

Настройка численной модели для исследования транзисторных МОП-структур КНИ-типа с проектными нормами 180 нм в среде TCAD

Е.А. Артамонова¹, А.С. Ключников², А.Ю. Красюков¹, Т.Ю. Крупкина¹, Н.А. Шелепин²

¹Национальный исследовательский университет «МИЭТ», krupkina@dsd.miee.ru

²ОАО «НИИМЭ и Микрон»

Аннотация — Работа посвящена настройке численной модели для исследования МОП-транзисторов с проектными нормами 180 нм, реализованных на подложке кремний-на-изоляторе (КНИ). Выбор параметров модели осуществлялся на основе сравнения расчетных и экспериментальных вольт-фарадных характеристик (ВФХ) и вольт-амперных характеристик (ВАХ) транзисторов.

Ключевые слова — МДП-структура, численное моделирование, кремний-на-изоляторе (КНИ), TCAD.

I. ВВЕДЕНИЕ

В современной полупроводниковой электронике одну из самых передовых и технологичных ниш занимают наноразмерные МОП-транзисторы со структурой кремний-на-изоляторе (КНИ). Благодаря своей экономичности, высокой степени интеграции, дешевизне, а также из-за слабого влияния на характеристики транзисторов короткоканальных эффектов этот тип транзисторов выбирают ведущие мировые производители процессоров, такие как Intel и AMD.

Возможности TCAD, основанные на совокупности физических моделей, алгоритмов построения сетки и численных методов, позволяют успешно переходить к каждому новому поколению КМОП-технологий, обеспечивают значительное сокращение количества итераций в процессе разработки и ускорение запуска изделий в производство. Использование программных средств приборно-технологического моделирования позволяет оперативно осуществлять разработку и адаптацию новых технологий, минимизируя затраты на проведение опытных партий.

Однако методология применения программных комплексов для численного моделирования полупроводниковых приборов, позволяющая рассчитывать электрические и технологические параметры транзисторов данного класса, требует настройки параметров моделей под экспериментальные данные для каждого конкретного технологического маршрута.

В работе представлены результаты численного моделирования КНИ МОП-транзисторов с проектными нормами 180 нм методами приборно-технологического моделирования с помощью САПР Sentaurus TCAD [1], а также результаты настройки параметров численной модели на основе экспериментальных данных.

II. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КНИ МОП-ТРАНЗИСТОРА

Двумерная структура исследуемого КНИ МОП-транзистора с длиной канала 180 нм, полученная в результате технологического моделирования, показана на рис. 1. На рис. 2 приведено одномерное распределение примеси в канале при разных дозах легирования подложки.

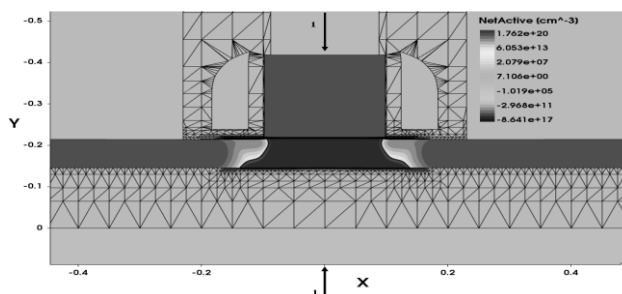


Рис. 1. Двумерная модель КНИ МОП-транзистора

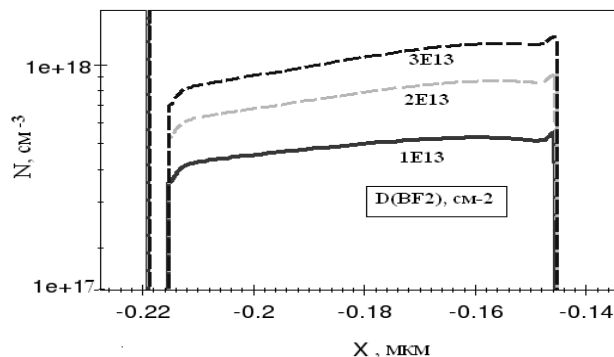


Рис. 2. Распределение активной примеси в сечении затвора (сечение 1 на рис. 1) при разных дозах легирования кармана

Конструктивно-технологические параметры структуры определяют тип сформированного МДП-транзистора как элемента, работающего с частичным обеднением подложки, роль которой в данном случае выполняет пленка кремния толщиной 70 нм.

