ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОНАМИ С ЭНЕРГИЕЙ 4 МэВ НА РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КРЕМНИЕВЫХ БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

С.А. Мискевич[1)], А.Ф. Комаров[1)], В.Н. Ювченко[1)], А.П. Ермолаев[1)], С.В. Шпаковский[2)], Ю.В. Богатырёв[3)], Г.М. Заяц[4)]
[1)]*Белорусский государственный университет, Институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко, ул. Курчатова 7, Минск 220045, Беларусь, sergei.miskevich@inbox.ru*
[2)]*ОАО «Интеграл» - управляющая компания холдинга «Интеграл», ул. Казинца 121а, Минск*
[3)]*НПЦ НАН Беларуси по материаловедению, ул. П. Бровки 19, Минск 220072, Беларусь*
[4)]*Институт математики НАН Беларуси, Минск, ул. Сурганова 11, zayats@im.bas-net.by*

В работе рассматриваются процессы, происходящие в биполярных транзисторах на кремнии, при облучении их потоком высокоэнергетических электронов со средней энергией 4 МэВ. Определено, что основной вклад в радиационную деградацию рабочих характеристик данного типа приборов вносит уменьшение времени жизни неравновесных носителей заряда вследствие появления при облучении дефектов - центров рекомбинации. Разработана физико-математическая модель радиационного изменения времени жизни неравновесных носителей заряда в базе транзистора при облучении электронами. Предложен метод расчёта радиационного коэффициента изменения времени жизни неравновесных дырок при облучении электронами 4 МэВ. Проведен расчёт изменения выходных характеристик и коэффициента усиления *p-n-p* биполярного транзистора при облучении электронами.

Ключевые слова: биполярные транзисторы; облучение; электроны; моделирование; коэффициент усиления; время жизни; дефекты.

EFFECT OF 4 MeV ELECTRON IRRADIATION ON THE OPERATING CHARACTERISTICS OF SILICON BJTS

Sergei Miskevich[1)], Alexander Komarov[1)], Vera Yuvchenko[1)], Alexei Ermolaev[1)], Sergei Shpakovski[2)], Yuri Bogatyrev[3)], Galina Zayats[4)]
[1)]*Sevchenko Institute of Applied Physics Problems, Belarussian State University, 7 Kurchatov Str., 220045 Minsk, Belarus, sergei.miskevich@inbox.ru*
[2)]*JSC «INTEGRAL» – «INTEGRAL» Holding Managing Company, 121A Kazintsa Str., 220108 Minsk, Belarus*
[3)]*Scientific-Practical Materials Research Centre, National Academy of Sciences of Belarus, 19 Petrus Brovki Str., 220072 Minsk, Belarus*
[4)]*Institute of Mathematic, National Academy of Sciences of Belarus 11 Surhanov Str., Minsk, Belarus, zayats@im.bas-net.by*

Semiconductor devices used in space, on atomic objects or in military equipment should have the high radiation hardness. Their manufacturing is expensive and requires the series of the tests of the finished products. To reduce the costs, the computer simulation of device operation is used. The software allows to forecast the malfunction and failure of the semiconductor devices at the design stage.

This work represents the research of processes in the silicon *p-n-p* bipolar junction transistors (BJT) operating under the irradiation of 4 MeV electrons with a dose of up to 10^{15} cm^{-2}. The model of radiation changes of the BJT characteristics is developed. The base of this model is the equation of continuity of non-equilibrium charge carriers describing their distribution within the base area of BJT. Distribution profile defines the recombination losses of non-equilibrium charge carriers and the currents through the terminals. The method of calculation of the radiation factor of lifetime change for the electron flux is proposed. Experimental research was carried out at the “Integral” facility. The dependence of input and output characteristics, collector current and current gain on the radiation dose is obtained and presented in this work. Both simulation and experimental results show the significant deterioration in the BJT performance.

Keywords: BJT; irradiation; electrons; simulation; current gain; lifetime; defects.

