

Приборно-технологическое моделирование элементов интегральной электроники с повышенной стойкостью к внешним воздействиям

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

Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

Device-Technological Modeling of Integrated Circuit Electronics Elements with Improved Endurance to External Influences

Y.A. Chaplygin, T.Y. Krupkina, A.Y. Krasukov, E.A. Artamonova

National Research University of Electronic Technology, Moscow

Проведен анализ особенностей использования средств приборно-технологического моделирования для расчета электрических характеристик элементов интегральных схем в условиях различных внешних воздействий. Выявлены особенности моделей, оказывающие наиболее сильное влияние на результаты моделирования.

Ключевые слова: приборно-технологическое моделирование; саморазогрев; лавинный пробой; накопленная радиация; сужение запрещенной зоны.

The process and device simulation tools features have been analyzed. The tools have been analyzed applied to the calculation of electrical characteristics for various integrated circuit devices, operating in different external conditions. The model features having the maximum effect on the simulation results have been revealed.

Keywords: process and device simulation; model features; self-heating; avalanche breakdown; total dose effects.

Введение. Работа элементов интегральной электроники существенно зависит от внешних факторов – температуры, электрического поля, радиации.

Повышение температуры среды приводит к уменьшению тока таких элементов интегральной электроники, как МДП-транзисторы, а также к увеличению тока биполярных транзисторов. В элементах силовой электроники, КНИ-транзисторах, влияние температуры проявляется в виде эффекта саморазогрева, который может привести к разрушению прибора [1].

Рост электрического поля в МДП-транзисторах приводит к насыщению дрейфовой скорости носителей и уменьшению тока прибора. Электрическое поле вызывает лавинный пробой $p-n$ -переходов в обратном включении, что важно для элементов интегральной силовой электроники, например планарных силовых транзисторов для интеллектуальных силовых ИС.

При радиационном воздействии в элементах интегральной электроники происходит накопление избыточного и неравновесного заряда, который нарушает функциони-

рование прибора [2]. При длительном радиационном воздействии на ловушках в SiO₂ накапливается положительный заряд, вызывающий образование встроенного канала и увеличение тока утечки прибора. Примером такого воздействия может служить накопление положительного заряда в толстом слое скрытого оксида для КНИ-МОП-транзисторов, вызывающее возникновение паразитного канала на границе Si/SiO₂ и увеличение тока стока прибора.

В настоящей работе проведен анализ особенностей использования средств приборно-технологического моделирования для расчета электрических характеристик элементов интегральных схем в условиях различных внешних воздействий.

Моделирование эффекта саморазогрева. Рассмотрим особенности моделирования эффекта саморазогрева. Для описания работы полупроводникового прибора используется базовая система дифференциальных уравнений, известная как диффузионно-дрейфовая модель, состоящая из трех уравнений: Пуассона для расчета потенциала, уравнений непрерывности для электронов и дырок. Для учета эффекта саморазогрева в диффузионно-дрейфовую модель следует добавить уравнение теплопроводности и задать граничные условия для температуры. Однако в данном случае возникают проблемы с адекватностью результатов моделирования. При саморазогреве транзистора температура распределяется далеко за границы области двумерной модели, распределение температуры может иметь трех-, а не двумерный характер, максимальная температура может зависеть от размеров всего кристалла микросхемы, а также его топологии, длины металлических межсоединений.

Для упрощения задачи в [3] предложено использовать внешние тепловые сопротивления, моделирующие кристалл, окружающий транзистор. Тогда можно использовать традиционную двумерную модель транзистора с введенными внешними тепловыми сопротивлениями

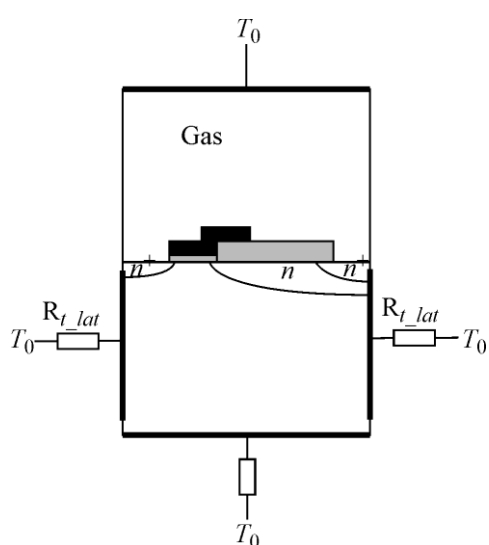


Рис. 1. Двухмерная модель планарного силового *n*-МОП-транзистора для расчета характеристик прибора с учетом эффекта саморазогрева

