

УДК 539.122.04

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИАЦИОННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК
БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ**

Мискевич С.А., Комаров А.Ф., Комаров Ф.Ф., Ювченко В.Н., Ермолаев А.П.

*НИУ «Институт прикладных физических проблем имени А.Н.Севченко» БГУ
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Разработана физико-математическая модель для расчета изменения рабочих характеристик *n-p-n* биполярных транзисторов в условиях облучения нейтронами 1,4 МэВ. Создана управляющая программа и проведены численные расчеты коэффициента усиления (КУ) тока и выходных характеристик прибора.

Ключевые слова: транзисторы, облучение, моделирование, радиационная стойкость.

**SIMULATION OF RADIATION CHANGES OF OPERATING CHARACTERISTICS OF BIPOLAR
JUNCTION TRANSISTORS**

Miskiewicz S., Komarov A., Komarov F., Yuvchenko V., Ermolaev A.

*Institute of Applied Physics Problems of BSU
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The model of *n-p-n* bipolar junction transistor operating under 1.4 MeV neutron irradiation and the software to input initial data and show simulation results were developed. The model allows to calculate the changes in output characteristics and current gain of BJT.

Key words: bipolar junction transistors, irradiation, simulation, radiation hardness.

*Адрес для переписки: Мискевич С.А., ул. Курчатова, 7, Минск 220045, Республика Беларусь
e-mail: sergei.miskevich@inbox.ru*

Биполярные транзисторы (БТ) являются приборами, управляемыми током неосновных носителей заряда (ННЗ). Определяющий параметр их радиационной стойкости это время жизни ННЗ в базе транзистора.

Модель. Модель для расчета радиационных изменений рабочих характеристик БТ основана на том, что основной вклад в этот процесс вносит дефектообразование при прохождении радиационных частиц и электромагнитного излучения через полупроводник и, как следствие, сокращение времени жизни ННЗ ввиду их рекомбинации на радиационных дефектах кристаллической решетки полупроводника. Ионизационные эффекты в БТ при воздействии излучения не так критичны [1], однако они могут вызывать появление каналов утечки у поверхности базы при генерации и накоплении заряда в изолирующих оксидных слоях прибора.

Время жизни ННЗ входит в уравнение непрерывности, задающее их пространственно-временное распределение по базовой области. В случае БТ *n-p-n* типа оно имеет вид:

$$\frac{\partial n(x)}{\partial t} = -\frac{\Delta n(x)}{\tau_n(x)} + D_n(x) \frac{\partial^2 n(x)}{\partial x^2} - \mu_n E(x) \frac{\partial n(x)}{\partial x} - n(x) \mu_n \frac{\partial E(x)}{\partial x}, \quad (1)$$

где n – концентрация неравновесных электронов, Δn – разница между концентрацией равновесных и неравновесных электронов; τ_n – время жизни; D_n – коэффициент диффузии; μ_n – подвижность;

E – напряженность встроенного электрического поля.

Граничные условия для (1): на эмиттерном переходе:

$$n(0) = n_p(0) e^{\frac{qU}{kT}}, \quad (2)$$

на коллекторном:

$$n(W_A) = 0, \quad (3)$$

где W_A – ширина активной базы; q – заряд электрона; U – напряжение на эмиттерном переходе; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура. Данные условия соответствуют активному режиму работы БТ, т. е. прямому смещению эмиттерного и обратному смещению коллекторного переходов.

Зависимость времени жизни неравновесных носителей заряда от поглощенной дозы излучения задается формулой [2]

$$\frac{1}{\tau_\Phi} = \frac{1}{\tau_0} + k_\tau \Phi, \quad (4)$$

где τ_0 – время жизни до облучения, τ_Φ – после облучения, Φ – поглощенная доза, k_τ – радиационный коэффициент изменения времени жизни. Данный коэффициент зависит от энергии и типа частиц, уровня инжекции и других факторов, а его численное значение в большинстве случаев определяется экспериментально.

В случае облучения нейтронами со средней энергией 1,4 МэВ данный коэффициент для *n-p-n* БТ имеет вид [1]:

$$\frac{1}{k_{\tau}} = 2,5 \cdot 10^5 + 5,55 \cdot 10^6 \left(\frac{p}{n}\right)^{0,395}$$

(нейтронов·сек/см²),

что при той же степени легирования и инжекции в несколько раз ниже, чем в случае *p-n-p* биполярного транзистора [1–2].

Результаты. Решение (1) в базе БТ представляет собой распределение ННЗ и определяет уровень рекомбинационных потерь. На его основе получаем плотности токов через переходы БТ: через эмиттерный

$$j_{ne} = qD_n \frac{dn(0)}{dx}, \quad (5)$$

через коллекторный

$$j_{nc} = qD_n \frac{dn(W_A)}{dx}, \quad (6)$$

Интегрируя (5) и (6) по площади переходов, получаем значения токов эмиттера и коллектора. Ток базы является разностью между ними. КУ в схеме с общим эмиттером – отношение токов коллектора и базы.

