TCAD моделирование характеристик кремниевых и кремний-германиевых биполярных транзисторов с учетом радиационных эффектов

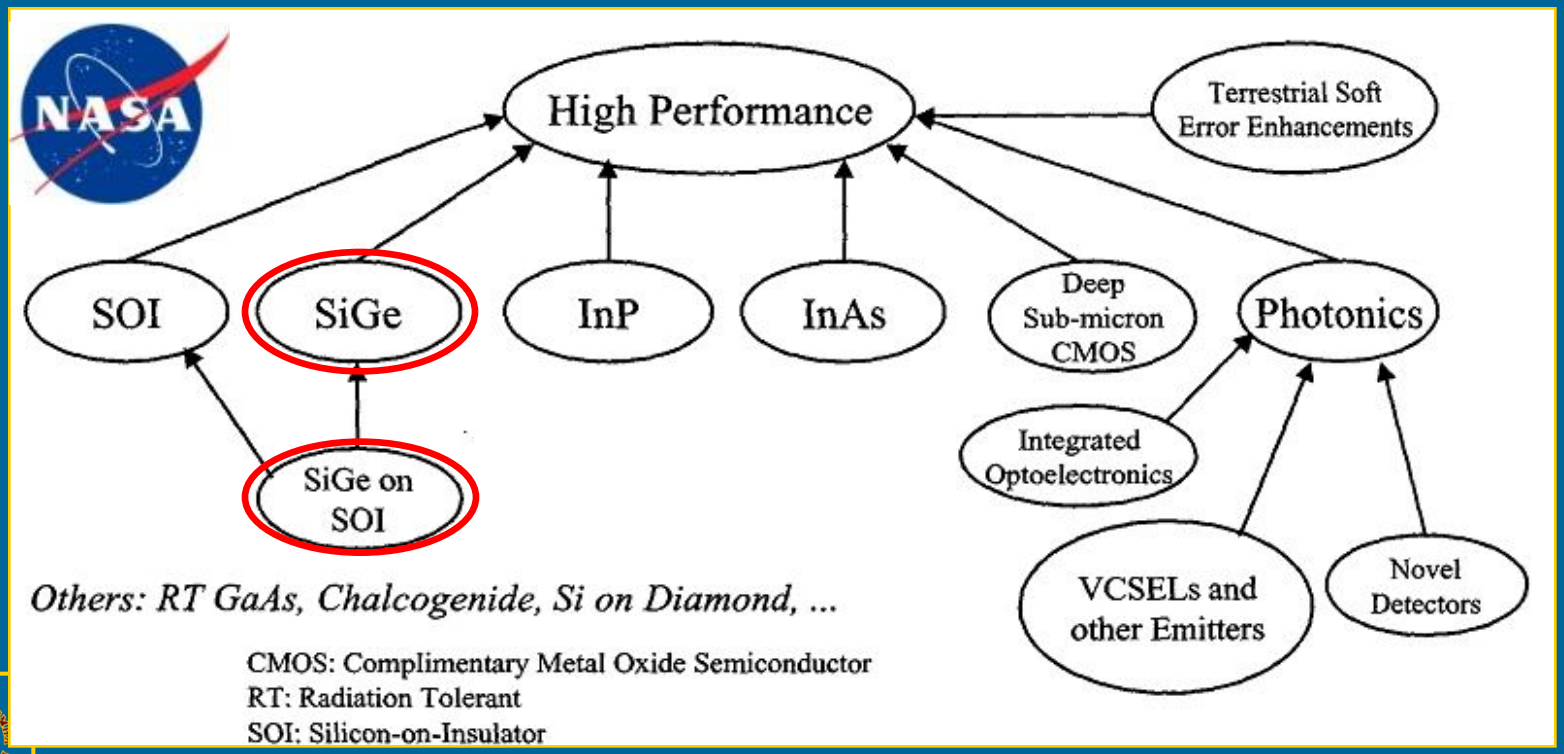
К.О. Петросянц[1,2], М.В. Кожухов[1]

[1]Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»(Московский институт электроники и математики), kpetrosyants@hse.ru

[2]Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН

Актуальность

- Для проектирования схем спец. применений, в существующие промышленные САПР встраиваются специальные подсистемы САПР: RHCAD – Radiation-Hardened CAD, реализующие специальные, более «жёсткие» методы проектирования.
- Важное место в номенклатуре ЭКБ занимают радиационно-стойкие высокочастотные Si и SiGe БИС, изготовленные по биполярной технологии



Современное состояние проблемы для Si БТ и SiGe ГБТ

Sentaurus Synopsys

Недостатки:

Для моделирования структур БТ учета G_r недостаточно.

