

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ ЭКРАНОВ НА ОСНОВЕ КОМПОЗИТА W-Cu ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ ОТ ПРОТОНОВ РАДИАЦИОННЫХ ПОЯСОВ ЗЕМЛИ

А. С. Якушевич¹, С. Б. Ластовский¹, Ю. В. Богатырев¹,
С. С. Грабчиков¹, Н. А. Василенков²

¹НПЦ НАН Беларуси по материаловедению, РБ, г. Минск;
yakushevich@ifitp.bas-net.by;

²ЗАО «Тестприбор» РФ, г. Москва

ВВЕДЕНИЕ

Основными доминирующими эффектами воздействия ионизирующих излучений (ИИ) космического пространства на изделия электронной техники (ИЭТ) являются дозовые эффекты и одиночные [1, 2]. Для снижения дозовой нагрузки ИЭТ экранируют как элементами космического аппарата, так и специальными защитными экранами. В состав материала защитных экранов во многих случаях включают тяжелые металлы: вольфрам, висмут, тантал и др. Эффективность экранирования ИЭТ от электронов и протонов естественных радиационных поясов Земли (ЕРПЗ) определяют либо на моделирующих установках, либо расчетными методами. Воздействие электронов на защищенные экранами микросхемы проще моделировать экспериментально на ускорителях электронов, а протонов — расчетными методами.

Цель данной работы — определение с помощью программного пакета GEANT4 эффективности защиты ИЭТ экранами на основе композита W-Cu от воздействия протонов ЕРПЗ.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОХОЖДЕНИЯ ПРОТОНОВ ЧЕРЕЗ ЭКРАНЫ

Расчет поглощенных доз проводился с помощью программного пакета GEANT4 [3]. GEANT4 — это пакет библиотек для моделирования взаимодействия излучения с веществом, созданный с использованием объектно-ориентированной технологии и реализован на языке программирования C++. Пакет включает в себя полный диапазон функций для задания геометрии системы, частиц и необходимых процессов взаимодействия.

Поглощенная доза рассчитывалась в объеме образца кристалла кремния размером $2 \times 2 \times 0,25$ мм³ без экрана и за экранами размером $z \times 10 \times 10$ мм³, которые помещались на расстоянии 1 м от источника частиц. Толщина экранов z варьировалась в диапазоне от 0,2 мм до 0,6 мм с шагом 0,2 мм, а от 0,6 мм до 1,5 мм — с шагом 0,1 мм. В качестве материала экранов использовался композит W-Cu плотностью 16 г/см³ и с массовыми долями: W — 85%, Cu — 15%.

Геометрия задачи в плоскости XY без сохранения масштаба представлена на рис. 1. Геометрические центры всех задаваемых тел лежат на оси X. Пространство между телами заполнено вакуумом. Источник частиц представлял собой прямоугольник размером 1×1 см² и размещался в плоскости YZ. Протоны с заданной энергией испускались из произвольной точки источника, которая определялась генератором случайных чисел, в направлении (1, 0, 0). Все протоны падали на экран перпендикулярно его плоскости.

Моделирование проводилось для усредненного по орбите Земли интегрального потока протонов в функции энергии для орбитального наклона 60° и круговой орбиты с высотой 300 км [4]. В работе [4] поток протонов приводится за сутки. С целью уменьшения машинного времени моделирование проводится для потока протонов не в сутки на см^2 , а в час на см^2 .

При моделировании для протонов и электронов учитывались следующие физические процессы взаимодействия с веществом: тормозное излучение, многократное рассеяние, ионизация среды, а для γ -квантов — фотоэффект, комптоновское рассеяние и рождение электрон-позитронных пар. В данном случае в связи с небольшим количеством высокоэнергетических протонов в используемом спектре [4] по сравнению с остальными протонами (с энергией меньше 200 МэВ) ядерные реакции в процессе моделирования не учитываются, хотя в [5] отмечается, что для протонов с энергией выше 200 МэВ характерно развитие различных видов ядерных реакций.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

На рис. 2 представлены результаты определения с помощью программы GEANT4 поглощенной дозы в кристалле кремния, облучаемого протонами разной энергии без защитного экрана и за экранами W–Cu разной толщины.

Все зависимости имеют очень схожий вид. С ростом энергии протонов вначале значение поглощенной дозы возрастет, а затем резко уменьшается и при дальнейшем росте энергии протонов выходит на постоянное значение. Такой вид зависимости поглощенной дозы от энергии частиц обусловлен как видом самого спектра протонов ЕРПЗ, так и зависимостью эффективности их взаимодействия с атомами кристалла кремния от энергии [1]. Отличие заключается лишь в том, что с ростом толщины защитного экрана максимум поглощенной дозы D уменьшается и смещается в область больших энергий. Так, при отсутствии экрана (кривая *a*, рис. 2) наибольшие значения поглощенной дозы наблюдаются для протонов с энергиями меньше 1 МэВ, для толщины экрана 0,4 мм (кривая *c*, рис. 2) — меньше 20 МэВ, а при толщине экрана 1,5 мм (кривая *l*, рис. 2) максимальному значению D уже соответствует энергия протонов 35 МэВ.

