

МОДЕЛЬ РАДИАЦИОННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК IGBT ТРАНЗИСТОРОВ

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

Институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко

Белорусского государственного университета,

ул. Курчатова 7, Минск 220045, Беларусь, sergei.miskewich@inbox.ru

Предложена модель радиационных изменений рабочих характеристик интегральных iGBT транзисторов на кремнии. Приведены результаты расчета сдвига порогового напряжения и выходные характеристики при облучении потоком протонов с энергией до 950 кэВ и дозами до $3.7 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$.

Ключевые слова: iGBT; моделирование; облучение; пороговое напряжение; дефектообразование; вольт-амперные характеристики.

MODEL OF SHIFT OF IGBT OPERATING CHARACTERISTICS UNDER IRRADIATION

Sergei Miskiewicz, Vera Yuvchenko, Fadei Komarov

Sevchenko Institute of Applied Physics Problems, Belarusian State University,

7 Kurchatov Str., 220045 Minsk, Belarus, Sergei.miskewich@inbox.ru

The model of radiation-induced changes in operating characteristics of silicon isolated-gate bipolar transistors is developed. The simulation results for the threshold voltage, output voltage-current characteristics of the iGBT under the proton irradiation (up to 950 keV, $3.7 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$) are shown.

Keywords: iGBT; simulation; irradiation; threshold voltage; defect formation; voltage-current characteristics.

Введение

Ввиду высокой чувствительности полупроводниковых приборов к радиационному воздействию (в космосе, атомной энергетике и т.д.) крайне важно уметь прогнозировать изменения их рабочих характеристик, потенциально приводящих к сбоям и отказу оборудования.

Целью настоящей работы является построение физико-математической модели сдвига рабочих характеристик iGBT транзисторов при облучении.

Объект исследования

Объектом исследования являлись образцы *p-n-p-n* iGBT транзистора на кремни производство ОАО «Интеграл», облученные протонами с энергиями до 1 МэВ. Образцы облучались потоком протонов в лаборатории элионики НИИПФП им. А.Н. Севченко БГУ. Было проведено моделирование для определения оптимальных значений энергии протонов, которые для

3-кратного облучения составили 740, 840 и 950 кэВ; соотношение доз 1:1.2:1.4.

Облучение проводилось в 5 этапов с повышением дозы [1].

После каждого этапа облучения проводились измерения в НТЦ «Белмикросистемы» ОАО «Интеграл» в отделе измерений ОИЦ. Статические характеристики транзистора исследовались на АИС «ГАММА-160М», а динамические – на измерителе Гамма-162.

Модель

Для расчета сдвига порогового напряжения iGBT была использована модель, предложенная в работе [2] для МОП-транзистора. В модели предполагается наличие «глубоких» и «мелких» ловушечных уровней в объеме подзатворного диэлектрика, а также создание дополнительных поверхностных состояний на границе раздела диэлектрик-полупроводник.

На рисунке 1 представлены результаты расчета изменения порогового напряжения в сравнении с экспериментальными данными [1].

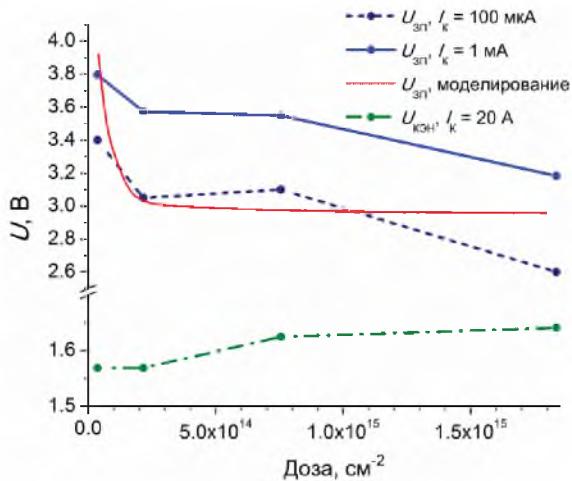


Рис. 1. Сдвиг порогового напряжения и напряжения насыщения коллектор-эмиттер в зависимости от дозы облучения

Для моделирования изменения выходных ВАХ (зависимость тока коллектора от напряжения коллектор-эмиттер) прибора был применен подход, предложенный в [3] и развитый в [4] для описания работы биполярных транзисторов (БТ).

Основные отличия iGBT от БП: наличие 4 областей с разным типом проводимости, направление тока – от коллектора к эмиттеру, наличие индуцированного канала проводимости, управляемая напряжением, а не током и т.д.

В связи с этим рассматривались процессы, происходящие в дрейфовой *n*-области (базе), *p*-телье и *n*-канале прибора на основе модели для МДП [2]. В закрытом состоянии, при отсутствии напряжения на затворе, имеется обратный ток через переход между дрейфовой областью и телом.

