

Одномерное приборно-технологическое моделирование элементов интегральных схем с использованием электронных таблиц

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

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

Аннотация — Разработаны программы приборного и технологического моделирования элементов интегральных схем в одномерном приближении с использованием электронных таблиц. Показаны возможности программ по приборному моделированию МДП-структур и р-п-переходов, а также по моделированию технологических маршрутов. Определены направления совершенствования возможностей созданных программ.

Ключевые слова — приборно-технологическое моделирование, TCAD, одномерное приближение, электронные таблицы.

I. ВВЕДЕНИЕ

При разработке элементной базы интегральных схем (полупроводниковых приборов), как правило, нужно получить зависимости технологических параметров слоев прибора (таких как глубина залегания и поверхностное сопротивление кармана в КМОП-структуре, поверхностная концентрация примеси или толщина подзатворного диэлектрика МДП-транзистора) от режимов технологического маршрута создания прибора. Либо требуются зависимости электрических параметров приборов (таких как пороговое напряжение МДП-транзистора, емкость, пробивное напряжение р-п-перехода, тепловой ток р-п-перехода) от конструктивно-технологических режимов формирования прибора (таких как, например, доза легирования, время и температура отжига или окисления).

Для расчета таких зависимостей широко используются средства приборно-технологического моделирования, например, такие как Sentaurus TCAD [1] или Silvaco TCAD [2], обладающие широкими возможностями по моделированию технологических процессов и расчету электрических характеристик различных элементов интегральных схем для различных полупроводниковых и диэлектрических материалов.

Однако из-за своей универсальности такие программы сложны в освоении, например описание программы технологического моделирования Sentaurus Process на английском языке занимает 1068 страниц (в версии F-2011.09), а описание программы приборного моделирования Sentaurus Device – 1334 страницы.

Моделирование технологического маршрута или расчет ВАХ полупроводникового прибора в двухмерном или трехмерном приближении может занимать значительное время, и в случае неверно выбранных исходных данных, режимов маршрута или режимов включения прибора требуется многократное повторение длительных расчетов.

Поэтому при исследовании нового технологического маршрута или полупроводникового прибора желательно оценить значения и определить характер зависимостей электрических параметров от конструктивно-технологических режимов более быстрым способом с использованием более простых средств моделирования. В качестве примера такого средства можно привести программу Process Wizard (Prowize или ФАКТ), в которой интуитивно понятным способом – в виде таблицы операций – задавался технологический маршрут, проводилось его одномерное моделирование, и в ней же отображались результаты. Также программа Prowize позволяла рассчитывать электрические параметры и даже строить их зависимости от режимов маршрута.

Основными недостатками программы Prowize являются закрытость ее моделей, а также то, что она была написана достаточно давно под операционную систему MS-DOS. Также Prowize не позволяла выводить результаты приборного моделирования, такие как ВАХ или CV-характеристики, а также пространственные распределения таких величин, как потенциал, поле, концентрации электронов и дырок.

Таким образом, актуальной задачей является создание программы или набора программ для технологического и приборного моделирования элементов кремниевых ИС в одномерном приближении, имеющих простой и дружелюбный интерфейс и работающих под наиболее распространенной на персональных компьютерах операционной системе Microsoft Windows.

В данной работе представлены результаты разработки и использования такого набора программ. В качестве платформы для создания программ выбрана достаточно распространенная программа Microsoft Excel, имеющая удобные и простые средства для вывода, хранения, сравнения и отображения одномерных зависимостей. Идея об использовании

Excel в научных вычислениях не нова. Например, в [3] была разработана программа для двухмерного моделирования электрических характеристик солнечных элементов, реализованная исключительно средствами Excel, имеющая, однако, ограничения по объему вычислений и использующая упрощенные модели.

В нашем случае основное вычислительное ядро программ реализовано на встроенном в Excel языке Visual Basic. В работе [4] нами уже были представлены некоторые результаты по созданию одномерной программы для расчета параметров МДП-структуры с различными типами затвора, подзатворного диэлектрика и подложки.

На основе имеющегося задела были разработаны и доработаны следующие программы моделирования в одномерном приближении:

- доработана программа расчета параметров МДП-структуры MIS1D (рабочее название);
- разработана программа расчета параметров p-n-перехода PN1D;
- разработан предварительный вариант программы технологического моделирования Process1D.

Рассмотрим далее возможности каждой программы.

II. ПРОГРАММА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ МДП-СТРУКТУРЫ

Программа MIS1D позволяет создать одномерную модель МДП-структуры, состоящую из пяти областей с заданием материала каждой области. Возможно использование следующих материалов: Si, SiO₂, Si₃N₄. Также введены еще три диэлектрических материала, параметры которых можно вводить независимо. Для заданных размеров и областей задаются распределения донорной и акцепторной примесей в виде постоянного распределения, либо в виде трех распределений Гаусса. На рис. 1 показан пример задания распределения примеси в МДП-структуре.

