

Исследование характеристик МДП-транзисторов с использованием одномерной модели

Т.Ю. Крупкина, А.Ю. Красюков, Е.А. Артамонова

Национальный исследовательский университет «МИЭТ», a_kras@org.miet.ru

Аннотация — В результате работы была создана численная одномерная модель-программа для расчета электрических характеристик МДП-транзисторов, позволяющая наглядно отобразить процессы внутри прибора. Модель построена на основе численного решения одномерного уравнения Пуассона в многослойной МДП-структуре. Рассмотрены примеры, иллюстрирующие возможности модели по расчету параметров МДП-транзисторов.

Ключевые слова — МДП-структура, численное моделирование.

I. ВВЕДЕНИЕ

Основой элементной базы современных цифровых интегральных схем являются транзисторы со структурой металл–диэлектрик–полупроводник (МДП-транзисторы). Длина канала таких приборов составляет менее 100 нм. Для совершенствования конструкции МДП-транзисторов требуется четкое понимание процессов, происходящих в приборе. Имеющиеся аналитические модели применимы для описания работы транзистора как элемента схемы и не позволяют анализировать процессы внутри отдельного полупроводникового прибора.

При разработке и оптимизации конструкции и технологии изготовления элементов интегральных схем, как правило, используются средства приборно-технологического моделирования (TCAD). TCAD является универсальной средой с широкими возможностями по моделированию различных полупроводниковых приборов сложной формы [1]. Однако такая универсальность несколько затрудняет изучение системы TCAD, а также неудобна для иллюстрации физики работы простых полупроводниковых приборов, например процессов, происходящих в МДП-структурах с произвольным распределением примеси в подложке.

На начальном этапе исследования характеристик МДП-транзисторов, а также при изучении физики работы полупроводниковых приборов требуется простая численная модель-программа, позволяющая рассчитывать электрические характеристики МДП-транзисторов и отображать основные распределения в МДП-структуре.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью работы является разработка численной модели для исследования электрических характеристик МДП-транзисторов, позволяющей наглядно отобразить процессы внутри прибора.

III. ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Одномерная модель МДП-структуры задается как распределение концентрации активной примеси $N(x)=N_d-N_a$ в узлах конечно-разностной сетки с учетом материалов структуры.

В диэлектрических областях $N(x)=0$. В кремнии задается равномерное либо неравномерное распределение примеси с использованием одного постоянного профиля и нескольких аналитических распределений в виде:

$$N(x)=N_1(x)+N_2(x)+N_3(x)+N_{\text{const}}$$

где $N_1(x)$, $N_2(x)$, $N_3(x)$ описываются аналитическими выражениями (аналитическое распределение), а N_{const} – постоянная величина (постоянный профиль).

Зависимости $N_1(x)$, $N_2(x)$ и $N_3(x)$ задаются в виде распределения Гаусса (рис. 1):

$$N_1 = N_{1\text{max}} \exp\left(-\left(\frac{x-x_{1\text{max}}}{L_1}\right)^2\right)$$

$$L_1 = \frac{X_{1\text{min}}}{\sqrt{\ln\left(\frac{N_{1\text{max}}}{N_{1\text{min}}}\right)}}$$

Пример модели МДП-структуры с n+-Si*-затвором, подзатворным диэлектриком SiO₂ и p-подложкой показан на рис. 2.

