

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Effect of synthesis conditions on the impurity composition of STM Almazot diamond single crystals / N.M. Kazyuchits [et al.] // *Inorganic Materials*. – 2014. – V. 50. – №. 2. – P. 130-135.
2. Ускорительный комплекс ИЦ-100 для проведения научно-прикладных исследований / Б.Н. Гикал [и др.] // *Письма в журнал Физика элементарных частиц и атомного ядра*. – 2008. – Т. 5. – №. 1. – С. 59-85.
3. Raman scattering in diamond irradiated with high-energy xenon ions / N.M. Kazuchits [et al.] // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. – 2020. – V. 472. – P. 19-23.
4. Ion-implantation-induced defects in diamond and their annealing: experiment and simulation / R. Kalish [et al.] // *physica status solidi (a)*. – 1999. – V. 174. – №. 1. – P. 83-99.
5. Raman investigation of damage caused by deep ion implantation in diamond / J.O. Orwa [et al.] // *Physical Review B*. – 2000. – V. 62. – №. 9. – P. 5461.
6. Annealing of electron radiation damage in a wide range of Ib and IIa diamond samples / J.W. Steeds, S. Kohn // *Diamond and related materials*. – 2014. – V. 50. – P. 110-122.
7. Multiple slip in diamond due to a nominal contact pressure of 10 GPa at 1,000° C / C.A. Brookes, V.R. Howes, A.R. Parry // *Nature*. – 1988. – V. 332. – №. 6160. – P. 139-141.
8. Strength of diamond / D.J. Weidner, Y. Wang, M.T. Vaughan // *Science*. – 1994. – V. 266. – №. 5184. – P. 419-422.
9. A study of plastic deformation profiles of impressions in diamond / E.J. Brookes [et al.] // *Diamond and related Materials*. – 2000. – V. 9. – №. 3-6. – P. 1115-1119.
10. Photoluminescence studies of sintered diamond compacts / T. Evans, S.T. Davey, S.H. Robertson // *Journal of materials science*. – 1984. – V. 19. – №. 7. – P. 2405-2414.
11. Spectroscopic and microscopic characterizations of color lamellae in natural pink diamonds / Gaillou E. [et al.] // *Diamond and Related Materials*. – 2010. – V. 19. – №. 10. – P. 1207-1220.
12. Vacancy enhanced aggregation of nitrogen in diamond / A.T. Collins // *Journal of Physics C: Solid State Physics*. – 1980. – V. 13. – №. 14. – P. 2641.
13. Diffusion of nitrogen in diamond and the formation of A-centres / R. Jones [et al.] // *Diamond and Related Materials*. – 2015. – V. 53. – P. 35-39.
14. Photoluminescence spectra of xenon implanted natural diamonds / V.A. Martinovich [et al.] // *Journal of luminescence*. – 2003. – V. 102. – P. 785-790.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИАЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ В ПОЛЕВЫХ И БИПОЛЯРНЫХ СТРУКТУРАХ

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

¹ НИИПФП им. А.Н. Севченко БГУ, Курчатова, 7, 220045 Минск, Беларусь,
e-mail: sergei.miskevich@inbox.ru

² Институт математики НАН Беларуси, Сурганова 11, 220072 Минск, Беларусь,
e-mail: zayats@im.bas-net.by

Разработаны физико-математические модели, программное обеспечение и управляющие программы для моделирования радиационных изменений рабочих характеристик биполярных транзисторов (БТ) и структур металл-диэлектрик-полупроводник (МДП). Проведено моделирование при облучении МДП гамма-квантами ⁶⁰Со 1,2 МэВ дозами до $1,1 \cdot 10^7$ рад и БТ гамма-квантами, нейтронами и электронами. Получены зависимости порогового напряжения МДП структур, коэффициента усиления БТ от дозы облучения.

Ключевые слова: биполярные транзисторы; радиационное облучение; дефектообразование; гамма-кванты; рентгеновское излучение; МДП; моделирование.

