

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИАЦИОННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК БИПОЛЯРНЫХ СТРУКТУР

С.А. Мискевич¹⁾, А.Ф. Комаров¹⁾, Ф.Ф. Комаров¹⁾, В.Н. Ювченко¹⁾, Г.М. Заяц²⁾

¹⁾Белорусский государственный университет, Институт прикладных физических проблем
им. А.Н. Севченко, ул. Курчатова 7, 220045 Минск, Беларусь, sergei.miskevich@inbox.ru

²⁾Институт математики НАН Беларуси,
ул. Сурганова 11, Минск, Беларусь, zayats@bas-net.by

В настоящей работе представлена физико-математическая модель работы биполярных транзисторных структур на кремнии при воздействии на них потоками высокоэнергетических радиационных частиц и электромагнитным излучением. Модель основана на численном решении уравнения непрерывности для неравновесных носителей заряда в рабочих областях прибора. Показан расчёт радиационных коэффициентов изменения времени жизни неосновных носителей заряда при облучении. Приведены результаты моделирования радиационных изменений рабочих характеристик транзистора на примере выходных ВАХ и зависимости коэффициента усиления от поглощённой дозы. Сделано сравнение приборов различного типа и режимов их работы касательно стойкости к радиационному воздействию.

Ключевые слова: биполярный транзистор; ионизирующее излучение; моделирование; время жизни; неравновесные носители заряда.

SIMULATION OF RADIATION-INDUCED CHANGES OF OPERATING CHARACTERISTICS OF BIPOLAR STRUCTURES

Sergei Miskiewicz¹⁾, Alexander Komarov¹⁾, Fadei Komarov¹⁾,
Vera Yuvchenko¹⁾, Galina Zayats²⁾

¹⁾Sevchenko Institute of Applied Physics Problems, Belarusian State University,
7 Kurchatov Str., 220045 Minsk, Belarus, sergei.miskevich@inbox.ru

²⁾Institute of mathematics of NAS of Belarus, 11 Surganov Str., zayats@bas-net.by

This work presents the model of the Si-BJT's operating in radiation environment. It is based on numerical solution on the continuity equation of the nonequilibrium charge carriers in the device work areas. Calculation of the radiation factors of the radiation-induced changes of nonequilibrium charge carrier lifetime is shown. The simulation results concerning the BJT output characteristics and current gain dose dependence are presented. Radiation hardness of the various types and operating modes of BJT's was compared.

Keywords: bipolar junction transistor; ionizing radiation; simulation; lifetime; nonequilibrium charge carriers.

Введение

В настоящее время приборы полупроводниковой электроники широко применяются во многих сферах жизни человека и промышленности. Однако высокая чувствительность полупроводников к воздействию радиационного облучения препятствует их использованию в аппаратуре орбитальных станций, атомной энергетике, объектах военного и двойного назначения и т.п.

В связи с этим, разработка методов повышения радиационной стойкости полупроводниковых приборов остаётся акту-

альной задачей для предприятий электронной промышленности. На первый план здесь выходит математическое моделирование для прогнозирования работы прибора в требуемых условиях. Оно позволит на основании полученных результатов внести необходимые корректировки в технологический процесс ещё на этапе проектирования.

Таким образом, цель настоящей работы – создать программный комплекс, позволяющий на основании заданных входных данных по топологии сделать расчёт изменений рабочих характеристик

биполярных транзисторов (БТ) в требуемых условиях эксплуатации.

Объектом исследования являлись интегральные БТ на кремнии $p-n-p$ и $n-p-n$ типов проводимости, работающие в режиме усиления низкочастотных сигналов. Результаты экспериментальных исследований радиационных изменений их рабочих характеристик предоставлены НТИЦ «Беломикросистемы» ОАО «Интеграл».

Физико-математическая модель

Модель для расчета радиационных изменений рабочих характеристик БТ основана на том, что основной вклад в этот процесс вносит дефектообразование и, как следствие, сокращение времени жизни неравновесных носителей в рабочих областях заряда ввиду их рекомбинации на радиационных дефектах кристаллической решетки полупроводника. Ионизационными эффектами при воздействии излучения на полупроводниковый материал, как правило, пренебрегают [1].

Время жизни неравновесных носителей заряда входит в уравнение непрерывности, задающее их пространственно-временное распределение по рабочей области. В случае БТ $n-p-n$ типа оно имеет вид:

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

Здесь n – концентрация неравновесных электронов, Δn – разница между концентрацией равновесных и неравновесных электронов, τ_n – время жизни неравновесных электронов, D_n – коэффициент диффузии, μ_n – подвижность, E – напряженность встроенного электрического поля, обусловленного неравномерным легированием рабочей области БТ.

Граничные условия для уравнения (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.

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 и определяется экспериментально.