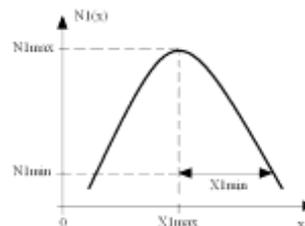


Рис. 1. Параметры распределения примеси $N_1(x)$

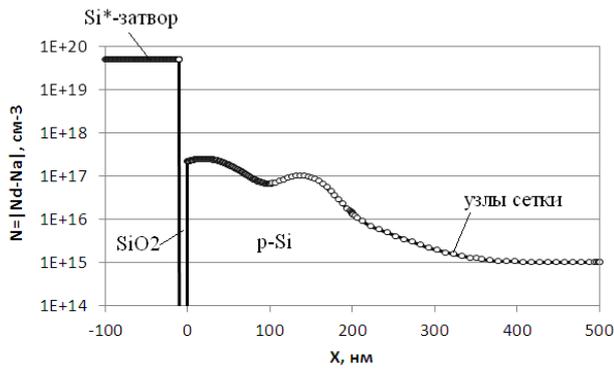


Рис. 2. Модель МДП-структуры с Si*-затвором и р-подложкой

Рассмотрим уравнения и модели, используемые при расчете параметров МДП-структуры при заданном распределении примеси и толщинах областей. Если предположить, что ток в МДП-структуре отсутствует, то для описания процессов перераспределения заряда достаточно решить одно уравнение Пуассона. В подложке (Si) уравнение Пуассона имеет следующий вид:

$$\frac{d^2 \varphi}{dx^2} = \frac{e}{\varepsilon \cdot \varepsilon_0} \left(n_i \cdot \exp\left(\frac{\varphi - \varphi_n}{\varphi_t}\right) - n_i \cdot \exp\left(\frac{\varphi_p - \varphi}{\varphi_t}\right) - N(x) \right).$$

Квазиуровни Ферми для электронов и дырок равны, то есть $\varphi_n = \varphi_p$. В подзатворном диэлектрике решается уравнение Лапласа:

$$\frac{d^2 \varphi}{dx^2} = 0.$$

Дифференциальные уравнения дополняются граничными условиями. На границе затвор-диэлектрик потенциал задается исходя из материала затвора и напряжения затвор-подложка. На границе раздела подзатворный диэлектрик-подложка задаются следующие граничные условия:

$$\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_d \cdot E_d - \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_s \cdot E_s = e \cdot N_{ss}.$$

Относительные диэлектрические проницаемости всех доступных материалов (ε_d , ε_s), а также эффективный заряд границы раздела N_{ss} , задаются перед проведением расчета.

Для окончательной формулировки задачи нужно задать модель эффективной собственной концентрации носителей в кремнии $n_i(T, N)$ [2].

В результате численного решения уравнений Пуассона и Лапласа рассчитывается распределение потенциала $\varphi(x)$ в МДП-структуре, на основе которого рассчитываются распределения, показанные на рис. 3-6:

- концентраций электронов и дырок $n(x)$, $p(x)$;
- границ зон $E_c(x)$, $E_v(x)$;
- электрического поля $|E(x)|$.

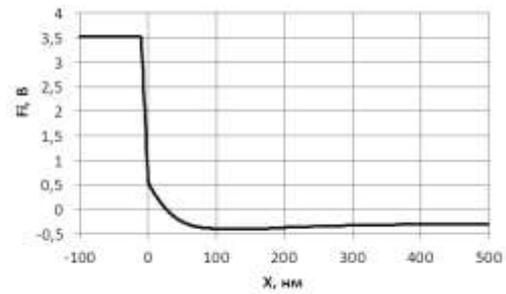


Рис. 3. Распределение потенциала в МДП-структуре при $U_{зп} = 3В$

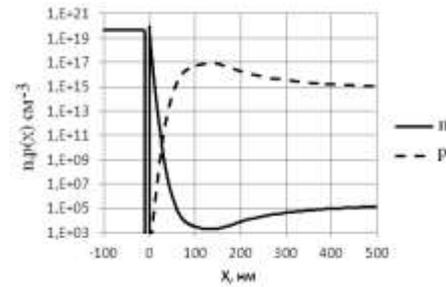


Рис. 4. Распределение концентраций электронов и дырок в МДП-структуре при $U_{зп} = 3В$