Не учитывается изменение скорости поверхностной рекомбинации

Не учитывается образование ловушек на границе Si/SiO_2

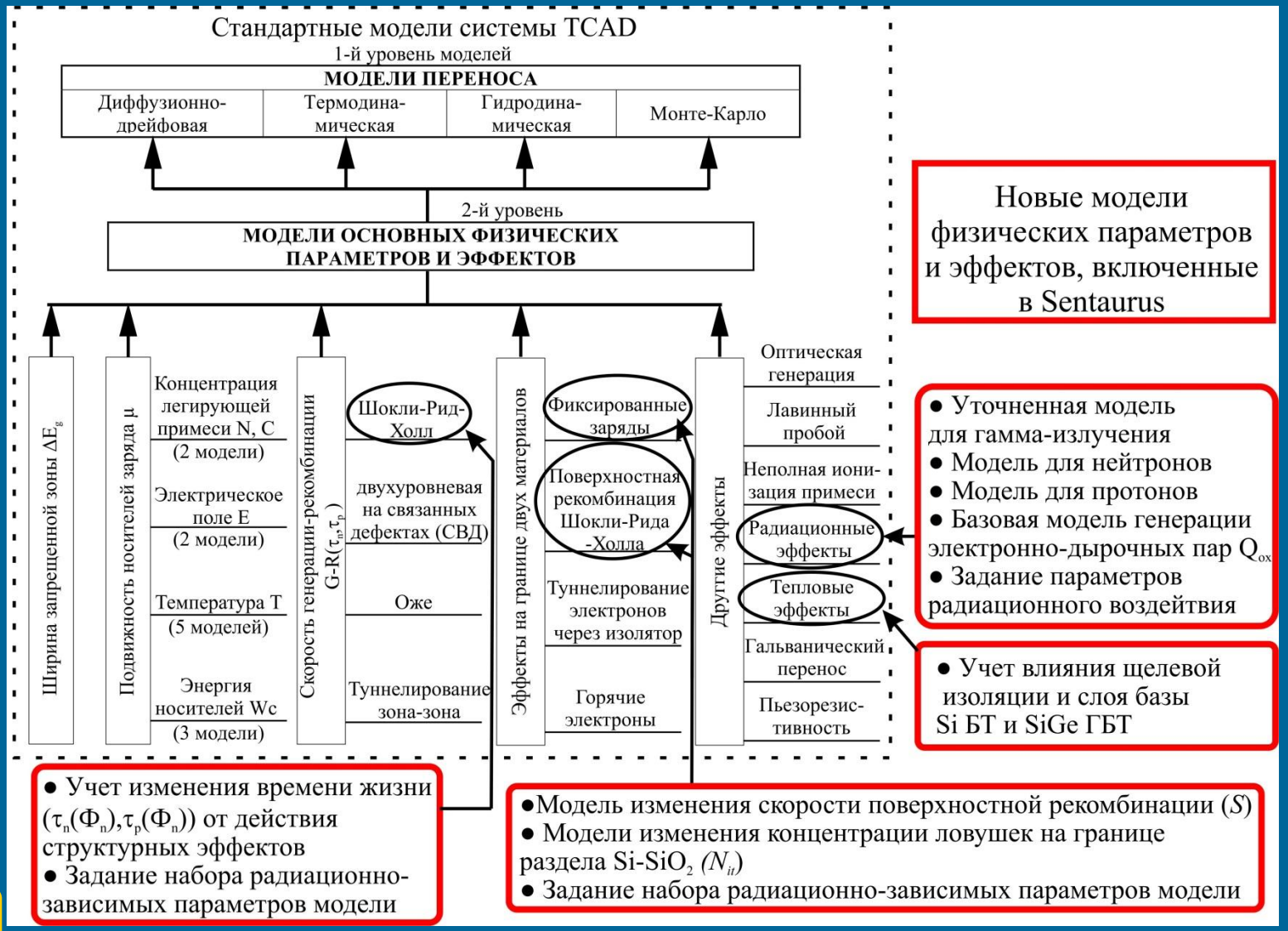
Silvaco TCAD

Недостатки:

Не учитывается изменение параметров материалов при воздействии радиации;

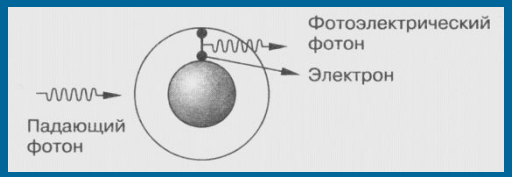
Не учитывается влияние на радиационную стойкость уровня легирования базы, а также ряда других параметров

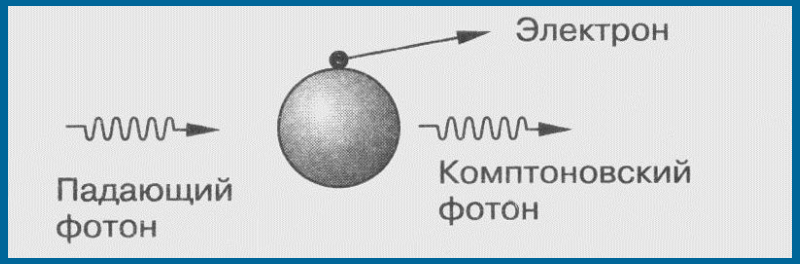
Модели основных физических эффектов системы Synopsys Sentaurus

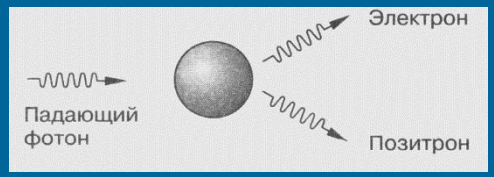


I. Математическая модель Si БТ и SiGe ГБТ, учитывающая влияние гамма-излучения

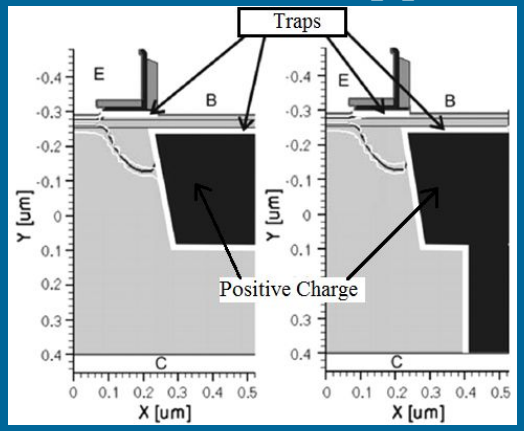
Взаимодействие гамма-квантов с атомами п/п







Ионизационные эффекты



Основные деградирующие параметры

Положительный заряд в оксиде Q_{ox}

Скорость поверхностной рекомбинации S

Концентрация ловушек на границе Si-SiO_2 N_{it}

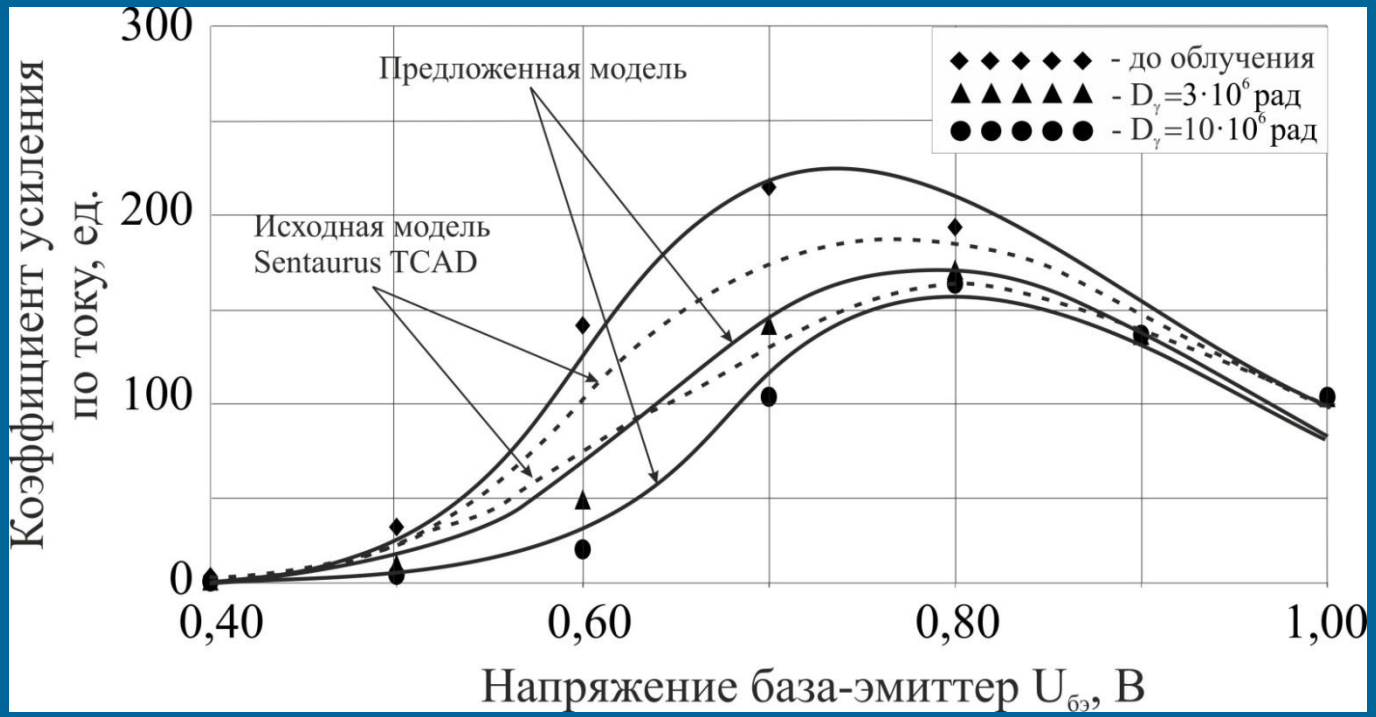
I. Математическая модель Si БТ и SiGe ГБТ, учитывающая влияние гамма-излучения

