и 3D расчёты электрических полей в диэлектрической плёнке вблизи неоднородностей горизонтальной поверхности затвора структуры ФЛЭШ ЭП в среде TCAD Sentaurus для различных конфигураций границы межуровневого диэлектрика (рис. 6, 7).

Коэффициент усиления электрического поля на острие неоднородности рассчитывался из соотношения

$$\beta = \frac{E}{E_{flat}}, \quad (1)$$

где E – напряжённость электрического поля на вершине неоднородности.

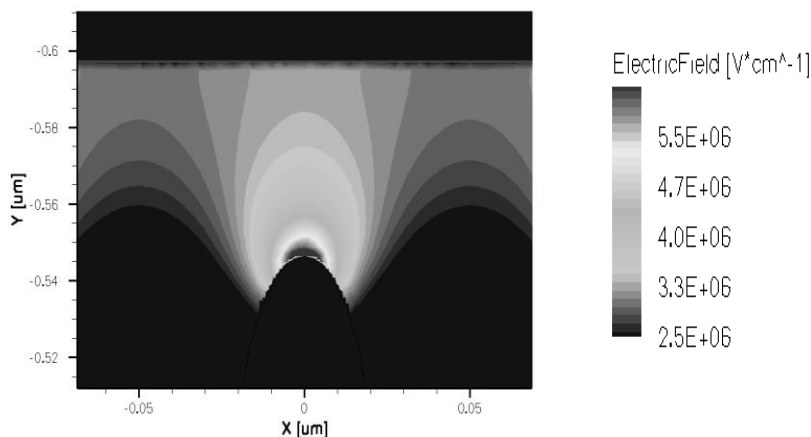


Рис.6. 2D карта распределения электрического поля в диэлектрике на затворе для конфигурации неоднородности поверхности эллиптической формы

Результаты расчёта показывают, что электрическое поле на остриях неоднородностей затвора увеличивается в 1.5 – 10 раз в зависимости от неоднородности рельефа, толщины диэлектрической плёнки на горизонтальной и вертикальной поверхностях затвора.

Таким образом, установлена работоспособность модели расчёта электрических полей ФЛЭШ ЭП, реализованной в формате TCAD Sentaurus для оценки технологии формирования материала и рисунка затвора, его изоляции. Например, можно подбирать технологические способы травления материала затвора по вертикальной плоскости, технологические параметры осаждения материала затвора и его изоляции для обеспечения заданного уровня электрического поля на границе раздела.

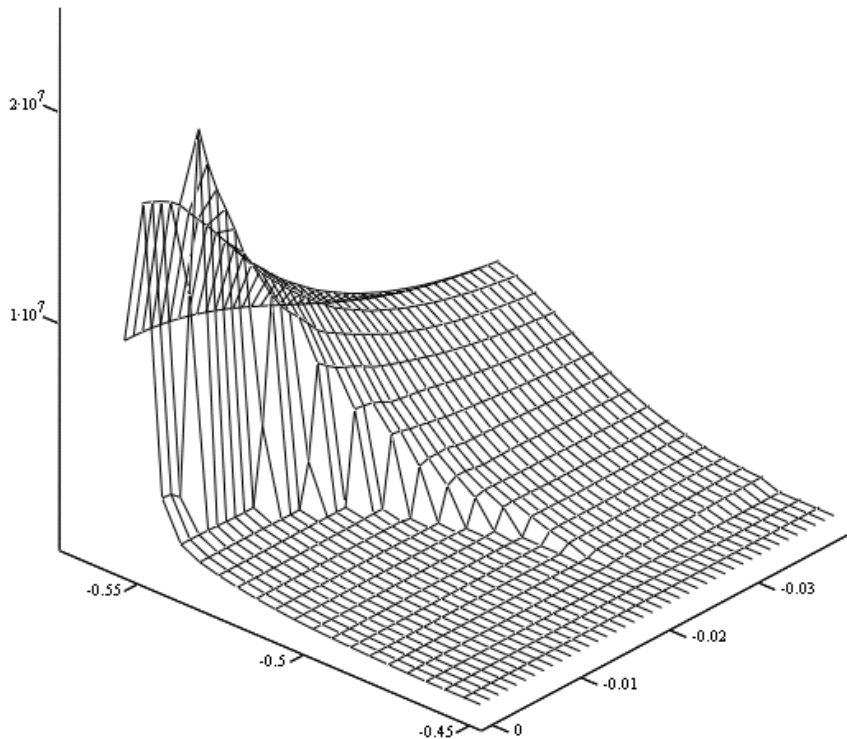


Рис. 7. 3D карта распределения электрического поля $E(x,y)$ вокруг неоднородности для межэлектродного расстояния 10 нм

6. Возможности развития модели

Разработанная модель в настоящее время расширяется в направлении расчёта токов проводимости диэлектриков в структурах со сложной архитектурой компонентов.

Проводимость слоя изолятора в идеальной МДП-структуре предполагается равной нулю. Реальные диэлектрики обладают проводимостью, особенно заметной при повышенных температурах и электрических полях. По закону сохранения электрической индукции, поле в диэлектрике E_i и электрическое поле E_s в полупроводнике на границе с диэлектриком связаны соотношением

$$E_i = E_s * \left(\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_i} \right), \quad (2)$$

где ε_s и ε_i – соответствующие диэлектрические проницаемости.