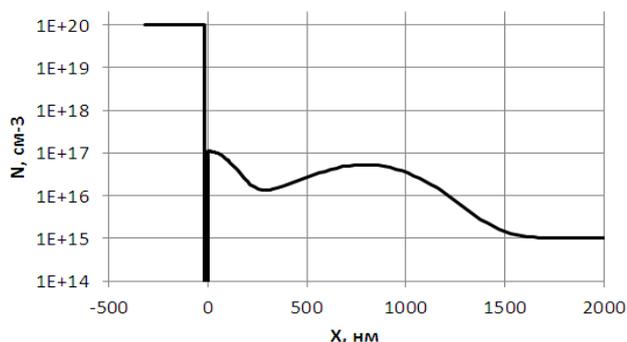


Рис. 1. Распределение примеси в одномерной модели МДП-структуры

Распределение примеси задается на неравномерной конечно-разностной сетке, которая формируется автоматически с учетом задаваемого пользователем максимального и минимального шага сетки. Сетка

автоматически сгущается вблизи границ раздела материалов.

В основе программы лежит численное решение уравнения Пуассона для созданной модели МДП-структуры, для чего также задаются параметры материалов (диэлектрическая проницаемость, средство к электронам и ширина запрещенной зоны). Также в кремнии задается модель зависимости собственной концентрации носителей от температуры и концентрации примеси ($n_i(T, N)$), а также модели зависимостей подвижности электронов и дырок от температуры, концентрации примеси и поперечного электрического поля $\mu(T, N, E_n)$ и их параметры.

Программа представляет собой один Excel-файл с двумя листами, на одном из которых создается модель, и отображаются результаты расчета, а на другом – задаются параметры всех моделей. В результате моделирования отображаются пространственные распределения потенциала, поля, концентраций и подвижностей носителей, показанные на рис. 2, 3. Также рассчитываются и отображаются зависимости плотностей инверсного и объемного заряда, поверхностных концентраций носителей в канале, поверхностного потенциала от напряжения затвор-подложка с учетом и без учета потенциала подложки и плотностей поверхностных состояний на границах раздела материалов. Данные зависимости позволяют оценить проходные ВАХ и CV-характеристики МДП-транзистора, показанные на рис. 4.

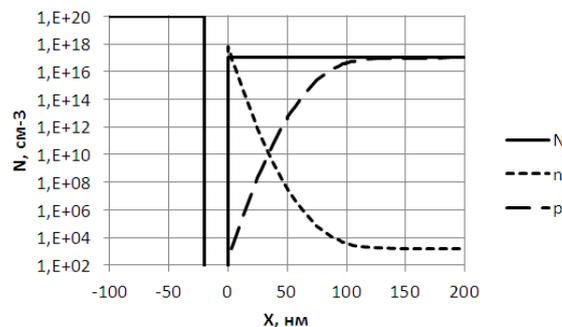


Рис. 2. Распределения примеси (N) концентраций электронов (n) и дырок (p) в модели МДП-структуры с постоянным распределением примеси в подложке

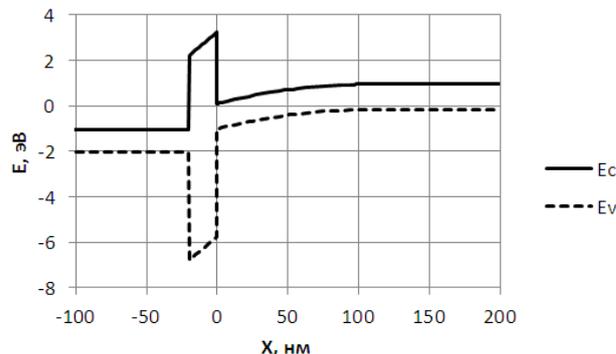


Рис. 3. Рассчитанная зонная диаграмма МДП-структуры с постоянным распределением примеси в подложке

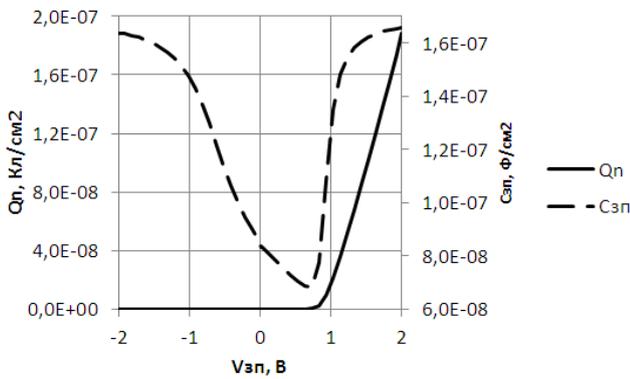


Рис. 4. Расчетные проходные и СВ-характеристики одномерной модели МДП-транзистора

III. ПРОГРАММА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ P-N-ПЕРЕХОДА

Программа PN1D позволяет создать одномерную модель p-n перехода, состоящую из одной области (Si), в которой заданы распределения донорной и акцепторной примесей по аналогии с программой MIS1D. Профили также задаются на конечно-разностной сетке, которая формируется с учетом задаваемого пользователем максимального и минимального шага сетки и автоматически сгущается на границах p-n-переходов (X_j), как показано на рис. 5. Программа позволяет создать одномерные модели p+-p, n+-p, p+-p-n, n+-n-p –переходов, а также структур вида n+-p-r+ или p+-n-p+.

