

УДК 004(06)+621.38(06)+681.5(06)

ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МИКРООБЪЕМОВ ЭЛЕМЕНТОВ СБИС НА ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЕ ОТ ПРОТОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

А. В. Афонин, Л. А. Гришанцева, В. А. Полуниин, А. И. Чумаков
(5494 МО РФ, НИЯУ МИФИ, ЭНПО "СПЭЛС", г. Москва)

Проведено численное моделирование по программе GEANT4 процессов энерговыделения от воздействия протонов в микрообъемах активных элементов СБИС разной формы с учетом влияния окружающих материалов. Показано, что при микронных размерах чувствительных областей СБИС форма микрообъема оказывает на энерговыделение слабое влияние.

Ключевые слова: протонное излучение, интегральная схема, энерговыделение, эффект собирания заряда, программа GEANT4.

Развитие современных микроэлектронных устройств определяется все большей их миниатюризацией, сопровождаемой значительным уменьшением активных областей элементов сверхбольших интегральных схем (СБИС). Широкое использование СБИС в электронной аппаратуре космических аппаратов приводит к необходимости учета влияния локальных радиационных эффектов, обусловленных значительным энерговыделением от взаимодействия отдельной ядерной частицы с веществом СБИС [1, 2]. Миниатюризация отдельных элементов СБИС (определяемая проектными нормами) уменьшает как эффективный объем элемента СБИС, так и пороговую энергию возникновения локального радиационного эффекта. В связи с этим совершенно не очевидно, что по мере уменьшения размеров элементов чувствительность СБИС к локальным радиационным эффектам при воздействии отдельных ядерных частиц будет возрастать. Такое предположение в первую очередь необходимо проверить применительно к эффектам, вызываемым вторичными ядерными частицами (протонами), так как вероятность возникновения эффекта от них пропорциональна объему активного элемента, а не поверхности, как при воздействии тяжелых заряженных частиц.

Решение данной задачи в работе производилось численным моделированием по програм-

ме GEANT4 [3, 4] процессов энерговыделения в микрообъемах разных размеров и форм при воздействии потока высокоэнергетичных частиц (протонов). Прохождение протонов больших энергий через вещество сопровождается формированием вторичных ядерных частиц, имеющих большой разброс по массе, энергии и линейным потерям энергии. Из-за конечного пробега вторичных ядерных частиц при расчете вероятности локального энерговыделения возникает необходимость учета вклада частиц, генерированных за пределами активной области СБИС.

В качестве типовых объектов были выбраны: 1) куб с размерами $3 \times 3 \times 3$ мкм; 2) сфера диаметром 3 мкм; 3) цилиндр диаметром и высотой, равными 3 мкм. Моделирование проводилось для протонов с энергиями в диапазоне от 15 до 1000 МэВ для активного элемента, находящегося в типичной среде окружения СБИС. Источник излучения задавался изотропным потоком частиц.

На рис. 1 представлен пример моделируемой структуры для кубического элемента с учетом реального окружения материалами, характерными для элементов СБИС.

По результатам численного моделирования формировались файлы, которые содержали следующую информацию:

– суммарные потери энергии вторичных частиц, образованных в микрообъеме (prob1);

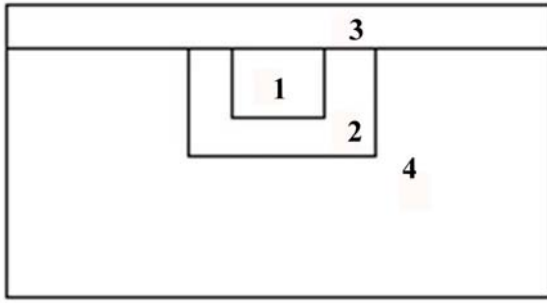


Рис. 1. Взаимное расположение и размеры элементов анализируемого микрообъема: 1 — область активного элемента СБИС; 2 — слой кремния; 3 — слой окиси кремния размерами $0,2 \times 0,2 \times 0,013$ мм; 4 — подложка СБИС

- суммарные потери энергии всех вторичных частиц в микрообъеме (prob2);
- суммарные потери энергии в микрообъеме (prob3);
- энергии и пробеги ядер отдачи в микрообъеме;
- суммарные потери энергии в неупругих процессах в микрообъеме;
- суммарные ионизационные потери энергии и пробеги для каждой вторичной ядерной частицы в микрообъеме.

На рис. 2, 3 представлены результаты расчетов вероятности потерь энергии в активной области различной формы при облучении протонами с энергией 100 МэВ.

Видно, что вероятности потерь энергии $\Delta E < 0,2$ МэВ не отличаются друг от друга для всех трех форм активной области. Это обусловлено тем, что основной канал энерговыделения определяется потерями короткопробежных вторичных частиц, образованных внутри активной области.