Введение

При производстве полупроводниковых приборов с повышенной радиационной стойкостью для снижения материальных и временных затрат на испытания готовых изделий активно применяется компьютерное моделирование работы данных устройств в условиях радиационного воздействия ещё на этапе проектирования. В связи с этим, необходимо наличие эффективных моделей и программного обеспечения, описывающих поведение электронных компонентов в широком диапазоне режимов работы, доз и энергий излучения.

Объект исследования

В настоящей работе было проведено исследование *p-n-p* биполярного транзистора (БТ) КТ3107А производства ОАО «ИНТЕГРАЛ». Облучение прибора произведено на линейном ускорителе ЭЛУ-4 с номинальной энергией электронов E_e= 4 МэВ. Длительность импульсов составляла 5 мкс, частота следования импульсов 200 Гц. Плотность потока электронов (5-10)·10^{11} см$^{-2}$·с$^{-1}$, флюенс электронов $\Phi_e = 5\cdot10^{13}$ - $2\cdot10^{15}$ см$^{-2}$.

Модель

При разработке модели БТ были использованы оригинальные конструктивно-технологические параметры транзистора КТ3107А, включая конфигурацию и размеры областей, профили концентрации легирующих примесей. Модель основана на том, что решающий вклад в радиационную деградацию биполярных транзисторов вносит сокращение времени жизни неравновесных носителей заряда (ННЗ) в базе, вызванное повышением концентрации центров рекомбинации – дефектов кристаллической структуры – при облучении [1]. Время жизни входит в уравнение непрерывности ННЗ [1-4]:

$$\frac{\partial p(x)}{\partial t} = -\frac{p(x)-p_n(x)}{\tau_p(x)} + D_p(x)\frac{\partial^2 p(x)}{\partial x^2} - \mu_p(x)E(x)\frac{\partial p(x)}{\partial x} - p(x)\mu_p(x)\frac{\partial E(x)}{\partial x}, \quad (1)$$

где $\tau_p(x)$ – время жизни ННЗ, D_p и μ_p– коэффициент диффузии и подвижность ННЗ, p – концентрация ННЗ, p_n – равновесная концентрация ННЗ. В состав данного уравнения входят диффузионная, рекомбинационная и дрейфовая составляющие. Последняя связана с наличием встроенного электрического поля $E(x)$.

Решение уравнения (1) представляет собой пространственно-временное распределение ННЗ по базовой области БТ. Градиент концентрации ННЗ на границах эмиттерного и коллекторного переходов определять эмиттерный и коллекторный токи, а их разность – ток базы.

Зависимость времени жизни ННЗ от условий облучения выражается в следующем виде [5]:

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_0} + \Delta(E)\sigma_c \upsilon f(E_t - E_f)\Phi, \quad (2)$$

где $\Delta(E)$ – вероятность образования центра рекомбинации, σ_c – сечение захвата носителя заряда, υ – тепловая скорость, E_t – энергетический уровень рекомбинационного центра, введённого облучением, E_f – уровень Ферми, $f(E_t - E_f)$ – вероятность захвата ННЗ рекомбинационным центром. Решение уравнения (1) осуществлялось численно методом Гаусса. Параметры моделирования выбирались исходя из [6] и экспериментальных данных.

Результаты

На рис. 1 представлена зависимость коэффициента усиления БТ от дозы облучения электронами 4 МэВ для различных значений тока коллектора (0.01 – 0.1 А). Прибор включен в активном режиме.

На рис. 2 представлены выходные характеристики БТ до и после облучения дозами 10^{14} – 10^{16} см$^{-2}$ при заданном токе базы 0.8 мА. На рис. 3 представлены результаты моделирования входных характеристик БТ до и после облучения электронами с дозами 10^{13} – 10^{15} см$^{-2}$ и при обратном напряжении на коллекторе 0.2 В.