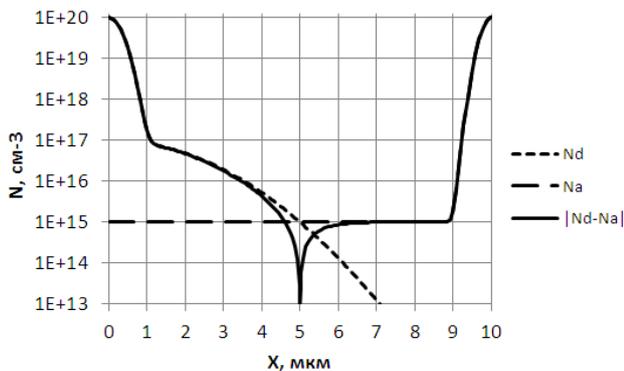


Рис. 5. Распределение примеси в одномерной модели p-n-перехода

Следует отметить, что при создании модели p-n-перехода проводится расчет поверхностного сопротивления одной из его областей, что позволяет быстро восстановить профиль распределения примеси по заданному сопротивлению и глубине залегания (например, профиль распределения примеси в n-кармане p-МОП-транзистора в КМОП-структуре).

Программа позволяет анализировать работу p-n-перехода двумя способами:

- на основе численного решения уравнения Пуассона при обратном включении прибора (Пуассон-анализ);

- на основе решения системы из трех уравнений: Пуассона и уравнений непрерывности для электронов и дырок для прямого и обратного включения.

По аналогии с программой MIS1D в Si заданы модели собственной концентрации носителей. Также заданы модели рекомбинации (модель Шокли-Рида-Холла с учетом зависимости времени жизни носителей от температуры и концентрации примеси), лавинной генерации, а также модель зависимости подвижности электронов и дырок от температуры и концентрации примеси.

При использовании Пуассон-анализа уравнение Пуассона решается в предположении постоянных квазиуровней Ферми, на основе чего рассчитываются распределения потенциала, поля, концентраций и подвижностей носителей, а также зонная диаграмма и подвижность прибора, показанные на рис. 6, 7.

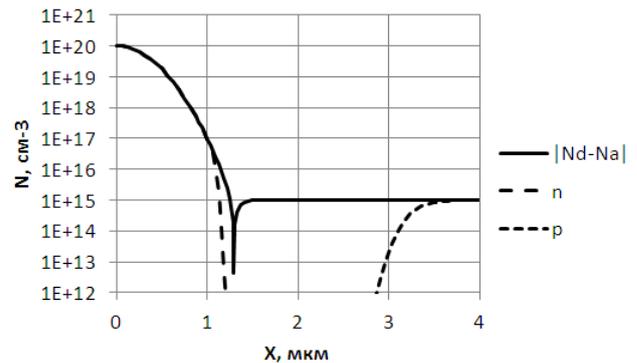


Рис. 6. Распределения примеси (N) концентраций электронов (n) и дырок (p) в модели p-n-перехода в обратном включении

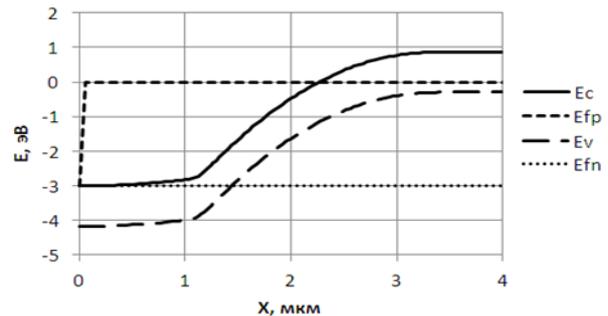


Рис. 7. Рассчитанная зонная диаграмма p-n-перехода в обратном включении

Следует отметить, что уравнение Пуассона может решаться как в линейных, так и в цилиндрических и сферических координатах, позволяя рассчитывать распределения полей в одно, двух- и трехмерных случаях, как показано на рис. 8. Также рассчитываются зависимости ионизационных интегралов для электронов и дырок, плотности объемного заряда и величины максимального поля структуры от напряжения на p-n-переходе, позволяя оценить напряжение лавинного пробоя и барьерную емкость прибора, как показано на рис. 9.

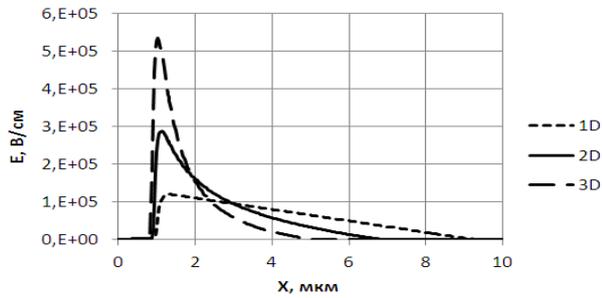


Рис. 8. Распределения поля в p-n-переходе при обратном включении $U_{pn} = -50$ В в различных системах координат

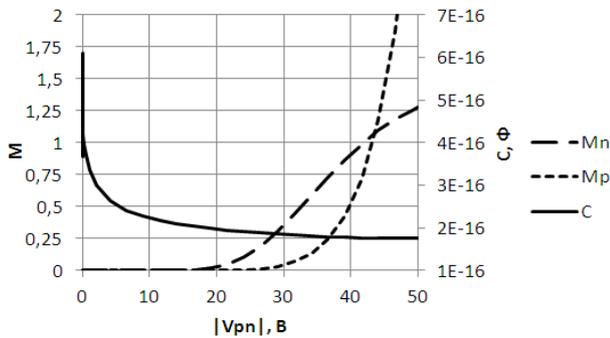


Рис. 9. Зависимость величин ионизационных интегралов для электронов и дырок, а также барьерной емкости p-n-перехода от обратного напряжения

