

УДК 539.122.04, 621.315.592

Мискевич С. А.¹, Комаров А. Ф.¹, Комаров Ф. Ф.¹, Ювченко В. Н.¹,
Ермолаев А. П.¹, Богатырёв Ю. В.², Заяц Г. М.³

РАСЧЁТ ИЗМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА ПРИ ОБЛУЧЕНИИ БЫСТРЫМИ ЭЛЕКТРОНАМИ

¹Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко» БГУ, Минск, Беларусь

²Институт физики твёрдого тела и полупроводников НАН Беларуси, Минск, Беларусь

³Институт математики НАН Беларуси, Минск, Беларусь

В работе рассматривается физико-математическая модель радиационного изменения времени жизни неравновесных носителей заряда в кремнии при воздействии потока электронов с энергией 4 МэВ. Предложен метод расчёта радиационного коэффициента изменения времени жизни неравновесных дырок. Проведен расчёт электрических характеристик p - n - p биполярного транзистора.

В настоящее время перед предприятиями электронной промышленности стоит задача создания полупроводниковых приборов, имеющих высокую стойкость к воздействию ионизирующего излучения, для применения их на объектах атомной энергетики и в космических аппаратах.

Для снижения материальных и временных затрат активно применяется компьютерное моделирование работы таких приборов при радиационном воздействии ещё на этапе проектирования, поэтому крайне необходимо наличие эффективных моделей и программного обеспечения, описывающих поведение электронных компонентов в широком диапазоне режимов работы, доз и энергий излучения.

В предыдущих работах [1-4] нами были представлены разработанные физико-математические модели расчёта изменения времени жизни неравновесных носителей заряда в кремнии p - и n -типа проводимости при облучении потоками электронов с энергией до 2 МэВ, нейтронов 1-2 МэВ и гамма-квантов Co^{60} 1,2 МэВ, результаты расчётов распределения носителей заряда по базовой области и электрических характеристик биполярных транзисторов. Был разработан программный комплекс и управляющая программа для ввода/вывода информации.

В настоящей работе было предложено расширение функционала разработанного программного комплекса за счёт добавления в него модуля, содержащего физико-математическую модель для расчёта изменения времени жизни неравновесных носителей заряда в кремнии при воздействии потока электронов с энергией 4 МэВ.

В общем виде зависимость времени жизни неравновесных носителей τ_Φ от дозы Φ и типа излучения имеет следующий вид [1]:

$$\frac{1}{\tau_\Phi} = \frac{1}{\tau_0} + k\Phi, \quad (1)$$

где k – коэффициент радиационного изменения времени жизни ННЗ, τ_0 – время жизни до облучения.

С учётом зависимости k от типа и энергии излучения [5]:

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

где $\Delta(E)$ – вероятность образования центра рекомбинации, σ_c – сечение захвата носителя заряда, v – тепловая скорость, E_t – энергетический уровень рекомбинационного центра, введённого облучением, E_f – уровень Ферми, $f(E_t - E_f)$ – вероятность захвата ННЗ рекомбинационным центром.

Время жизни входит в уравнение непрерывности неравновесных носителей заряда:

Секция 4. Прикладные проблемы физики конденсированного состояния

$$\frac{\partial p(x)}{\partial t} = -\frac{p(x) - p_n(x)}{\tau_p(x)} + D_p(x) \frac{\partial^2 p(x)}{\partial x^2} - \mu_p(x) E(x) \frac{\partial p(x)}{\partial x} - p(x) \mu_p(x) \frac{\partial E(x)}{\partial x}, \quad (3)$$

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 $E(x)$.

Расчёты проводились для p - n - p биполярного транзистора КТ3107А, разработанного в ОАО «Интеграл». Режим работы активный. Параметры моделирования брались из [6–10]. Экспериментальные данные получены путём облучения образцов на линейном ускорителе ЭЛУ-4 с номинальной энергией электронов $E_e = 4$ МэВ. Длительность импульсов 5 мкс, частота 200 Гц. Плотность потока электронов $(5-10) \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, флюенс электронов $\Phi_e = 5 \cdot 10^{13} - 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$.

