

ВЛИЯНИЕ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИБОРОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

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

¹Белорусский государственный университет,

Институт прикладных физических проблем имени Севченко,
ул. Курчатова 7, 220045 Минск, Беларусь, sergei.miskevich@inbox.ru

²Институт математики НАН Беларуси, ул. Сурганова 11, 220072 Минск, Беларусь

В настоящей работе рассмотрены радиационные эффекты, возникающие в полупроводниковых материалах при воздействии на них ионизирующих излучений различного типа и энергии. Показаны механизмы, посредством которых происходят изменения рабочих характеристик полупроводниковых приборов. Разработана физико-математическая модель радиационных повреждений биполярных транзисторов. Реализован метод расчета распределения неравновесных носителей заряда по рабочим областям биполярного транзистора как в одномерном, так и в двумерном приближении. Выявлены различия в радиационной стойкости транзисторов, работающих в разных режимах и с разной топологией, и определены их оптимальные значения. Приведены основные результаты моделирования, которые показывают хорошее соответствие с экспериментальными данными.

Ключевые слова: моделирование; гамма-кванты; нейтроны; полупроводниковые структуры; биполярные транзисторы.

EFFECT OF IONIZING RADIATION ON CHARACTERISTICS OF SEMICONDUCTOR DEVICES

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

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

²Institute of Mathematics of NAS of Belarus, 11 Surganov Str., 220072 Minsk, Belarus

Radiation effects of ionizing corpuscular and electromagnetic radiation on semiconductors and semiconductor devices were investigated. The model of radiation-induced changes in semiconductor devices such as BJT was developed. It is based on continuity equation solving and used to calculate the 1D and 2D distribution of non-equilibrium charge carriers in areas of BJT and changes in input and output characteristics and current gain. The simulation results and the experimental data are shown.

Keywords: simulation; gamma-rays; neutrons; semiconductor structures; bipolar junction transistors.

Введение

Полупроводниковые приборы в настоящее время широко применяются во многих сферах микро- и нанoeлектроники. Их использование в аппаратуре военного и двойного назначения, а также на космических объектах и в атомной энергетике подразумевает высокую стойкость к радиационному воздействию. В связи с высокой чувствительностью полупроводников к ионизирующему излучению, а также сложностью и дорогостоящей натурных испытаний радиационной стойкости готовой продукции, большую роль в производственном процессе играет компьютерное моделирование для прогнозирования физических процессов, происходящих в полупроводниковых приборах при воздействии на них излучений различного типа и энергий.

Радиационные эффекты в полупроводниках можно разделить на структурные и ионизационные. Структурные связаны с образованием дефектов в кристаллической решетке, служащих центром захвата, рассеяния и рекомбинации носителей заряда, и являются критическими для приборов, управляемых током, таких как биполярные транзисторы. Ионизационные эффекты заключаются в генерации избыточных носителей заряда, приводящих к смещению электрических потенциалов в полупроводниках, и к ним чувствительны полевые транзисторы, МДП- и МОП-структуры.

Целью настоящей работы является разработка физико-математической модели радиационных

изменений рабочих характеристик полупроводниковых приборов на примере биполярных транзисторов.

Модель

Биполярные транзисторы представляют собой полупроводниковые приборы, управляемые токами и основанные на инжекции и переносе неосновных носителей заряда от эмиттера к коллектору через базу. Для определения коэффициента усиления и входных и выходных характеристик биполярных транзисторов необходим расчет входных и выходных токов, которые зависят от распределения неравновесных носителей заряда в базе.

Для расчета распределения неравновесных носителей заряда требуется решить уравнение непрерывности, которое в одномерном случае имеет вид [1]:

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

Его граничные условия: $p(0) = \frac{n_i^2}{N(0)} \cdot e^{\frac{qU_B}{kT}} \cdot p(W_A) = 0$

Здесь $p_n(x)$ – равновесная концентрация дырок в базе, q – заряд электрона, k – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура, U_B – напряжение на переходе эмиттер-база, n_i – собственная концентрация носителей заряда в кремнии, $N(0)$ – концентрация легирующей примеси в базе на границе с эмиттером, $E(x)$ – напряженность встроенно-

го электрического поля, $\tau_p(x)$ – время жизни неравновесных дырок в базе, D_p и μ_p – их коэффициент диффузии и подвижность, W_A – ширина активной базы.

