

6. Kotani N., Kawazu S. The effect of holes on the injection-induced breakdown in n-channel MOSFET's // IEEE Trans. Electron Devic.— 1985.— V. ED-32.— P. 722.
7. Kuhnert R., Werner C., Schütz A. A novel impact-ionization model for 1  $\mu\text{m}$  MOSFET simulation // Ibid.— P. 1057.
8. Гадиак Г. В., Гинкин В. П., Обреخت М. С. и др. Программа расчета стационарных ВАХ МОП-транзистора — MOS // Автометрия.— 1987.— № 1.
9. Schneider G. E., Zedan M. A modified strongly implicit procedure for the numerical solution of field problems // Numerical Heat Transfer.— 1981.— V. 4.— P. 1.
10. Gadiyak G. V., Obrecht M. S. The use of factorization methods for solving the charge transfer equations in semiconductor devices // Simulation of Semiconductor Devices and Process. V. 2: Proc. of the Second Internat. Conf.— Held at University College of Swansea.— Swansea: U. K., 1986.
11. Eitan B., Frohman-Bentchkowsky D. Hot-electron injection into the oxide in n-channel MOS devices // IEEE Trans. Electron Devic.— 1981.— V. ED-28.— P. 328.
12. Niehans W. C., Seidel T. E., Iglesias D. E. Double-drift IMPAT diodes near 1000 GHz // IEEE Trans. Electron Devic.— 1973.— V. ED-20.— P. 675.

*Поступила в редакцию 9 февраля 1987 г.*

УДК 621.382.82.001

С. Г. МУЛЯРЧИК, В. Г. СОЛОВЬЕВ

(Минск)

## ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА KFSM К МОДЕЛИРОВАНИЮ МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ СТРУКТУР

В статье приводятся результаты исследования характеристик разнообразных микроэлектронных структур с помощью разработанного авторами программного комплекса KFSM [1]. Целью данной работы является, во-первых, установление степени адекватности результатов двумерного численного моделирования, во-вторых, оценка качества соответствующего проектно-технологического решения, в-третьих, определение затрат машинного времени.

Фундаментальная система уравнений решалась методом Сейдмана — Чу [2] с демпфированием [3]. При расчете биполярных приборов, если прикладываемое напряжение не превосходило 1,5 В, использовались переменные  $\varphi$ ,  $\Phi_n = \exp(-\varphi_n)$ ,  $\Phi_p = \exp(\varphi_p)$ , где  $\varphi_n$ ,  $\varphi_p$  — квазиуровни Ферми для электронов и дырок;  $\varphi$  — электростатический потенциал. Линейные системы, получаемые при дискретизации уравнений непрерывности, решались при этом НФСГ-методом (сопряженных градиентов с неполной LU-факторизацией) [4]. Расчет полевых приборов проводился с использованием переменных  $n$ ,  $p$ ,  $\varphi$ , при этом для решения дискретизированных уравнений непрерывности применялся метод Стоуна с нулевыми итерационными параметрами [5]. Дискретизированное уравнение Пуассона решалось НФСГ-методом.

Критерием остановки внешнего итерационного процесса служило условие достижения заданных либо относительного изменения токов на выводах структуры ( $2 \cdot 10^{-3}$ ) и относительной точности баланса токов ( $2 \cdot 10^{-3}$ ), либо абсолютного изменения электростатического потенциала на гummелевской итерации ( $10^{-9}$  ф<sub>т</sub>), либо числа внешних итераций (50 для биполярных и 100 для МДП-структур).