Предложены и реализованы в системе TCAD модели, связывающие концентрацию радиационно-индуцированных ловушек $N_{it} = f_1(D_\gamma)$ и скорость поверхностной рекомбинации на границе Si/SiO_2 $S = f_2(D_\gamma)$ с дозой гамма-излучения

Преимущества

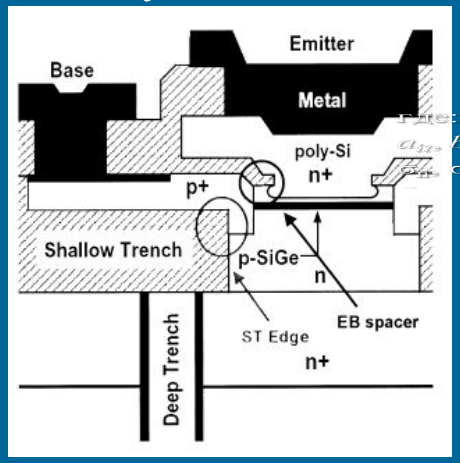
по сравнению с ранее существующими TCAD-моделями: учтены два эффекта, которые ранее не учитывались, что существенно повысило точность моделирования.

SiGe ГБТ 7HP



I. Модель, учитывающая влияние гамма-излучения в структурах Si БТ и SiGe ГБТ,

Наиболее чувствительные области

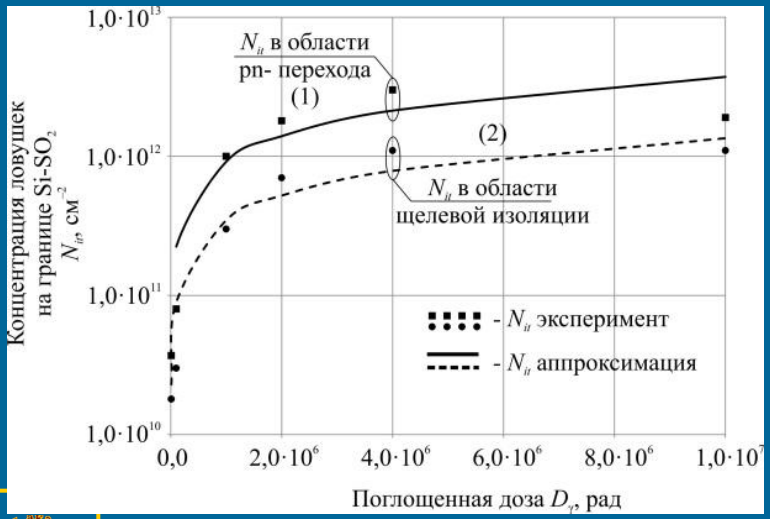


Концентрация ловушек и скорость поверхностной рекомбинации на границе с $Si\text{-}SiO_2$:

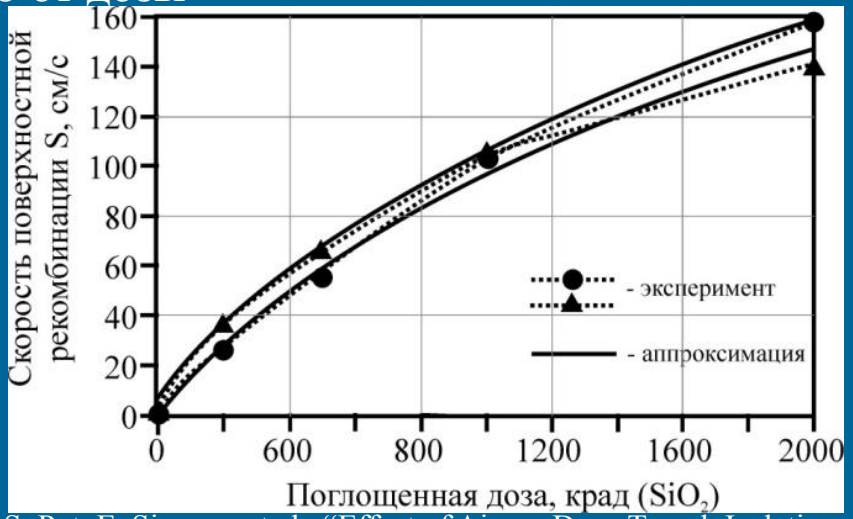
где:

- a_{it}, b_{it}, k_s – эмпирический коэффициент;
- σ_n, σ_p – сечение захвата электронов и дырок;
- ϑ_{th} – тепловая скорость.

Зависимости N_{it} и S от дозы



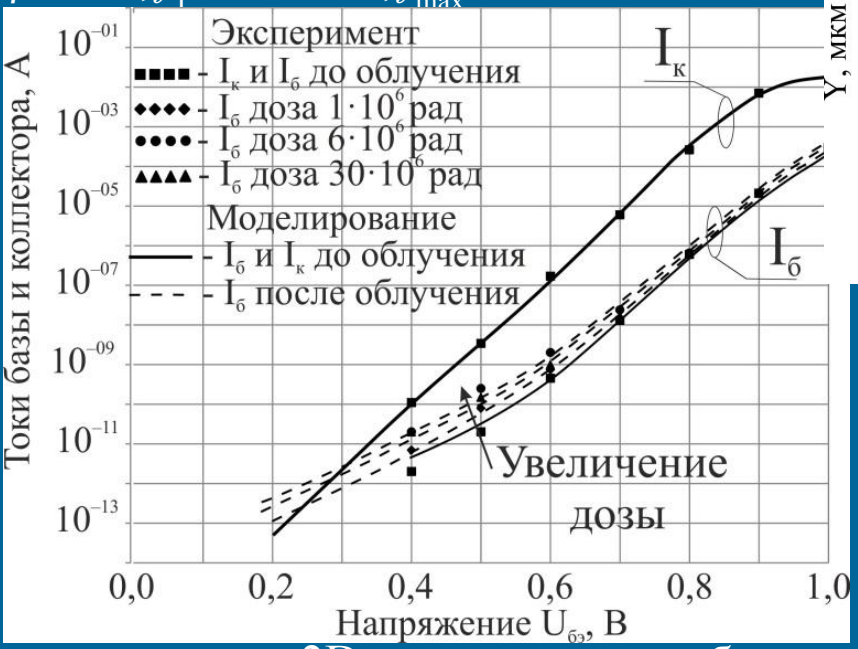
S. L. Kosier, R. D. Shrimpf, D. M. Fleetwood at el. Charge separation for bipolar transistors. TNS.