подложки $R_{t,bot}$, левой и правой границы $R_{t,lat}$, как показано на рис.1. Температура окружающей среды ($T_0 = 300$ К) задается на внешних выводах введенных тепловых сопротивлений. Над самим транзистором рекомендуется создать область окружающей среды (Gas), в которой также будет решаться уравнение теплопроводности. Оценим внешнее тепловое сопротивление подложки толщиной $H = 500$ мкм и теплопроводностью $k = 1$ Вт/(см·К): $R_{t,bot} = H/k = 0,05$ К·см²/Вт.

Для оценки влияния температурных граничных условий проведен расчет выходных ВАХ планарного силового МОП-транзистора для интеллектуальных силовых ИС (см. рис.1). На рис.2 показаны зависимости максимального тока стока и максимальной температуры транзистора от внешнего теплового сопротивления подложки и теплоотвода с боковых границ двумерной модели.

Моделирование влияния электрического поля. Рассмотрим влияние моделей переноса, электрического поля, а также моделей лавинной генерации на ВАХ закрытого КНИ-*n*-МОП-транзистора с длиной канала $L = 0,35$ мкм. Будем считать, что транзистор не имеет контакта к тонкой подложке. Результаты расчета ВАХ при использова-

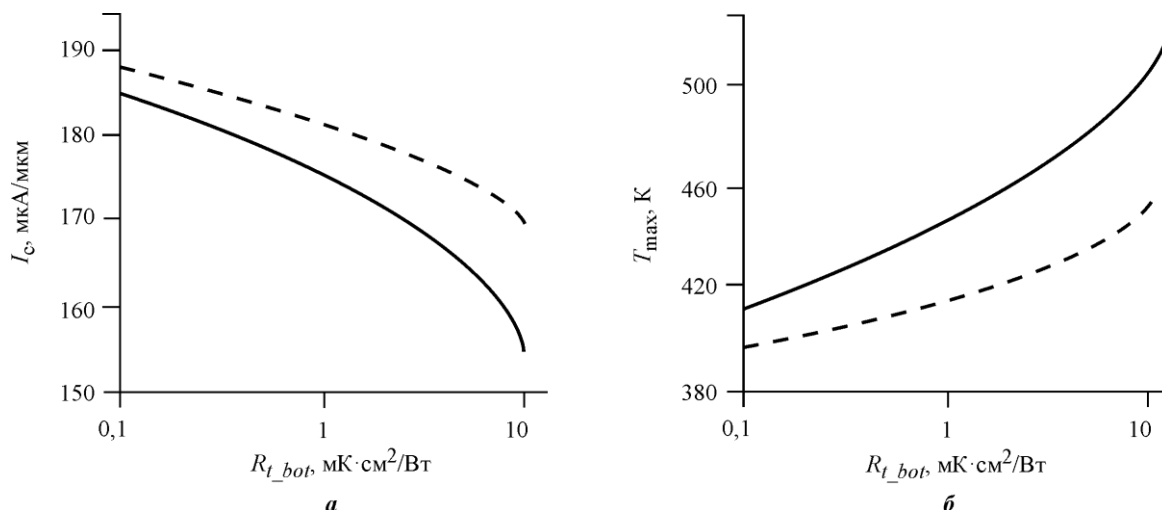


Рис.2. Зависимости максимального тока стока (а) и максимальной температуры T_{max} (б) силового транзистора от внешнего теплового сопротивления подложки R_{t_bot} : - - - теплоотвод через левую и правую границы прибора; — теплоотвод только через левую границу прибора

нии гидродинамической модели для электронов и двух моделей лавинной генерации (Van Overstraeten – De Man [4], Okuto – Crowell [5]) показаны на рис.3. В табл.1 и 2 приведены зависимости пробивного напряжения КНИ-*n*-МОП-транзистора и тока включения паразитного биполярного транзистора от типа модели лавинной генерации и модели переноса, представляющие собой системы из нескольких уравнений: диффузионно-дрейфовой модели (ДДМ) – 3 уравнения; гидродинамической модели для электронов (ГД1) – 4 уравнения; гидродинамической модели для электронов и дырок (ГД2) – 5 уравнений.