**Одноколлекторный транзистор с инжекционным питанием.** Структура прибора и профиль легирующей примеси взяты из работы [6], в которой наряду с результатами расчетов приведены измеренные вольт-амперные характеристики. Постановка вычислительных экспериментов, в итоге которых будут найдены аналогичные ВАХ, позволяет оценить точность численного моделирования средствами KFSM. Следует заметить, что авторы [6] в своих расчетах использовали подход, требующий

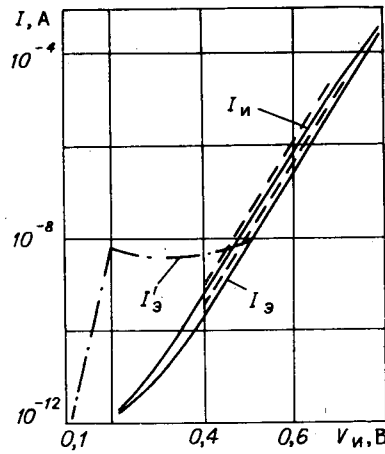


Рис. 1

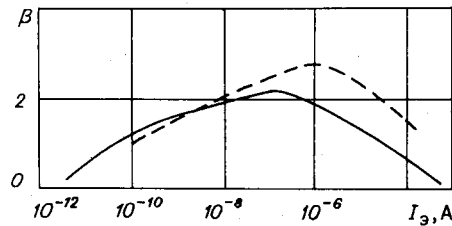


Рис. 2

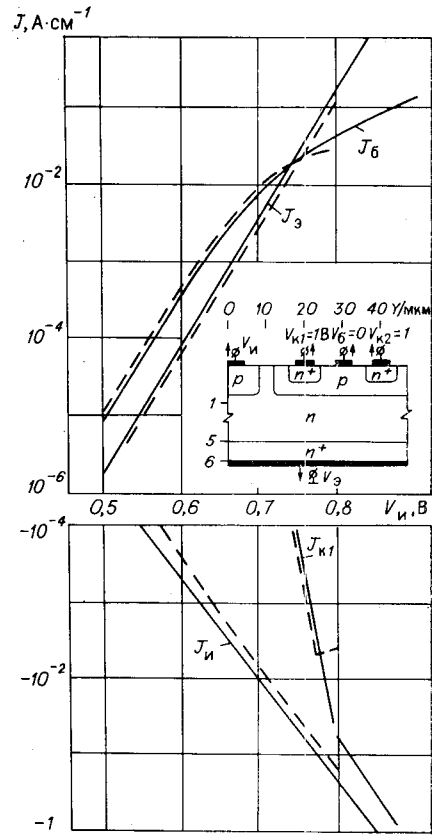


Рис. 3

больших вычислительных затрат, поскольку, как они утверждали, только он позволяет с достаточной точностью рассчитать малые токи (при напряжении на инжекторе в диапазоне 0,2—0,5 В). Представляет интерес проверка возможностей KFSM и с точки зрения расчета малых токов. На рис. 1 приведены вольт-амперные характеристики  $I_n(V_n)$  и  $I_э(V_n)$ , полученные с помощью KFSM (сплошные линии). В отличие от результатов работы [6] (штриховая линия) при низких напряжениях на инжекторе использование KFSM дает качественно верные результаты и, следовательно, позволяет исследовать микроэлектронные структуры при их работе в области слабых токов. На наш взгляд, негативные результаты расчета транзистора с инжекционным питанием при  $V_n < 0,5$  В, приведенные в [6], объясняются низкой точностью решения дискретизированных уравнений непрерывности на заключительных гуммельевских итерациях, хотя возможно влияние и других причин, в частности способа аппроксимации граничных условий. Удовлетворительно совпадает с экспериментальной и зависимость коэффициента усиления питающего  $p-n-p$ -транзистора от тока базы (эмиттера инжекционной структуры) (рис. 2). Наименьшая погрешность вычисленных  $\beta$  наблюдается при токах эмиттера  $10^{-10}$ — $10^{-7}$  А. Когда значение  $I_э$  превосходит 1 мкА, систематическая ошибка  $\Delta\beta \approx 1$ .