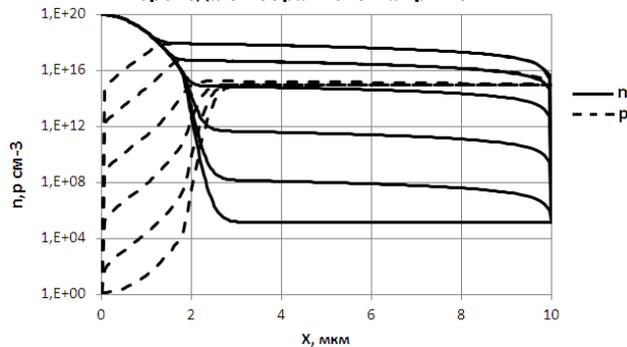


Рис. 10. Расчетные распределения концентраций электронов и дырок при прямых смещениях p-n-перехода $V_{pn} = 0, 0.2, 0.4, 0.8$ и 1 В

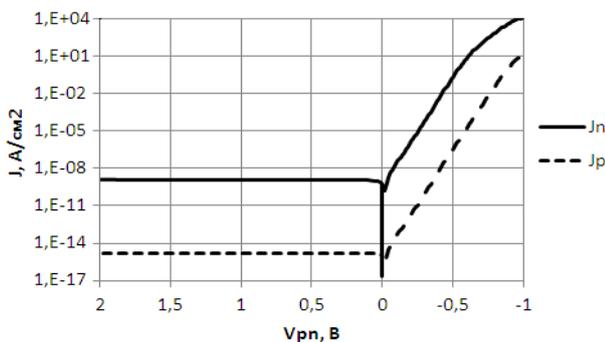


Рис. 11. Расчетные ВАХ p-n-перехода при прямом и обратном включениях.

При решении системы из трех уравнений рассчитываются распределения концентрации

неосновных носителей, а также ВАХ прибора в прямом и обратном включении для линейной системы координат (одномерный случай) без учета лавинной генерации, как показано на рис. 10, 11.

IV. ПРОГРАММА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Программа Process1D позволяет моделировать технологический маршрут создания кремниевых интегральных схем, включающий операции ионной имплантации, окисления и диффузии. На данный момент эта программа является наименее проработанной и использует следующие модели:

- рассматриваются примеси As, P и B;

- распределение примеси после ионной имплантации задается распределением Гаусса, одиночного и двойного распределения Пирсона-4 в зависимости от заданной дозы и энергии при угле наклона пучка $\text{tilt} = 7^\circ$. Модель имплантации через диэлектрик пока не реализована. На рис. 12 показаны распределения примесей после ионной имплантации с разной дозой и энергией;

- при моделировании окисления решается уравнение второго закона Фика для двух типов окислителя (O_2 , H_2O). При этом учитываются модели Дила-Гроува и Массуда, а также кристаллографическая ориентация подложки и давление паров окислителя. На рис. 13 показаны зависимости толщины SiO_2 , рассчитанные для различных условий окисления;

- диффузия примесей моделируется путем решения уравнения второго закона Фика с постоянными коэффициентами диффузии. Используется простейшая модель активации примеси на основе предела растворимости. Моделируется диффузия примеси через слой SiO_2 , а также загонка примеси. Сегрегация примеси на границе Si-SiO₂ при окислении кремния пока не учитывается.

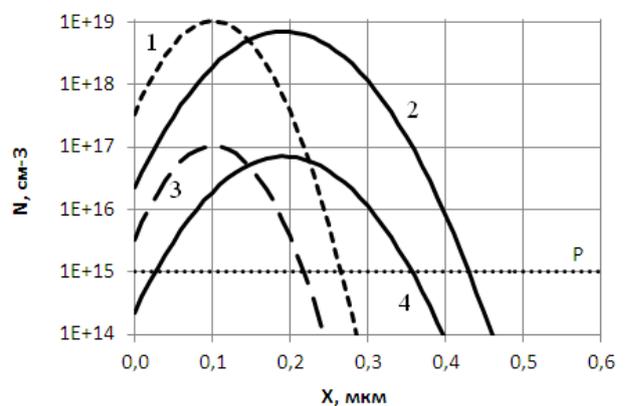


Рис. 12. Распределение бора после ионной имплантации в Si при $E = 30$ кэВ, $D = 10^{12}-10^{14}$ cm^{-2} (1 и 2); при $E = 60$ кэВ, $D = 10^{12}-10^{14}$ cm^{-2} (3 и 4)

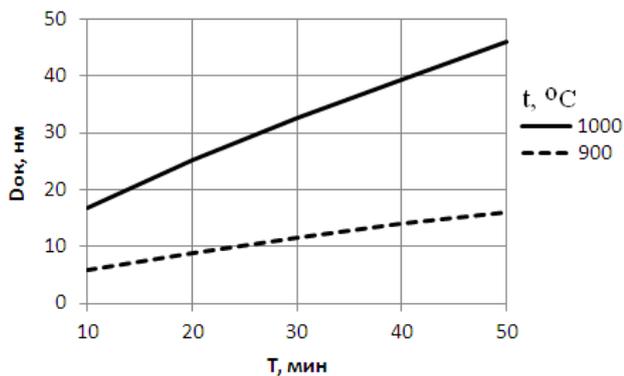


Рис. 13. Расчетные зависимости толщины SiO₂ от времени и температуры окисления в сухом кислороде

