



ОБОБЩЕННАЯ TCAD-МОДЕЛЬ ДЛЯ УЧЕТА РАДИАЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ В СТРУКТУРАХ МОП И БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

GENERAL TCAD MODEL OF MOSFET AND BJT STRUCTURES WITH ACCOUNT FOR RADIATION EFFECTS

УДК 621.382.3: 004.942

ПЕТРОСЯНЦ КОНСТАНТИН ОРЕСТОВИЧ^{1,2}

kpetrosyants@hse.ru

КОЖУХОВ МАКСИМ ВЛАДИМИРОВИЧ³

ПОПОВ ДМИТРИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ¹

PETROSYANTS KONSTANTIN O.^{1,2}

kpetrosyants@hse.ru

KOZHUKHOV MAXIM V.³

POPOV DMITRIY A.¹

¹ Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (Московский институт электроники и математики) 123458, г. Москва, ул. Таллинская, 34

² Институт проблем проектирования в микроэлектронике Российской академии наук 124365, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Советская, 3

³ АО «Научно-производственная корпорация «Космические системы мониторинга, информационно-управляющие и электромеханические комплексы» имени А. Г. Иосифьяна» (АО «Корпорация «ВНИИЭМ») 107078, РФ, г. Москва, Хоромный тупик, 4, стр. 1

¹ National Research University "Higher School of Economics" (Moscow Institute of Electronics and Mathematics, Department of Electronics Engineering) 34 Tallinskaya St., Moscow, 123458, Russia

² Institute for Design Problems in Microelectronics of Russian Academy of Sciences (IPPM RAS)

3 Sovetskaya St., Zelnograd, Moscow, 124365, Russia

³ JSC "Research and Production Corporation "Space Monitoring Systems, Information & Control and Electromechanical Complexes" named after A. G. Iosifian" ("VNIIEEM Corporation" JSC) 4/1 Khoromny blind alley, Moscow, 107078, Russia

Разработана новая TCAD Rad модель для биполярных и МОП транзисторов, учитывающая влияние протонов на основные радиационно-зависимые параметры, такие как время жизни, подвижность, скорость поверхностной рекомбинации и концентрация радиационно-индуцированных ловушек в оксиде. Результаты моделирования показывают хорошую сходимость с экспериментальными данными.

Ключевые слова: МОП; биполярные; радиационные эффекты; протоны; физические модели; TCAD.

The paper considers a new TCAD Rad model for BJTs and MOSFETs for proton radiation. The equations for radiation-dependent parameters (life time, mobility, surface velocity, traps concentration) have been added in Sentaurus TCAD. The simulation results are in good agreement with experimental data.

Keywords: MOSFET; BJT; radiation effects; proton; physical models; TCAD.

На настоящий момент с помощью Synopsys TCAD в полной мере не изучено воздействие протонного излучения на структуры МОП и биполярных транзисторов.

В [1] нами была представлена физическая TCAD-модель учета влияния протонного излучения на Si БТ и SiGe ГБТ структур. В данной работе модель была обобщена и расширена для моделирования МОП-структур. Базовым принципом, на котором основана модель, является аддитивный подход к моделированию воздействия протонного излучения путем совместного учета влияния ионизирующего излучения и эффектов смещения. Протонное излучение заменяется комбинацией механизмов смещения и ионизации.

В Synopsys TCAD были включены новые выражения для радиационно-зависимых параметров, таких как: время жизни (τ), подвижность (μ), скорость поверхностной рекомбинации (S), концентрация ловушек в оксиде (N_t).

1. Добавлена зависимость коэффициента радиационно-индуцированной деградации времени жизни K_t от концентрации носителей в активной области.

2. Добавлены экспериментальные зависимости концентрации радиационно-индуцированных ловушек N_t и скорости поверхностной рекомбинации на границе Si/SiO₂ в зависимости от дозы.

3. Добавлены новые зависимости подвижности электронов и дырок от температуры и электрического поля $\mu_n, \mu_p = f(T, E_{\text{эф}})$ для HfO₂/Poly-Si-структур.