В случае облучения нейтронами со средней энергией 1.4 МэВ данный коэффициент имеет вид [1]:

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

тронов · с/см²), что при той же степени легирования и инжекции в несколько раз ниже, чем в случае $p-n-p$ биполярного транзистора [1-2].

Для случая облучения гамма-квантами коэффициент k_τ приходилось выводить на основании экспериментальных данных.

Модель также учитывает эффект Эрли – модуляцию ширины активной базы БТ при отрицательном смещении на коллекторном переходе [3].

Решение уравнения (1) с учетом (2) и (3) в базовой области БТ представляет собой распределение неравновесных носителей по базе и определяет уровень рекомбинационных потерь. На основе данного распределения получаем плотности токов через переходы БТ: через эмиттерный:

$$j_{ne} = qD_n \frac{dn(0)}{dx}, \quad (6)$$

через коллекторный:

$$j_{nc} = qD_n \frac{dn(W_A)}{dx} \quad (7)$$

Интегрируя (5) и (6) по площади переходов, получаем значения токов эмиттера и коллектора. Ток базы является разностью между ними. Коэффициент усиления в случае схемы с общим эмиттером - отношение тока коллектора к току базы.

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

Результаты

Была разработана управляющая программа для ввода исходных данных, запуска расчётных модулей и вывода результатов моделирования на экран в графическом виде. На рисунке 1 показано главное окно данной программы.

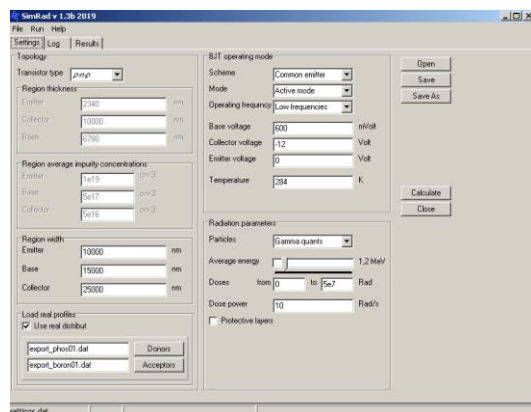


Рис. 1. Главное окно управляющей программы
Fig. 1. Main window of control program

На рисунке 2 показано окно для вывода результатов моделирования на примере выходных характеристик БТ для 3 заданных значений напряжений на базе.

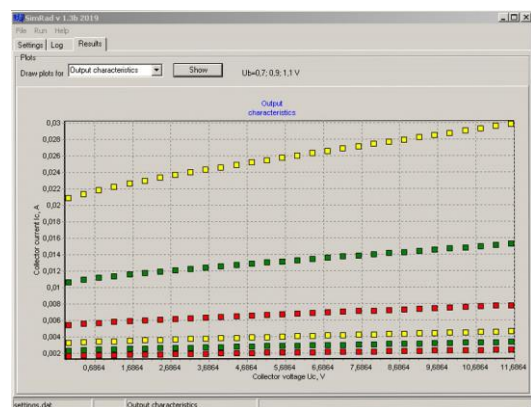


Рис. 2. Окно вывода результатов расчета
Fig. 2. Window showing the simulation results

В работах [2, 3, 5] нами проводилось моделирование радиационных изменений рабочих характеристик $p-n-p$ БТ. В случае прибора $n-p-n$ типа результаты расчёта зависимости коэффициента усиления транзисторов от дозы нейтронов со средней энергией 1.4 МэВ представлены на рис. 3. При моделировании режимы работы транзисторов разных типов из-за различия их характеристик выбирались такими, чтобы начальные коэффициенты усиления обоих приборов были равны (рис. 3а).

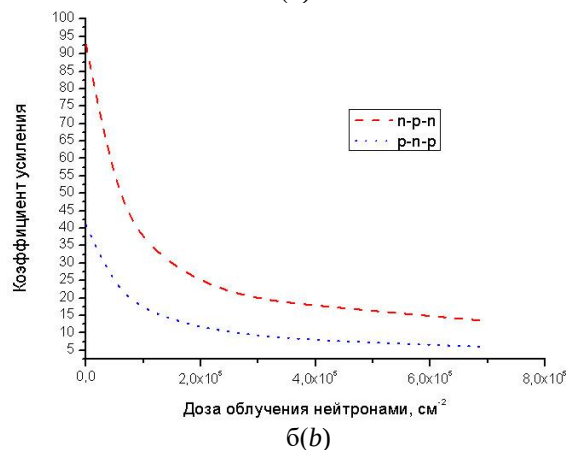
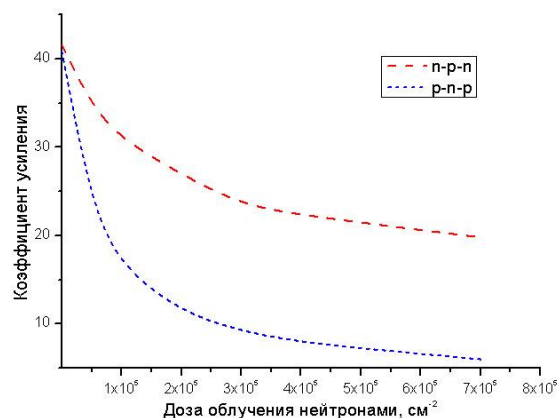