Таблица 1

Зависимость пробивного напряжения КНИ-*n*-МОП-транзистора $U_{проб}$, В, от типа моделей переноса и лавинной генерации

Модель лавинной генерации	ДДМ	ГД1	ГД2
Van Overstraeten – De Man [4]	5,4	6,8	7,2
Okuto – Crowell [5]	4,2	8	9,6
Lackner [6]	5,4	9	11
UniBo [7]	5,3	9	11

Таблица 2

Зависимость тока включения паразитного биполярного транзистора $I_{вкл}$, 10^{-14} А/мкм, от типа моделей переноса и лавинной генерации

Модель лавинной генерации	ДДМ	ГД1	ГД2
Van Overstraeten – De Man [4]	1,4	2,5	2,1
Okuto – Crowell [5]	1,3	4,5	3
Lackner [6]	1,75	4,6	3,6
UniBo [7]	1,6	4,1	4

Моделирование эффекта накопленной радиации. Рассмотрим особенности моделирования эффекта накопленной радиации. При облучении заряд накапливается в подзатворном и скрытом оксидах. Предполагается, что в диэлектриках нет зарядов. Для моделирования эффекта накопления заряда диэлектрик представляется в качестве по-

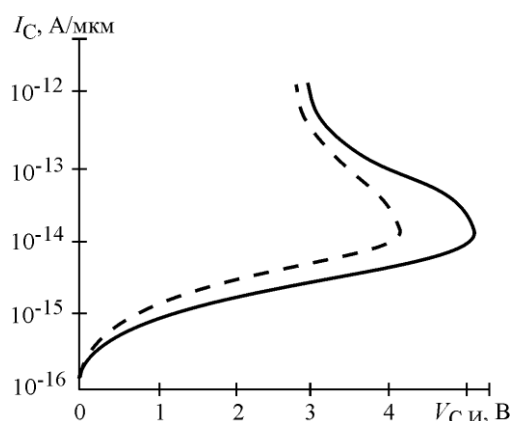


Рис.3. ВАХ транзистора с длиной канала $L = 0,35$ мкм (ДДМ с учетом различных моделей генерации и наличия контакта к подложке): - - - модель Okuto – Crowell; — модель Van Overstaeten – De Man

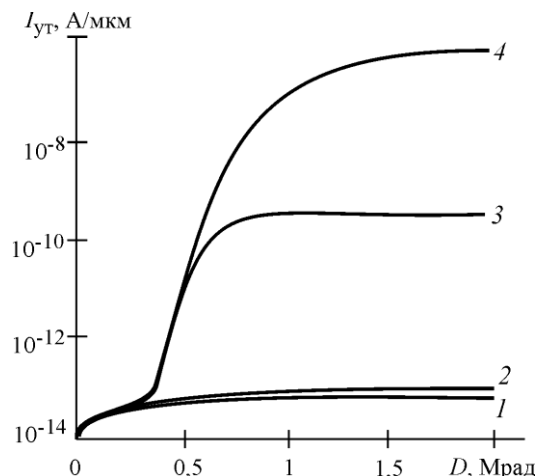


Рис.4. Зависимость тока утечки $I_{ут}$ от дозы облучения D и концентрации ловушек N_t для закрытого КНИ- n -МОП-транзистора с длиной канала $L = 0,35$ мкм: 1 – $N_t = 10^{17}$ см $^{-3}$; 2 – $N_t = 10^{18}$ см $^{-3}$; 3 – $N_t = 2 \cdot 10^{18}$ см $^{-3}$; 4 – $N_t = 3 \cdot 10^{17}$ см $^{-3}$

лупроводника с широкой запрещенной зоной (как у оксида кремния). В диэлектрике задается распределение нейтральных ловушек заряда и подвижность носителей. Важным параметром модели является максимальная концентрация ловушек N_t в диэлектрике [8]. Рассмотрим влияние N_t на ток утечки $I_{ут}$ закрытого КНИ- n -МОП-транзистора при напряжении сток-исток $V_{C,И} = 5$ В. Зависимость тока утечки от дозы облучения и концентрации ловушек показана на рис.4.

