



# 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<sup>1,2</sup>

*kpetrosyants@hse.ru*

КОЖУХОВ МАКСИМ ВЛАДИМИРОВИЧ<sup>3</sup>

ПОПОВ ДМИТРИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> Институт проблем проектирования в микроэлектронике  
Российской академии наук

124365, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Советская, 3

<sup>3</sup> 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

PETROSYANTS KONSTANTIN O.<sup>1,2</sup>

*kpetrosyants@hse.ru*

KOZHUKHOV MAXIM V.<sup>3</sup>

POPOV DMITRIY A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> National Research University “Higher School of Economics”  
(Moscow Institute of Electronics and Mathematics,  
Department of Electronics Engineering)  
34 Tallinskaya St., Moscow, 123458, Russia

<sup>2</sup> Institute for Design Problems in Microelectronics of Russian  
Academy of Sciences (IPPM RAS)

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

<sup>3</sup> JSC “Research and Production Corporation “Space Monitoring  
Systems, Information & Control and Electromechanical  
Complexes” named after A. G. Iosifyan” (“VNIEM 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 оксидах. 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 ( $\tau$ ), подвижность ( $\mu$ ), скорость поверхностной рекомбинации ( $S$ ), концентрация ловушек в оксидах ( $N_i$ ).

1. Добавлена зависимость коэффициента радиационно-индуцированной деградации времени жизни  $K\tau$  от концентрации носителей в активной области.

- Добавлены экспериментальные зависимости концентрации радиационно-индуцированных ловушек  $N_{it}$  и скорости поверхностной рекомбинации на границе  $Si/SiO_2$  в зависимости от дозы.
  - Добавлены новые зависимости подвижности электронов и дырок от температуры и электрического поля  $\mu_n, \mu_p = f(T, E_{eff})$  для  $HfO_2/Poly-Si$ -структур.
  - Добавлены аналитические зависимости для концентраций радиационно-индуцированных ловушек в объеме  $HfO_2$  ( $N_{ot}(D\gamma)$ ) и на границе раздела  $SiO_2/HfO_2$  ( $N_{it}(D\gamma)$ ). Созданы два программных модуля для учета:
  - Эквивалентного потока нейтронов  $\Phi_n$  и эквивалентной поглощенной дозы  $D_p$  после воздействия протонного излучения;
  - 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.

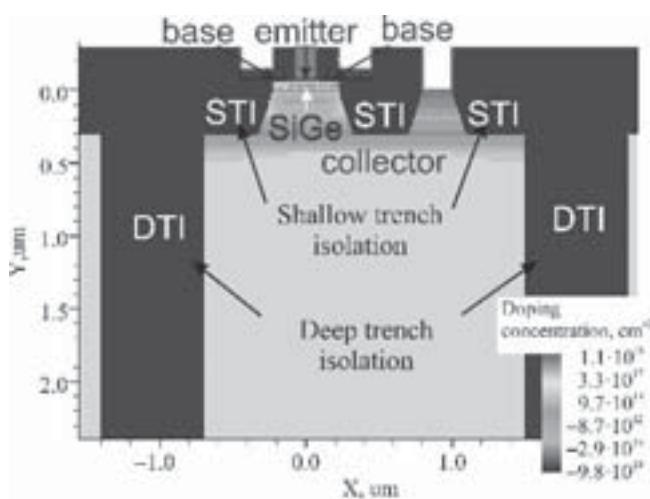


Рис. 1. Поперечное сечение SiGe ГБТ 5НР

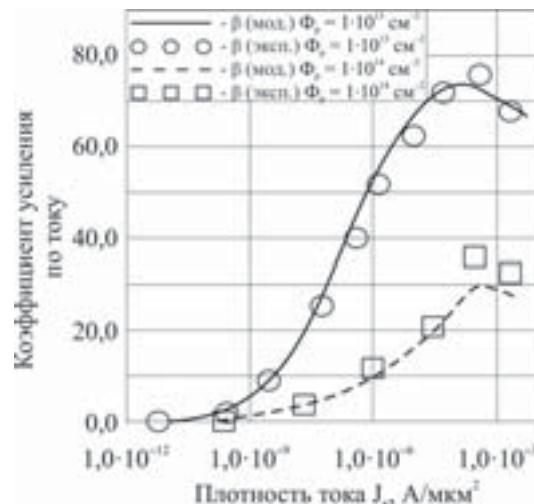


Рис. 3. Зависимость коэффициента усиления от коллекторного тока в случае облучения низкоэнергетическими (1,75 МэВ) протонами

На рис. 1 представлено поперечное сечение 0,5 мкм SiGe ГБТ 5НР 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 высокозергетическими (198 МэВ) протонами с флюенсом  $5 \cdot 10^{13}$  п/см<sup>2</sup> и облучения низкоэнергетическими (1,75 МэВ) протонами с флюенсами  $1 \cdot 10^{13}$  п/см<sup>2</sup> и  $1 \cdot 10^{14}$  п/см<sup>2</sup> (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,  $t_{box} = 190$  нм,  $N_{канал} = 3,1 \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup>. 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<sup>-2</sup>.

