

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОТОКА НЕЙТРОНОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ p-n-p БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

С.А. Мискевич¹⁾, А.Ф. Комаров¹⁾, В.В. Михайлов¹⁾, Г.М. Заяц²⁾

¹⁾Лаборатория элионики, НИИ ПФП им. А.Н. Севченко БГУ, ул. Курчатова, 7, Минск, 220045, Беларусь, komarAF@bsu.by

²⁾Институт математики НАН Беларуси, ул. Сурганова, 11, Минск, 220072, Беларусь, zayats@bas-net.by

Разработана физико-математическая модель и программное обеспечение для моделирования воздействия нейтронных потоков на характеристики p-n-p биполярных транзисторов, работающих в режиме усиления низкочастотных сигналов в схеме с общим эмиттером. Программное обеспечение позволяет рассчитать радиационные изменения входных и выходных характеристик планарных биполярных транзисторов при различных напряжениях, температурах, размерах и конфигурации областей и распределения примесей в них.

Введение

Биполярные транзисторы, как дискретные, так и в интегральном исполнении, в настоящее время широко используются во многих сферах микро- и нанозлектроники как усилители и генераторы сигналов, как ключи, стабилизаторы и др. Их эксплуатация в условиях радиационного воздействия (космическая среда, атомная электростанция, ядерный взрыв) может быть затруднена из-за изменений рабочих характеристик, вызванных ионизирующим излучением. Прогнозирование таких радиационных изменений является одной из важнейших задач при производстве радиационно-стойких приборов полупроводниковой электроники. Решением может служить компьютерное моделирование их работы при облучении с учётом реальной топологии прибора.

Объект исследования

В данной работе рассматривался p-n-p биполярный транзистор как часть интегральной структуры, представленной на рис. 1.

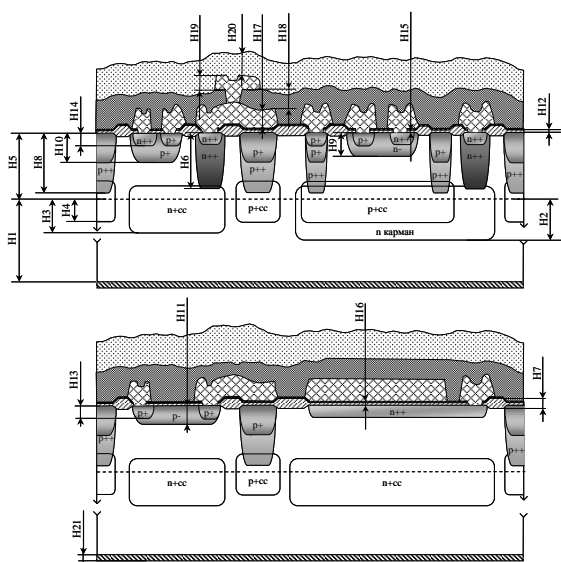


Рис. 1. Структура биполярного транзистора в интегральном исполнении.

Режимы формирования, распределение концентрации примесей, конфигурация и размеры областей, а также электрические характеристики

были предоставлены Дизайн-центром ОАО «Интергал». Транзистор выполнен по диффузионной технологии, поэтому распределение примесей, представленное на рис. 2, не является однородным. Это обуславливает наличие встроенного электрического поля в базе $E(x)$ и сравнительно малую ширину активной базы W_A .

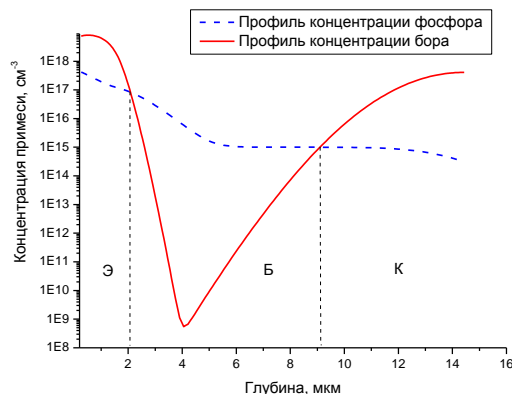


Рис. 2. Распределение концентрации примесей в p-n-p биполярном транзисторе.

Модель

При работе биполярного транзистора в активном режиме его важнейшим параметром является коэффициент передачи тока, т.е. отношение выходного тока к входному. В схеме с общим эмиттером это отношение тока коллектора к току базы:

$$k = \frac{J_C}{J_B} \quad (1)$$

Ток базы идёт на поддержание процессов рекомбинации неосновных носителей, инжектированных из эмиттера в базу. Обратная величина коэффициента передачи тока представляет собой рекомбинационные потери R_B носителей в базе на пути от эмиттера к коллектору.