Напряженность встроенного электрического поля $E(x)$ задается [2]:

$$E(x) = -\frac{kT}{q} \frac{1}{N(x)} \frac{dN(x)}{dx}, \quad (2)$$

где $N(x)$ – концентрация легирующей примеси в базе. Эффект Эрли, или зависимость толщины базы от напряжения на коллекторе [3]:

$$W_A = W_{A0} - 0.5 \cdot \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0 U_{dc} (N_{ac} + N_{db})}{qN_{ac}N_{db}}} \sqrt{1 - \frac{U_C}{U_{dc}}}, \quad (3)$$

где W_{A0} – толщина активной базы при разомкнутой цепи коллектора, U_{dc} – потенциальный барьер между базой и коллектором, U_C – отрицательное напряжение на коллекторе, ε – диэлектрическая проницаемость кремния, ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума, N_{ac} и N_{db} – средние концентрации акцепторов в коллекторе и доноров в базе.

В стационарном случае уравнение (1) представим в виде неоднородного дифференциального уравнения второго порядка с постоянными коэффициентами относительно $p(x)$:

$$\frac{p(x) - p_n(x)}{\tau_p(x)} + D_p \frac{\partial^2 p(x)}{\partial x^2} - \mu_p E(x) \frac{\partial p(x)}{\partial x} - p(x) \mu_p \frac{\partial E(x)}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

Решение осуществляется численно конечно-разностным методом [4] путем его замены дискретным аналогом, полученным на разностной сетке с количеством узлов N и шагом $h_i = x_{i+1} - x_i$, $i=0, 1, \dots, N-1, N$, где $x_0=0$, $x_N=W_A$. В результате получаем трехточечное уравнение следующего вида:

$$y_{i-1} \left(\frac{D_p}{h_i^2} - \frac{\mu_p E_i}{2h_i} \right) - y_i \left(\frac{2D_p}{h_i^2} + \frac{1}{\tau_p} + \mu_p \frac{E_{i+1} - E_i}{h_i} \right) + y_{i+1} \left(\frac{D_p}{h_i^2} + \frac{\mu_p E_i}{2h_i} \right) + \frac{p_{ni}}{\tau_p} = 0 \quad (5)$$

В координатной форме уравнение (5) имеет вид:

$$\begin{cases} y_0 = \lambda_1 y_1 + \mu_1 \\ -a_i y_{i-1} + c_i y_i - b_i y_{i+1} = f_i \\ y_N = \lambda_2 y_{N-1} + \mu_2 \end{cases}, \text{ для } i=1, 2, \dots, N-1, N \quad (6)$$

При граничных условиях первого рода, т.е. заданных значениях функции p на границах области моделирования, λ_1 и λ_2 равны 0. Тогда

$$y_0 = \mu_1 = \frac{n_i^2}{N(0)} \cdot e^{\frac{qU_B}{kT}}$$

$$y_N = \mu_2 = 0.$$

Система (6) является системой линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) вида $Ay=f$, где матрица коэффициентов A имеет трехдиагональный вид, и все ее коэффициенты равны 0, за исключением центральной и двух побочных диагоналей.

Систему (6) решаем методом прогонки [4], который является частным случаем метода Гаусса для решения разреженных СЛАУ, и получаем значения y_i по узлам сетки дискретизации, или распределение неравновесных дырок по активной базе биполярного транзистора.

Что касается зависимости времени жизни неравновесных носителей заряда от дозы, энергии и типа излучения, то в общем случае, как это подтверждается экспериментальными данными, она задается формулой [1, 3]:

$$\frac{1}{\tau_\Phi} = \frac{1}{\tau_0} + k_\tau \Phi, \quad (7)$$

где τ_0 – время жизни дырок до облучения, τ_Φ – время жизни дырок при облучении, Φ – доза облучения и k_τ – коэффициент радиационного изменения времени жизни дырок, зависящий как от типа и энергии радиационных частиц, так и от параметров и режима работы прибора.

Для потока нейтронов со средней энергией 1,4 МэВ для p - n - p биполярных транзисторов в режиме усиления данный коэффициент имеет вид [1]:

$$\frac{1}{k_\tau} = 4 \cdot 10^4 + 5,76 \cdot 10^6 \cdot \left(\frac{p}{n} \right)^{0,534} \quad (8)$$

Как видим, k_τ зависит от концентрации равновесных и неравновесных носителей в базе и представляет собой массив значений в координатном пространстве.