Расчёт проводится для технологической системы Si – SiO₂ с целью установления цифровых критериев по проводимости диэлектрика для выбора технологических режимов формирования блока.

В системе Si – SiO₂, когда поле в кремнии достигает характерной для лавинного пробоя величины $3 \cdot 10^5 \text{ В·см}^{-1}$, соответствующее поле в окисле примерно в три раза больше ($=10^6 \text{ В·см}^{-1}$), поскольку $\frac{\varepsilon_{\text{Si}}}{\varepsilon_{\text{SiO}_2}} = 11.7/3.9$.

В ультратонких слоях SiO₂, а также при очень больших электрических полях электронную проводимость определяют «эффекты тунелирования» Фаулера – Нордгейма [11]:

$$J \approx E_{\text{f}}^2 \exp\left[-\frac{4\sqrt{2m^*}(q\Phi_{\text{B}})^{3/2}}{3q\hbar E_{\text{f}}}\right], \quad (3)$$

где m^* – эффективная масса электронов в запрещённой зоне SiO_2 , q , m – заряд и масса свободного электрона, $\hbar$ – постоянная Планка, Φ_b – высота барьера на границе подложки или плёнки с диэлектриком.

7. Заключение

Разработана универсальная технологическая и графическая модель расчёта карты распределения электрических полей для неоднородной горизонтальной и вертикальной структуры затвора активного компонента кремниевой матрицы в среде TCAD Sentaurus. Модель может быть использована для расчёта электронных и ионных токов проводимости ультратонких диэлектриков с учётом неоднородности поверхности, технологии изготовления блока, выбора технологических условий формирования материалов диэлектрика, рисунка затвора.

Литература

1. Шурыгина В. Микросхемы энергонезависимой памяти. Электроника: Наука, Технология, Бизнес 2008, №3, стр.84-88.
2. Васильев В.Ю. Применение методов химического осаждения тонких слоёв из газовой фазы для микросхем с технологическими нормами 0.35 – 0.18 мкм. Часть 1. Основные тенденции развития методов. Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы, 2010 г.
3. Marcus R. B. and Sheng T. T. The oxidation of shaped silicon surfaces// J. Electrochem. Soc.1982, Vol.129. N.6. P. 1278-1282.
4. Yoshikawa K., Nagakubo Y., Kanzaki K., Two Dimensional Effect in Suppression of Thermal Oxidation Rate// Extended Abstracts of the (1984 International) Conference on Solid State Devices and Materials, Kobe, 1984, p.475-478.
5. Sunami H., Koyanagi M, Hashimoto N. Intermediate oxide formation in double-polysilicon gate MOS structure// J. Electrochem. Soc.1980, Vol.127. N.11. P. 2499-2505.
6. Brown D.K. Hu S.M., Morrissey J.M. Flaws in sidewall oxides grown on polysilicon gate.- J. Electrochem. Soc.1982, Vol.129. N.5. P. 1084-1089.
7. М.Б. Белоненко, Н.Г. Лебедев, Е.В. Сочнева// Диссипативные солитоны в углеродных нанотрубках, Физика твёрдого тела, 2011, том 53, вып. 1, стр. 184-188.
8. Anderson R.M., Kerr D.R. Evidence for surface asperity mechanism of conductivity in oxide grown on polycrystalline // J. of Appl. Phys. – 1975. – v.53, №9, p.4834-4836.
9. Heiman P.A., Murarka S.P., Sheng T.T. Electrical conduction and breakdown on oxide of polycrystalline silicon and their correlation with interface texture// J. of Appl. Phys. – 1982. – v.53, №9, p.6240-6246.
10. Sentaurus Process User Guid. C-2009.06 pp.508-512.
11. Зи С.М. Физика полупроводниковых приборов. Часть 2. М.: Энергия, 1986 г., стр.423-426.

Статья поступила в редакцию 08.09.2011

Перов Геннадий Васильевич

к.т.н., доцент кафедры САПР СибГУТИ

e-mail: mef@ngs.ru, тел. 8960-788-42-22

Сединин Валерий Иванович

д.т.н., профессор, заведующий кафедрой САПР СибГУТИ

e-mail: sedvi@bk.ru, тел. 8913-917-12-33

Calculation of Electric Fields in Ultra-Thin Dielectrics with Heterogeneous Border in Sentaaurus TCAD Environment**G. V. Perov, V. I. Sedinin**

We develop a graphical and technological model of reprogrammable memory element of the actuation device for Glonass navigator receiver in Sentaaurus TCAD environment. The calculation of distribution of electric fields in thin dielectrics on a surface of a shutter with a non-uniform horizontal and vertical profile of relief is provided. The model can be used for calculation of electronic and ionic conductivity currents in a dielectric on a shutter depending on heterogeneity of border, and for determining of their fault limits.

Keywords: Sentaaurus TCAD package, dielectrics on a shutter of memory element, electric field on heterogeneous borders.