Рис. 3. Зависимость коэффициента усиления от дозы нейтронов
Fig. 3. Dependence of current gain on neutron dose

Согласно рис. 3а, у $n-p-n$ транзистора при равных начальных значениях скорость падения коэффициента усиления при наборе дозы существенно ниже, чем у $p-n-p$. Однако при одинаковых режимах работы (ток базы обоих транзисторов поддерживался равным 10 мкА), как видно из рис. 3б, относительное падение ко-

эffiциента усиления примерно равно.

ЗаклЮчение

Сравнение результатов моделирования радиационной стойкости разных типов биполярных транзисторов показывает, что при облучении у приборов обоих типов наблюдается значительное падение коэффициента усиления. Вид зависимости коэффициента усиления от поглощённой 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.

Однако для корректного моделирования и сравнения радиационной стойкости биполярных транзисторов различного типа необходимо наличие большего объема данных натурных испытаний. В последующих работах будут моделироваться влияние гамма-квантов и электронов на *n-p-n*, применяться двумерное приближение и рассматриваться рекомбинационные процессы в эмиттере и на поверхности прибора.

Библиографические ссылки

1. Вологдин Э.Н., Лысенко А.П. Радиационная стойкость биполярных транзисторов. М.; 2000. 101 с.
2. Miskiewicz S.A., Komarov A.F., Komarov F.F., Zayats G.M., Soroka S.A. Radiation degradation of bipolar transistor current gain. *Acta Physica Polonica* 2017; 132 (2): 288-290.
3. Мискевич С.А., Комаров Ф.Ф., Комаров А.Ф., Ювченко В.Н., Заяц Г.М., Цивако А.А., Божаткин В.А. Влияние ионизирующего излучения на характеристики полупроводниковых приборов: моделирование и эксперимент. В кн.: Труды XXIV Международной научной конференции «Взаимодействие ионов с поверхностью» (ВИП-

2019). (19-23 августа 2019 года), г. Москва; 2019. (3). С. 97-100.

4. Самарский А.А. Теория разностных схем. М.: Наука; 1989.
5. Мискевич С.А., Комаров Ф.Ф., Комаров А.Ф., Заяц Г.М., Ювченко В.Н., Ластовский С.Б., Богатырёв Ю.В. Моделирование радиационной стойкости биполярных транзисторных структур на кремнии. В кн.: Материалы VIII Международной научной конференции «Актуальные проблемы физики твёрдого тела». (24-28 сентября 2018 года), г. Минск. Минск: Издательский центр БГУ; 2018. С. 208-210.

References

1. Vologdin E.N., Lysienko A.P. Radiacionnaja stojkost bipoliarnych tranzistorov. [Radiation hardness of BJT]. Moscow; 2000. 101 p. (In Russian).
2. Miskiewicz S.A., Komarov A.F., Komarov F.F., Zayats G.M., Soroka S.A. Radiation degradation of bipolar transistor current gain. *Acta Physica Polonica* 2017; 132 (2): 288-290.
3. Miskiewicz S.A., Komarov F.F., Komarov A.F., Yuvchenko V.N., Zayats G.M., Tsivako A.A., Bozhatkin V.A. Vlijaniye ionizirujushchego izlucheniya na charakteristiki poluprovodnikovych priborov: modelirovaniye i eksperiment. [Impact of ionizing radiation on the characteristics of the semiconductor devices]. In book: Proceedings of XXIV International scientific conference «Vzaimodejstviye ionov s poverchnostju» [Ion-surface interaction]. (August 19-23, 2019), Moscow; 2019. (3). P. 97-100. (In Russian).
4. Samarskij A.A. Teoriya raznostnykh schem. [Theory of difference schemes]. Moscow: Science; 1989. (In Russian).
5. Miskiewicz S.A., Komarov F.F., Komarov A.F., Zayats G.M., Yuvchenko V.N., Lastovskij S.B., Bogatyriov Yu.V. Modelirovaniye radiacionnoj stojkosti bipoliarnych tranzistornykh struktur na kremnii. [Simulation of radiation hardness of silicon bipolar transistor structures]. In book: Proceedings of VIII International scientific conference «Aktualnyye problemy fiziki tvordogo tela». [«Actual problems of solid-state physics»]. (September 24-28, 2018), Minsk. Minsk: Izdatelskij centr BGU [BSU Publishing center]; 2018. P. 208-210. (In Russian).