Для гамма-квантов в литературных источниках нет формулы для расчета k_τ , поэтому, основываясь на результатах эксперимента по облучению биполярных транзисторов гамма-квантами с энергией 1.2 МэВ, был применен метод подгонки для определения данного коэффициента. На рисунке 1 показано распределение неравновесных носителей по активной базе биполярного транзистора до и после облучения его гамма-квантами 1.2 МэВ.

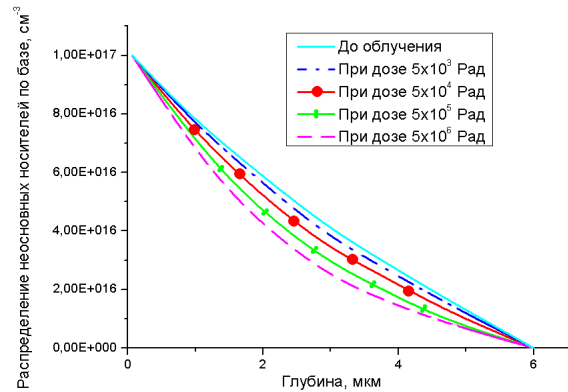


Рис. 1. Распределение неравновесных носителей заряда по базе биполярного транзистора до и после облучения гамма-квантами 1.2 МэВ

Fig. 1. Nonequilibrium charge carrier distribution in the base of BJT before and after 1.2 MeV γ -irradiation

Для более точного расчета распределения неравновесных носителей заряда по базе биполярных транзисторов следует использовать двумерное приближение [5], поскольку лишь в данном случае учитываются рекомбинационные процессы в пассивной базе биполярного транзистора.

Основываясь на найденном распределении неравновесных носителей заряда по базе биполярного транзистора, можно определить плотности токов [3,5] через эмиттерный:

$$j_{pE} = \frac{\partial p(0)}{\partial x} e D_p \quad (9)$$

и коллекторный переходы:

$$j_{pк} = \frac{\partial p(W_A)}{\partial x} e D_p \quad (10)$$

Интегрируя (9) и (10) по всей площади соответствующих переходов, находим токи эмиттера и коллектора. Ток базы будет представлять разность между током эмиттера и током коллектора. Коэффициентом усиления в схеме с общим эмиттером является отношение тока коллектора к току базы.

На рисунке 2 приведены результаты моделирования изменения коэффициента усиления биполярного транзистора при облучении гамма-квантами с энергией 1.2 МэВ и потоком нейтронов со средней энергией 1.4 МэВ.

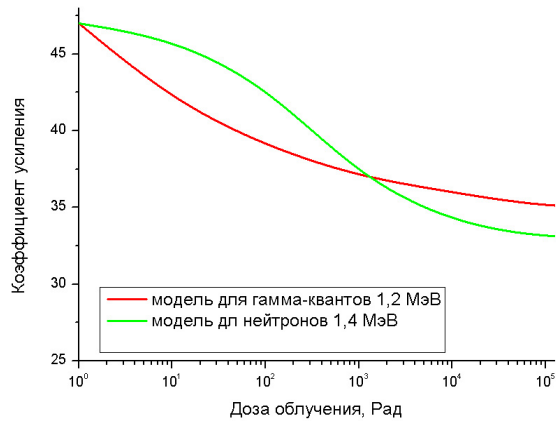


Рис. 2. Зависимость коэффициента усиления биполярного транзистора от дозы облучения гамма-квантами 1,2 МэВ и нейтронами 1.4 МэВ

Fig. 2. Dependence of BJT current gain on 1.2 MeV γ -radiation and 1.4 MeV neutron flux dose

На рисунке 3 показана зависимость коэффициента усиления биполярного транзистора от дозы облучения гамма-квантами 1.2 МэВ при использовании различных методов для расчета распределения неравновесных носителей заряда по базе. Как видно, наиболее точные результаты дает двумерная модель.