В открытом состоянии прибор работает как *p-n-p* БТ, управляемый базовым током, текущим через индуцированный канал в теле между базой и истоком. В свою очередь, управление базовым током осуществляется с помощью напряжения, прикладываемого к затвору.

Модель работы iGBT транзистора основана на решении уравнений непрерывности для носителей заряда в рабочих областях прибора заданной топологии.

Они содержат дрейфовую, диффузационную, рекомбинационную части, описывают распределение концентрации неравновесных электронов n в теле по координате x и времени t и имеют следующий вид [3]:

$$\frac{\partial n(x)}{\partial t} = -\frac{\Delta n(x)}{\tau_n(x)} + D_n(x) \frac{\partial^2 n(x)}{\partial x^2} - \mu_n E(x) \frac{\partial n(x)}{\partial x} - n(x) \mu_n \frac{\partial E(x)}{\partial x}, \quad (1)$$

где Δn – разница между концентрацией равновесных и неравновесных электронов, τ_n – время жизни, D_n – коэффициент диффузии, μ_n – подвижность, E – напряженность встроенного электрического поля, обусловленного неравномерным легированием.

Для дырок в базе уравнение следующее [5]:

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

При облучении прибора происходит генерация дефектов, в связи с чем расчет сопротивление, уменьшается подвижность, коэффициент диффузии и время жизни неосновных носителей заряда [3]:

$$\frac{1}{\tau_\phi} = \frac{1}{\tau_0} + k_\tau \Phi \quad (3)$$

Результаты моделирования

Была проведена конечно-разностная аппроксимация уравнений (1) и (2) и их численное решение с учетом (3) методом прогонки. По полученному распределению рассчитаны токи электронов через эмиттерный контакт и дырок через коллекторный переход.

На рисунке 2 представлены результаты расчета выходных характеристик прибора до и после облучения протонами с энергией 950 кэВ и дозами в диапазоне $(5 \times 10^{12}$

$- 1 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$. Напряжение на затворе поддерживалось на уровне 3.5 В.

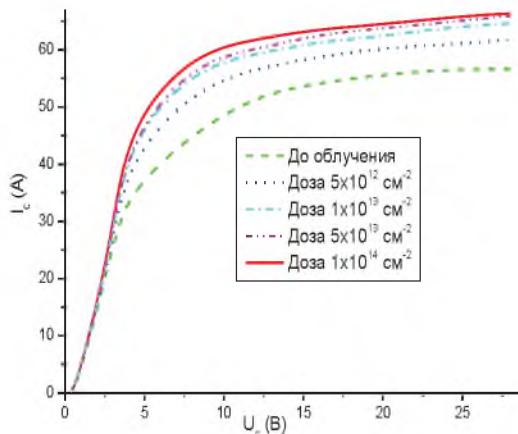


Рис. 2. Выходные ВАХ iGBT до и после облучения протонами с энергией 950 кэВ и 4 значениями доз

Наблюдается увеличение коллекторного тока, что напрямую связано со снижением порогового напряжения прибора, а также выход на насыщение с ростом дозы облучения.

Заключение

Таким образом, исследовано влияние протонного облучения на рабочие характеристики iGBT-транзистора. Предложена модель и проведены расчеты сдвига порогового напряжения при протонном облучении. Предложена модель работы силовой части прибора и проведены расчеты

изменения коллекторного тока при облучении. Наблюдается существенный сдвиг рабочих характеристик прибора.

Библиографические ссылки

- Ювченко В.Н., Мискевич С.А., Комаров Ф.Ф., Ковалчук Н.С., Кречко М.М., Шпаковский С.В. Сдвиг рабочих характеристик iGBT транзисторов при облучении протонами. В кн.: Материалы VIII Междунар. конф. «Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики, аэрокосмических технологий и физики конденсированного состояния» (22-23 мая 2025 г.), г. Минск. Минск: НИИПФП им. А.Н. Севченко БГУ; 2025. С. 468-470.
- Zayats G., Komarov A., Komarov F., Miskiewicz S. Modeling of radiation effects in the MIS devices. *American Journal of Nano Research and Application* 2017; 5(1): 7–11.
- Володгин Э.Н., Лысенко А.П. Радиационная стойкость биполярных транзисторов. М.; 2000. 101 с.
- 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* 2017; 132(2): 288-290.
- Мискевич С.А., Комаров А.Ф., Ювченко В.Н., Ермолаев А.П., Шпаковский С.В., Богатырев Ю.В., Заяц Г.М. Влияние облучения электронами с энергией 4 МэВ на рабочие характеристики кремниевых биполярных транзисторов. В кн.: Материалы XV Международной конференции «Взаимодействие излучений с твердым телом» (26-29 сентября 2023 г.), г. Минск. Минск: БГУ; 2023. С. 180-182.