Моделирование эффекта сужения запрещенной зоны. Рассмотрим влияние моделей, учитывающих сужение запрещенной зоны кремния, на коэффициент усиления n - p - n -биполярного транзистора. Эпитаксиально-планарные биполярные транзисторы широко используются в качестве усилителей тока. Важным параметром приборов является коэффициент усиления тока β . При моделировании на расчетное значение β существенно влияет эффект сужения ширины запрещенной зоны кремния (Band Gap Narrowing BGN) вследствие сильного легирования эмиттера транзистора. По умолчанию в TCAD используется статистика Больцмана и эффект BGN описывается полуэмпирическими моделями зависимости ширины запрещенной зоны от концентрации примеси в кремнии, а именно моделями Bennet-Wilson [9] (задана по умолчанию), Slotboom [10], Alamo [11], Jain-Roulston [12]. Следует отметить, что сильнолегированный эмиттер является вырожденным и для него необходимо использовать статистику Ферми – Дирака вместо статистики Больцмана. Для сравнения влияния различных моделей BGN на рис.5 представлены зависимости

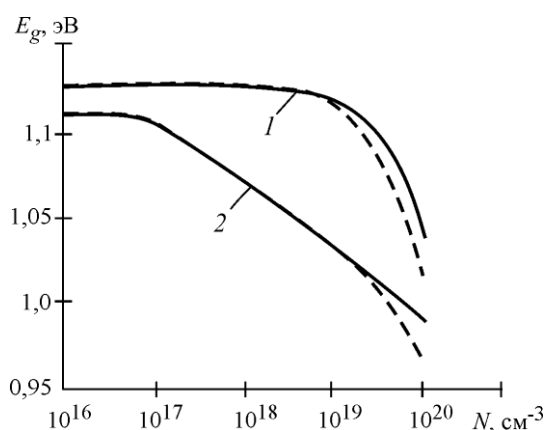


Рис.5. Зависимость ширины запрещенной зоны E_g от концентрации донорной примеси N с учетом статистики Ферми – Дирака и различных BGN-моделей: 1 – модель Bennet – Wilson; 2 – модель Slotboom; — статистика Ферми – Дирака без учета BGN-моделей; - - - статистика Ферми – Дирака с учетом BGN-моделей

коэффициент усиления тока β . При моделировании на расчетное значение β существенно влияет эффект сужения ширины запрещенной зоны кремния (Band Gap Narrowing BGN) вследствие сильного легирования эмиттера транзистора. По умолчанию в TCAD используется статистика Больцмана и эффект BGN описывается полуэмпирическими моделями зависимости ширины запрещенной зоны от концентрации примеси в кремнии, а именно моделями Bennet-Wilson [9] (задана по умолчанию), Slotboom [10], Alamo [11], Jain-Roulston [12]. Следует отметить, что сильнолегированный эмиттер является вырожденным и для него необходимо использовать статистику Ферми – Дирака вместо статистики Больцмана. Для сравнения влияния различных моделей BGN на рис.5 представлены зависимости

ширины запрещенной зоны кремния от концентрации примеси N , рассчитанные с использованием моделей Bennet-Wilson и Slotboom.

В табл.3 приведены результаты расчета коэффициента усиления тока β n - p - n -транзистора для различных моделей.

Таблица 3

Влияние модели BGN на коэффициент усиления тока β транзистора

Модель BGN	Статистика	
	Ферми – Дирака	Больцмана
Без учета модели	1106	1013
Slotboom	195	197
Bennet – Wilson	577	583
Alamo	233	237
Jain – Roulston	261	264

Заключение. На результаты моделирования эффекта саморазогрева существенное влияние оказывает выбор граничных условий в виде внешних тепловых сопротивлений. При моделировании эффекта пробоя модели переноса и лавинной генерации влияют на пробольшее напряжение КНИ- n -МОП-транзистора. При моделировании радиационного воздействия ток утечки КНИ- n -МОП-транзистора существенно зависит от концентрации ловушек в скрытом оксиде прибора. При моделировании характеристик биполярного транзистора для корректного расчета коэффициента усиления биполярного транзистора можно использовать статистику Больцмана с заданной моделью сужения запрещенной зоны.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 14.581.21.000.7 от 3.10.2014 г.).