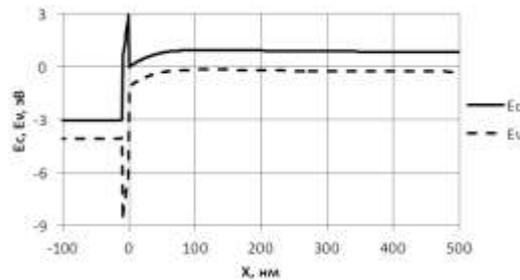


Рис. 5. Зонная диаграмма МДП-структуры при $U_{зп} = 3В$

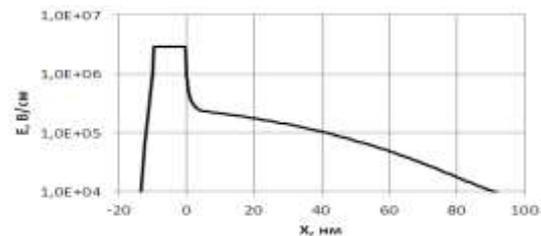


Рис. 6. Распределение поля в МДП-структуре при $U_{зп} = 3В$

На основе распределений электронов и дырок рассчитывается плотность инверсного заряда Q в подложке или затворе, а также плотность объемного заряда $Q_{опз}$ в подложке МДП-структуры. Также определяется поверхностный потенциал подложки $F_{is} = \varphi(x=0) - \varphi(X=500\text{nm})$ и концентрации носителей на поверхности подложки $n(X=0)$, $p(X=0)$. Все эти величины рассчитываются при разных напряжениях на МДП-структуре ($V_{зп}$ или $V_{зп}$).

Продифференцировав зависимость $Q_{опз}(V_{зп})$ по напряжению $V_{зп}$, получим зависимость удельной емкости затвора МДП-транзистора от напряжения затвор-подложка $C_{зп}(V_{зп})$. На рис. 7-9 показаны все описанные зависимости.

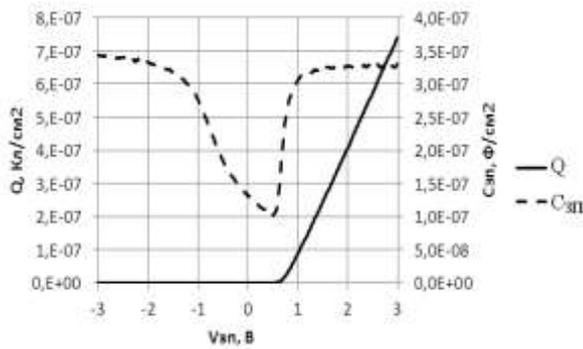


Рис. 7. Зависимости плотности инверсного заряда и удельной емкости МДП-структуры от напряжения затвор-подложка

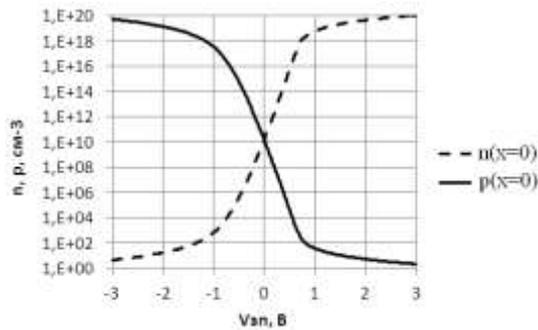


Рис. 8. Зависимости концентрации носителей на поверхности подложки МДП-структуры от напряжения затвор-подложка

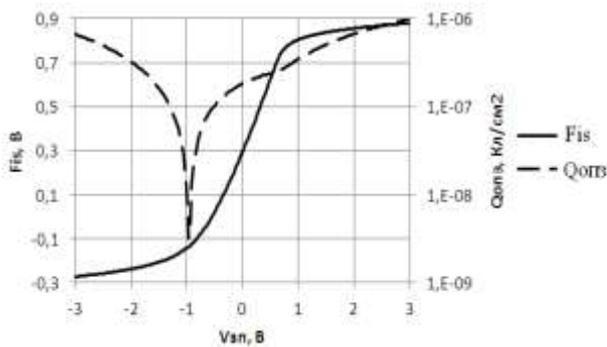


Рис. 9. Зависимости поверхностного потенциала и плотности объемного заряда МДП-структуры от напряжения затвор-подложка