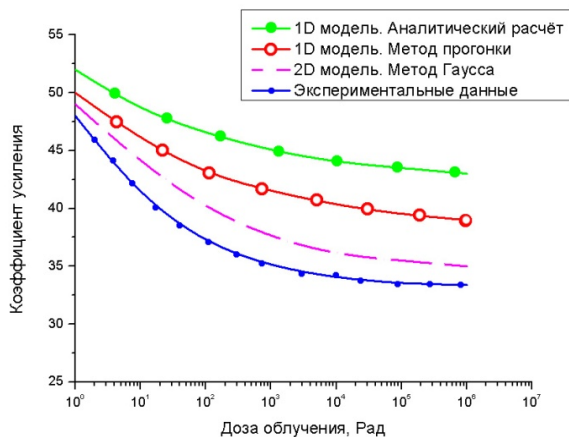


Рис. 3. Зависимость коэффициента усиления биполярного транзистора от дозы облучения гамма-квантами 1.2 МэВ

Fig. 3. Dependence of BJT current gain on 1.2 MeV γ -radiation dose

Заключение

Была разработана физико-математическая модель радиационных изменений рабочих характеристик биполярных транзисторов, в основе которой лежит численное решение уравнения непрерывности для неравновесных носителей заряда в базе, время жизни которых сокращается при облучении потоком радиационных частиц или электромагнитным излучением.

В результате моделирования с использованием разработанной модели и согласно данным экспериментальных исследований было установлено, что ионизирующее излучение, в частности гамма-кванты и нейтроны приводят к существенному уменьшению одной из основных характеристик биполярных транзисторов – коэффициента усиления.

Характер зависимости коэффициента усиления от дозы облучения не является линейным и зависит от типа радиационных частиц. Также установлено, что изменения в коэффициенте усиления наблюдаются уже при низких дозах облучения, а скорость его падения с ростом дозы уменьшается.

Двумерная модель для расчета распределения неравновесных носителей заряда более точно соответствует результатам эксперимента, поскольку учитывает рекомбинационные процессы как в активной, так и в пассивной базе.

Библиографические ссылки

1. Вологдин Э.Н., Лысенко А.П., Радиационная стойкость биполярных транзисторов. Москва; 2000. 101 с.
2. Степаненко И., Основы транзисторов и транзисторных схем. Москва: Наука; 1977. 672 с.
3. Miskiewicz S.A., Komarov A.F., Komarov F.F., Zayats G.M., Soroka S.A. Radiation degradation of bipolar transistor current gain. *ActaPhysicaPolonica* 2017; 132(2): 288–290.
4. Самарский А.А. Теория разностных схем. Москва: Наука; 1989.
5. Мискевич С.А., Комаров Ф.Ф., Комаров А.Ф., Заяц Г.М., Ювченко В.Н., Ластовский С.Б., Богатырев Ю.В. Моделирование радиационной стойкости биполярных транзисторных структур на кремнии. В кн.: Материалы 8-ой Международной научной конференции «Актуальные проблемы физики твердого тела», (24–28 сентября 2018 года), г. Минск. Минск: Издательский центр БГУ; 2018. С. 208–210.

References

1. Vologdin E.N., Lysenko A.P. Radiacionnaya stoykost bipolarnykh tranzistorov. [Radiation hardness of BJT]. Moscow; 2000. 101 p. (In Russian).
2. Stepanenko I. Osnovy tranzistorov i tranzistornykh skhem. Moscow: Nauka; 1977. 672 p. (In Russian).
3. Miskiewicz S.A., Komarov A.F., Komarov F.F., Zayats G.M., Soroka S.A. Radiation degradation of bipolar transistor current gain. *ActaPhysicaPolonica* 2017; 132(2): 288–290.
4. Samarskiy A.A. Teoriya raznostnykh skhem. [Differential schemes theory]. Moscow: Nauka; 1989. (In Russian).
5. Miskiewicz S.A., Komarov F.F., Komarov A.F., Zayats G.M., Yuvchenko V.N., Lastovskiy S.B., Bogatyryov Yu.V. Modelirovaniye radiacionnoy stoykosti bipolarnykh tranzistornykh struktur na kremnii. [Simulation of radiation hardness of bipolar transistor structures of silicon]. V kn.: Materialy VIII Mezhdunarodnoy nauchnoy konferencii "Aktualnyye problemy fiziki tvyordogo tela" (2018, September, 24–28), Minsk. Minsk: Izdatelskiy centr BGU; 2018: 208–210. (In Russian).