

# ДВУХМЕРНОЕ ПРИБОРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО БИПОЛЯРНОГО *pnp*-ТРАНЗИСТОРА

А.Еременко, Н.Зайцев,  
А.Новоселов, И.Романов

**Выгоды от создания математической модели устройства или процесса очевидны. С помощью модели можно теоретически исследовать поведение объекта. Такой метод дешевле, быстрее и безопаснее экспериментальных исследований, не требует затрат на материалы и измерительное оборудование. С помощью математических моделей проще находить оптимальные параметры конструкции и технологические режимы для достижения требуемых свойств объекта. Но достоверность и полнота полученных результатов зависят от качества модели.**

Как правило, математические модели строятся на основе математического описания физических свойств и явлений объекта и его элементов. Иногда это просто формула, характеризующая определенную зависимость выходных воздействий системы от ее входных воздействий и свойств. Для некоторых объектов модель представляет собой систему интегро-дифференциальных уравнений, которая решается численными методами при помощи компьютера. В последнее время широко используются модели "черного ящика", в которых объект представляет собой "черный ящик" с входными и выходными параметрами. Связь между этими параметрами (связи внутри "черного ящика", представляющие собой линейные или нелинейные зависимости) настраивается по экспериментальным данным.

В отсутствие моделей сложных объектов для описания поведения этих объектов широко используется метод анализа конечных элементов. Он заключается в том, что внутри объекта строится сетка (одно-, двух- или трехмерная – в зависимости от исследуемого объекта), а в каждой ее точке записывается система уравнений (определяющая поведение и свойства системы в данной точке). Затем система уравнений решается в точке с учетом решений в соседних точках. Этот процесс имеет итерационный характер и выполняется с помощью компьютера. Существует ряд фирм, которые занимаются разработкой программ и моделей отдельных физических свойств, позволяющих проводить моделирование поведения объектов методом конечных элементов. К ним относятся и фирмы, разрабатывающие программы для моделирования технологии изготовления и электрических характеристик полупроводниковых приборов, например Avant [1], ISE AG [2] и другие. Стоимость таких программ – от десятков до сотен тысяч долларов США. Практически все ведущие фирмы по изготовлению полупроводниковых приборов либо имеют такие программы, либо пользуются услугами фирм, которые располагают подобными программами.

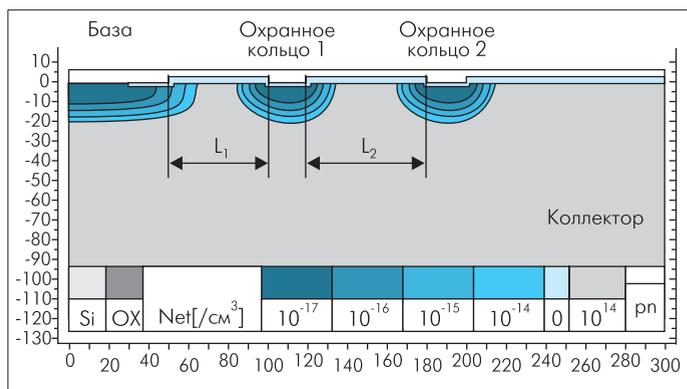
Программы для моделирования достаточно широко используются в микроэлектронике для исследования функционирования различных полупроводниковых приборов – от дискретных высоковольтных транзисторов [3] до одноэлектронных транзисторов [4]. Решаемые с по-

мощью моделирования задачи также очень разнообразны. Это и оптимизация конструкции и технологии полупроводниковых приборов [5], и исследования отдельных физических эффектов [6] и отдельных узлов технологического маршрута [7], и многое другое [8–10]. Использование моделирования продиктовано рядом обстоятельств. Во-первых, существенно экономится время и материальные ресурсы. Во-вторых, исследования можно проводить в более полном объеме. В-третьих, результаты моделирования могут предоставить информацию, которую трудно или невозможно получить с помощью измерительного оборудования. Все это положительно сказывается на проведении необходимых исследований.