На рисунке 1 а) представлена расчётная зависимость времени жизни неравновесных дырок от дозы облучения потоком электронов с энергией 4 МэВ при различных уровнях инжекции в базу (напряжениях на переходе эмиттер-база). На рисунке 1 б) зависимость времени жизни по глубине активной базы для нескольких значений доз облучения электронами.

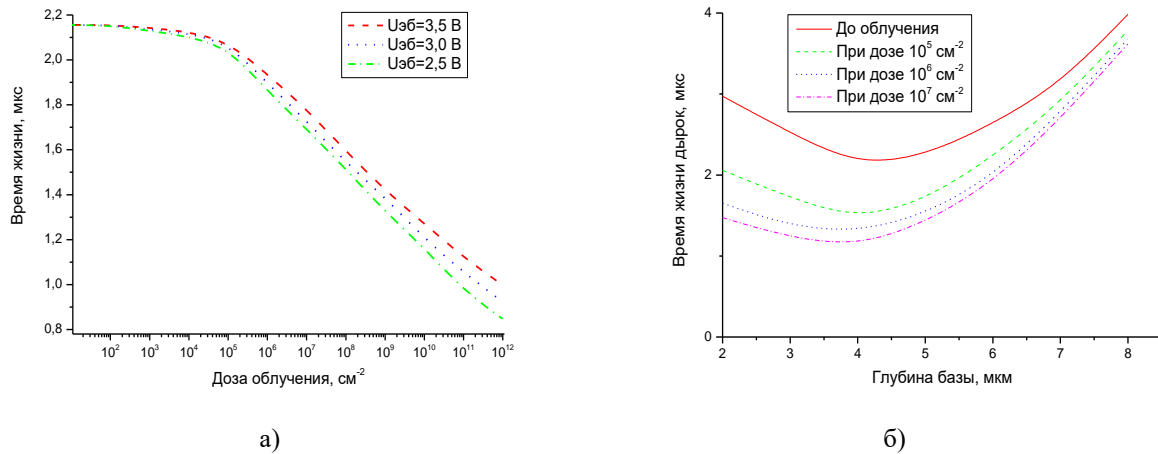


Рисунок 1 – Зависимость времени жизни неравновесных дырок от дозы облучения электронами

На рисунке 2 а) представлены выходные характеристики транзистора для тока базы 800 мкА до и после облучения электронами 4 МэВ дозами 1×10^{14} и $1 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$. На рисунке 2 б) представлена зависимость коэффициента усиления транзистора от дозы облучения электронами 4 МэВ для различных значений тока коллектора.