**Двухколлекторная инжекционная структура.** Своеобразие конструкторско-технологического решения, при котором два коллектора вертикального транзистора симметрично расположены относительно базового контакта (рис. 3), приводит к возникновению эффекта внутренней связи. Для этой структуры авторы располагали результатами численного моделирования, полученными с использованием комплекса «Альфа» [7] (их любезно предоставил Б. С. Польский). По этой причине профиль легирования, разностная сетка, основные электрофизические параметры

задавались такими же, как и при расчетах с использованием пакета «Альфа». Это позволяет сравнить вольт-амперные характеристики одной и той же транзисторной структуры, рассчитанные с помощью двух существенно разных программных комплексов, и таким образом определить степень адекватности результатов.

На рис. 3 сплошные линии представляют результаты, полученные с помощью комплекса KFSM, штриховые — «Альфа» (первый из них универсальный, второй — специализированный, ориентированный на биполярные структуры планарной технологии), которые достаточно близки. Заметное различие в токах  $J_{к1}$  и  $J_{б}$  при  $V_{н} > 0,775$  В объясняется недостаточной точностью

решения дискретизированных уравнений непрерывности в комплексе программ «Альфа». В обоих случаях при  $V_{н} > 0,75$  В начинает заметно расти ток первого коллектора. Нелогичное, на первый взгляд, поведение  $J_{к1}$  объясняется проявлением эффекта внутренней связи. Вследствие поперечного дырочного тока на высокоомном слое полупроводника базовой области  $p$ -типа происходит падение напряжения и потенциал эмиттерного перехода со стороны базы под первым коллектором оказывается положительным. При некотором потенциале инжектора он возрастает настолько, что происходит значительная инжекция электронов из области эмиттера, приводящая к возникновению коллекторного тока  $J_{к1}$ . Процессорное время, понадобившееся для расчета вольт-амперной характеристики (5 точек) с помощью KFSM, составило 162 мин ЭВМ ЕС1061, причем основные затраты пришлось на расчет двух последних точек, на каждой из которых выполнялось до пятидесяти внешних итераций.

**Короткоканальный МДП-транзистор.** При численном моделировании короткоканального МДП-транзистора (рис. 4) ставилась задача исследования влияния энергии и дозы легирования канала на пороговое напряжение транзистора с использованием экспериментально определенного распределения концентрации примеси в кармане  $p$ -типа. Примесный профиль в областях истока и стока аппроксимировался функцией Гаусса с максимумом концентрации, отстоящим от границы Si—SiO<sub>2</sub> на 0,05 мкм. Область подлегирования структуры формировалась на основе распределения Пирсон IV [8].

Методика проведения вычислительных экспериментов сводится к следующему. При энергии подлегирования 20, 40, 60 кэВ и дозах 0,05; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5 мкКл/см<sup>2</sup> рассчитывались вольт-амперные характеристики при напряжении на стоке 3 В (напряжение на затворе изменялось при этом от 0,4 до 2 В с шагом 0,2 В). Пороговое напряжение определялось по пересечению зависимости  $\sqrt{I_c}$  от  $V_g$  с осью абсцисс. При этом учитывалось напряжение плоских зон  $V_{FB} = -1,08$  В. Плотность поверхностных состояний в расчетах принималась равной  $10^{11}$  см<sup>-2</sup>. Так как током дырок в  $n$ -канальном приборе можно пренебречь, то решались только два уравнения: Пуассона и непрерывности для электронов.

Из рис. 4, на котором приведены зависимости порогового напряжения от дозы легирования при трех значениях энергии ионов, следует, что требуемая величина порогового напряжения (0,8 В) достигается при  $E = 20$  кэВ и дозе легирования 0,33 мкКл/см<sup>2</sup>. В заключение отметим, что время расчета одного варианта ВАХ (9 точек) для МДП-транзисто-