В данной работе представлены результаты оптимизации конструкции биполярного *pnp*-транзистора с целью получения максимального пробивного напряжения база-коллектор без изменения технологии изготовления. Для увеличения пробивного напряжения использовались два охранных кольца. Оптимизация проводилась с использованием двухмерного приборно-технологического моделирования.

**Оптимизация конструкции.** Для высоковольтных биполярных транзисторов напряжение пробоя *p**n*-перехода база-коллектор определяется распределением напряженности электрического поля вблизи боковой части перехода. Распределение этой величины вблизи боковой части *p**n*-перехода и ее максимум определяются прикладываемым к *p**n*-переходу напряжением, кривизной линии *p**n*-перехода и концентрацией примеси с обеих сторон от *p**n*-перехода. При прочих одинаковых технологических параметрах для увеличения напряжения первичного пробоя можно использовать охранные кольца вблизи края *p**n*-перехода база-коллектор [11]. Наличие охранных колец приводит к изменению распределения напряженности электрического поля и значения его максимальной напряженности, что изменяет значение напряжения первичного пробоя. Причем расположение охранных колец достаточно сильно влияет на напряжение пробоя.

Моделирование зависимости тока коллектора от напряжения на коллекторе для *p**n*-перехода база-коллектор (с целью определения пробивного напряжения база-коллектор) предварялось двухмерным моделированием технологии изготовления биполярного *pnp*-транзистора. Для расчета профилей бора и фосфора использовалась модель диффузии примесей с явным учетом влияния точечных дефектов (вакансий и междоузельных атомов кремния). Расчет диффузии примесей проводился как в кремнии, так и в SiO<sub>2</sub>, что позволяло более точно учитывать сегрегацию примесей на границе раздела. При моделировании термических операций учитывались время нагрева и остывания, а также суммарные расходы и парциальные давления газов при отжигах в окисляющей или смешанной газовых средах. Полученная структура для расчета пробивного напряжения представлена на рис. 1. Толщина эпитаксиального слоя составляет 120 мкм, глубина залегания *p**n*-перехода база-коллектор – 20 мкм.



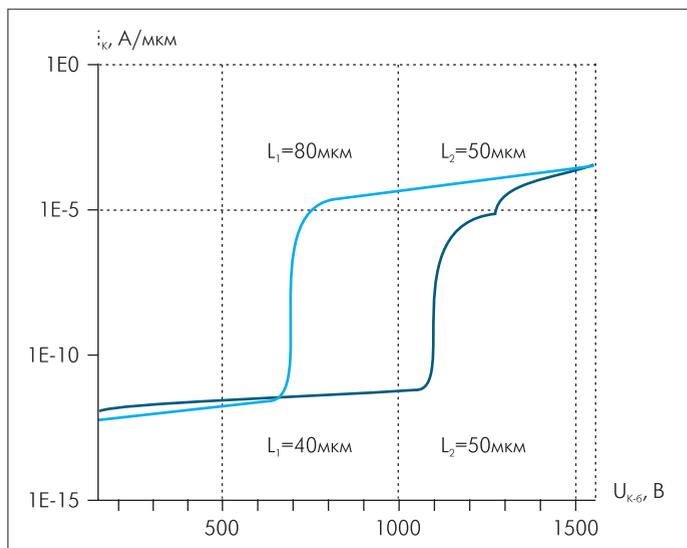
**Рис.1. Физическая структура для моделирования пробивного напряжения**

Исследовалось влияние расположения охранных колец относительно базы на напряжение пробоя  $p\bar{n}$ -перехода база-коллектор. Работа по моделированию была разбита на два этапа: 1) определение оптимального положения первого охранных колец относительно базы  $L_1$  (при расстоянии между первым и вторым охранными кольцами  $L_2=50$  мкм); 2) определение оптимального положения второго охранных колец относительно первого охранных колец  $L_2$  (при расстоянии между первым охранным кольцом и базой, равном оптимальному). Для каждой структуры (с разными  $L_1$  и  $L_2$ ) проводился расчет зависимости тока коллектора от обратного смещения напряжения на коллекторе. По этим характеристикам определялось пробивное напряжение база-коллектор.