Отсутствие эффектов «плавающей» подложки и воспроизводимость характеристик транзисторов с частичным обеднением подложки обеспечивается за счет формирования контакта к «плавающему» объему подзатворной области. Фиксирование потенциала на этом контакте препятствует накоплению носителей заряда в «плавающей» области подложки и изменению ее потенциала. Возможны различные варианты топологической реализации контактов к «плавающей» подложке, в частности, в данном случае формировался контакт Н-типа, особенности которого рассмотрены в [2].

На рис. 3-4 приведены семейства экспериментальных и расчетных ВАХ транзисторов в подпороговой области. Измерения и расчет проводились для транзисторов с шириной и длиной канала 0,52 мкм и 0,18 мкм, соответственно, при дозе легирования кармана DBF2 = $3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$. На рис. 3 экспериментальные значения тока нормированы по ширине.

При моделировании транзисторов нанометрового диапазона необходимо учитывать, что с уменьшением минимальных топологических размеров возрастает влияние разброса конструктивно-технологических параметров на характеристики прибора. В частности, на такие параметры МОП-транзистора, как пороговое напряжение V_{th} , подпороговый ток I_{off} и ток насыщения I_{ss} существенное влияние оказывает разброс по толщине подзатворного диэлектрика и по концентрации примеси в кармане в тонком приповерхностном слое кремния.

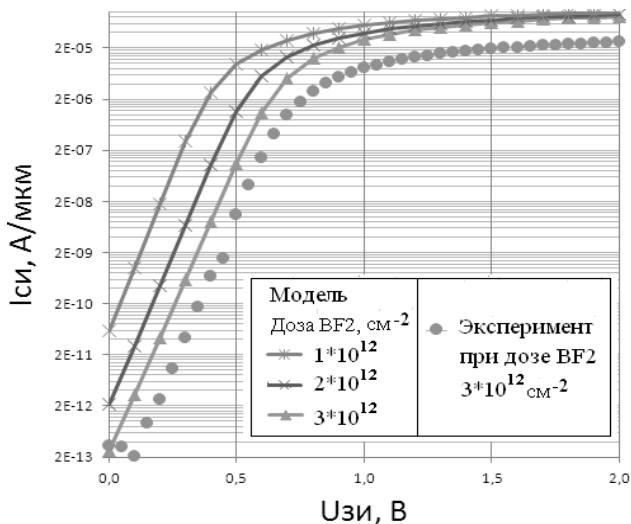


Рис. 3. Проходная характеристика КНИ МОП-транзистора при $U_{си}=0,05 \text{ В}$; расчет выполнен для трех значений дозы легирования кармана

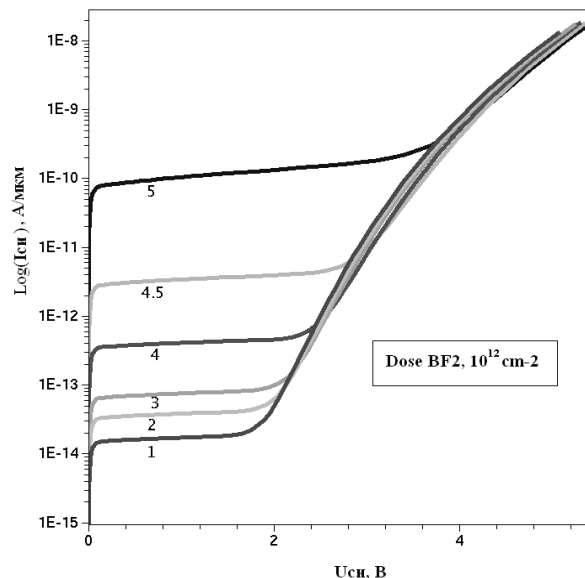


Рис. 4. Ток утечки КНИ МОП-транзистора при $U_{зи}=0$; расчет выполнен для различных значений дозы легирования кармана

На рис. 5 приведены результаты расчета зависимости порогового напряжения и подпорогового тока транзистора от толщины подзатворного диэлектрика T_{ox} для транзисторов с шириной и длиной канала 0,52 мкм и 0,18 мкм, соответственно.