На рис. 14 показаны распределения примесей до и после диффузии в нейтральной среде. Моделируется маршрут, задаваемый в виде таблицы на листе Excel и показанный далее:

- подложка, бор, $N = 10^{15} \text{ см}^{-3}$, ориентация [100];
- имплантация, фосфор, $E = 80 \text{ кэВ}$, $D = 10^{13} \text{ см}^{-2}$;
- отжиг, $t = 1200 \text{ °C}$, $T = 60 \text{ мин}$, N_2 .

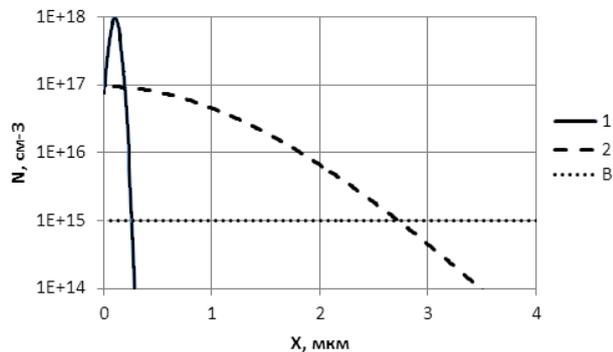


Рис. 14. Распределение фосфора после имплантации в р-подложку (1) и после отжига в нейтральной среде (2)

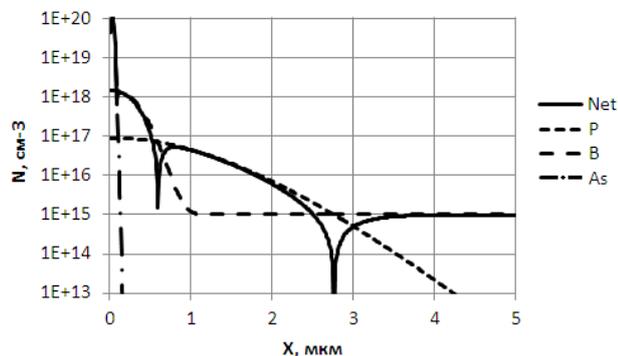


Рис. 15. Расчетное распределение примесей в конце моделируемого технологического маршрута

На рис. 15 показаны распределения примесей в конце технологического маршрута, приведенного далее:

- подложка, бор, $N = 10^{15} \text{ см}^{-3}$, ориентация [100];

- имплантация, фосфор, $E = 80 \text{ кэВ}$, $D = 10^{13} \text{ см}^{-2}$;
- отжиг, $t = 1200 \text{ °C}$, $T = 60 \text{ мин}$, N_2 ;
- имплантация, бор, $E = 50 \text{ кэВ}$, $D = 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$;
- отжиг, $t = 1050 \text{ °C}$, $T = 60 \text{ мин}$, N_2 ;
- имплантация, мышьяк, $E = 50 \text{ кэВ}$, $D = 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$;
- отжиг, $t = 950 \text{ °C}$, $T = 30 \text{ мин}$, N_2 .

V. ОЦЕНКА РАБОТЫ ПРОГРАММЫ В СРАВНЕНИИ С СИСТЕМОЙ SENTAURUS TCAD

Для оценки точности работы программ проведено сравнение результатов моделирования с результатами расчета с использованием системы Sentaaurus TCAD версии G-2012.06.

Проведены расчеты проходной и вольт-фарадной характеристик p-канального МОП-транзистора с различной длиной канала. Двухмерная модель прибора в TCAD показана на рис. 16. Рассчитанные характеристики прибора показаны на рис. 17, 18; при расчете проходной ВАХ в TCAD считалось, что $U_{\text{си}} = 0,05 \text{ В}$; при расчете C-V-характеристики в TCAD считалось что $U_{\text{си}} = 0$, учитывался эффект квантования энергии носителей в канале, а также обеднение Si*-затвора.

Как видно из рис. 17, проходные характеристики, рассчитанные разными способами, имеют качественно схожий вид, и результаты расчета в MIS1D позволяют адекватно оценить величину порогового напряжения при низком напряжении $U_{\text{си}}$. При большой длине канала ($L = 1 \text{ мкм}$) вольт-фарадная характеристика, рассчитанная в TCAD, смещена вниз относительно характеристики, рассчитанной в MIS1D, так как в MIS1D не учитывается эффект квантования в канале.