4. Добавлены аналитические зависимости для концентраций радиационно-индуцированных ловушек в объеме HfO₂ ($N_{\text{a}}(D\gamma)$) и на границе раздела SiO₂/HfO₂ ($N_{\text{t}}(D\gamma)$). Созданы два программных модуля для учета:

5. Эквивалентного потока нейтронов Φ_n и эквивалентной поглощенной дозы D_p после воздействия протонного излучения;

6. Поглощенной дозы D_p после воздействия протонного излучения, конвертированной в поглощенную дозу $D\gamma$ после воздействия гамма-излучения той же энергии в соответствии с ионизационными потерями энергии протонов.

Следующие примеры иллюстрируют возможности разработанной модели.

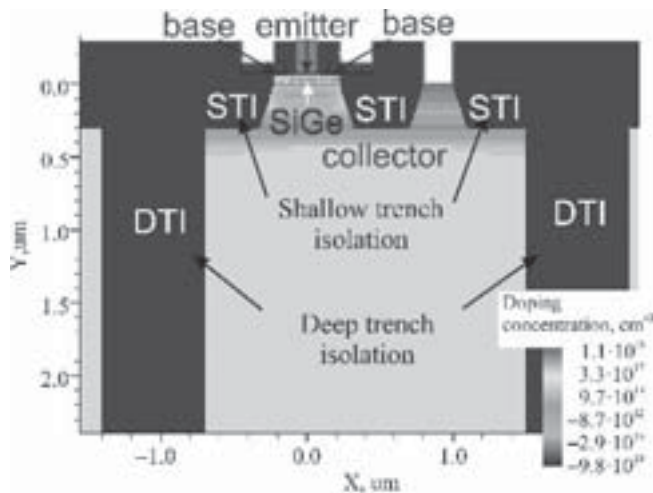


Рис. 1. Поперечное сечение SiGe ГБТ 5HP

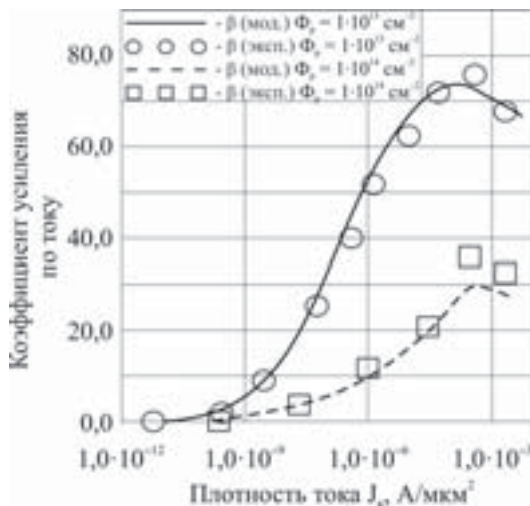


Рис. 3. Зависимость коэффициента усиления от коллекторного тока в случае облучения низкоэнергетическими (1,75 МэВ) протонами

На рис. 1 представлено поперечное сечение 0,5 мкм SiGe ГБТ 5HP с $\beta = 110$, $f_T = 50$ ГГц, $f_{max} = 70$ ГГц. Проведено моделирование и сравнение с экспериментальными данными [2] зависимости коэффициента усиления до и после облучения высокоэнергетическими (198 МэВ) протонами с флюенсом $5 \cdot 10^{13}$ п/см² и облучения низкоэнергетическими (1,75 МэВ) протонами с флюенсами $1 \cdot 10^{13}$ п/см² и $1 \cdot 10^{14}$ п/см² (рис. 2 и 3).

На рис. 4 представлено поперечное сечение n-канального КНИ МОП-транзистора с $L = 0,5$ мкм, $W = 8$ мкм, $t_{ox} = 7,5$ нм, $t_{Si} = 50$ нм, $t_{вох} = 190$ нм, $N_{канал} = 3,1 \cdot 10^{17}$ см⁻³. Проведено моделирование (точки) и сравнение с экспериментальными (линии) данными [3] сток-затворных характеристик n-канального КНИ МОП-транзистора до и после облучения протонами дозой 150 и 500 крад (рис. 5).

Погрешность разработанной модели не превышает 20% для Si БТ, SiGe ГБТ и МОП-транзисторов после облучения дозами до 10 Мрад и потоками до $1 \cdot 10^{16}$ см⁻².