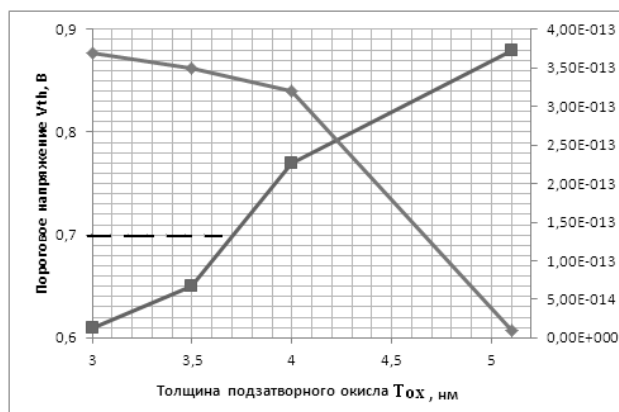


Рис. 5. Зависимость порогового напряжения и тока утечки от толщины подзатворного окисла при дозе легирования кармана $3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$; средняя величина экспериментального значения порогового напряжения показана пунктиром

На рис. 6 показаны результаты расчета выходных ВАХ КНИ МОП-транзистора при $U_{зи}$ равных 0,5 В, 1,1 В, 1,7 В при типовых значениях параметров физических моделей для транзисторов с шириной и длиной канала 0,52 мкм и 0,18 мкм, соответственно. Как видно из рис. 6, экспериментальное значение тока существенно превышает расчетное при относительно малых напряжениях на затворе $U_{зи} = 0,5 \text{ В}$ и 1,1 В, что указывает на необходимость настройки параметров модели на этапе приборного моделирования.

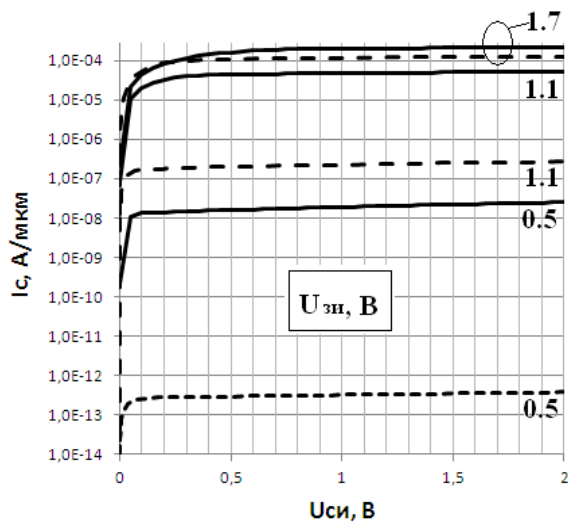


Рис. 6. Семейство выходных ВАХ КНИ МОП-транзистора (пунктир – модель, сплошная - эксперимент)

Расчетные и экспериментальные параметры КНИ МОП-транзисторов приведены в табл. 1. Расчет осуществлялся с помощью исходной численной модели (без настройки). Сравнение проводилось по следующим параметрам: толщина подзатворного окисла T_{ox} , пороговое напряжение V_{th} при напряжении на стоке 50 мВ, ток транзистора в закрытом состоянии I_{off} при напряжении на стоке 50 мВ, ток транзистора в режиме насыщения I_{ss} при напряжениях на стоке и затворе 1,8 В. Для повышения точности численной модели и улучшения совпадения экспериментальных и расчетных параметров транзистора необходимо проведение настройки параметров численной модели.

Таблица 1

Сравнение параметров КНИ МОП-транзисторов, формируемых по технологии 180 нм, с экспериментом

	T_{ox} , nm	V_{th} , V	I_{off} , A/μкм	I_{ss} , mA/μкм
модель	3.6	0.65	$4.5 \cdot 10^{-13}$	0.22
	3.2	0.61	$3.7 \cdot 10^{-13}$	0.41
экспер.	3.4 ± 0.2	0.70 ± 0.1	$1 \cdot 10^{-(13 \pm 1)}$	0.23 ± 0.05

III. НАСТРОЙКА ПАРАМЕТРОВ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ КНИ МОП-ТРАНЗИСТОРА

На первом этапе были рассчитаны семейства выходных и вольт-фарадных характеристик транзистора с размерами затвора $W \cdot L = 10 \mu\text{км} \cdot 5 \mu\text{км}$. На рис. 7 показаны ВФХ транзистора для различных толщин подзатворного диэлектрика T_{ox} . Хорошее совпадение расчетной и экспериментальной ВФХ в режиме обогащения показывает, что толщина окисла в модели находится в заданных пределах. Наблюдаемое различие в величине емкости в режиме сильной инверсии требует корректировки этой величины уточнением эффективной концентрации примеси в

поликремневом затворе N_{poly} (рис. 8). Наилучшее совпадение расчетной и экспериментальной емкости в режиме сильной инверсии достигается при значении эффективной концентрации примеси в поликремнии N_{poly} равной $7 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$.