SIMULATION OF RADIATION EFFECTS IN MOS AND BIPOLAR STRUCTURES

S. A. Miskiewicz¹, V. N. Yuvchenko¹, F. F. Komarov¹, A. F. Komarov¹, G. M. Zayats²

¹*Institute of Applied Physics Problems, Kurchatov str. 7, 220045 Minsk, Belarus*

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

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

The software including the models and interface programs for simulation of radiation changes in the characteristics of MOS and bipolar junction transistors (BJT) was developed. Simulation of 1.2 MeV gamma-quants, neutron and electron impact on MOS and BJT was performed to the doses 1.1×10^7 Rad. The dependences of the MOS threshold voltage and the BJT current gain on the dose were calculated.

Key words: BJT; ionizing radiation; defect formation; gamma-quants; X-rays; MOS; simulation.

ВВЕДЕНИЕ

В связи с широким применением полупроводниковых приборов в оборудовании космических аппаратов, на объектах атомной энергетики, а также военного назначения, на них накладываются повышенные требования по радиационной стойкости. Разработка, проектирование и изготовление таких приборов являются крайне дорогостоящими процессами, требующими кроме того ещё и натурных испытаний продукции, проводимых за рубежом. Поэтому, важное значение для предприятий электронной промышленности имеет компьютерное моделирование радиационной стойкости полупроводниковых приборов на этапе проектирования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект исследования – образцы БТ и МДП (МОП)-структур, разработанные на ОАО «Интеграл».

Модель для расчёта радиационных изменений порогового напряжения МДП структур при облучении рентгеновскими квантами [1] была реализована авторами ранее в [2]. В настоящей работе данная модель адаптирована для гамма-квантов ^{60}Co 1,2 МэВ. В основе модели лежит генерация электронно-дырочных пар в подзатворном диэлектрике, разделение их электрическим полем, накопление дырок на ловушках и смещение электрических потенциалов структуры.

Модель работы БТ и аналитический расчёт радиационных эффектов при воздействии нейтронов и электронов на БТ представлены в [3]. Модель основана на численном решении уравнения непрерывности для неравновесных носителей заряда, которое методом прогонки [4] проведено нами в [5, 6]. В настоящей работе разработана двумерная модель для учёта рекомбинации в пассивной базе и эмиттере и проведено численное решение системы уравнений методом Гаусса [4].

Разработка программного обеспечения осуществлялась на языке программирования C++ в средах Borland C++ Builder и MS Visual Studio.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Разработаны физико-математические модели, программное обеспечение и управляющие программы для моделирования процессов радиационных воздействий на рабочие характеристики биполярных и МОП-транзисторов.

Для МОП-транзисторов учтено влияние энергии рентгеновских и гамма-квантов в потоке на изменение порогового напряжения и вид сток-затворных и выходных ВАХ. В модель включено изменение концентрации “мелких” и “глубоких” ловушек в подзатворном диэлектрике и на границе раздела SiO₂/Si; различные формы профиля концентрации ловушек; зависимость от энергии рентгеновских и гамма-квантов коэффициента генерации электронно-дырочных пар, вероятности разделения этих пар электрическим полем до их рекомбинации, сечений захвата носителей на ловушки, коэффициента образования поверхностных состояний.

Программа позволяет осуществлять ввод исходных данных для расчетной модели, запуск расчетных модулей, вывод результатов моделирования на экран в графическом виде и в текстовый файл в виде таблицы. Результаты представляют собой сток-затворные и выходные ВАХ, зависимость изменения порогового напряжения от дозы облучения. Интерфейс управляющей программы представлен на рисунке 1.