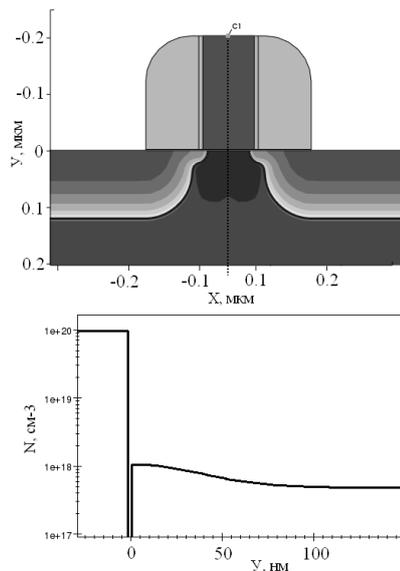


Рис. 16. Модель наноразмерного p-МДП транзистора с p+-Si*-затвором и длиной канала 90 нм для сравнительных расчетов в TCAD

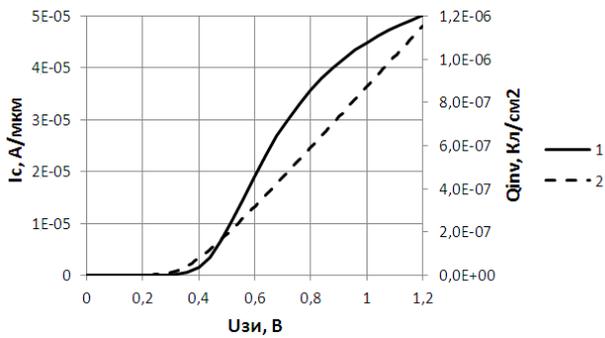


Рис. 17. Проходные характеристики для наноразмерного n-MДП транзистора (1 - TCAD, L = 90 нм, 2 - MIS1 (справа))

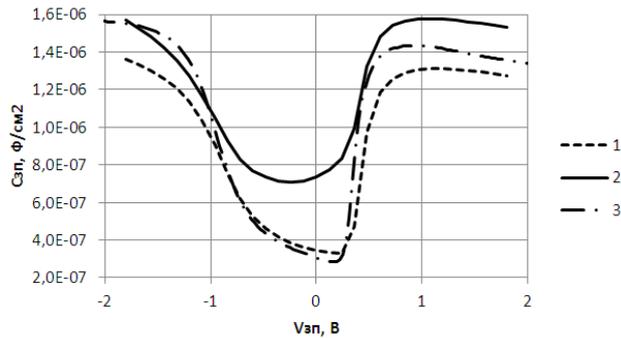


Рис. 18. Вольт-фарадные характеристики n-MОП-транзистора (1 - TCAD L = 1 мкм, 2 - TCAD L = 90 нм, 3 - MIS1D)

Проведены расчеты распределений концентраций электронов и дырок, а также ВАХ одномерного n+-p-перехода средствами TCAD и в программе PN1D. Сравнительные результаты моделирования показаны на рис. 19, 20.

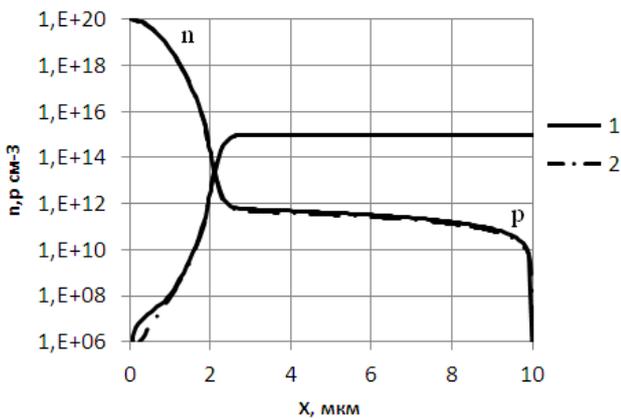


Рис. 19. Расчетные распределения концентраций электронов и дырок n+-p-перехода при прямом смещении $V_{pn} = 0,4$ В (1 - TCAD, 2 - PN1D)

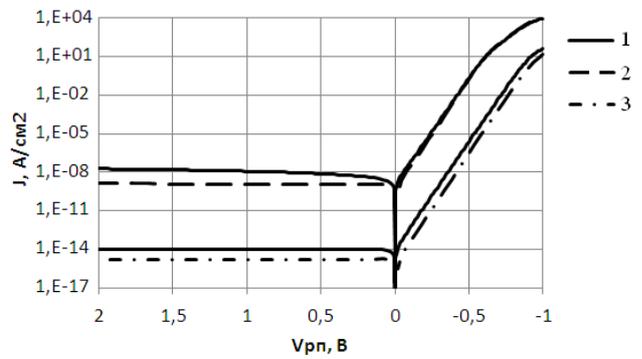


Рис. 20. Сравнительные расчеты ВАХ n+-p-перехода (1 - TCAD, 2 - PN1D Jn, 3 - PN1D Jp)

Как видно из рис. 19-20, концентрации носителей и токи прибора, рассчитанные программой PN1D, практически совпадают с результатами расчета в TCAD. В программе PN1D ток электронов рассчитывался как ток неосновных носителей в p-области, а ток дырок – как ток неосновных носителей в n-области. Данный алгоритм недостаточно точен, не позволяет рассчитывать токи основных носителей и требует доработки.

Проведены сравнительные расчеты распределений примесей As, P и B после ионной имплантации в Si под углом $\text{tilt} = 7^\circ$ без слоя SiO_2 на поверхности подложки. По аналогии с TCAD в программе Process1D для описания примесного профиля использованы двойные распределения Пирсона-4, параметры которых соответствуют таблицам Advanced Calibration TCAD. Сравнительные результаты расчета показаны на рис. 21.