Для моделирования электрических характеристик использовалась дрейфово-диффузионная модель, которая решает уравнение Пуассона и два уравнения непрерывности для электронов и дырок. При этом учитывалась зависимость собственной концентрации носителей, подвижности и процессов генерации-рекомбинации от концентрации примеси, температуры, ширины запрещенной зоны и электрического поля.

Промоделированные зависимости тока коллектора от напряжения на нем для двух структур с разными  $L_1$  приведены на рис. 2.

Как видно из рисунка, у  $p\bar{n}$ -перехода наблюдается два пробоя. Первый связан с пробоем в области боковой части перехода база-коллектор. Он происходит при более низких напряжениях и зависит от положения охранных колец. Второй пробой связан с пробоем в донной части перехода база-коллектор. Он имеет место при более высо-



**Рис.2. Зависимость тока коллектора от напряжения на нем**

**Таблица 1**

$L_1$ , мкм	100	90	80	70	65	60	55	50	40
$U_{проб}$ , В	660	680	700	750	800	900	1020	1140	1090

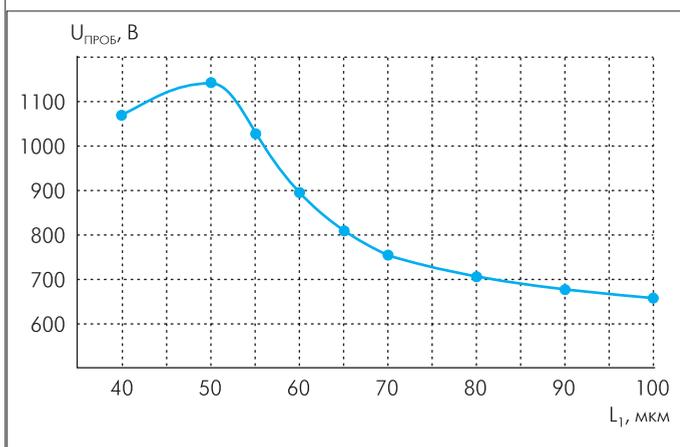
**Таблица 2**

$L_2$ , мкм	40	50	55	60	65
$U_{проб}$ , В	1060	1140	1150	1160	1123

ких напряжениях и не зависит от положения охранных колец. Зависимости напряжения первого пробоя от  $L_1$  при фиксированном  $L_2=50$  мкм и от  $L_2$  при фиксированном  $L_1=50$  мкм (оптимальном) приведены в табл. 1 и 2 и на рис. 3 и 4. Обе зависимости имеют характерные максимумы, по которым можно определить оптимальное расположение охранных колец.

На рис. 5а-в приведены сравнительные распределения напряженности электрического поля при разных напряжениях на коллекторе для структур с  $L_2=50$  мкм и  $L_1=70$  мкм и 50 мкм.

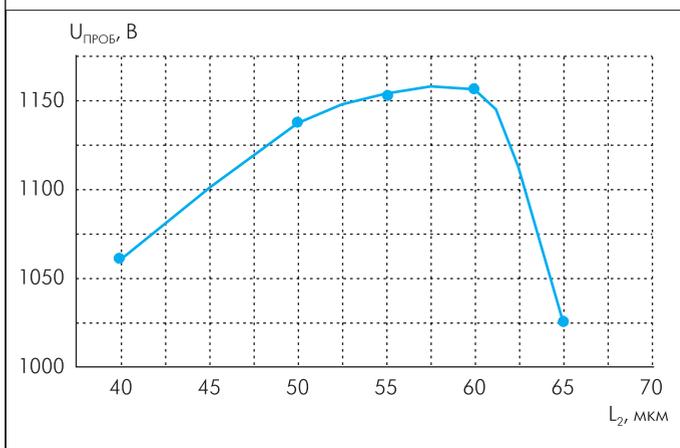
Изменение положения охранных колец приводит к изменению распределения напряженности электрического поля вблизи перехода ба-



**Рис.3. Зависимость пробивного напряжения  $p\bar{n}$ -перехода база-коллектор от  $L_1$  ( $L_2=50$  мкм)**

за-коллектор и, соответственно, к изменению пробивного напряжения. Из рис. 5а-в видно, что на оптимальной структуре ( $L_1=50$  мкм) напряженность электрического поля распределена на большем пространстве и максимальная напряженность у перехода база-коллектор меньше по сравнению с неоптимальной структурой ( $L_1=70$  мкм).