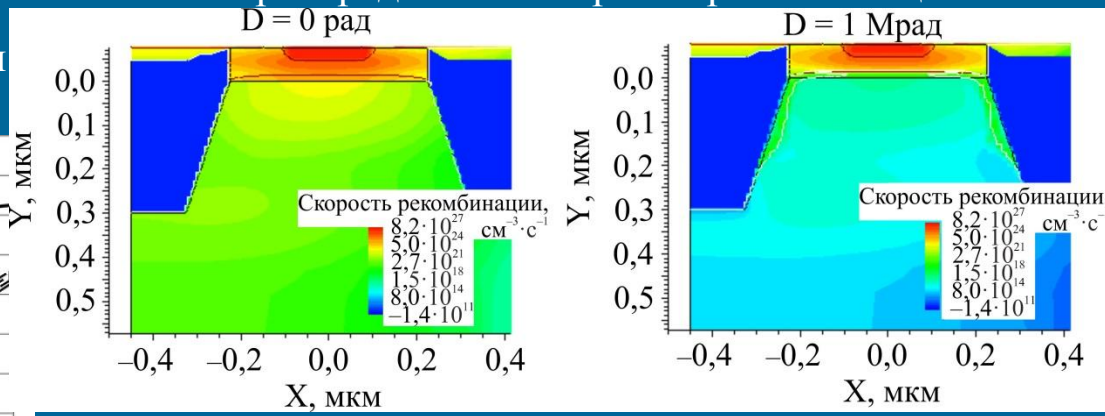
S. Put, E. Simoen, at el., "Effect of Airgap Deep Trench Isolation on t Gamma Radiation Behavior of a 0.13 um SiGe:C NPN HBT Technology"

I. Результаты моделирования влияния гамма-излучения в системе TCAD

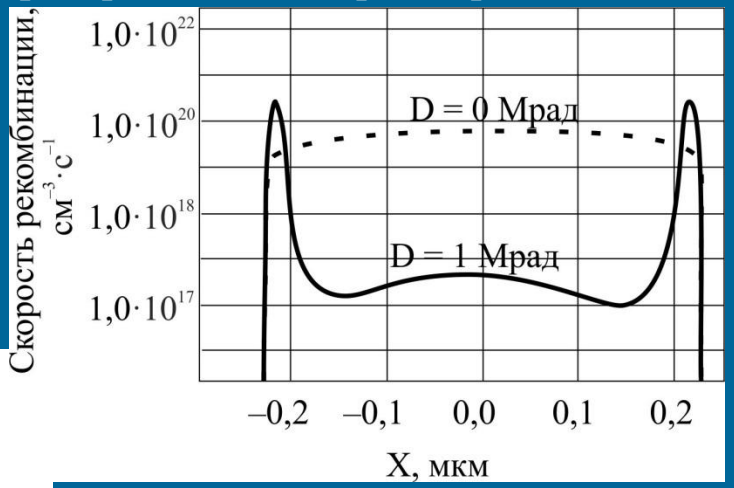
БАХ 0,13 мкм SiGe ГБТ 8WL с параметрами $\beta = 250$, $f_T = 100$ ГГц, $f_{max} = 200$ ГГц



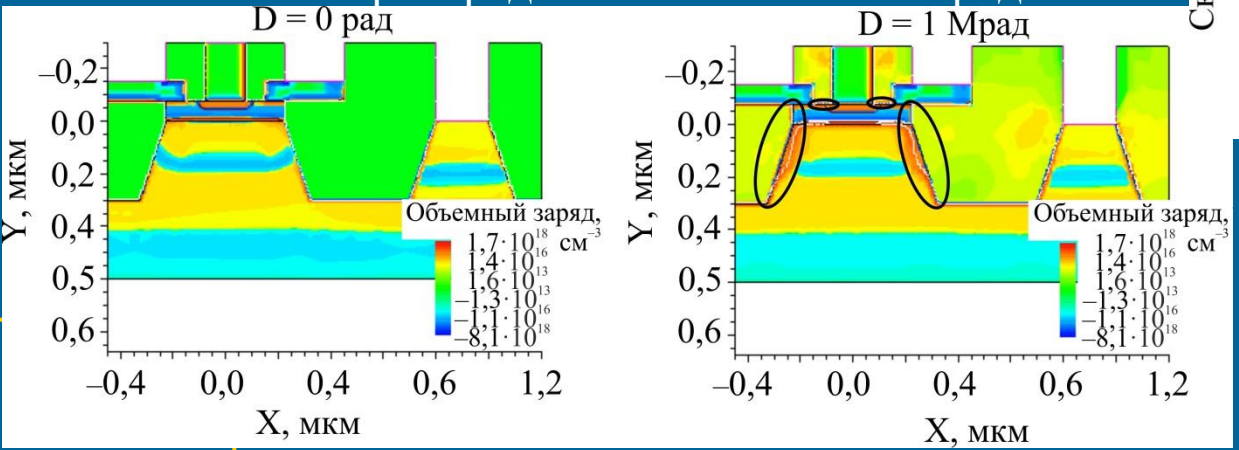
2D распределение скорости рекомбинации



1D распределение скорости рекомбинации

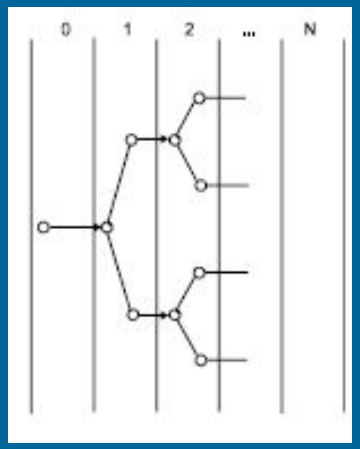


2D распределение объемного заряда

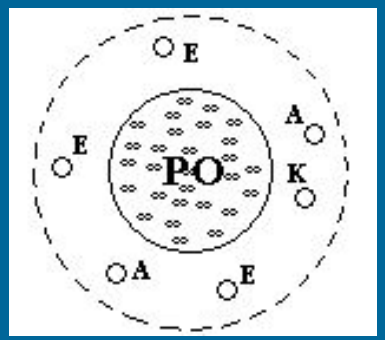


Погрешность моделирования статических БАХ 10-15%

II. Математическая модель Si БТ и SiGe ГБТ, учитывающая влияние нейтронного излучения



Образование разупорядоченных областей

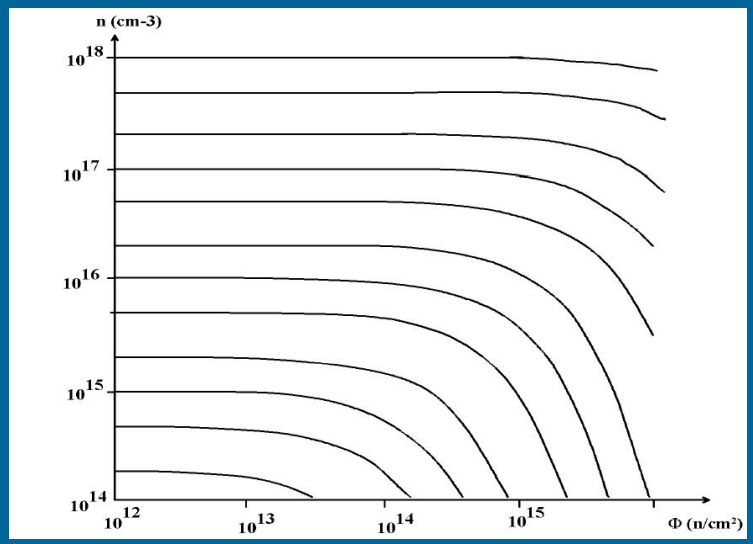


1. Время жизни носителей заряда τ

2. Концентрация неравновесных носителей заряда N

3. Подвижность неравновесных носителей заряда μ

$$\frac{1}{\tau_{\Phi}} = \Phi \frac{1}{\tau_0} K + \ldots$$



II. Математическая модель Si БТ и SiGe ГБТ, учитывающая влияние нейтронного излучения

1) Зависимость времени жизни носителей заряда от потока нейтронов включена в систему TCAD **впервые**:

$$\frac{1}{\tau_{\Phi}} = \frac{1}{\tau_0} + K_{\tau n} \cdot \Phi$$

2) Предложена улучшенная модель для коэффициента радиационного изменения времени жизни K_τ, учитывающая уровень инжекции и концентрацию легирующей примеси, что особенно важно для современных Si БТ и SiGe ГБТ с высоким уровнем легирования базы

II. Математическая модель Si БТ и SiGe ГБТ, учитывающая влияние нейтронного излучения

$$\frac{1}{\tau_\Phi}\Phi\frac{1}{\tau_0}K \quad n \cdot$$

$K_\tau(n,p)$ – Модель Грегори

$K_\tau(n,p,N_{прим})$ – Улучшенная модель

Улучшенная модель*:

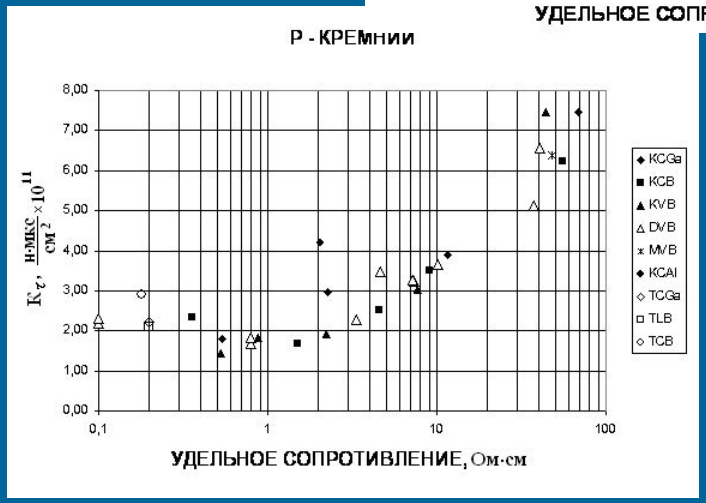
- Для n-типа материала:

$$K_\tau = a + b\cdot\left[\ln\left(\frac{n_{неосн}+n_i}{n_{осн}}\right)\right]^2 + c\cdot\ln\left(\frac{N_{прим}}{n_i}\right)\cdot\left[\ln\left(\frac{d}{\delta+e}+1\right)\right]^{0.5}$$

- Для p-типа материала:

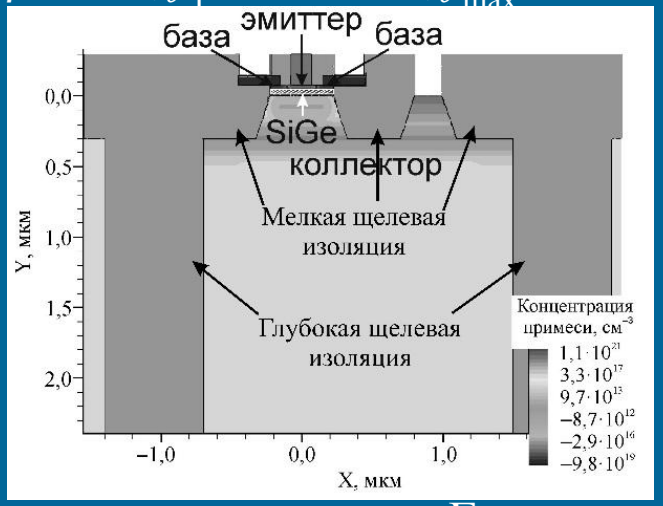
$$K_\tau = a + f\cdot\ln\left(\frac{N_{прим}}{m}\right)\cdot\left[\ln\left(\frac{n_{неосн}+n_i}{n_{осн}}\right)\right]^2$$

*Разработана Э.Н. Вологдиным и Д.С. Смирновым (ОАО “НПП “Пульсар”)

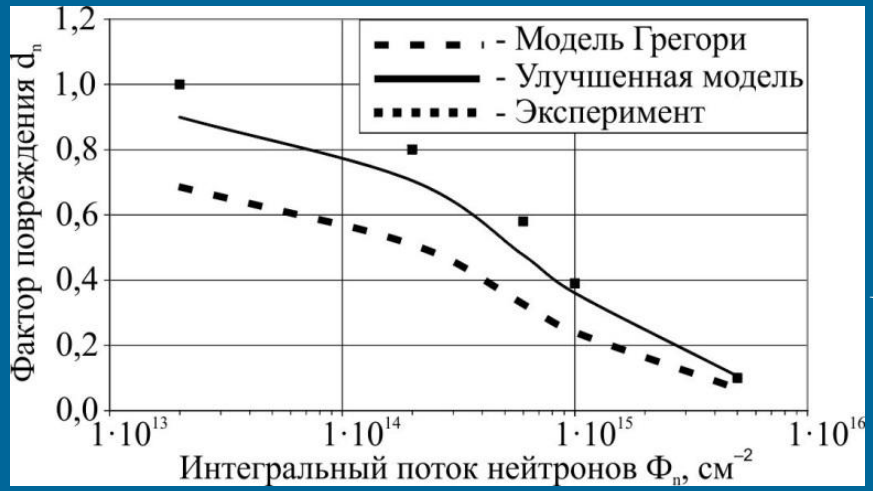


II. Результаты расчетов по модели, учитывающей влияние нейтронного излучения в структурах Si БТ и SiGe ГБТ

Структура 0,13 мкм SiGe ГБТ 8WL с $\beta = 250$, $f_T = 100$ ГГц, $f_{max} = 200$ ГГц