## ЛИТЕРАТУРА

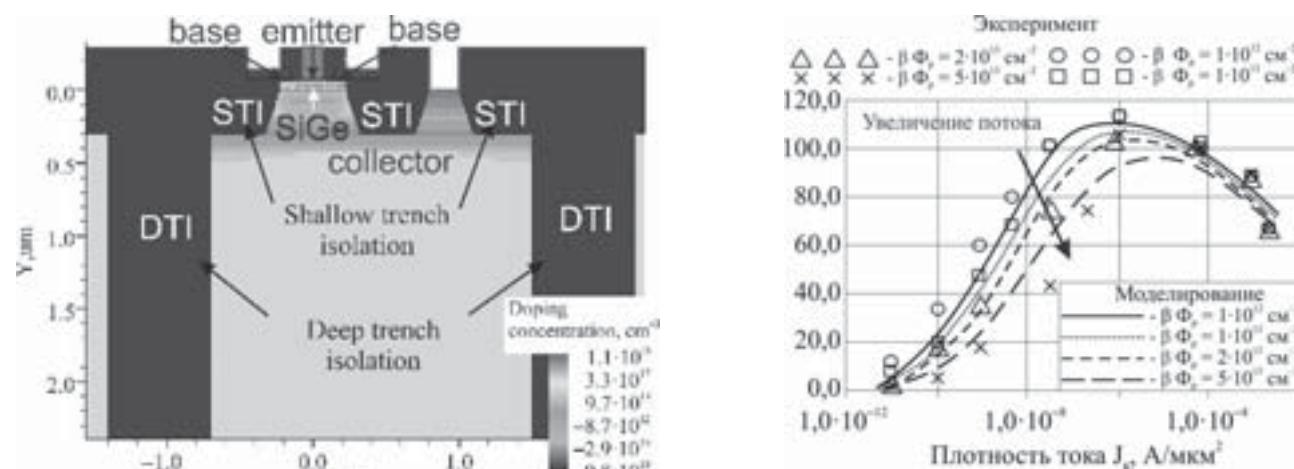
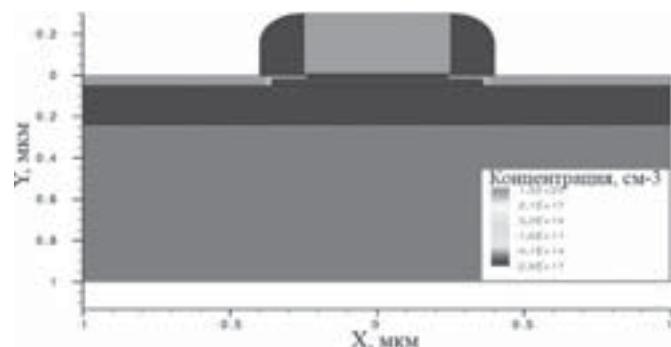
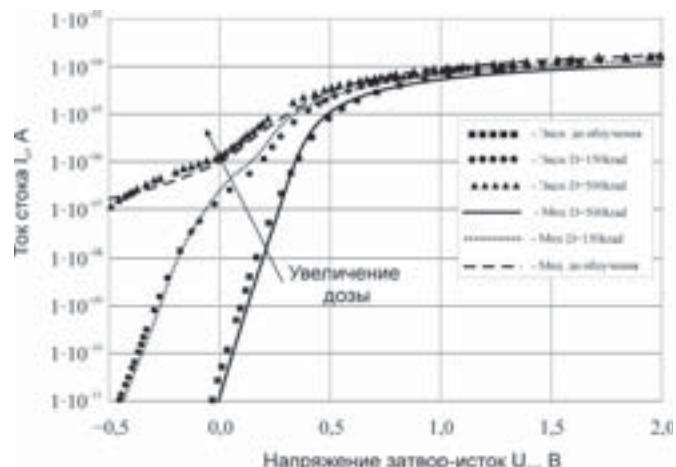


Рис. 2. Зависимость коэффициента усиления от коллекторного тока в случае облучения высокозергетическими (198 МэВ) протонами

Рис. 4. Поперечное сечение  $n$ -канального КНИ МОПРис. 5. Сток-затворные характеристики  $n$ -канального КНИ МОП до и после облучения протонами

- Zhang S., Cressler J. D., Subbanna S., Groves R., Niu G., Isaacs-Smith T., Williams J. R., Bakhrus 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.
- 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.