Измеренные напряжения пробоя база-коллектор на рабочих образцах составили от 1100 до 1200 В, что хорошо согласуется с результатами моделирования.



**Рис.4. Зависимость пробивного напряжения  $p\bar{n}$ -перехода база-коллектор от  $L_2$  ( $L_1=50$  мкм)**

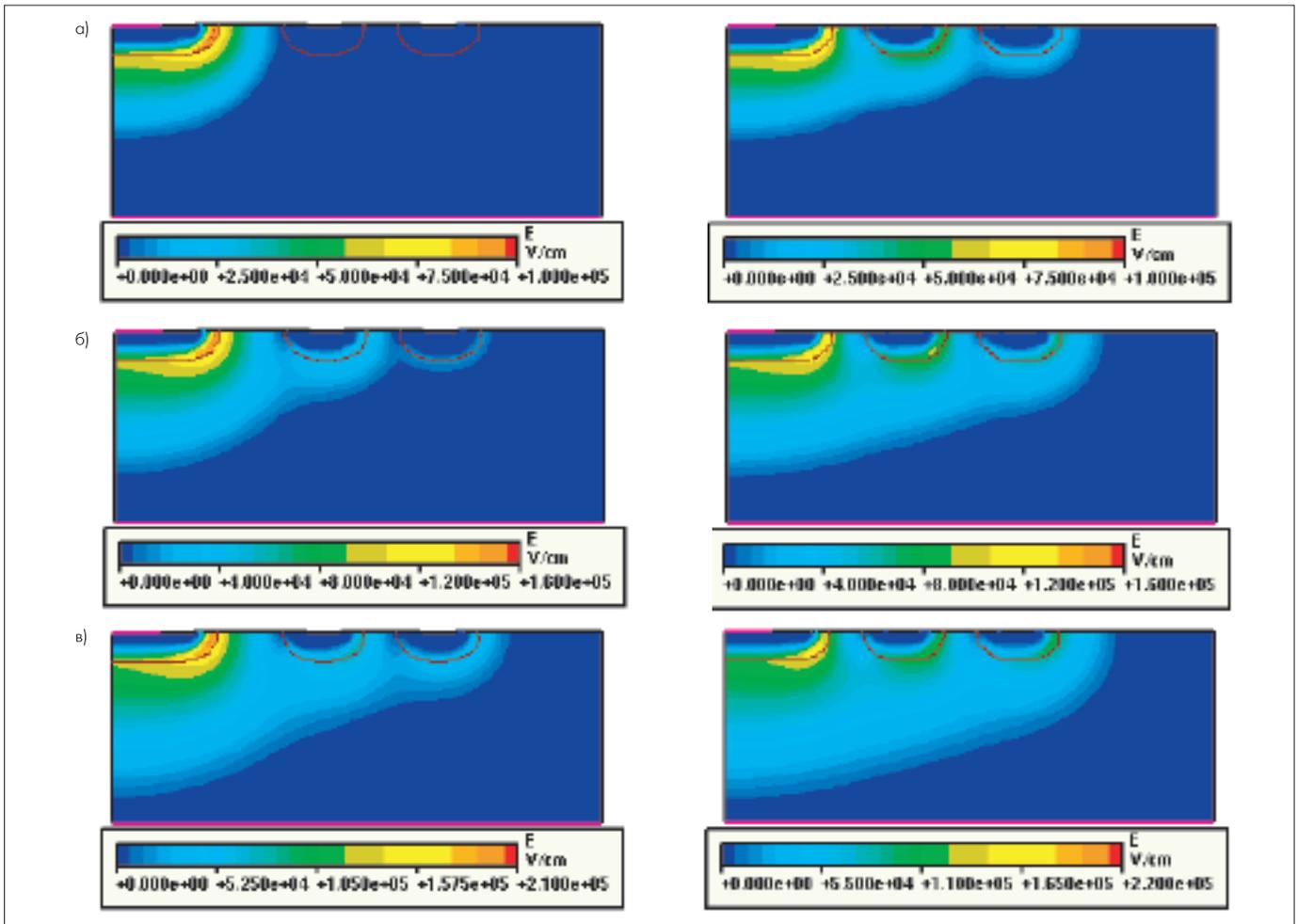


Рис.5. Распределение напряженности электрического поля при различных напряжениях на коллекторе: а) 200 В; б) 400 В; в) 600 В

**Заключение.** В результате проведения моделирования были определены зависимости пробивного напряжения от расстояния между первым охранным кольцом и базой, а также зависимость пробивного напряжения от расстояния между двумя охранными кольцами (при расстоянии между первым охранным кольцом и базой, равном оптимальному). Из полученных зависимостей можно определить конструкцию высоковольтного биполярного *pn*-транзистора, которая будет иметь максимальное напряжение пробоя *pn*-перехода база-коллектор при имеющемся наборе технологических параметров. При изменении этих параметров (концентрации примеси в эпитаксиальном слое и глубины *pn*-перехода база-коллектор) будут изменяться и оптимальные размеры конструкции. Проведенные эксперименты подтвердили правильность результатов моделирования. При этом не потребовалось исследовать влияние конструктивных параметров биполярного транзистора на напряжение пробоя база-коллектор на экспериментальных партиях, что сэкономило время и затраты на изготовление фотошаблонов и опытных образцов.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Star-HSPICE, Avant! Corp., Fremont, CA, <http://www.avantcorp.com>
2. <http://www.ise.com>
3. Trivedi M., Khandelwal P., Shenai K. Performance modeling of RF Power MOSFET's. – Transaction on Electron Devices, 1999, vol. 46, №8, p.1794 – 1802.