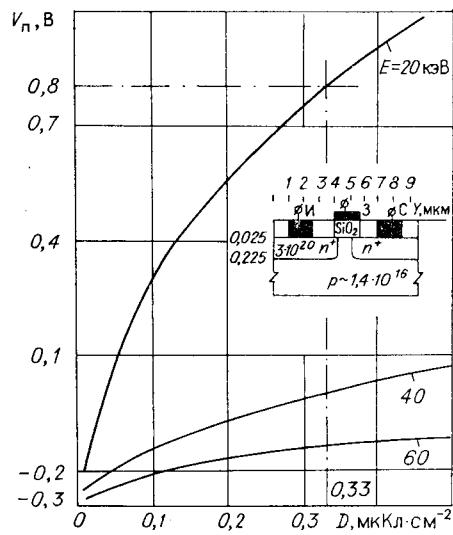


Рис. 4

ра с использованием сетки размерностью  $32 \times 53$  составляло в среднем 100 мин ЭВМ ЕС 1061.

Приведенные результаты применения программного комплекса KFSM показывают, что KFSM обеспечивает адекватность моделирования, обладает свойством универсальности по отношению к конфигурации моделируемых структур при приемлемых затратах машинного времени.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Мулярчик С. Г., Соловьев В. Г. Комплекс программ двумерного моделирования твердотельных микроэлектронных структур // Изв. вузов. Радиоэлектроника.— 1987.— Т. 30, № 6.
2. Seidman T. L., Choo S. C. Iterative scheme for computer simulation of semiconductor devices // Solid-State Electron.— 1972.— V. 15, N 10.— P. 1229.
3. Brown G. W., Lindsay B. W. The numerical solution of Poisson's equation for two-dimensional semiconductor devices // Solid-State Electron.— 1976.— V. 19, N 12.— P. 991.
4. Meijerink J. A., Van der Vorst H. A. An iterative solution method for linear systems of which the coefficient matrix is a symmetric M-matrix // Math. Comput.— 1977.— V. 31, N 137.— P. 148.
5. Stone H. L. Iterative solution of implicit approximations of multidimensional partial differential equations // SIAM J. Numer. Anal.— 1968.— V. 5, N 3.— P. 530.
6. Toyabe T., Ujii K., Okaba T. e. a. Method and application of two-dimensional analysis of  $P^2L$  // Trans. Inst. Electron. and Commun.— 1979.— V. 62-C, N 3.— P. 315.
7. Польский Б. С., Похвалина Л. С. Численное моделирование стационарных процессов в биполярных полупроводниковых приборах // Изв. вузов. Радиоэлектроника.— 1982.— Т. 25, № 3.
8. Буренков А. Ф., Комаров Ф. Ф., Кумахов М. А., Темкин М. М. Таблицы параметров пространственного распределения ионно-имплантированных примесей.— Минск: БГУ, 1980.

Поступила в редакцию 12 июня 1987 г.

УДК 621.315

В. И. КОЛЬДЯЕВ, О. Ю. ПЕНЗИН, О. Н. ШАХОВА

(Новосибирск)

### МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДОМ НЕПОДВИЖНОГО ЗАРЯДА ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕМЕНТОВ СБИС НА ОСНОВЕ МДП-ТРАНЗИСТОРОВ

**Введение.** Численное моделирование электронных процессов для анализа и проектирования элементов СБИС широко используется на практике [1—3]. Уменьшение размеров элементов СБИС на основе МДП-структур ведет к усложнению происходящих в них электрофизических процессов, что создает объективные предпосылки для все более широкого использования моделирования. В основе методов моделирования основных характеристик современных кремниевых СБИС лежит численное решение так называемой фундаментальной системы уравнений (ФСУ) с граничными и начальными условиями, отражающими специфику конкретной полупроводниковой структуры [4]. ФСУ включает уравнения непрерывности для потоков электронов и дырок, уравнение Пуассона для потенциала и дополнительные два уравнения, описывающие диффузионную и дрейфовую компоненты потоков. Численное моделирование элементов СБИС на основе ФСУ позволяет решить следующие классы задач:

1) определение функциональных характеристик активных элементов СБИС, на основе которых создается СБИС (например, вольт-амперные характеристики (ВАХ), проходные и выходные характеристики для