

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально показана возможность создания барьерных структур посредством имплантации ионов бора в НРНТ алмаз. Формирование барьерной структуры связывается с фиксацией уровня Ферми в нарушенном ионами слое вблизи середины запрещенной зоны, в то время как в неповрежденной части кристалла он располагается значительно ближе к потолку валентной зоны. При освещении лазером 405 нм либо облучении электронами с энергией 10 кэВ возникает выходное напряжение порядка 1 В. Для увеличения индуцированного квантами света или высокоэнергетическими электронами тока необходимо снижать рекомбинационные потери в материале, а также уменьшать последовательное сопротивление барьерных структур.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Carrier recombination and diffusion in high-purity diamond after electron irradiation and annealing / P. Grivickas // Appl. Phys. Lett. – 2020. – Vol. 117. – P. 242103 (1–7).
2. Carrier recombination parameters in diamond after surface boron implantation and annealing / P. Grivickas [et al.] // J. Appl. Phys. – 2020. – Vol. 127. – P. 245707 (1–6).
3. Ionization equilibrium at the transition from valence-band to acceptor-band migration of holes in boron-doped diamond / N. A. Poklonski [et al.] // J. Appl. Phys. – 2016. – Vol. 119. – P. 245701 (1–10).
4. Single crystal CVD diamond membranes for betavoltaic cells / C. Delfaure [et al.] // Appl. Phys. Lett. – 2016. – Vol. 108. – P. 252105.
5. Energy conversion efficiency in betavoltaic cells based on the diamond Schottky diode with a thin drift layer / V. Grushko [et al.] // Applied Radiation and Isotopes. – 2020. – Vol. 157. – P. 109017.
6. Ultrahigh conversion efficiency of betavoltaic cell using diamond pn junction / T. Shimaoka, H. Umezawa, K. Ichikawa, J. Pernot, S. Koizumi // Appl. Phys. Lett. – 2020. – Vol. 117. – P. 103902.
7. <http://www.srim.org/>

ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРНЫХ СТРУКТУР НА КРЕМНИИ В УСЛОВИЯХ РАДИАЦИОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ

С. А. Мискевич, Ф. Ф. Комаров, В. Н. Ювченко

*НИИППП им. А.Н. Севченко БГУ, ул. Курчатова, 7, 220045 Минск, Беларусь
e-mail: sergei.miskevich@inbox.ru*

Разработана физико-математическая модель и представлены результаты моделирования воздействия потока электронов с энергией 2–4 МэВ и дозами до 10^{15} см^{-2} на входные и выходные вольт-амперные характеристики (ВАХ), а также коэффициент усиления p – n – p -биполярного транзистора КТЗ107А.

Ключевые слова: кремний; биполярные транзисторы; радиационное излучение; моделирование; время жизни; рекомбинация; электроны.

OPERATING OF SILICON BIPOLAR JUNCTION TRANSISTORS UNDER THE IRRADIATION

S. A. Miskiewicz, F. F. Komarov, V. N. Yuvchenko

*Institute of Applied Physics Problems of Belarusian State University, Kurchatov str. 7,
220045 Minsk, Belarus*

Corresponding author: S. A. Miskiewicz (sergei.miskevich@inbox.ru)

The model of radiation impact of the electron flux (2–4 MeV, up to 10^{15} cm^{-2}) on the bipolar junction transistors (BJT) is developed and the results of computer simulation of the input and output current-voltage characteristics and current gain are shown.

Key words: silicon; bipolar junction transistors; radiation; computer simulation; lifetime; recombination; electrons.

ВВЕДЕНИЕ

Высокая чувствительность полупроводниковых приборов к воздействию ионизирующего излучения ограничивает сферы их применения на объектах атомной энергетики и космического пространства. Поэтому актуальна задача прогнозирования и повышения радиационной стойкости устройств ещё на этапе проектирования, с использованием компьютерного моделирования.

МОДЕЛЬ

В работе рассматривался оригинальный p – n – p -биполярный транзистор (БТ) КТ3107А, параметры которого были предоставлены ОАО «Интеграл».

Облучение производилось на линейном ускорителе ЭЛУ-4 с номинальной энергией электронов $E_e = 4 \text{ МэВ}$. Длительность импульсов 5 мкс, частота следования импульсов 200 Гц. Плотность потока электронов $(5\text{--}10) \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, флюенс $\Phi_e = 5 \cdot 10^{13} \text{--} 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2} [1]$.

Основной вклад в радиационную деградацию рабочих характеристик БТ вносит сокращение времени жизни неравновесных носителей заряда (ННЗ) в базе, вызванное повышением концентрации центров рекомбинации (дефектов кристаллической структуры) при облучении [2].

Время жизни ННЗ (дырок для p – n – p -БТ) входит в уравнение непрерывности ННЗ [2]:

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

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 $E(x)$.

Граничные условия для уравнения (1) имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} p(0) &= p_n(0) e^{\frac{qU}{kT}}, \\ p(W_A) &= 0, \end{aligned} \quad (2) \quad (3)$$

где W_A – ширина активной базы, q – заряд электрона, U – напряжение на эмиттерном переходе, k – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура. Данные условия соответствуют активному режиму работы БТ.

Решение (1) с граничными условиями (2–3) представляет собой пространственно-временное распределение ННЗ по области базы БТ. Градиент концентрации ННЗ на границах эмиттерного и коллекторного переходов определяет эмиттерный и коллекторный токи. Разность эмиттерного и коллекторного токов равна току базы.