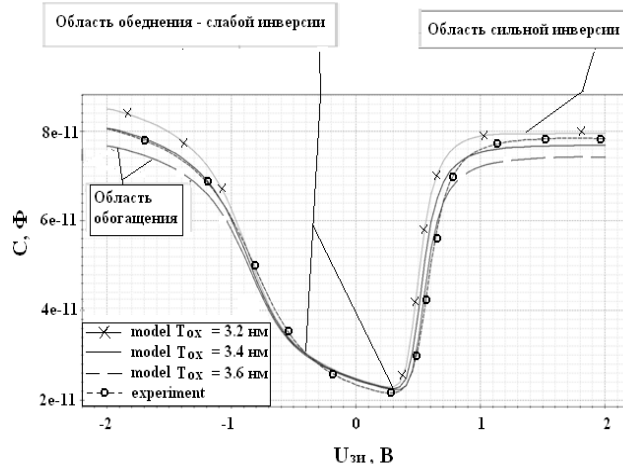


Рис. 7. Зависимость емкости перекрытия затвора от напряжения на затворе при вариации T_{ox}

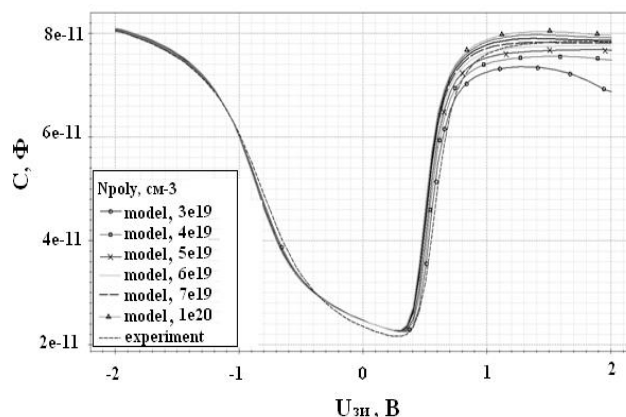


Рис. 8. Зависимость емкости перекрытия затвора от напряжения на затворе при вариации N_{poly}

Для выбранных значений толщины оксида и концентрации в поликремнии были рассчитаны проходные характеристики ($I_d V_g$) длинноканального транзистора при малых напряжениях на стоке и затворе (рис. 9). Настройка численной модели для приборного моделирования проводилась по параметрам модели подвижности Ломбарди, учитывающей влияние границы раздела кремний-окисел [1,3]. Модель подвижности, используемая в приборном моделировании, учитывает рассеяние носителей на акустических фононах (μ_{ac}) и рассеяние на границе кремний-окисел (μ_{sr}) [1,3,4]:

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu_b} + \frac{D}{\mu_{ac}} + \frac{D}{\mu_{sr}}$$

где μ_b – объемная подвижность, $D = \exp(-x/l_{crit})$, x – расстояние от границы раздела кремний-окисел, l_{crit} – характеристическая длина.

На рис. 10-11 приведены проходные

характеристики длинноканального транзистора с вариацией параметра δ , входящего в компонент подвижности μ_{sr} , и параметра C , входящего в компонент подвижности μ_{ac} . На рис. 12 показано влияние параметра B компонента подвижности μ_{ac} . Вариация подгоночных параметров δ и C оказывает достаточно сильное влияние на проходные характеристики (рис. 10-11) как в подпороговой области работы транзистора, так и в области сильной инверсии. Существенно меньшее влияние на проходные характеристики оказывает подгоночный параметр B (рис. 12).