Вероятности энерговыделения $\Delta E > 0,2$ МэВ близки по порядку значений для всех трех форм активной области, однако конкретные значения варьируются в зависимости от характеристик самой области. При этом надо иметь в виду, что для энерговыделения больше нескольких мегаэлектронвольт статистика взаимодействий оказывается крайне малой, что не позволяет делать статистически значимых выводов. Поэтому для большинства приложений можно считать, что форма активной области не сказывается на вероятности энерговыделения для областей с 3-микронными размерами.

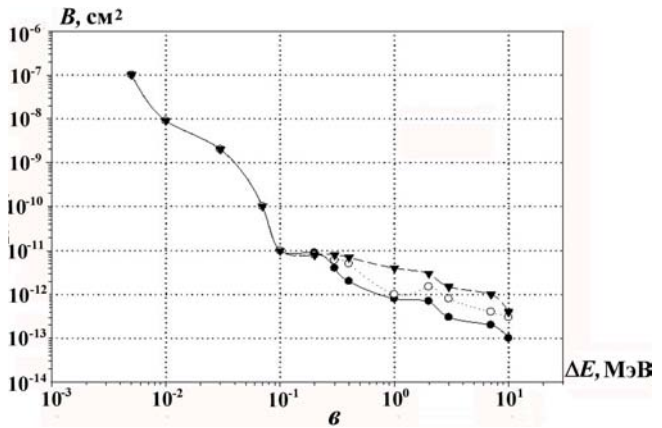
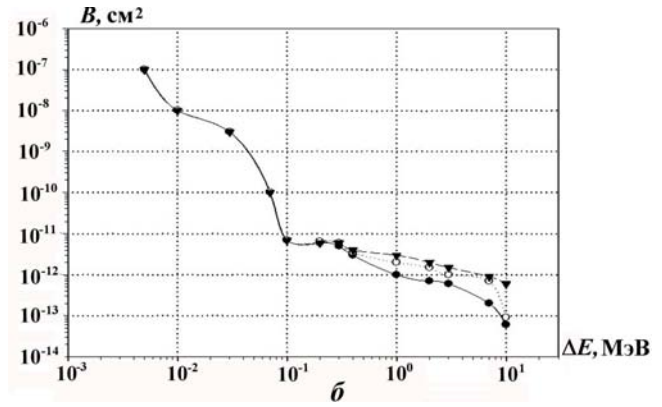
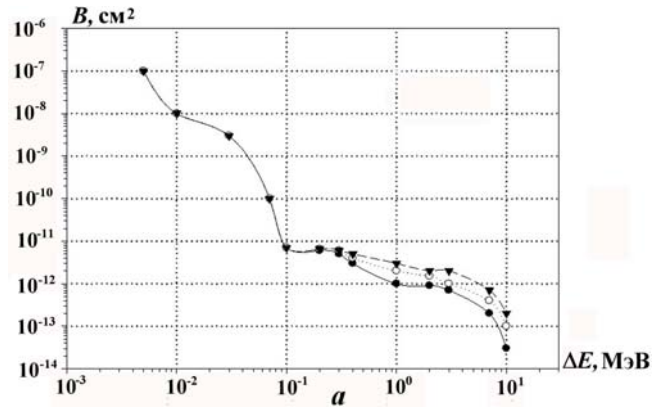


Рис. 2. Вероятность энерговыделения, нормированная на флюенс протонов с энергией 100 МэВ, для различных форм активной области: а — кубической; б — сферической; в — цилиндрической; —●— — prob1; ...○... — prob2; —▼— — prob3

На рис. 4 приведены результаты расчетов интегральных зависимостей вероятности энерговыделения от энергии первичной частицы для активной области сферической формы. В целом результаты вполне очевидны: по мере увеличения энергии протонов происходит выход на насыщение по вероятности энерговыделения, что

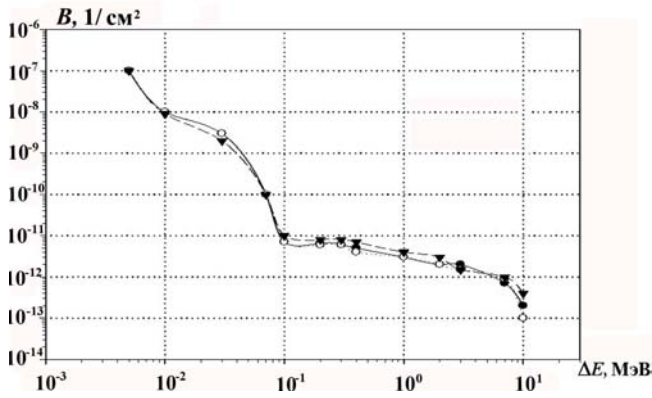


Рис. 3. Сравнение вероятностей энерговыделения, нормированных на флюенс протонов с энергией 100 МэВ, для различных форм области: —●— куб; ...○... — сфера; —▼— цилиндр