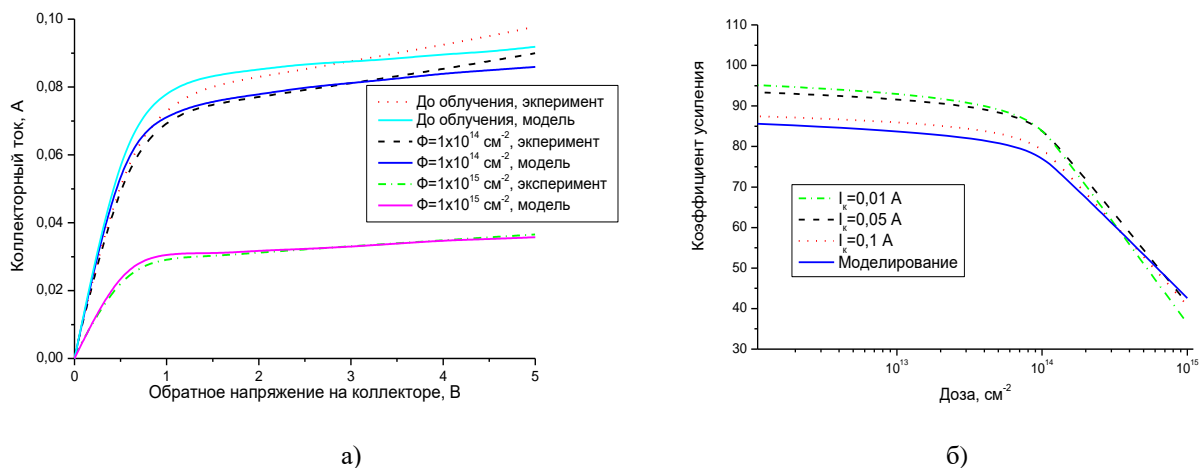


Рисунок 2 – Электрические характеристики транзистора до и после облучения электронами 4 МэВ

Секция 4. Прикладные проблемы физики конденсированного состояния

Таким образом, наблюдается значительное снижение электрических характеристик биполярного транзистора 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.

Список литературы

1. Miskiewicz, S.A. Radiation degradation of bipolar transistor current gain / S.A. Miskiewicz, A.F. Komarov, F.F. Komarov, G.M. Zayats, S.A. Soroka // Acta Physica Polonica A, 2017, V. 132, P. 288 – 290
2. Мискевич, С.А. Моделирование радиационных эффектов в биполярных транзисторах / С. А. Мискевич, Ф. Ф. Комаров, А. Ф. Комаров, В. Н. Ювченко, Г. М. Заяц // «Прикладные проблемы оптики, радиофизики и физики конденсированного состояния»: материалы VI Междунар. научно-практической конф., г. Минск, 20–21 мая 2021 г. – С. 134–136.
3. Мискевич, С.А. Радиационные изменения рабочих характеристик биполярных транзисторов на кремнии / С.А. Мискевич, А.Ф. Комаров, Ф.Ф. Комаров, В.Н. Ювченко // «Опто-, микро- и СВЧ-электроника – 2022»: материалы II Междунар. Научно-техн. конф., Минск, НАН Беларуси, 21-23 сентября 2022 г. – С. 34 – 40.
4. Мискевич, С.А. Моделирование радиационных изменений рабочих характеристик биполярных транзисторов / С. А. Мискевич, А. Ф. Комаров, Ф. Ф. Комаров, В. Н. Ювченко, А. П. Ермолаев // «Приборостроение-2022»: материалы XV Междунар. научно-практ. конф., Минск, 16–18 октября 2022 г. – С. 341–342.
5. Bertolotti, M. In: Radiation effects in semiconductors. Ed. Vook F.L. – New York, Plenum press. – 1968.
6. Иванов, А.М. Влияние облучения электронами и протонами на характеристики поверхностно-барьерных структур SiC-детекторов ядерных излучений / А.М. Иванов, Н.Б. Строкан, В.В. Козловский, А.А. Лебедев // Физика и техника полупроводников, 2008, Т. 42, В. 3, С. 370 – 377.
7. Богатов, Н.М. Влияние радиационных дефектов, созданных низкоэнергетическими протонами при температуре 83 К, на характеристики кремниевых фотоэлектрических структур / Н.М. Богатов, Л.Р. Григорьян, А.И. Коваленко, М.С. Коваленко, Ф.А. Колоколов, Л.С. Лунин // Физика и техника полупроводников, 2020, Т. 54, В. 2, С. 144 – 148
8. Naik, K.G. The effect of electron irradiation on BJTs and MOSFETs at elevated temperatures / K.G. Naik, S. Bhat, G. Sangeev // Arch. Phy. Res., 2013, V. 4 (2), P. 74-86
9. Yu, Z. Effects of Electronic Irradiation on the Characteristics of the Silicon Magnetic Sensitive Transistor / Z. Yu, X. Zhao, W. Liu, S. Li, Z. Yang, D. Wen, H. Zhang // Micromachines. 2023, V. 14, I. 430.
10. Kulkarni, S.R. High-energy electron induced gain degradation in bipolar junction transistors / S.R. Kulkarni, M. Ravindra, G.R. Joshi, R. Damle // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. 2006, B. 251, P. 157–162