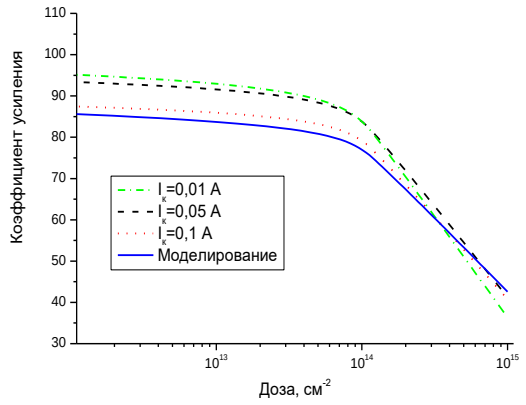

Рис. 1. Зависимость коэффициента усиления БТ от дозы облучения электронами в нескольких режимах работы

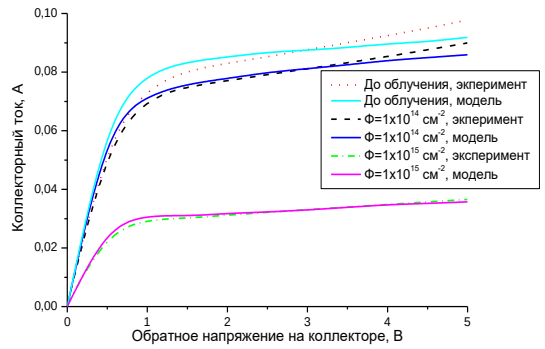

Рис. 2. Выходные характеристики БТ до и после облучения электронами для нескольких значений доз

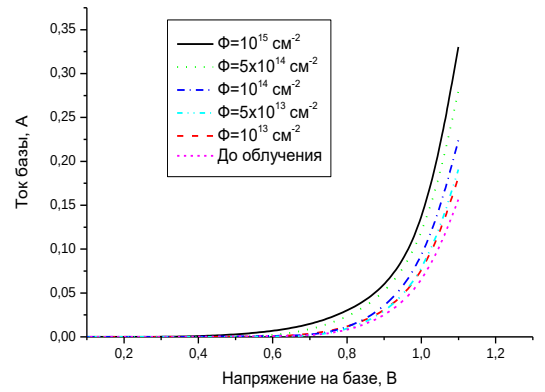

Рис. 3. Входные характеристики БТ до и после облучения электронами

Заключение

Результаты моделирования и данные экспериментальных исследований показывают значительное ухудшение электрических характеристик (снижение выходного тока и коэффициента усиления, повышение тока базы) БТ при облучении быстрыми электронами 4 МэВ. Результаты расчётов по разработанной модели хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Расчётный модуль с разработанной моделью будет включен в программный комплекс по моделированию радиационных изменений рабочих характеристик полупроводниковых приборов.

Библиографические ссылки

1. Сидоров Л.Н., Юровская М.А., Борщевский А.Я., Трушков И.В., Иоффе И.Н. Фуллерены. Москва: Экзамен; 2005. 688 с.
1. 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 A* 2017; 132: 288 – 290.
2. Мискевич С.А., Комаров Ф.Ф., Комаров А.Ф., Ювченко В.Н., Заяц Г.М. Моделирование радиационных эффектов в биполярных транзисторах. В кн.: Материалы VI Международной конференции «Прикладные проблемы оптики, радиофизики и физики конденсированного состояния». (20-21 мая 2021), г. Минск. Минск: Издательский центр БГУ; 2021. С. 134–136.
3. Мискевич С.А., Комаров А.Ф., Комаров Ф.Ф., Ювченко В.Н. Радиационные изменения рабочих характеристик биполярных транзисторов на кремнии. В кн.: Материалы II Международной конференции «Опто-, микро- и СВЧ-электроника – 2022». (21-23 сентября 2022), г. Минск. Минск: Издательский центр НАН Беларуси; 2022. С. 34-40.
4. Мискевич С.А., Комаров А.Ф., Комаров Ф.Ф., Ювченко В.Н., Ермолаев А.П. Моделирование радиационных изменений рабочих характеристик биполярных транзисторов. В кн.: Материалы XV Международной конференции «Приборостроение-2022». (16-18 октября 2022), г. Минск. Минск: Издательский центр БНТУ; 2022. С. 341–342.
5. Bertolotti M. In: Radiation effects in semiconductors. New York: Plenum press; 1968.
6. Kulkarni S.R., Ravindra M., Joshi G.R., Damle R. High-energy electron induced gain degradation in bipolar junction transistors. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research* 2006; 251: 157-162.