Неравновесная концентрация инжектированных в базу дырок на границе эмиттер-база $p(0)$, согласно [1], задаётся следующим выражением:

$$p(0) = p_n(0) \cdot e^{\frac{qU_{EB}}{kT}}, \quad (2)$$

где $p_n(0)$ — равновесная концентрация дырок, q — заряд электрона, k — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура, U_{EB} — напряжение на

переходе эмиттер-база, которое можно считать равным напряжению на базе U_B . За начало координат принимаем границу перехода эмиттер-база со стороны базы, которая в зависимости от напряжения на переходе может сдвигаться. Учитывая несимметричность перехода эмиттер-база (концентрация примеси в эмиттере на 2 порядка выше концентрации примеси в базе), вкладом электронной составляющей инжекции из базы в эмиттер пренебрежём, т.е. имеет место односторонняя инжекция [2].

Равновесную концентрацию дырок в п-базе находим по формуле:

$$p_n(x) = \frac{n_i^2}{n_n(x)}, \quad (3)$$

где n_i – собственная концентрация носителей заряда в кремнии, $n_n(x)$ – концентрация основных носителей заряда (электронов) в базе. Считаем, что в диапазоне рассматриваемых температур концентрация основных носителей равна концентрации легирующей примеси $N(x)$, тогда (2) приводим к виду [3]:

$$p(0) = \frac{n_i^2}{N(0)} \cdot e^{\frac{qU_B}{kT}}. \quad (4)$$

Распределение инжектированных дырок по ширине базы с учётом встроенного электрического поля задаётся уравнением [3]:

$$\frac{\partial p(x)}{\partial t} = -\frac{p(x) - p_n(x)}{\tau_p(x)} + D_p \frac{\partial^2 p(x)}{\partial x^2} - \mu_p E(x) \frac{\partial p(x)}{\partial x} - p(x) \mu_p \frac{\partial E(x)}{\partial x}, \quad (5)$$

где $\tau_p(x)$ – время жизни дырок в базе, D_p и μ_p – коэффициент диффузии и подвижность дырок в базе.

Напряжённость встроенного электрического поля в базе транзистора задаётся выражением:

$$E(x) = -\frac{kT}{q} \frac{1}{N(x)} \frac{dN(x)}{dx}. \quad (6)$$

Считаем, что неравновесная концентрация дырок на границе перехода база-коллектор $p(W_A)=0$. Толщина активной базы W_A в зависимости от величины обратного напряжения на коллекторе изменяется в широких пределах, что следует учитывать при расчётах. Решая уравнение (5), находим распределение неосновных неравновесных носителей по базе.

Согласно [2], в области активной базы рекомбинационный ток описывается формулой:

$$I_A = qS_A \int_0^{W_A} \frac{p(x)}{\tau_p(x)} dx, \quad (7)$$

где S_A – площадь активной базы. В пассивной базе рекомбинационный ток описывается выражением:

$$I_{\Pi} = \frac{qS_{\Pi} \bar{D}_p n_i^2}{L_p} \frac{1}{N_{\Pi}} \exp\left(\frac{qU_{EB}}{kT}\right), \quad (8)$$

где \bar{L}_p – среднее значение диффузионной длины дырок в пассивной базе, \bar{N}_{Π} – среднее значение донорной примеси в пассивной базе, S_{Π} – площадь пассивной базы. Диффузионная длина связана с временем жизни соотношением:

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p}. \quad (9)$$

Полный ток базы, принимая инжекцию односторонней и пренебрегая потерями в эмиттере и

на поверхности, будет равен сумме рекомбинационных токов J_A и J_{Π} .

При радиационном воздействии в базе транзистора происходит генерация электронно-дырочных пар, а также образование точечных дефектов. В работах [1] и [4] показано, что наибольшее влияние ионизирующее излучение оказывает на время жизни неравновесных носителей, которое входит в (7) и (8), а изменением концентрации носителей можно пренебречь. Зависимость времени жизни от радиационного потока имеет вид [1]:

$$\frac{1}{\tau_{\Phi}} = \frac{1}{\tau_0} + k_{\tau} \Phi, \quad (10)$$

где τ_0 – время жизни дырок в базе до облучения, τ_{Φ} – время жизни дырок после облучения потоком частиц Φ , k_{τ} – коэффициент радиационного изменения времени жизни дырок в базе.