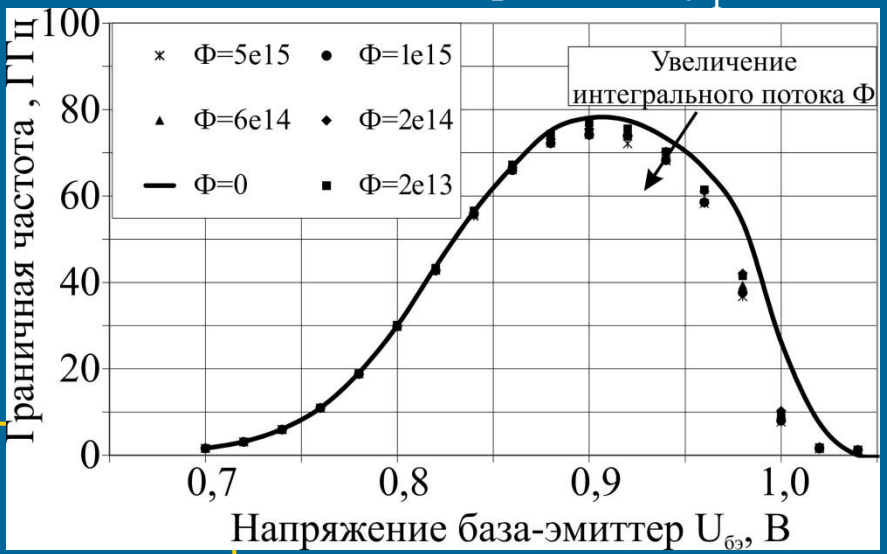
Фактор повреждения: $d_n = \frac{\beta(\Phi_n)}{\beta(0)}$

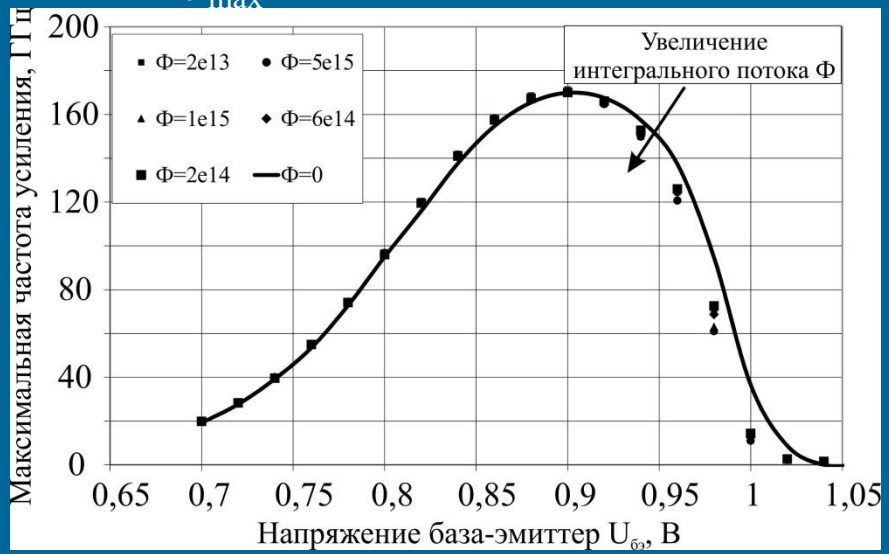


Коэффициент усиления по току **сильно** уменьшается

Частоты f_T и f_{max} **слабо** зависят от флюенса нейтронов

Граничная f_T и максимальная f_{max} частота





III. Модель, учитывающая влияние протонного излучения на структуры Si БТ и SiGe ГБТ

Для моделирования протонного излучения используются модели для нейтронного и гамма-излучений

III. Модель, учитывающая влияние протонного излучения на структуры Si БТ и SiGe ГБТ

1) В системе TCAD **впервые** учитывается воздействие протонного излучения

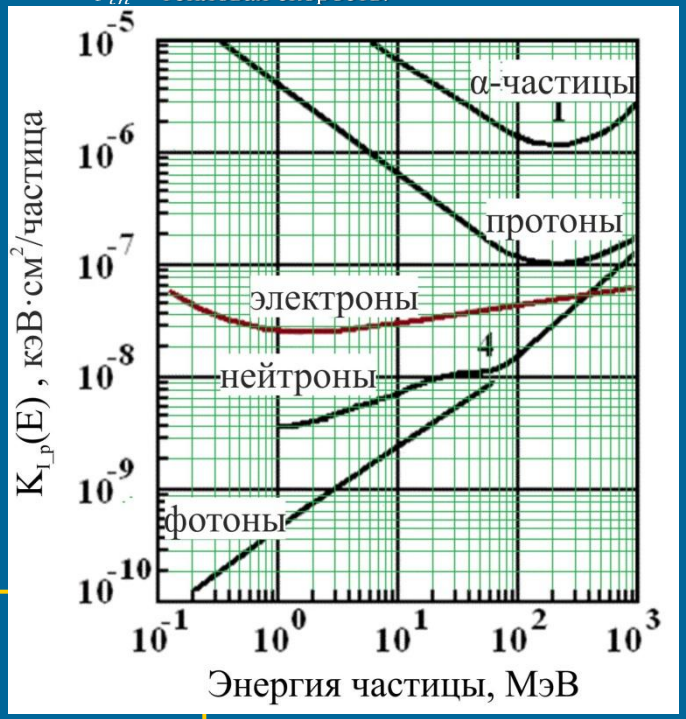
2) Предложен подход, учитывающий совместное влияние ионизационных и структурных эффектов на электрофизические и электрические характеристики Si и SiGe биполярных структур при воздействии протонного излучения в Sentaurus Synopsys

III. Модель, учитывающая влияние протонного излучения на структуры Si БТ и SiGe ГБТ

1) Используется комбинация моделей для нейтронного и гамма-излучений.
2) Определяется поток нейтронов и поглощенная доза гамма-излучения, которые эквивалентны по своему воздействию протонному излучению:

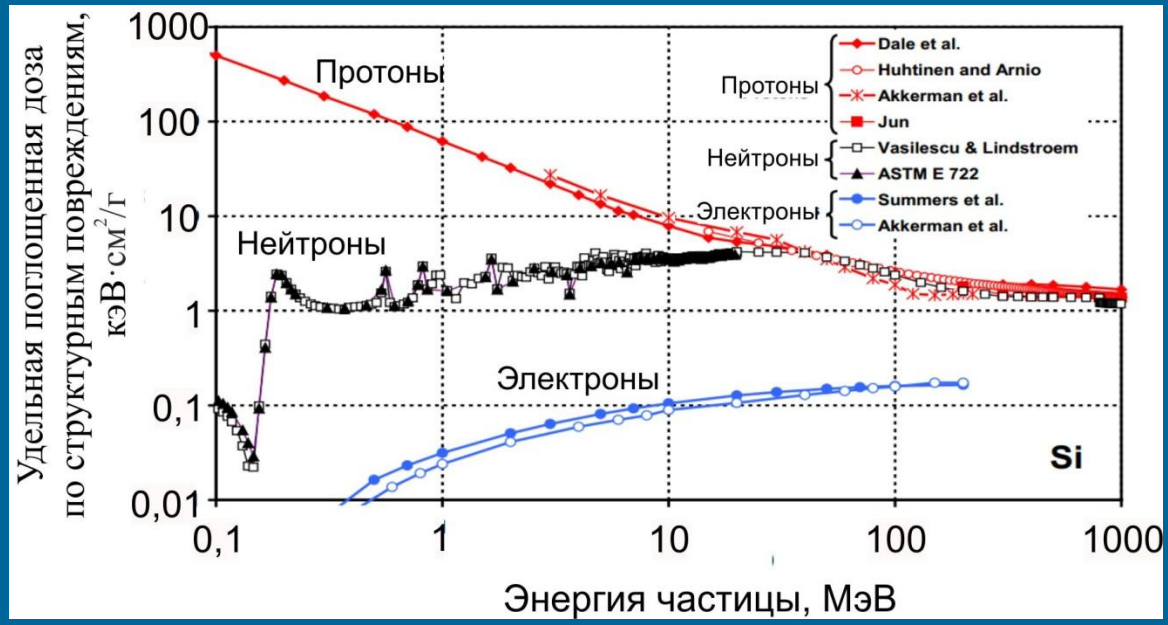
Эквивалентная поглощенная доза гамма-излучения

где:
a_{it}, b_{it}, k_s – эмпирический коэффициент;
σ_n, σ_p – сечение захвата электронов и дырок;
ϑ_{th} – тепловая скорость.