Как видно из рис. 21, распределения примесей, рассчитанные в разных программах, практически совпадают. На данный момент в программе Process1D недостаточно полно реализован алгоритм интерполяции параметров профилей из таблиц имплантации, и моделирование возможно для ограниченного диапазона энергий и доз имплантации.

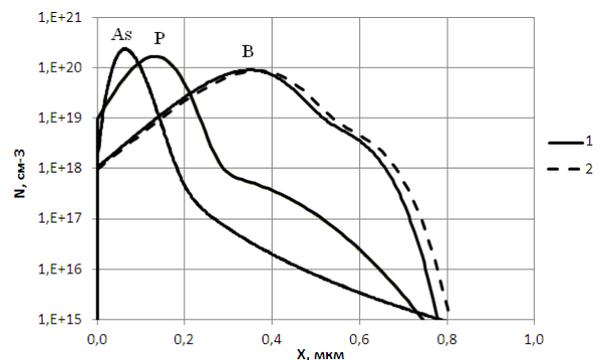


Рис. 21. Расчетные распределения примесей после имплантации $D = 2 \cdot 10^{15}$ см⁻², $E = 100$ кэВ (1 - TCAD, 2 - Process1D)

Проведены сравнительные расчеты зависимости толщины SiO_2 от температуры и времени окисления. Расчет показал, что хорошее совпадение с

результатами моделирования в TCAD достигается при температурах $t = 900-1000$ °С. При больших температурах программа Process1D переоценивает толщину SiO₂.

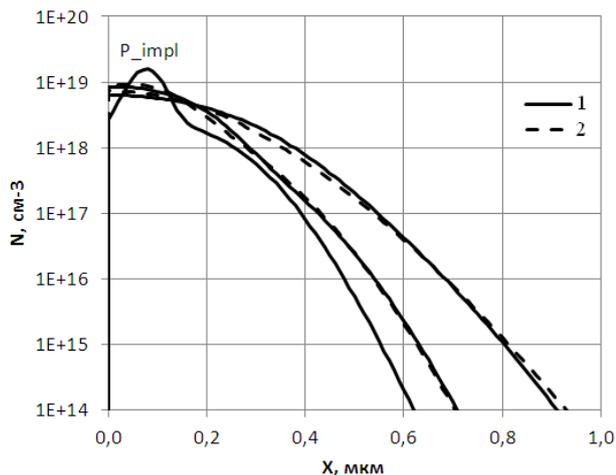


Рис. 22. Расчетные распределения фосфора после имплантации с дозой $D = 1.6 \cdot 10^{14}$ см⁻² и отжига при 30 и 120 мин (1 - TCAD, 2 - Process1D)

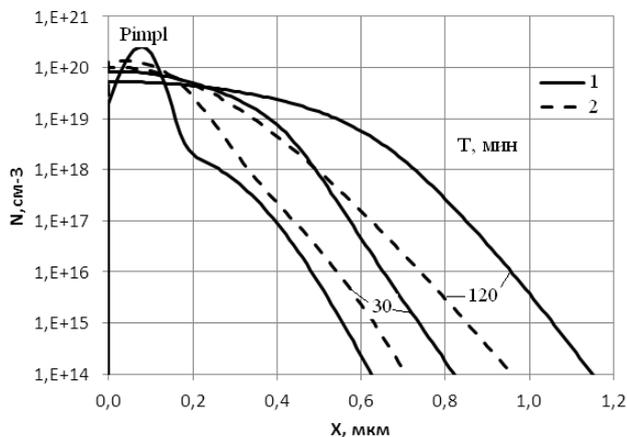


Рис. 23. Расчетные распределения фосфора после имплантации с дозой $D = 2 \cdot 10^{15}$ см⁻² и отжига при 30 и 120 мин (1 - TCAD, 2 - Process1D)

Проведены сравнительные расчеты процесса диффузии примесей после ионной имплантации. На рис. 22, 23 показаны распределения фосфора сразу

после имплантации (Pimpl, $E = 60$ кэВ), а также после отжига в нейтральной среде при $T = 1000$ °С, $t = 30, 120$ мин. Как видно из рис. 22-23, при дозах имплантации $D \leq 1.6 \cdot 10^{14}$ см⁻² простейшая модель диффузии (с постоянным коэффициентом диффузии), реализованная в программе Process1D, дает схожие с TCAD результаты. Существенные отличия в профилях примеси проявляются при более высоких дозах легирования, когда нужно учитывать влияние точечных дефектов. Модель диффузии в программе Process1D требует серьезной доработки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанные программы для одномерного приборного и технологического моделирования позволяют быстро и просто определять характер зависимостей электрических параметров МДП-структур и р-n-переходов от конструктивно-технологических режимов создания элементов интегральных схем и оценивать значения этих параметров. В дальнейшем планируется добавлять новые модели в разработанные программы. Например, нужно учесть эффект квантования носителей в канале МДП-транзистора и модель лавинной генерации при расчете ВАХ р-n-перехода в области пробоя. При моделировании технологических процессов нужно совершенствовать модели имплантации и особенно модели диффузии.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] URL: <http://www.synopsys.com/Tools/TCAD/Pages/default.aspx> (дата обращения: 31.03.2016)
- [2] URL: <http://www.silvaco.com/products/tcad.html> (дата обращения: 31.03.2016)
- [3] Paul A. Basore and Kirsten Cabanas-Holmen, IEEE Journal of Photovoltaics, 1, 1, July 2011, pp. 72-77, 10.1109/JPHOTOV.2011.2166376.
- [4] Крупкина Т.Ю., Красюков А.Ю., Артамонова Е.А. Исследование характеристик МДП-транзисторов с использованием одномерной модели. Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем-2014. Сборник трудов (ВАК) М.:ИППМ РАН, 2014, Часть II. С.159-162.