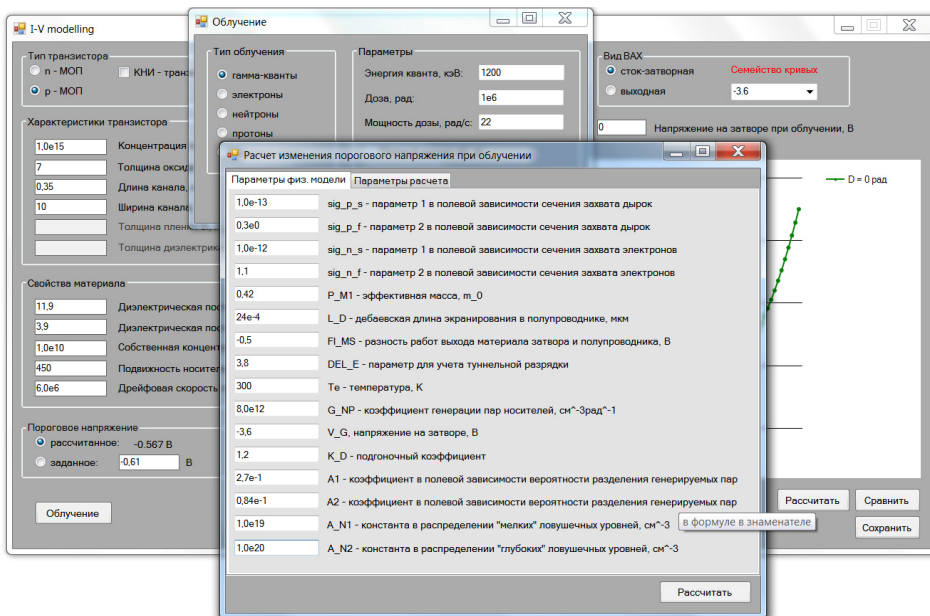


Рисунок 1. – Окна управляющей программы моделирования радиационного воздействия на рабочие характеристики МОП-транзисторов

Было проведено сравнение результатов моделирования выходных и сток-затворных ВАХ *n*-МОП и *p*-МОП транзисторов с экспериментальными результатами, полученными при облучении МОПТ гамма-квантами ⁶⁰Co с энергией 1,2 МэВ дозами до $1,1 \times 10^7$ рад. Использован метод разделения зарядов, позволяющий на основе анализа экспериментальных сток-затворных ВАХ МОПТ разделить сдвиг порогового напряжения при облучении на поверхностную и объемную составляющие. На рисунке 2 представлены результаты расчетов для *p*-МОП, а на рисунке 3 для *n*-МОП

транзисторов с толщиной слоя диэлектрика 7 нм, облученных гамма-квантами в активном электрическом режиме ($V_G = -3,3$ В). ΔV_{it} – поверхностная составляющая сдвига порогового напряжения; ΔV_{ot} – объемная составляющая.

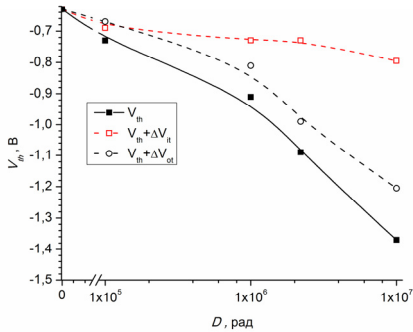


Рисунок 2. – Рассчитанный из экспериментальных ВАХ сдвиг порогового напряжения p -МОП транзистора при облучении гамма-квантами

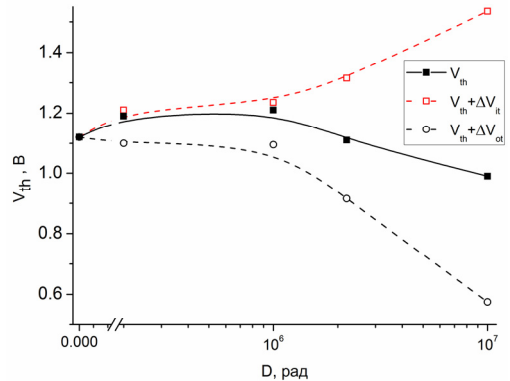


Рисунок 3. – Рассчитанный из экспериментальных ВАХ сдвиг порогового напряжения n -МОПТ при облучении гамма-квантами

Управляющая программа для моделирования процессов воздействия разных видов облучения на характеристики БТ, интерфейс которой представлен на рисунке 4, позволяет задавать тип прибора, размеры рабочих областей, концентрации легирующих примесей в них, режимы работы, тип, энергию и дозу облучения.

