

Muradian Genrik Vaganovich – e-mail: muradian@kcsr.kiae.ru; phone: +74991967670; Institute of General and Nuclear Physics; neutron physics laboratory; head of laboratory; dr. of phis.-math. sc.

Yakovlev Genrikh Vasilyevich – e-mail: Yakovlev_GV@nrcki.ru; phone: +74991967265; advisor to the director of the center; cand. of eng. sc.; senior researcher.

Bondur Valery Grigoryevich – Research Institute for Aerospace Monitoring “Aerocosmos”; e-mail: vgbondur@aerocosmos.info; 4, Gorokhovskij, Moskow, 105064, Russia; phone: +74956321654; director; academician of Russian Academy of Sciences; dr. of eng. sc.; professor.

Makarov Victor Aleksandrovich – e-mail: ultramaker@rambler.ru; phone: +74956321654; division of prompt monitoring; research scientist; cand. of eng. sc.

Murynin Alexander Borisovich – e-mail: AMurynin@bk.ru; phone: +79266902722; Dorodnicyn computing centre of RAS; senior researcher; cand. of eng. sc.

УДК 621.382.3

К.О. Петросянц, М.В. Кожухов, Д.А. Попов, Е.В. Орехов

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ, ВСТРОЕННЫЕ В СИСТЕМУ TCAD,
ДЛЯ УЧЕТА ВЛИЯНИЯ ГАММА- И НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
НА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ**

В работе представлены математические модели для учета влияния поглощенной дозы гамма-излучения и интегрального потока нейтронов на характеристики субмикронных транзисторов. Описана процедура встраивания моделей в систему приборно-технологического моделирования Synopsys TCAD. Рассчитаны следующие зависимости: 1) сток-затворные характеристики для верхнего и нижнего затворов и ток утечки МОП-транзистора с длиной затвора 90 нм, изготовленного по технологии кремний на изоляторе, для различных поглощенных доз гамма-излучения; 2) фактор повреждений от интегрального потока нейтронов для гетеропереходного биполярного транзистора, выполненного по 0,13 мкм технологии кремний-германий.

Приборно-технологическое моделирование; поглощенная доза; гамма-излучение; интегральный поток нейтронов; МОП-транзистор; гетеропереходный биполярный транзистор.

K.O. Petrosyants, M.V. Kozhukhov, D.A. Popov, E.V. Orekhov

**MATHEMATICAL MODELS EMBEDDED INTO TCAD TO ACCOUNT FOR
GAMMA- AND NEUTRON RADIATION EFFECTS ON SEMICONDUCTOR
DEVICES**

Mathematical models to account for the influence of total dose of gamma radiation and the neutron fluence on the characteristics of submicron transistors is presented in the paper. The procedure of models embedding to the Synopsys TCAD software is described. Simulation of the following dependencies: 1) drain current versus front and back gate voltage and leakage current of the MOS transistor with 90 nm gate length, fabricated on silicon on insulator technology, for different total doses of gamma radiation; 2) damage factor versus neutron fluence for the heterojunction bipolar transistor, fabricated on 0,13-micron silicon germanium technology is performed.

TCAD; total dose; gamma irradiation; neutron fluence; MOS transistor; heterojunction bipolar transistor.

Введение. Система TCAD (Technology Computer-Aided Design) широко используется для моделирования полупроводниковых приборов и элементов больших интегральных схем (БИС), производимых по различным технологиям [1]. Математической основой данной системы является численное решение фундамен-

тальной системы уравнений физики полупроводниковых приборов. Учитываются различные механизмы переноса носителей заряда, рекомбинации-генерации, захвата на ловушках, подвижности и других физических механизмов.

К сожалению, модели, учитывающие различные механизмы радиационных воздействий, реализованы в TCAD не полностью (воздействие поглощенной дозы гамма-излучения) либо отсутствуют совсем (воздействие интегрального потока нейтронов). Как правило, эти модели базируются на экспериментальных данных и в значительной степени носят полуэмпирический характер.

В настоящей работе представлены модели для учета воздействия поглощенной дозы гамма-излучения и интегрального потока нейтронов, встроенные в систему Synopsys TCAD.