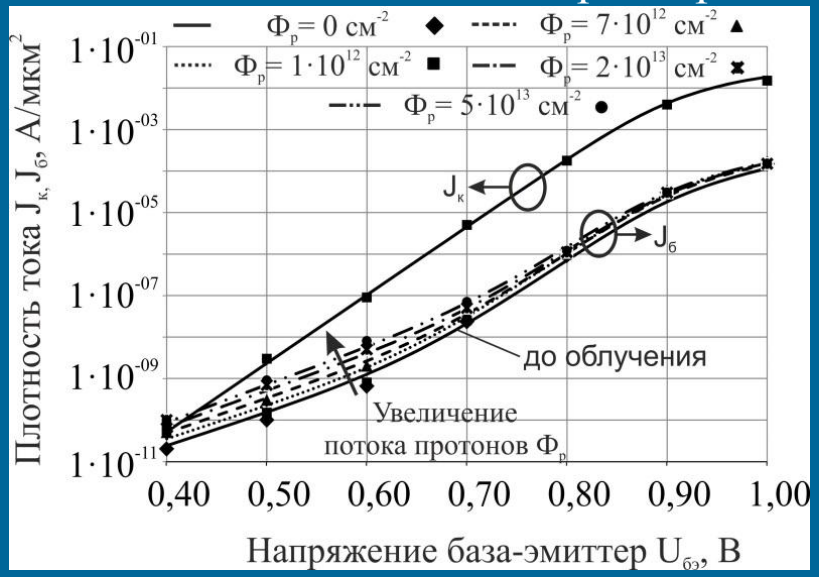
Эквивалентного потока нейтронов

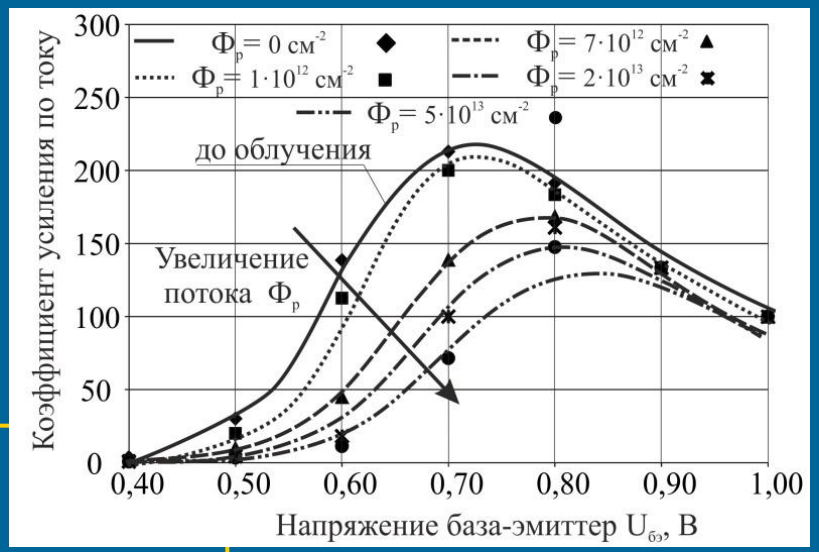
где:
a_{it}, b_{it}, k_s – эмпирический коэффициент;
σ_n, σ_p – сечение захвата электронов и дырок;
ϑ_{th} – тепловая скорость.

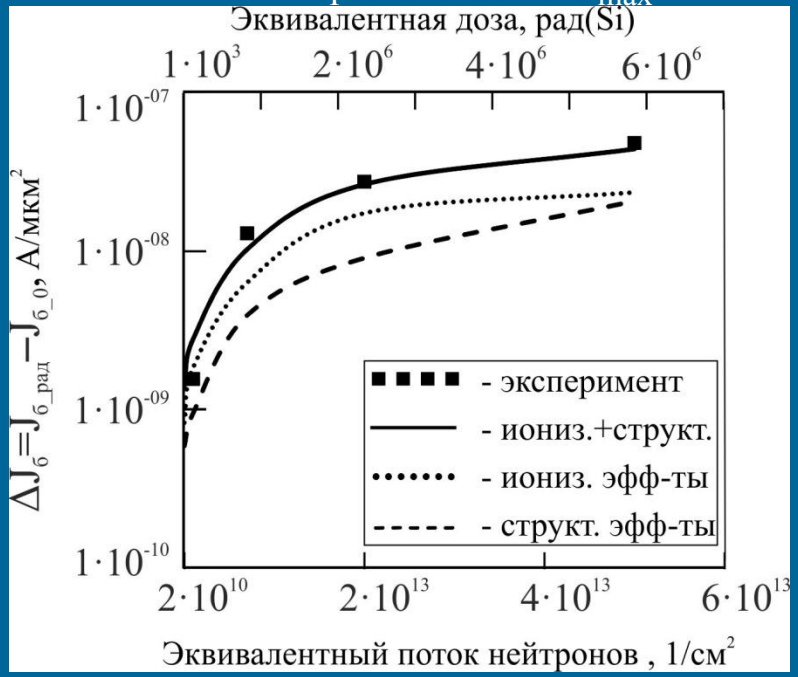


III. Расчет характеристик с помощью модели, учитывающей влияние протонного излучения на Si БТ и SiGe ГБТ

180 нм SiGe ГБТ 7HP с параметрами: W_e = 0,18 мкм, β = 250, f_T = 120 ГГц, f_{max} = 100 ГГц







Добавка радиационно-индуцированного тока базы

$$\Delta J_b = J_b(D) - J_b(0) \quad \text{для } U_{бэ} = 0{,}7 \text{ В}$$

Модель дает расхождение экспериментальных и смоделированных ВАХ не более 10-20%

ЗАКЛЮЧЕНИЕ: основные результаты работы

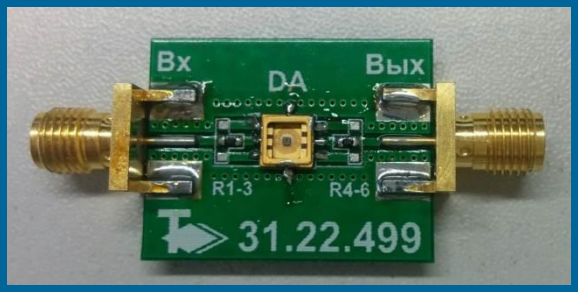
1) Разработаны приборно-технологические модели для расчета электрофизических и электрических характеристик Si БТ и SiGe ГБТ с учетом влияния нейтронного, протонного и гамма-излучений.
2) Модели включены в промышленную систему приборно-технологического моделирования Sentaurus Synopsys. Разработана методика настройки параметров моделей по результатам физических экспериментов.