Литература

1. *Beppy N., Oda S., Uchida K.* Experimental study of self-heating effect (SHE) in SOI MOSFETs: Accurate understanding of temperatures during AC conductance measurement, proposals of 2ω method and modified pulsed IV // Electron Devices Meeting (December 2012). – 2012. – P. 28.2.1 – 28.2.4.
2. *Raskin J.-P.* SOI substrates for more than Moore roadmap // 8th International Caribbean Conference on Devices, Circuits and Systems (14–17 March 2012). – 2012. – P. 1–4.
3. *Wachutka G. K.* Rigorous thermodynamic treatment of heat generation and conduction in semiconductor device modeling // IEEE Transactions on Computer-Aided Design. – 1990. – Vol. 9. – N. 11. – P. 1141–1149.
4. *Van Overstraeten R., De Man H.* Measurement of the ionization rates in diffused silicon p-n junctions // Solid-State Electronics. – 1970. – Vol. 13. – N. 1. – P. 583–608.
5. *Okuto Y., Crowell C. R.* Threshold energy effect on avalanche breakdown voltage in semiconductor junctions // Solid-State Electronics. – 1975. – Vol. 18. – N. 2. – P. 161–168.
6. *Lackner T.* Avalanche multiplication in semiconductors: a modification of Chynoweth's law // Solid-State Electronics. – 1991. – Vol. 34. – N. 1. – P. 33–42.
7. Experimental extraction of the electron impact-ionization coefficient at large operating temperatures / *S. Reggiani, E. Gnani, M.Rudan et al.* // IEDM Technical Digest. – San Francisco. – CA, USA. – 2004. – December. – P. 407–410.
8. Two-dimensional simulation of total dose effect on NMOSFET with lateral parasitic transistor / *C. Brisset, O. Flament, J. Leray et al.* // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 1996. – Vol. 43. – N. 6. – P. 2651–2658.
9. *Bennett H. S., Wilson C. L.* Statistical comparisons of data on band-gap narrowing in heavily doped silicon: Electrical and optical measurements / J. of Applied Physics. – 1984. – Vol. 55. – N. 10. – P. 3582–3587.
10. *Slotboom J.W., Graaff H.C.* Measurements of bandgap narrowing in Si bipolar transistors // Solid-State Electronics. – 1976. – Vol. 19. – N. 10. – P. 857–862.

11. *Alamo J., Swirhun S., Swanson R. M.* Simultaneous measurement of Hole lifetime, Hole mobility and bandgap narrowing in heavily doped n-type silicon // IEDM Technical Digest. – 1985. – December. – P. 290–293.

12. *Jain S. C., Roulston D. J.* A simple expression for band gap narrowing in heavily doped Si, Ge, GaAs and $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ strained layers // Solid-State Electronics. – 1991. – Vol. 34. – N. 5. – P. 453–465.

Статья поступила
14 декабря 2015 г.

Чаплыгин Юрий Александрович – член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой интегральной электроники и микросистем (ИЭМС) МИЭТ, ректор МИЭТ. *Область научных интересов:* микро- и наноэлектроника, микро- и наносистемная техника, нанотехнология.

Крупкина Татьяна Юрьевна – доктор технических наук, профессор кафедры ИЭМС МИЭТ. *Область научных интересов:* моделирование технологических процессов и интегральных приборов, методы проектирования интегральной элементной базы и микросистем.

Красюков Антон Юрьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры ИЭМС МИЭТ. *Область научных интересов:* численное моделирование элементов интегральных схем. **E-mail:** a_kras@org.miet.ru

Артамонова Евгения Анатольевна – кандидат технических наук, доцент кафедры ИЭМС МИЭТ. *Область научных интересов:* приборно-технологическое моделирование элементов интегральных схем.

Информация для читателей журнала «Известия высших учебных заведений. Электроника»

С тематическими указателями статей за 1996 - 2015 гг., аннотациями и содержанием последних номеров на русском и английском языках можно ознакомиться на нашем сайте:

<http://www.miet.ru>