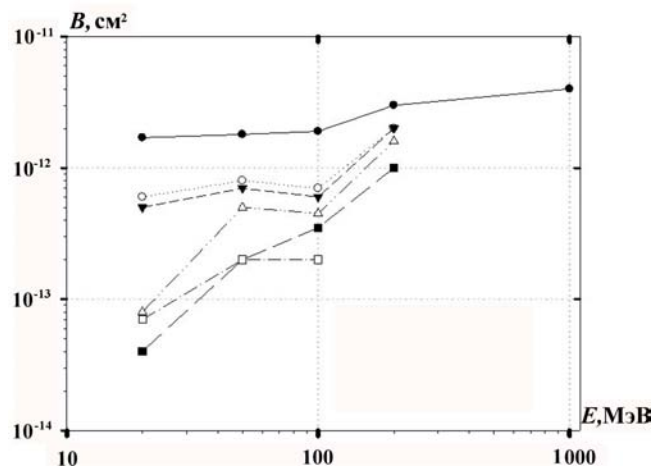


Рис. 4. Вероятность энерговыделения, нормированная на флюенс протонов, в активном элементе СБИС (сфера) в зависимости от энергии протона при анализе процессов только в исследуемой области: —●— $\Delta E > 0,5$ МэВ; ...○... — $\Delta E > 1$ МэВ; - -▼- - - $\Delta E > 1,5$ МэВ; ---△--- — $\Delta E > 2$ МэВ; - -■- - - $\Delta E > 3$ МэВ; --□-- — $\Delta E > 7$ МэВ

соответствует типовым зависимостям сечений эффектов от энергии протонов [1, 2]. Практически полное совпадение полученных результатов также наблюдалось и для элемента кубической формы.

Из сравнения графиков на рис. 4 и 5 видно, что учет процессов во внешних окружающих областях приводит к увеличению вероятности энерговыделения почти в 3 раза. При этом происходит пропадание "чувствительности" результатов расчетов к форме активной области электронно-

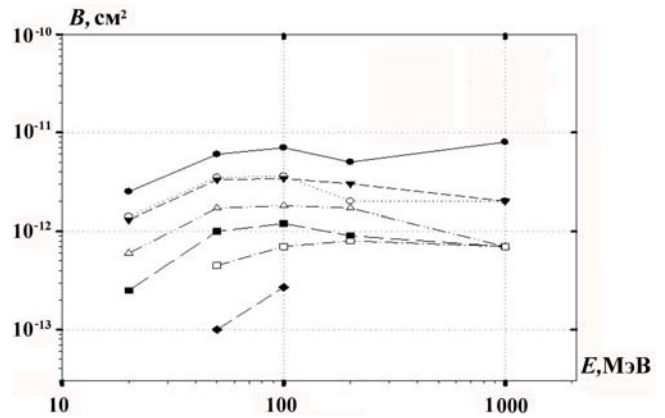


Рис. 5. Вероятность энерговыделения, нормированная на флюенс протонов, в активном элементе СБИС в зависимости от энергии протона при анализе процессов как в исследуемой, так и в окружающих областях: —●— $\Delta E > 0,5$ МэВ; ...○... — $\Delta E > 1$ МэВ; - -▼- - - $\Delta E > 1,5$ МэВ; ---△--- — $\Delta E > 2$ МэВ; - -■- - - $\Delta E > 3$ МэВ; --□-- — $\Delta E > 7$ МэВ; - -◆- - - $\Delta E > 10$ МэВ

го элемента. Аналогичные результаты были получены и при моделировании активных областей с другими размерами.

Таким образом, результаты расчетного моделирования для областей с типовыми размерами около 3 мкм приводят к следующим выводам:

- максимальное энерговыделение в микрообъеме относительно слабо зависит от условий сбора заряда (наличия или отсутствия дополнительной области сбора);
- при значениях энерговыделения менее 0,1 МэВ, которые обусловлены прямыми ионизационными потерями, учет частиц из внешних окружающих областей не приводит к изменению энерговыделения;
- при значениях энерговыделения более 0,1 МэВ учет частиц, образующихся за пределами "чувствительной" области, увеличивает вероятность энерговыделения почти в 3 раза;
- при энергиях протона более 50 МэВ значение максимального энерговыделения остается практически неизменным.

Список литературы

1. Чумаков А. И. Действие космической радиации на интегральные схемы. М.: Радио и связь, 2004. С. 320—335.

2. *Чумаков А. И.* Радиационные эффекты в ИС от отдельных ядерных частиц // Модель космоса. В 2 т. Т. 2: Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов / Под ред. М. И. Панасюка, Л. С. Новикова. М.: КДУ, 2007. С. 494—518.
3. *Amako K., Apostoilakis J., Arango H., Dubois P. A. et al.* GEANT4 developments and application // IEEE Transactions on NS. 2006. Vol. 53, No. 1. P. 270—278.
4. *Agostinelli S., Allison J., Amako K., Apostoilakis J. et al.* GEANT4 — a simulation toolkit // Nuclear Instruments and Methods. A. 2003. Vol. 506. P. 250—303.

Статья поступила в редакцию 06.03.12.