Влияние поглощенной дозы гамма-излучения на характеристики МОП-транзисторов, изготовленных по технологии кремний на изоляторе.

Воздействие поглощенной дозы гамма-излучения на транзисторы со структурой металл-оксид-полупроводник (МОП), изготовленные по технологии кремний на изоляторе (КНИ), приводит к генерации электрон-дырочных пар и захвату дырок в областях подзатворного, скрытого и бокового изолирующего диоксида кремния, а также к генерации отрицательно заряженных поверхностных состояний на границах раздела кремний-диоксид кремния. Захваченный в оксиде дырочный заряд приводит к деградации электрических характеристик n-канальных МОП-транзисторов (n-МОПТ): уменьшается пороговое напряжение, возрастает ток утечки в выключенном состоянии, изменяется допороговый наклон сток-затворной вольт-амперной характеристики (ВАХ). Влияние поверхностных состояний на n-МОПТ приводит к увеличению порогового напряжения и уменьшению крутизны сток-затворной характеристики [2].

Поскольку толщина подзатворного диэлектрика при снижении проектных норм уменьшается (до единиц нанометров в глубокосубмикронных транзисторах), количество захваченного в нем дырочного заряда снижается, уменьшая сдвиг порогового напряжения верхнего затвора, таким образом, стойкость верхнего транзистора увеличивается. Нижний скрытый и боковой изолирующий оксид являются достаточно толстыми по сравнению с подзатворным (десятые доли микрона), что приводит к захвату в них большего дырочного заряда.

Скорость генерации электрон-дырочных пар гамма-излучением описывается

в TCAD выражением $G = \left(\frac{E + E_1}{E + E_0} \right)^m g_0 D$, где E – величина электрического поля

(В/м); E_0 , E_1 , m – коэффициенты, определяющие зависимость от электрического поля, g_0 – ионизационная постоянная оксида ($\text{рад}^{-1} \cdot \text{см}^{-3}$); D – мощность дозы излучения (рад/с).

Поскольку радиационная модель TCAD не учитывает влияния поверхностных состояний, дополнительно была введена зависимость для учета деградации подвижности от дозы [2], которая задается следующим выражением:

$$\mu(D) = \frac{\mu_0}{1 + \alpha N_{it}(D)}, \text{ где } \mu_0 \text{ – подвижность носителей в необлученном транзисторе;}$$

$N_{it}(D) = a_{it} D^{b_{it}}$ – плотность поверхностных состояний на границе кремний-диоксид кремния; α , a_{it} и b_{it} – подгоночные коэффициенты.

Влияние интегрального потока нейтронов на характеристики субмикронных биполярных транзисторов. При воздействии потока нейтронов на биполярные транзисторы в объеме полупроводникового прибора образуются разупорядоченные области. В результате чего изменяется подвижность свободных носите-

лей заряда, концентрация основных носителей заряда и время жизни неравновесных носителей заряда. Уменьшение подвижности свободных носителей заряда является эффектом третьего порядка малости и в практически интересующих случаях этой зависимостью можно пренебречь. Изменение эффективной концентрации типозадающей примеси с облучением можно считать эффектом второго порядка малости на фоне изменения времени жизни, и его следует учитывать лишь при достаточно низком уровне легирования, что для активной базы, где концентрация примеси порядка $(10^{16} \div 10^{18}) \text{ см}^{-3}$, не характерно. Таким образом, наиболее чувствительным параметром при облучении нейтронами является время жизни неравновесных носителей заряда.