4. Scholze A., Schenk A., Fichtner W. Single-electron device simulation. – Transaction on Electron Devices, 2000, vol. 47, №10, p.1811 – 1818.

5. Zhou X., Lim K.Y., Lim D. A general approach to compact threshold voltage formulation based on 2-D numerical simulation and experimental correlation for deep-submicron ULSI technology development. – Transaction on Electron Devices, 2000, vol. 47, №1, p. 214 – 221.
6. Workman G.O., Fossum J.G. Physical noise modeling of SOI MOSFET with analysis of the lorentzian component in the low-frequency noise spectrum. – Transaction on Electron Devices, 2000, vol. 47, №6, p. 1192 – 1201.
7. Pomp A., Zelenka S., Strecker N., Fichtner W. Viscoelastic material behavior: modeling and discretization used in process simulator DIOS. – Transaction on Electron Devices, 2000, vol. 47, №10, p. 1999 – 2007.
8. Goo J.S., Choi C.H., Danneville F. et al. An accurate and efficient high frequency noise simulation technique for deep submicron MOSFETs. – Transaction on Electron Devices, 2000, vol. 47, №12, p. 2410 – 2219.
9. Mudanai S., Fan Y.Y., Ouyang Q., Tasch A.F., Banerjee S.K. Modeling of direct tunneling current through gate dielectric stacks. – Transaction on Electron Devices, 2000 vol. 47, №10, p.1851 – 1857.
10. Wang A.W., Saraswat K.C. A strategy for modeling of variations due to grain size in polycrystalline thin-film transistor. – Transaction on Electron Devices, 2000, vol. 47, №5, p. 1035 – 1043.
11. Johnson M.K., Annis A.D., Sandoe J., Coe D. An analysis of the dynamic behavior of field-limiting ring-passivation systems. – Transaction on Electron Devices, 1989, vol. 36, №6, p. 1203 – 1211.