Численное решение уравнения (1) получаем методом прогонки [4, 5] с учетом (4) и (5) после конечно-разностной аппроксимации на сетке.

Управляющая программа предназначена для ввода исходных данных, запуска расчетных модулей и вывода результатов моделирования на экран в графическом виде (рис. 1).

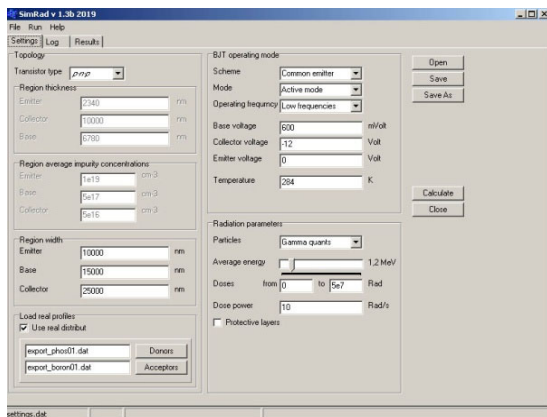


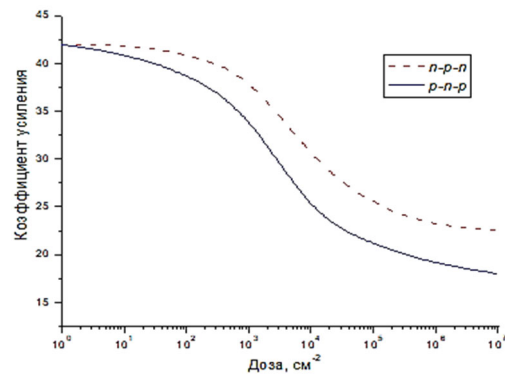
Рисунок 1 – Главное окно управляющей программы

При моделировании режимы работы транзисторов разных типов из-за различия их характеристик выбирались такими, чтобы начальные КУ обоих приборов были равны (рис. 2, а).

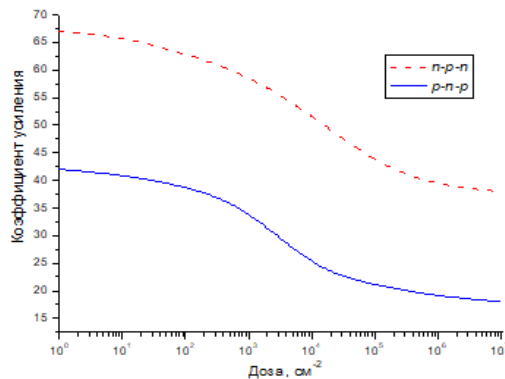
Согласно рис. 2, а, у *n-p-n* транзистора при равных начальных значениях скорость падения КУ при наборе дозы ниже, чем у *p-n-p*. Однако при одинаковых режимах работы (ток базы транзисторов 10 мкА), относительное падение КУ примерно равно (рис. 2, б).

Сравнение результатов моделирования радиационной стойкости разных типов биполярных

транзисторов показывает, что при облучении у приборов обоих типов наблюдается значительное падение КУ тока. Вид зависимости КУ от поглощенной дозы аналогичен, поскольку для описания радиационной деградации использовалась одна и та же модель, но с иными значениями коэффициента диффузии, подвижности, коэффициента радиационного изменения времени жизни.



а



б

Рисунок 2 – Зависимость коэффициента усиления от дозы нейтронов

Литература

1. Вологдин, Э. Н., Радиационная стойкость биполярных транзисторов. / Э. Н. Вологдин, А. П. Лысенко. – М., 2000. – 101 с.
2. Radiation degradation of bipolar transistor current gain / S. A. Miskiewicz [et al.] // Acta Physica Polonica. – 2017. – Vol. 132 (2). – P. 288–290.
3. Влияние ионизирующего излучения на характеристики полупроводниковых приборов: моделирование и эксперимент / С. А. Мискевич [и др.]. – В кн.: Труды XXIV Международной научной конференции «Взаимодействие ионов с поверхностью» (ВИП-2019) (19–23 августа 2019), г. Москва, 2019. – № 3. – С. 97–100.
4. Самарский, А. А. Теория разностных схем / А. А. Самарский, – М.: Наука, 1989.
5. Моделирование радиационной стойкости биполярных транзисторных структур на кремнии / С. А. Мискевич [и др.] // Материалы VIII Международной научной конференции «Актуальные проблемы физики твердого тела». (24–28 сентября 2018), Минск. Минск: Издательский центр БГУ, 2018. – С. 208–210.