Для нейтронного потока со средней энергией частиц 1,4 МэВ согласно [4] коэффициент радиационного изменения времени жизни в п-базе зависит от уровня инжекции следующим образом:

$$\frac{1}{k_{\tau}} = 4 \cdot 10^4 + 5,76 \cdot 10^6 \left(\frac{p}{n}\right)^{0,524} \quad (11)$$

Как видно из (6), время жизни дырок при облучении обратно пропорционально радиационной дозе.

Таким образом, задача сводится к адаптации подхода [1] для достаточно корректного описания конкретной топологии прибора и распределения концентрации легирующих примесей в областях.

Результаты расчётов

Моделирование проводилось для следующих параметров прибора: размеры эмиттера 4x4 мкм, размеры базы 8x12 мкм, распределения концентрации примесей соответствуют представленным на рис. 2.

Расчёт радиационного изменения коэффициента передачи тока производился для значений потока ионизирующего излучения в диапазоне от 0 до 1×10^5 рад при напряжении на базе $U_B=0.6$ В и напряжении на коллекторе $U_C=-9$ В. Результаты расчёта представлены на рис. 3. Наблюдается заметное уменьшение коэффициента передачи тока уже при относительно невысоких потоках облучения быстрыми нейтронами.

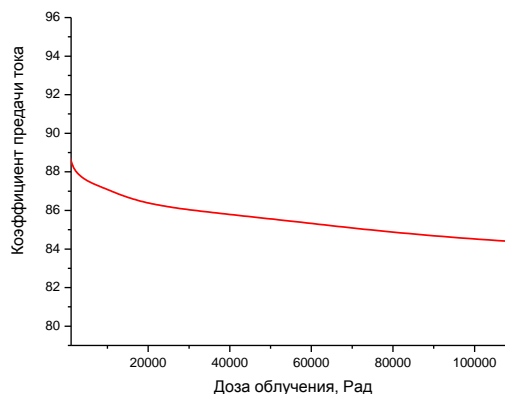


Рис. 3. Зависимость коэффициента передачи тока транзистора от дозы облучения.

Выходные характеристики транзистора рассчитывались при постоянном напряжении на базе $U_B=0,5$ В. На рис. 4 приведена зависимость тока коллектора от напряжения на коллекторе до облучения и для доз 2×10^5 Рад и 5×10^5 Рад.

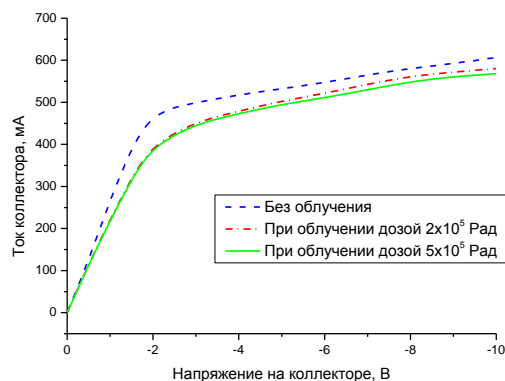


Рис. 4. Выходные характеристики транзистора до и после облучения.

Наиболее значительное уменьшение тока коллектора соответствует напряжению на коллекторе менее 5 В.

Заключение

Разработана физико-математическая модель и программное обеспечение для моделирования радиационно-индуцированных изменений характеристик р-п-р биполярных транзисторов.

Установлено, что с ростом поглощённой радиационной дозы возрастают рекомбинационные процессы в базе, вызывающие падение выходного тока и, следовательно, коэффициента передачи тока.

Список литературы

1. Вологдин Э.Н., Лысенко А.П. Радиационная стойкость биполярных транзисторов. Москва. 2000. 101 с.
2. Зеегер К. Физика полупроводников. Москва: Мир, 1977. 615 с.
3. Степаненко И.П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем. Москва: Энергия, 1977. 672 с.
4. Вологдин Э.Н., Лысенко А.П. Интегральные радиационные изменения параметров полупроводниковых материалов. Москва. 1999.

SIMULATION OF INFLUENCE OF NEUTRON FLOW ON P-N-P BIPOLAR TRANSISTOR CHARACTERISTICS

S.A. Miskiewicz¹⁾, A.F. Komarov¹⁾, V.V. Michailov¹⁾, G.M. Zayats²⁾

¹⁾Elionics laboratory, Institute of Applied Physics Problems, BSU, 7 Kurchatov street, 220045, Minsk, Belarus, komarAF@bsu.by

²⁾Institute of Mathematics, Academy of Sciences of Belarus, 11 Surganov Str., 220072 Minsk, Belarus, zayats@bas-net.by

We have developed numerical model and software to simulate the ionizing radiation influence on the bipolar transistor parameters. The software allows to calculate the input and output characteristics, the current transmission coefficient and other parameters under the irradiation for various temperatures, base and collector voltages.