ЛИТЕРАТУРА

1. Petrosyants K. O., Kozhukhov M. V. *Physical TCAD Model for Proton Radiation Effects in SiGe HBTs* // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2016. Vol. 63. № 4, pp. 2016–2021.

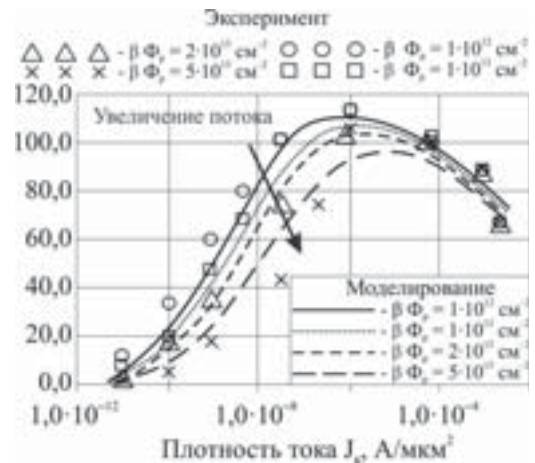


Рис. 2. Зависимость коэффициента усиления от коллекторного тока в случае облучения высокоэнергетическими (198 МэВ) протонами

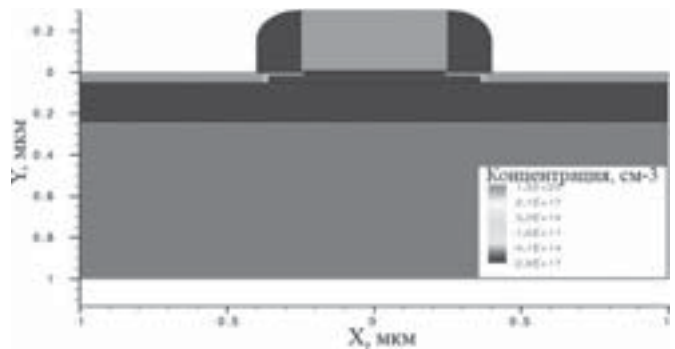


Рис. 4. Поперечное сечение n-канального КНИ МОП

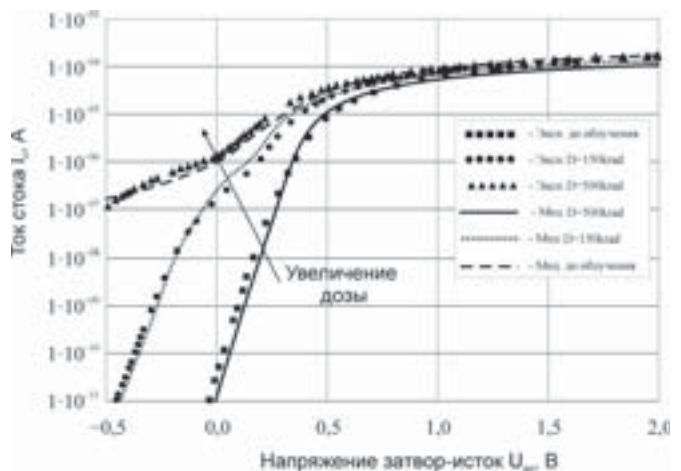


Рис. 5. Сток-затворные характеристики n-канального КНИ МОП до и после облучения протонами

2. Zhang S., Cressler J.D., Subbanna S., Groves R., Niu G., Isaacs-Smith T., Williams J.R., Bakhru H., Marshall P.W., Kim H.S., Reed R.A. *An Investigation of Proton Energy Effects in SiGe HBT Technology*, IEEE Trans. Nucl. Sci., Vol. 49, № 6, pp. 3208–3212, Dec. 2002.

3. Li Y., Niu G., Cressler J. D., Patel J., Marshall C.J., Marshall P.W., Kim H.S., Reed R.A., Palmer M.J. *Anomalous Radiation Effects in Fully Depleted SOI MOSFETs Fabricated on SIMOX*, IEEE Trans. Nucl. Sci., Vol. 48, № 6, pp. 2146–2151, Dec. 2001.