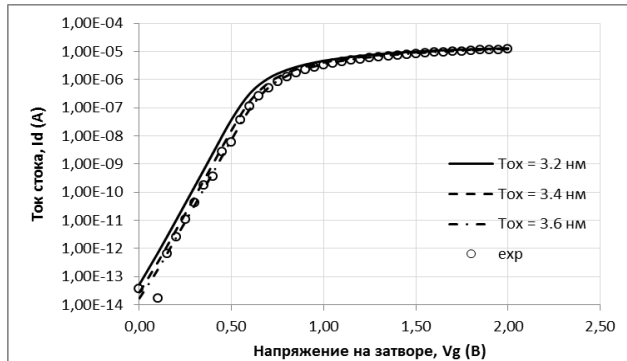


Рис. 9. Проходные характеристики транзистора при вариации T_{ox}

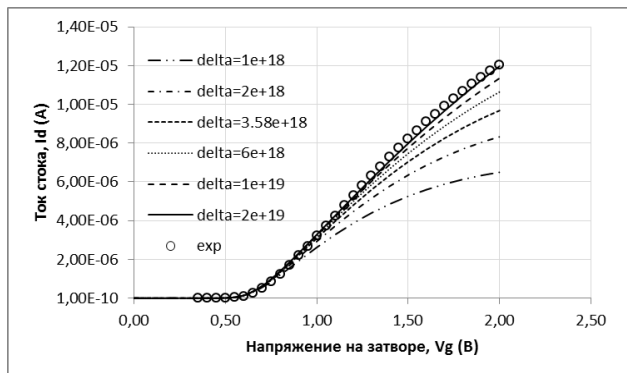


Рис. 10. Проходные характеристики транзистора при вариации параметра δ

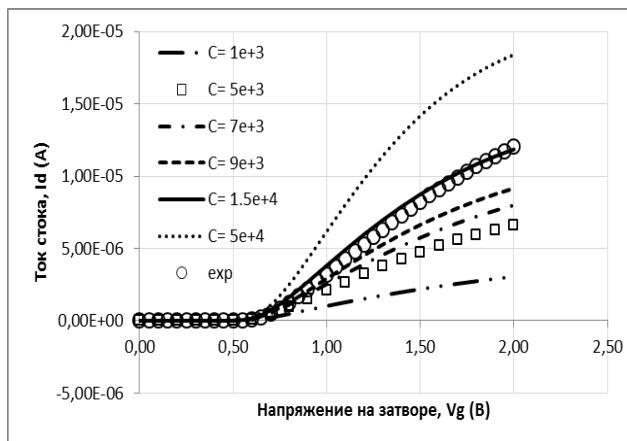


Рис. 11. Проходные характеристики транзистора при вариации параметра C

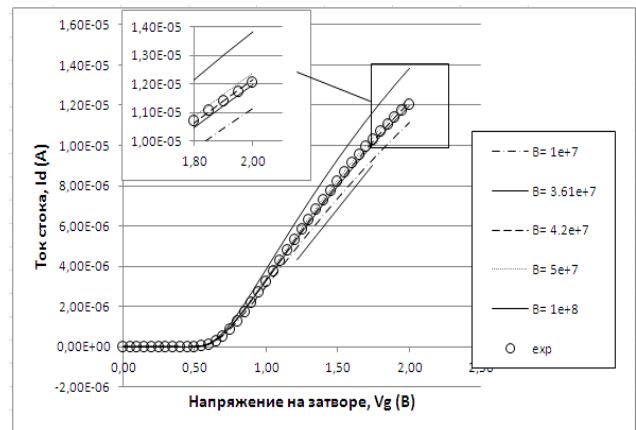


Рис. 12. Проходные характеристики транзистора при вариации параметра B ($\delta = 2*10^{19}$, $C = 1.5*10^4$)

Таким образом, проведена настройка численной модели КНИ МОП-транзистора с топологическими нормами 180 нм по экспериментальным данным. Выбранные значения параметров модели подвижности составляют: $\delta = 2*10^{19}$ В/с, $B = 4,2*10^7$ см/с, $C = 1,5*10^4$ см^{5/3}/(В^{2/3}*с). Расчетные ВАХ хорошо согласуются с экспериментальными в подпороговой области работы транзистора и в открытом состоянии при малых напряжениях на стоке и затворе.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе экспериментальных данных проведена верификация результатов моделирования и настройка параметров численной модели для расчета параметров КНИ МОП-транзисторов с проектными нормами 180 нм. Методика настройки включала сравнение расчетных и экспериментальных вольт-фарадных характеристик для уточнения значения величины подзатворного диэлектрика и эффективной концентрации примеси в поликремнии. По проходным характеристикам длинноканального транзистора при малых рабочих напряжениях определены параметры модели подвижности носителей. Таким образом, по результатам настройки получена численная модель, которая хорошо согласуется с экспериментальными данными в подпороговой области работы транзистора и в открытом состоянии при малых рабочих напряжениях.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] http://www.synopsys.com/Tools/TCAD/CapsuleModule/sentaurus_ds.pdf. Synopsys Inc. 2012. (дата обращения 28.04.2014).
- [2] Крупкина Т.Ю. Особенности приборно-технологического моделирования транзисторных структур КНС- и КНИ-типа // Микроэлектроника. 2005. № 5. Т. 34. С. 393-403.
- [3] Zachary K. Lee. A New Inverse-Modeling-Based Technique for Sub-100-nm MOSFET Characterization // Dissertation, University of British Columbia. 1998.
- [4] Yiming Li, Cheng-Kai Chen. A simulation-based evolutionary technique for inverse doping profile problem of sub-65 nm CMOS devices // Journal of Computational Electronics. 2006. Vol. 5. Issue 4. P. 365-370.