При значениях энергии более 50 МэВ вид зависимости $D(E)$ практически не изменяется по сравнению с незащищенным кристаллом кремния (вставка рис. 2), то есть при таких энергиях протонов данные экраны не могут служить защитой. Последнее вполне согласуется с известными литературными данными [1, 2].

На рисунке 3 представлена зависимость относительного изменения суммарной поглощенной дозы от толщины экранов W–Cu. Здесь D_0 соответствует суммарной поглощенной дозе в кремнии, облученного протонами без защиты. Данная зависимость позволяет судить об эффективности защитных свойств испытываемых экранов. Видно, что при толщине экрана порядка 1,3 мм можно достигнуть уменьшения поглощенной дозы протонов ЕРПЗ в 6 раз.

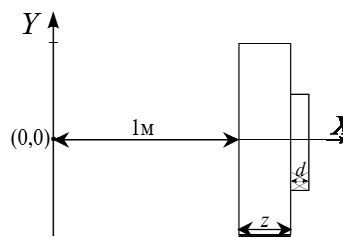


Рис. 1. Геометрия задачи в плоскости XY, где z — толщина экрана, d — толщина образца

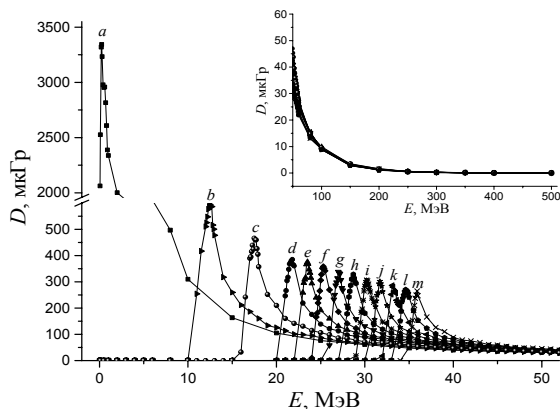


Рис. 2. Поглощенная доза в кристалле кремния, облучаемого протонами без экрана (а) и за защитными экранами на основе композита W–Cu разной толщины: b—0,2; c—0,4; d—0,6; e—0,7; f—0,8; g—0,9; h—1,0; i—1,1; j—1,2; k—1,3; l—1,4; m—1,5 мм

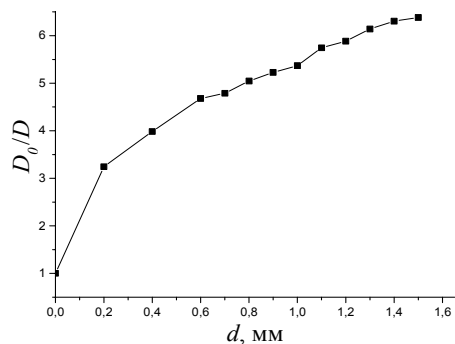


Рис. 3. Относительное изменение суммарной поглощенной дозы в кремнии, облученного протонами, в зависимости от толщины экранов на основе композита W–Cu

ВЫВОДЫ

С помощью программного пакета GEANT4 рассчитана поглощенная доза протонов ЕРПЗ в кристалле кремния, облучаемом за защитными экранами на основе композита W–Cu и без экрана. Показано, что с ростом толщины экранов от 0,2 до 1,5 мм поглощенная доза радиации в кремнии уменьшается в 3,24–6,38 раз по сравнению с неэкранированным образцом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ионизирующие излучения космического пространства и их воздействие на бортовую аппаратуру космических аппаратов / под ред. Г. Г. Райкунова. М.: Физматлит. 2013. 256 с.
2. Никифоров, А. Ю. Радиационные эффекты в КМОП ИС / А. Ю. Никифоров, В. А. Телец, А. И. Чумаков. М.: Радио и связь. 1994. 164 с.
3. GEANT4 for space / www.geant4.esa.int.
4. Стассинопулос, Э. Г. Радиационные условия работы электроники в космическом пространстве / Э. Г. Стассинопулос, Дж. П. Рейдмонд // ТИИЭР. 1988. Т. 76. № 11. С. 23.
5. Устюжанинов, В. Н. Радиационные эффекты в биполярных интегральных микросхемах / В. Н. Устюжанинов, А. З. Чепиженко. М.: Радио и связь. 1989. 144 с.