Основным параметром, определяющим решение уравнения (1) и характер распределения ННЗ по базе, является время жизни ННЗ, зависимость которого от условий облучения выражается в следующем виде [2, 3]:

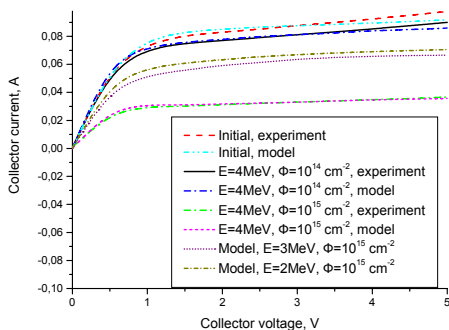
$$\frac{1}{\tau_{\Phi}} = \frac{1}{\tau_0} + k_{\tau} \Phi, \quad (4)$$

где Φ – доза облучения, k_{τ} – радиационный коэффициент изменения времени жизни ННЗ, τ_{Φ} – время жизни при облучении, τ_0 – время жизни до облучения.

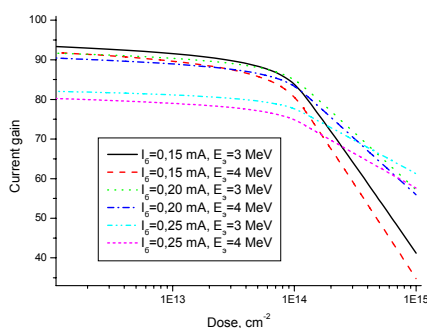
Данный коэффициент (k_{τ}) зависит от энергии и типа излучения, уровня инжекции и других факторов, а его численное значение в большинстве случаев определяется экспериментально. В некоторых частных случаях коэффициент k_{τ} может быть рассчитан численно [4].

В [1, 2] был предложен метод определения коэффициента k_{τ} на основании экспериментальных данных зависимости токов через переходы транзистора от дозы облучения электронами с энергией 4 МэВ и методики расчёта по топологии [4]. В настоящей работе модель адаптирована на более широкий диапазон энергий налетающих электронов, а также другой тип биполярных транзисторов.

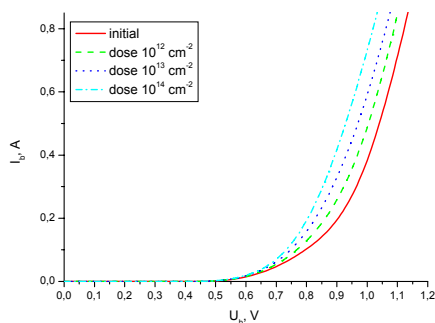
РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ



a



б



в

a – Выходные ВАХ БТ;
б – зависимость коэффициента усиления БТ от дозы облучения электронами;
в – входные характеристики БТ

На рисунке (а) представлены результаты моделирования выходных ВАХ БТ при воздействии потока электронов с энергиями 2–4 МэВ и дозами 10^{14} и 10^{15} см⁻². Для сравнения приведены экспериментальные результаты для энергии электронов 4 МэВ.

На рисунке (б) представлены результаты моделирования зависимости коэффициента усиления БТ от дозы облучения электронами с энергиями 3 и 4 МэВ для значений входного тока 0,15, 0,2 и 0,25 мА.

На рисунке (в) представлены результаты моделирования входных характеристик БТ до и после облучения потоком электронов с энергией 4 МэВ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При облучении БТ потоком электронов его рабочие характеристики значительно ухудшаются. На примере коэффициента усиления видно, что при наборе дозы 10^{15} см⁻² его значение снижается почти в 2 раза и скорость падения зависит от выбора рабочей точки прибора. Результаты моделирования выходных ВАХ БТ хорошо согласуются с экспериментальными данными.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Влияние облучения электронами с энергией 4 МэВ на рабочие характеристики кремниевых биполярных транзисторов / С.А. Мискевич [и др.] // Взаимодействие излучений с твердым телом (ВИТТ-2023): матер. XV Междунар. науч. конф., Минск, 26-29 сентября 2023 г. – Минск: БГУ, 2023. – С. 180–182.
2. Radiation degradation of bipolar transistor current gain / S.A. Miskiewicz [et al.] // Acta Physica Polonica A. - 2017. - №132. - P. 288–290.
3. Bertolotti M. In: Radiation effects in semiconductors. - New York: Plenum press; 1968.
4. Радиационная стойкость биполярных транзисторов / Э.Н. Вологдин, А.П. Лысенко. - М., 2000. – 101 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ЭЛЕКТРОННО-ФОНОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ГРАФЕНЕ, МОДИФИЦИРОВАННОМ АТОМАМИ ФТОРА

В. Н. Мищенко, П. А. Матусевич, А. Д. Васютич, И. С. Сурвило, К. Д. Рахубо

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
ул. П. Боровки 6, 220013 Минск, Беларусь,
e-mail: mishchenko@bsuir.by*

Графен рассматривается в настоящее время как один из наиболее перспективных материалов для создания новых полупроводниковых приборов для различных диапазонов частот. Путем моделирования из первых принципов исследованы особенности электронно-фононного взаимодействия в графене модифицированном атомами фтора. Полученные характеристики и параметры графена модифицированном атомами фтора могут служить основой для создания новых гетероструктурных приборов, содержащих слои модифицированного графена и других полупроводниковых материалов.

Ключевые слова: графен; фтор; моделирование; полупроводниковая структура.