Полученные зависимости (рис. 7-9) позволяют оценить возможности разработанной программы по оценке режимов работы и электрических параметров МДП-структуры:

- из рис. 8-9 можно определить режим работы МДП-структуры (обогащение, обеднение, слабая инверсия, сильная инверсия) при разном напряжении затвор-подложка;
- зависимость плотности инверсного заряда от напряжения затвор-подложка $Q(V_{зп})$ (рис. 7) позволяет оценить пороговое напряжение МДП-структуры при заданном распределении примеси в подложке и затворе. Вид зависимости $Q(V_{зп})$ для

МДП-структуры аналогичен виду проходной ВАХ длинноканального МДП-транзистора $I_c(V_{зп})$ при низком напряжении сток-исток. Таким образом, результаты одномерного моделирования МДП-структуры позволяют оценить пороговое напряжение МДП-транзистора;

- зависимость удельной емкости затвор-подложка позволяет оценить емкость МДП-транзистора без учета емкостей перекрытия затвор-исток и затвор-сток.

Одномерный характер модели не позволяет оценить влияние эффекта короткого канала на электрические характеристики МДП-транзистора. Также в расчете пока не учитывается такой важный эффект, как квантование носителей в канале МДП-транзистора, характерный для наноразмерных приборов с тонким подзатворным диэлектриком и высокой концентрацией примеси в подложке. Для планарных МДП-транзисторов данный эффект является чисто одномерным и, как раз, может быть описан одномерной моделью.

В то же время одномерная модель, реализованная в виде Excel-файла, позволяет быстро оценить влияние конструктивно-технологических параметров МДП-транзистора (распределение примеси в затворе и подложке, толщина и диэлектрическая проницаемость подзатворного диэлектрика, работа выхода из металла затвора) на пороговое напряжение и емкость прибора. Для МДП-структур с Si^* -затвором, расчет учитывает влияние эффекта зарядового обеднения затвора на пороговое напряжение и емкость структуры.

IV. ПРИМЕР ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МОДЕЛИ

Рассмотрим возможности разработанной модели по расчету характеристик наноразмерных МОП-транзисторов. Транзистор имеет следующие конструктивные параметры:

- Длина канала, $L=90$ нм.
- Затвор $n+-Si^*$, $N=10^{20}$ см⁻³.
- Подзатворный диэлектрик – SiO_2 , толщина $d=2$ нм.
- Постоянная концентрация примеси в p-подложке, $N_{п}=5 \cdot 10^{17}$ см⁻³.

Подлегирирование канала выполнено в виде распределения Гаусса и имеет следующие параметры: $N_{max}=7 \cdot 10^{17}$ см⁻³; $X_{max}=0$; $N_{min}=N_{п}$, $X_{min}=26$ нм.

Двухмерная модель n-канального МОП-транзистора, созданная средствами TCAD, показана на рис. 10. Одномерная модель МДП-структуры показана на рис. 11.

На рис. 12-13 показаны результаты расчета проходных и CV-характеристик наноразмерного n-МОП-транзистора с $n+-Si^*$ -затвором.

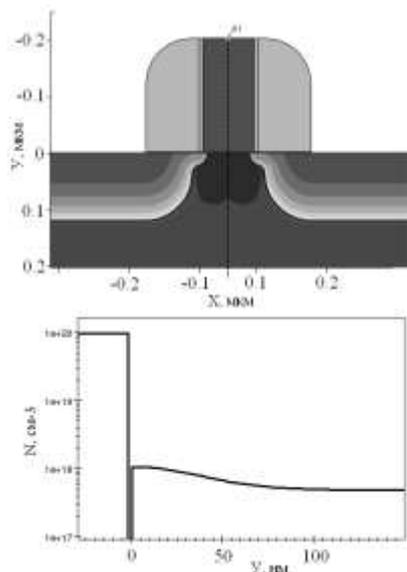


Рис. 10. Модель наноразмерного n-MOS транзистора с p+-Si*- затвором для сравнительных расчетов в TCAD