Изменение времени жизни неравновесных носителей заряда при облучении нейтронами описывается выражением: $\frac{1}{\tau_\Phi} = \frac{1}{\tau_0} + K_\tau \cdot \Phi$, где τ_Φ – время жизни

после облучения (с); τ_0 – время жизни до облучения (с), Φ – интегральный поток нейтронов (нейтрон/см²); K_τ – коэффициент радиационного изменения времени жизни (см²/нейтрон). Обычно коэффициент радиационного изменения времени жизни определяется эмпирическими выражениями. Для модели изменения времени жизни были выбраны зависимости [4]:

$$\text{для n-Si: } K_\tau = a + b \left[\ln \left(\frac{n_{\text{неоси}} + n_i}{n_{\text{оси}}} \right) \right]^2 + c \cdot \ln \left(\frac{N_{\text{оси}}}{n_i} \right) \left[\ln \left(\frac{d}{\delta + e} + 1 \right) \right]^{0.5},$$

$$\text{для p-Si: } K_\tau = a + f \cdot \ln \left(\frac{N_{\text{оси}}}{m} \right) \left[\ln \left(\frac{n_{\text{неоси}} + n_i}{n_{\text{оси}}} \right) \right]^2,$$

где $N_{\text{оси}}$ – концентрация легирующей примеси (см⁻³); n_i – собственная концентрация носителей заряда (см⁻³); $a, b, c, d, e, \delta, f, m$ – числовые коэффициенты.

Процедура встраивания моделей в TCAD. Исходные коды ряда физических моделей поставляются вместе с дистрибутивом TCAD. В исходные коды модели подвижности носителей заряда и времени жизни неравновесных носителей заряда, написанные на языке программирования С, были добавлены приведенные ранее выражения для учета влияния поглощенной дозы гамма-излучения и интегрального потока нейтронов соответственно. Далее модифицированные модели были скомпилированы и подключены при помощи программного интерфейса физических моделей (physical model interface — PMI) в расчет TCAD.

Моделирование воздействия дозы гамма-излучения. Для моделирования влияния дозы гамма-излучения был выбран КНИ n-МОПТ с длиной канала 90 нм, толщиной подзатворного оксида 2 нм, толщиной активного слоя кремния 90 нм и толщиной скрытого оксида 210 нм. Смоделированная двухмерная структура транзистора представлена на рис. 1. Моделирование воздействия гамма-излучения проводилось для диапазона доз от 0 до 2 Мрад, со смещением 1 В на стоке и 0 В на остальных выводах транзистора. Далее были рассчитаны сток-затворные характеристики верхнего и нижнего (подложка является затвором, а скрытый оксид выполняет роль подзатворного оксида) затворов для нескольких значений поглощенной дозы и напряжения на стоке 0,1 В (рис. 2 и 3 соответственно). На рис. 4 представлена зависимость тока утечки сток-исток транзистора от поглощенной дозы. Из результатов расчета видно, что в основном с дозой деградируют характеристики нижнего транзистора (из-за более толстого скрытого оксида), в то время как характеристики верхнего транзистора практически не сдвигаются в выбранном диапазоне поглощенных доз.

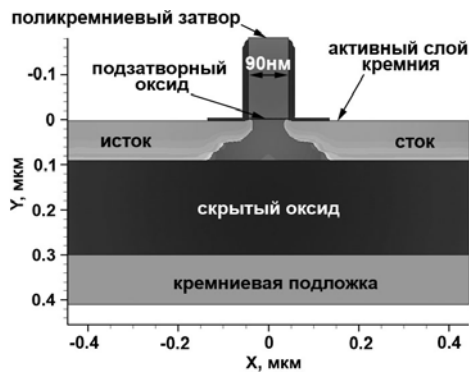


Рис. 1. Смоделированная структура n-канального КНИ МОПТ с длиной затвора 90 нм

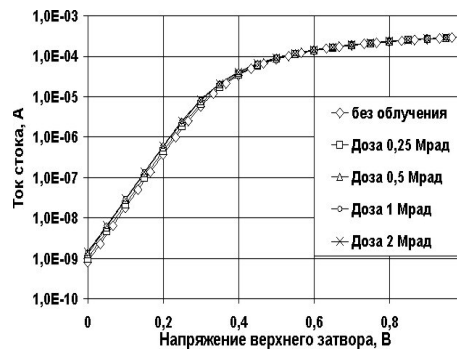


Рис. 2. Смоделированные сток-затворные ВАХ верхнего затвора для нескольких поглощенных доз