One-dimensional process and device simulation using spreadsheets

T. Yu. Krupkina , A. Yu. Krasjukov, E. A. Artamonova

National Research University of Electronic Technology, a_kras@org.miet.ru

Keywords — process and device simulation, TCAD, one-dimensional approximation, spreadsheets.

ABSTRACT

Device simulation programs for one-dimensional modeling of MIS-structures and pn junctions and silicon process simulation tools were created using spreadsheets.

New semiconductor devices and process flows design is almost impossible without process and device simulation. Usually it is necessary to estimate dependencies of the device parameters (such as threshold voltage, gate capacitance, breakdown voltage) versus the process parameters (such as ion implantation dose and energy, oxidation and doping diffusion time and temperature).

Existing commercial simulation tools such as TCAD from Synopsys [1] or Silvaco [2] are widely used for multidimensional simulation of different semiconductor devices and processes.

However such tools are very complex in using (manuals for Sentaurus Device from Synopsys TCAD F-2011.09 have 1334 pages), occupy a lot of HDD memory and usually operate under OS Linux.

For initial estimation of silicon device parameters and process modes it can be useful to have small, simple, fast and user-friendly programs such as very popular Process Wizard (Prowize or FAKT) - the one dimensional (1D) process simulator developed long time ago under MSDOS.

It would be useful to utilize the Microsoft Excel spreadsheets as the basis for 1D-simulators. Spreadsheet has simple and comfortable tools for 1D-data storing and visualization. For example in [3] were developed two-dimensional program PC2D for solar cells device simulation completely based on Excel spreadsheets.

In this paper we present several programs for one-dimensional silicon process and devices simulation based on Microsoft Excel spreadsheets. In our programs the main computation core is realized in Visual Basic, embedded in Excel [4]. There are three main programs:

- device simulation of metal-insulator-semiconductor (MIS) structures and transistors MIS1D;
- device simulation of pn-junctions PN1D;
- silicon technology process simulation Process1D.

MIS1D program can build one-dimensional MIS-structure model for five different materials such as Si, SiO₂, Si₃N₄ and three other insulators with user defined parameters. Donor and acceptor concentrations can be

defined as constant or Gaussian profiles. MIS model is covered by non-uniform finite-difference grid. The grid is automatically refined at region interfaces according to user-defined minimum and maximum step. MIS1D solves numerically the Poisson equation with several models and material parameters (permeability, electron affinity, band gap, intrinsic density). MIS1D is a single Excel file with two spreadsheets – the first for simulation results and the second for model parameters. As a result MIS1D computes and visualizes spatial distribution of potential, electric field, carrier concentrations and band diagrams. Also MIS1D computes the inversion charge–voltage- and CV-characteristics for different gate-substrate voltages.

The PN1D program can build one-dimensional silicon pn models (p+-n, n+-p, p+-p-n, n+-n-p, n+-p-p+, p+-n-n+) with non-uniform doping distribution. The finite-difference grid is refined at p-n junction depth (X_j) according to user-defined minimum and maximum step. PN1D can compute the surface resistance (ρ_s) of doping region, what allows restoring the unknown profile by given ρ_s and X_j . The PN1D can solve the single Poisson equation for reverse-biased pn junction (with constant quasi-Fermi levels) at linear (1D), cylindrical (2D) and spherical (3D) coordinates and compute the avalanche breakdown voltage and pn junction CV-characteristics at different voltages. Also PN1D can solve the drift-diffusion system (Poisson and two carrier continuity questions) in linear coordinates and compute IV-characteristics for the forward and reverse biased pn junction).

Process1D can model the silicon process operations such as ion implantation, oxidation and diffusion for B, P, As impurities and N₂, O₂, H₂O ambients. Ion implantation simulated using Gaussian distribution. Oxidation and diffusion simulated by solving numerically the second Fick law equation for impurities and oxidants.

REFERENCES

- [1] <http://www.synopsys.com/Tools/TCAD/Pages/default.aspx> (accessed: 31.03.2016)
- [2] <http://www.silvaco.com/products/tcad.html> (accessed: 31.03.2016)
- [3] Paul A. Basore and Kirsten Cabanas-Holmen, IEEE Journal of Photovoltaics, 1, 1, July 2011, pp. 72-77, 10.1109/JPHOTOV.2011.2166376.
- [4] Krupkina T.Ju. Krasjukov A.Ju., Artamonova E.A. Issledovanie harakteristik MDP-tranzistorov c ispol'zovaniem odnomernoj modeli. Problemy razrabotki perspektivnyh mikro- i nanojelektronnyh sistem-2014. Sbornik trudov (VAK) M.:IPPM RAN, 2014, Chast' II. C.159-162.