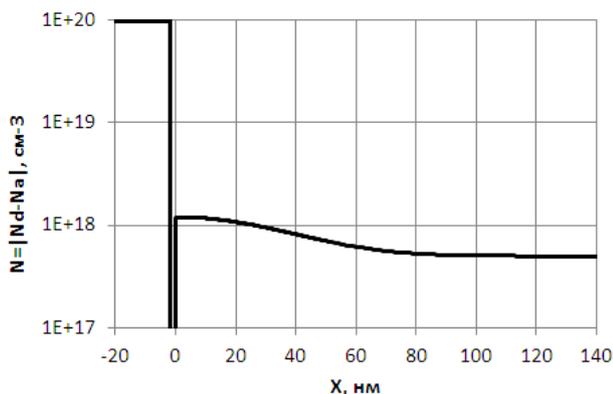


Рис. 11. Распределение примеси в одномерной модели МДП-структуры с p+-Si*- затвором

Сравнение расчетов показало что:

представление МОП-транзистора с длиной канала 90 нм в виде одномерного распределения примеси в вертикальном сечении затвора (1D-модель) позволяет оценить пороговое напряжение прибора при низком напряжении $U_{си}$;

1D-модель позволяет оценить емкость затвора наноразмерного транзистора без учета емкостей перекрытия затвор-исток и затвор-сток.

Основными достоинствами использования программы-модели для оценочных расчетов параметров МДП-транзисторов по сравнению с мощными и универсальными средствами TCAD являются:

- малое время расчета (в пределах минуты); малый размер программы-модели (Excel-файл, 250Кб);

- простота использования и отображения результатов (стандартные средства создания точечной диаграммы в MS Excel).

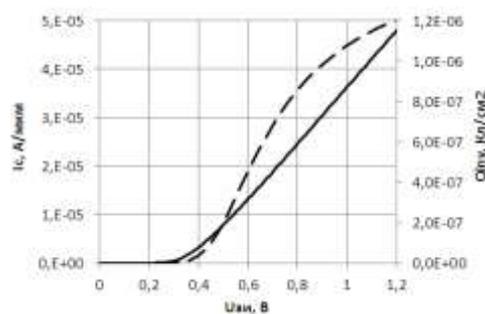


Рис. 12. Проходные характеристики p-MOS-транзистора с p+-Si*-затвором и с длиной канала $L=90$ нм при $U_{си}=0.05$ В. (пунктир – TCAD, сплошная – модель)

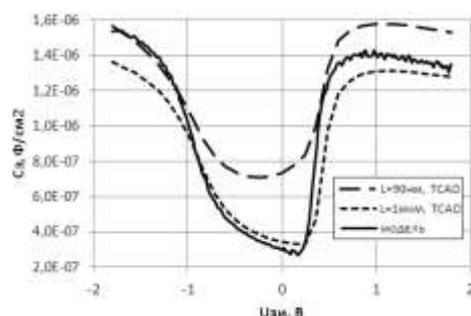


Рис. 13. CV характеристики p-MOS-транзистора с p+-Si*-затвором и различной длиной канала

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате работы была разработана одномерная численная модель-программа для расчета электрических характеристик МДП-транзисторов, позволяющая наглядно отобразить процессы внутри прибора. Рассмотрены примеры, наглядно иллюстрирующие возможности модели по расчету и исследованию характеристик МДП-структуры и МДП-транзистора.

ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации по поддержке молодых кандидатов наук МК-6820.2013.9.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Wettstein A., Schenk A., Fichtner W. Quantum device-simulation with the density-gradient model on unstructured grids // IEEE Transactions On Electron Devices. 2001. № 2. P. 279-284.
- [2] D.B.M. Klaassen, J.W. Slotboom, H.C. de Graaff. Unified Apparent Bandgap Narrowing in n- and p-Type Silicon // Solid-State Electronics. 2001. № 2. P. 125-129.