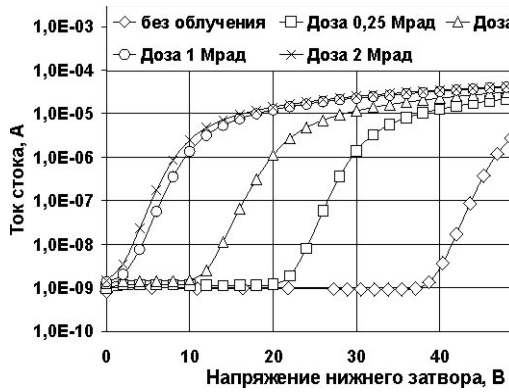


Рис. 3. Смоделированные сток-затворные ВАХ нижнего затвора для нескольких поглощенных доз

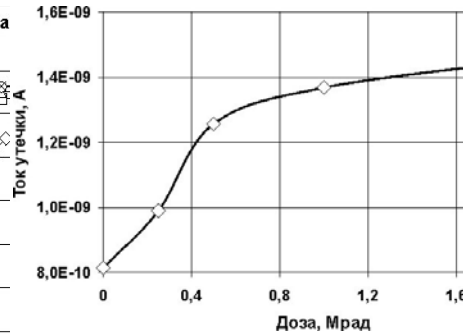


Рис. 4. Смоделированная зависимость тока утечки сток-исток от поглощенной дозы гамма-излучения

Моделирование воздействия интегрального потока нейтронов. Для исследований радиационной стойкости при нейтронном воздействии был выбран гетеропереходный биполярный транзистор (ГБТ), выполненный по 0,13 мкм технологии кремний-германий (SiGe) БиКМОП 8WL с коэффициентом усиления по току $\beta = 250$, граничной частотой $f_T = 100$ ГГц, частотой единичного усиления $f_{max} = 200$ ГГц. Структура SiGe ГБТ приведена на рис. 5. Для сравнения экспериментальных данных и результатов моделирования был определен фактор повреждения, который находится как, $d_n = \beta_{post} / \beta_{pre}$, где β_{post} и β_{pre} – коэффициенты усиления по току после и до облучения соответственно. Фактор повреждения получен при моделировании для классической и улучшенной модели изменения времени жизни и приведен на рис. 6. Как видно из графика, результаты, полученные при моделировании, хорошо согласуются с экспериментальными данными.

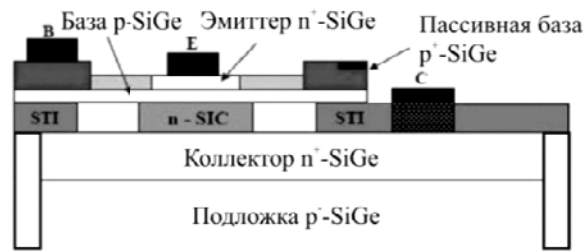


Рис. 5. Структура SiGe ГБТ IBM

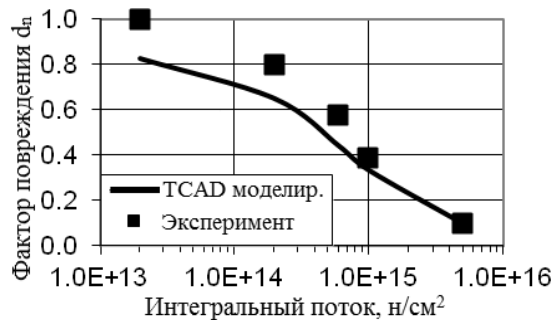


Рис. 6. Смоделированная и экспериментальная зависимости фактора повреждения от потока нейтронов

Заключение. В ходе работы были решены следующие задачи:

1. Приведены математические модели, которые учитывают воздействие суммарной дозы гамма-излучения и интегрального потока нейтронов на полупроводниковые приборы и элементы БИС.
2. Модели встроены в современную систему моделирования Synopsys TCAD, что позволяет использовать их для проектирования приборов и устройств полупроводниковой элементной базы для космических, военных и других специальных применений.
3. Приведены примеры практического использования моделей в составе TCAD для проектирования радиационно-стойкой элементной базы, изготовленной по современным субмикронным технологиям 90 нм КМОП КНИ и 0,13 мкм SiGe ГБТ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Synopsys Sentaurus TCAD, ver. C-2009.06, www.synopsys.com.
2. Никифоров А.Ю., Телец В.А., Чумаков А.И. Радиационные эффекты в КМОП ИС. – М.: Радио и связь, 1994.
3. Петросяну К.О., Орехов Е.В., Самбурский Л.М. и др. Трехмерное моделирование радиационных токов утечки в субмикронных МОП-транзисторах со структурой «кремний на изоляторе» // Известия вузов. Электроника. – 2010. – № 2 (82). – С. 81-83.
4. Вологдин Э.Н., Смирнов Д.С. Эмпирические соотношения для зависимости коэффициента радиационного изменения времени жизни носителей заряда в кремнии при нейтронном облучении от уровня инжекции и степени легирования // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. – 2010. – Вып. 2. – С. 17-22.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. А.А. Пугачев.

Петросянц Константин Орестович – Московский государственный институт электроники и математики (технический университет); e-mail: eande@miem.edu.ru; 123022, г. Москва, Б. Трехсвятительский пер., 3.; тел./факс: 84992355042; кафедра электроники и электротехники; зав. кафедрой; д.т.н.; профессор.

Кожухов Максим Владимирович – e-mail: includ@mail.ru; аспирант.

Попов Дмитрий Александрович – e-mail: jantor@tushino.com; аспирант.

Орехов Евгений Вадимович – Институт проблем проектирования в микроэлектронике Российской академии наук; e-mail: e.orekhov@miem.edu.ru; 124365, г. Москва, Зеленоград, ул. Советская, 3; тел.: 84997299890; научный сотрудник.

Petrosyants Konstantin Orestovich – Moscow State Institute of Electronics and Mathematics (Technical University); e-mail: eande@miem.edu.ru; 3, B. Tryokhsvyatitelskiy side-street, Moscow 109028, Russia; phone/fax: +74992355042; the chair of electronics and electrical engineering; head of chair; dr. of eng. sc., professor.

Kozhukhov Maxim Vladimirovich – e-mail: includ@mail.ru; post-graduate student.

Popov Dmitry Alexandrovich – e-mail: jantor@tushino.com; postgraduate student.

Orekhov Evgeny Vadimovich – Institute for Design Problems in Microelectronics of Russian Academy of Sciences; e-mail: e.orekhov@miem.edu.ru; 3, Sovetskaya street, Moscow 124365, Russia; phone: +74997299890; research fellow.

УДК 51-74

А.О. Козлов, А.М. Великанов, С.Г. Валеев

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ТЕХНОГЕННЫХ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ НА ОСНОВЕ АДАПТИВНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ РЕГРЕССИЙ

Для повышения эффективности управления технологическим процессом предложена методика прогнозирования значений характеристик технологического процесса на основе адаптивных динамических регрессий, обеспечивающих по сравнению с классическими регрессионными моделями повышение точности до нескольких раз. Дано описание этапов методики и моделей, включаемых в комплексную модель процесса. В качестве примера рассматриваются характеристики смазочно-охлаждающей жидкости, используемой при обработке металлов, и результаты вычислительных экспериментов по данным на одном из промышленных предприятий. Показаны результаты моделирования одного из параметров смазочно-охлаждающей жидкости.

СОЖ; эффективность управления; прогнозирование состояния; адаптивные регрессии.

A.O. Kozlov, A.M. Velikanov, S.G. Valeev

ANTHROPOGENIC TIME SERIES ANALYSIS METHOD BASED ON ADAPTIVE DYNAMIC REGRESSIONS

To improve efficiency of the process control the method of forecasting values of characteristics of technological process based on adaptive dynamic regressions is proposed. Method improves accuracy over classical regression models up to several times. A description of method is given. Also, models to be included in a comprehensive model of the process are described. As an example, we consider characteristics of lubricant-coolant which is widely used on metal-working plants. Results of computational experiments on data taken from one of the metal-working industry factory are described. Simulation results of one of the parameters of lubricant-coolant are shown.

Lubricant-coolant; management effectiveness; prediction of the state; the adaptive regression.