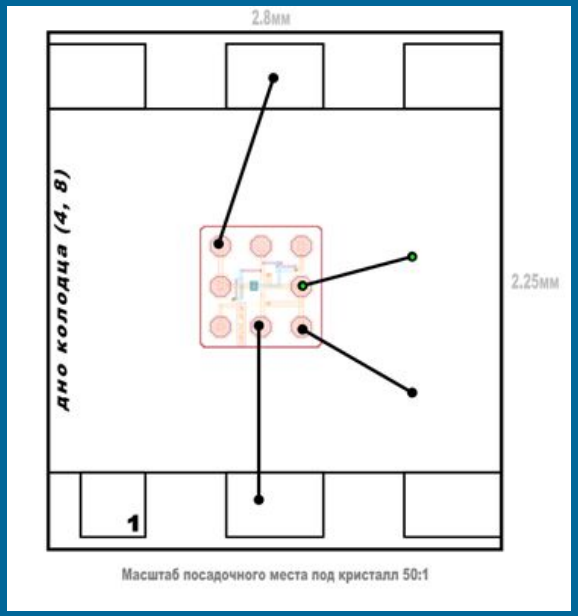
Модели обеспечивают достаточную точность (10-25%) описания характеристик элементов для Si БТ и SiGe ГБТ с размерами вплоть до субмикронных (до 0,1 мкм) в диапазоне радиационных доз до 10^7 рад и потоков до 10^{16} см$^{-2}$.

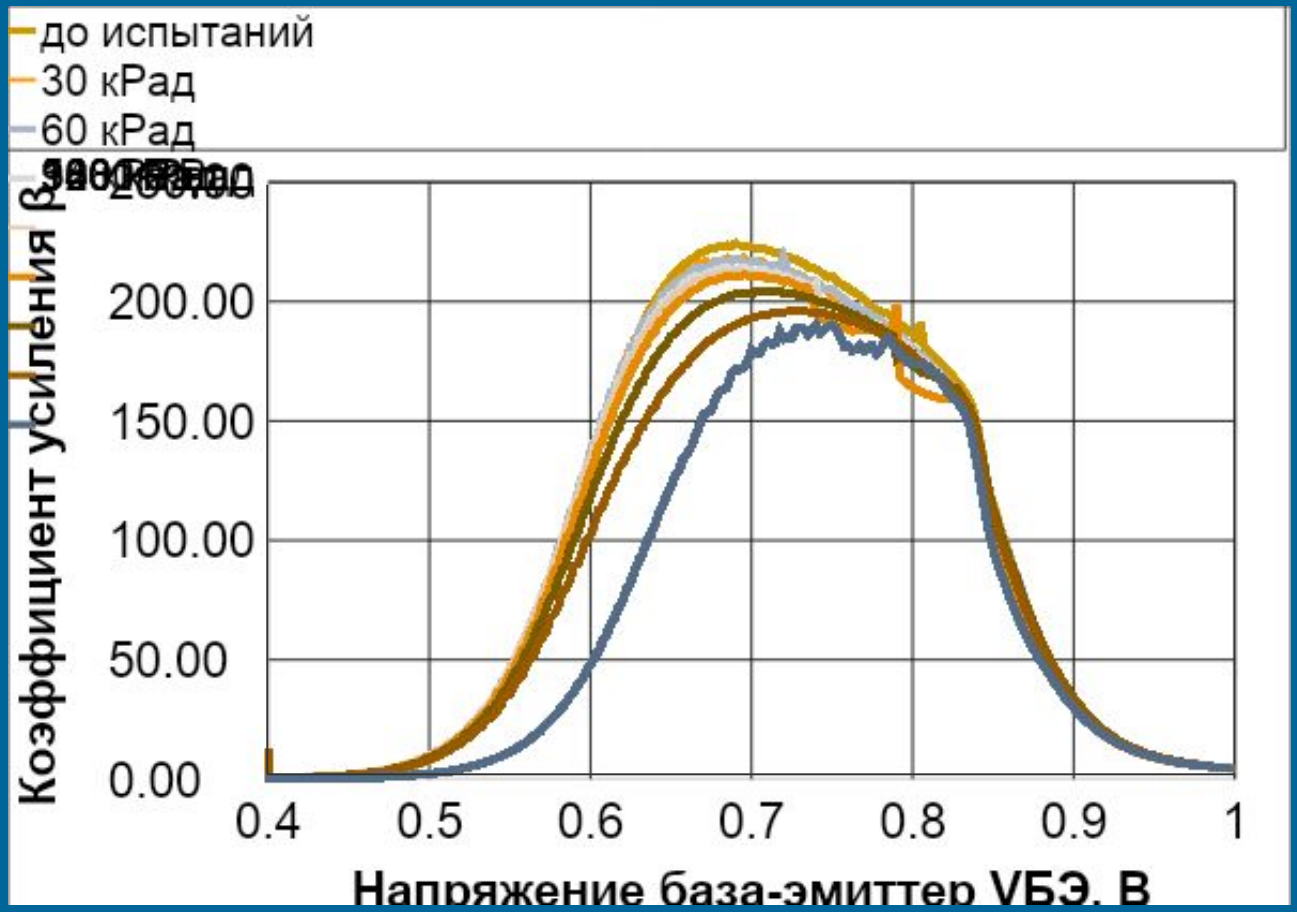
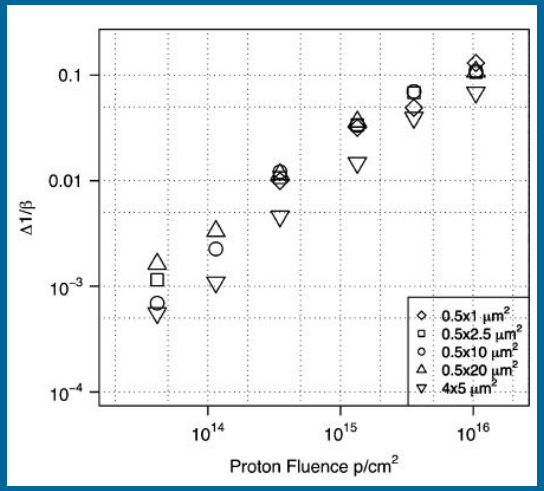
Разработанные радиационные модели для расчета Si БТ и SiGe ГБТ, изготовленных по различным отечественным и зарубежным технологиям, позволяют расширить возможности существующих приборно-технологических симуляторов, распространив их на расчет элементов радиационно-стойких Si и SiGe биполярных БИС.

Спасибо за внимание!

Результаты измерения SiGe ГБТ SGB25V до и после облучения







Результаты моделирования SiGe ГБТ до и после облучения для разных размеров эмиттера