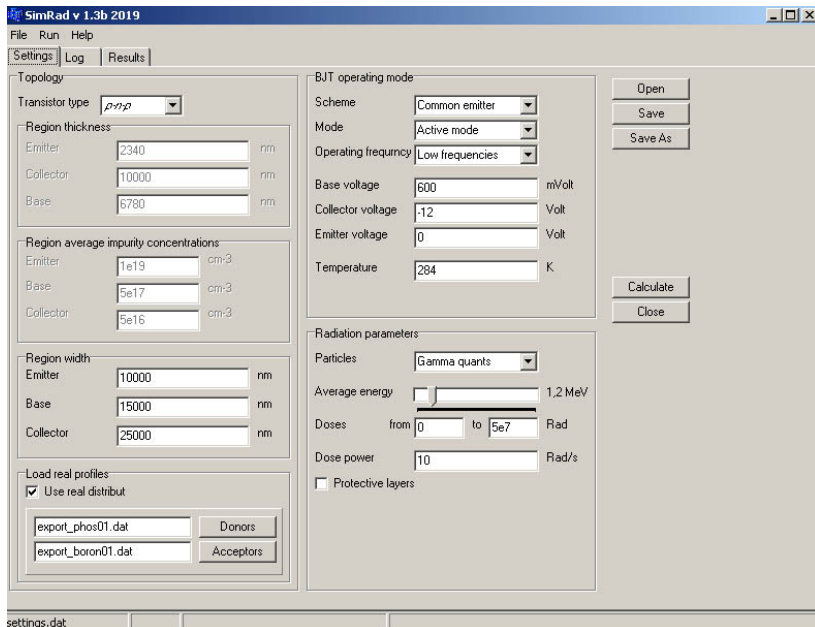


Рисунок 4. – Главное окно управляющей программы по моделированию радиационных изменений характеристик БТ

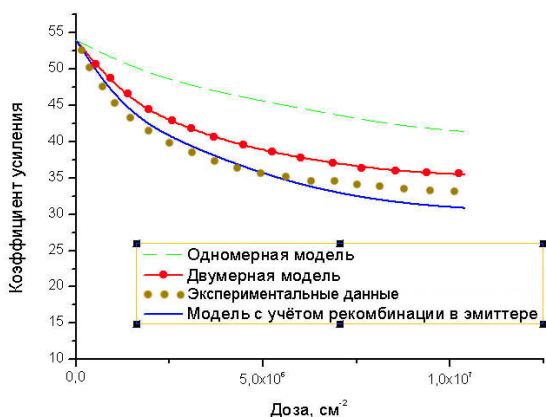


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента усиления БТ от дозы облучения

использованными моделями. Как видно из рисунка, последняя модель наиболее точно описывает характер зависимости коэффициента усиления от дозы облучения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанное программное обеспечение и результаты расчетов позволят прогнозировать воздействие потоков рентгеновских и гамма-квантов на характеристики полупроводниковых приборов, входящих в состав ИС для использования в условиях радиационного облучения, а также позволят технологам/конструкторам микроэлектронной промышленности проводить расчеты для прецизионной корректировки пороговых напряжений МОП/КМОП- транзисторов и коэффициента усиления биполярных транзисторов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Рентгеновская корректировка пороговых напряжений в производстве МДП интегральных схем / М.Н. Левин [и др.] // Микроэлектроника. – 2002. – Т. 31, № 6. – С. 408 – 413.
2. Simulation of radiation effects in SiO₂/Si structures / F.F. Komarov [et al.] // Acta Physica Polonica. – 2015. – V. 128, № 5. – P. 857 – 860.
3. Радиационная стойкость биполярных транзисторов / Э.Н. Вологдин, А.П. Лысенко – М., – 2000. – 101 с.
4. Теория разностных схем / А.А. Самарский. – М.: Наука, 1989.
5. Radiation degradation of bipolar transistor current gain / S.A. Miskiewicz [et al.] // Acta Physica Polonica. – 2017. – V. 132, №. 2. – P. 288–290.
6. Моделирование радиационной стойкости биполярных транзисторных структур на кремнии / С.А. Мискевич, Ф.Ф. Комаров, А.Ф. Комаров, Г.М. Заяц, В.Н. Ювченко, С.Б. Ластовский, Ю.В. Богатырёв // Актуальные проблемы физики твёрдого тела: матер. VIII Междунар. науч. конф., Минск, 24–28 сент. 2018 г. – Минск: Изд. центр БГУ, 2018. – С. 208–210.

Она осуществляет запуск расчетных модулей, вывод результатов моделирования на экран в графическом и текстовом виде (ВАХ, зависимость коэффициента усиления от дозы облучения). На рисунке 5 представлены результаты моделирования изменения коэффициента усиления $p-n-p$ БТ в режиме усиления в схеме с общим эмиттером при облучении гамма-квантами 1,2 МэВ с учётом рекомбинации неосновных носителей заряда в эмиттере в сравнении с ранее