

ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ БИБЛИОТЕК GEANT4 ДЛЯ РЕШЕНИЯ ТИПОВЫХ ЗАДАЧ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ИСПЫТАНИЙ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ НА СТОЙКОСТЬ К ИОНИЗИРУЮЩЕМУ ИЗЛУЧЕНИЮ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

Т. И. Полетова, Е. Н. Крылевский, С. А. Лазарев, К. М. Музюкин

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Важнейшую роль в обеспечении длительной и безотказной работы радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) в космических условиях играет ее стойкость к воздействию ионизирующего излучения (ИИ) космического пространства (КП). В результате такого воздействия в материалах и элементах бортового оборудования космического аппарата (КА) протекают различные физические процессы. В зависимости от характера процессов, инициируемых воздействием космической среды, происходящие изменения свойств материалов и элементов оборудования могут иметь разный временной масштаб, быть обратимыми или необратимыми, представлять различную опасность для бортовых систем. Многообразие факторов, воздействующих на КА, сложные энергетические спектры космических корпускулярных и электромагнитных излучений, возможность воздействия факторов космического пространства (ФКП) в различных сочетаниях и в различной временной последовательности – все это значительно затрудняет изучение и прогнозирование изменений свойств материалов и характеристик бортовых систем КА в условиях космической среды [1].

Основными видами нарушения работоспособности интегральных микросхем при воздействии ионизирующих излучений являются:

- параметрические отказы, связанные с дозовыми ионизационными эффектами;
- импульсные, связанные с мощностью дозы импульсного излучения;
- одиночные события, связанные с воздействием тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ) и приводящие к обратимым и необратимым сбоям и катастрофическим отказам.

В ИЯРФ хорошо отработаны испытания на дозовые и импульсные эффекты, но отсутствуют установки и методы для исследований на эффекты одиночных событий.

Воздействие ТЗЧ приводит к специфическим эффектам, связанным с появлением в отдельных элементах схемы локальных областей с исключительно высокой плотностью ионизации электронно-дырочных пар, обусловленных ионизационными потерями энер-

гии отдельной заряженной частицы на пути ее прохождения через интегральную схему. Тяжелые заряженные частицы взаимодействуют главным образом с электронами атомных оболочек, вызывая ионизацию атомов. Тормозная способность вещества может быть охарактеризована величиной удельных потерь dE/dx , являющейся функцией только кинетической энергии. Удельные потери энергии возрастают с уменьшением энергии частицы и особенно резко перед остановкой в веществе (пик Брэгга). Взаимодействие отдельной ядерной частицы с активной областью электронной компонентной базы (ЭКБ) является причиной возникновения одиночных радиационных эффектов, которые относятся к классу «микродозиметрических» и носят вероятностный характер. Важнейшим параметром, определяющим вероятность возникновения сбоя, является линейная передача энергии (ЛПЭ) в чувствительных слоях микросхемы при торможении заряженной частицы, а не начальная энергия пучка. Поэтому важной задачей при проведении радиационных испытаний становится пересчет энергии падающих ионов в ЛПЭ в чувствительной области микросхемы [2].

Целью настоящей работы является отработка методики пересчета энергии ионов в ЛПЭ в кристалле микросхемы при воздействии протонного излучения и тяжелых заряженных частиц.

Задачи исследования: изучение влияния корпуса микросхемы на энерговыделение в чувствительной области микросхемы и исследование зависимости ЛПЭ в слоях микросхемы от энергии пучка и атомного номера ионов.

Отработка методики проводилась на примере микросхемы, выполненной по КМОП технологии. На рис. 1 представлено схематичное изображение исследуемой микросхемы. При моделировании исследуемая микросхема разбивалась на совокупность бесконечных слоев с заданными материалом и толщиной (табл. 1). Чувствительная область, представляющая собой слой Si, дополнительно разбивалась на 10 слоев для более детального исследования распределения энерговыделения непосредственно в кристалле.

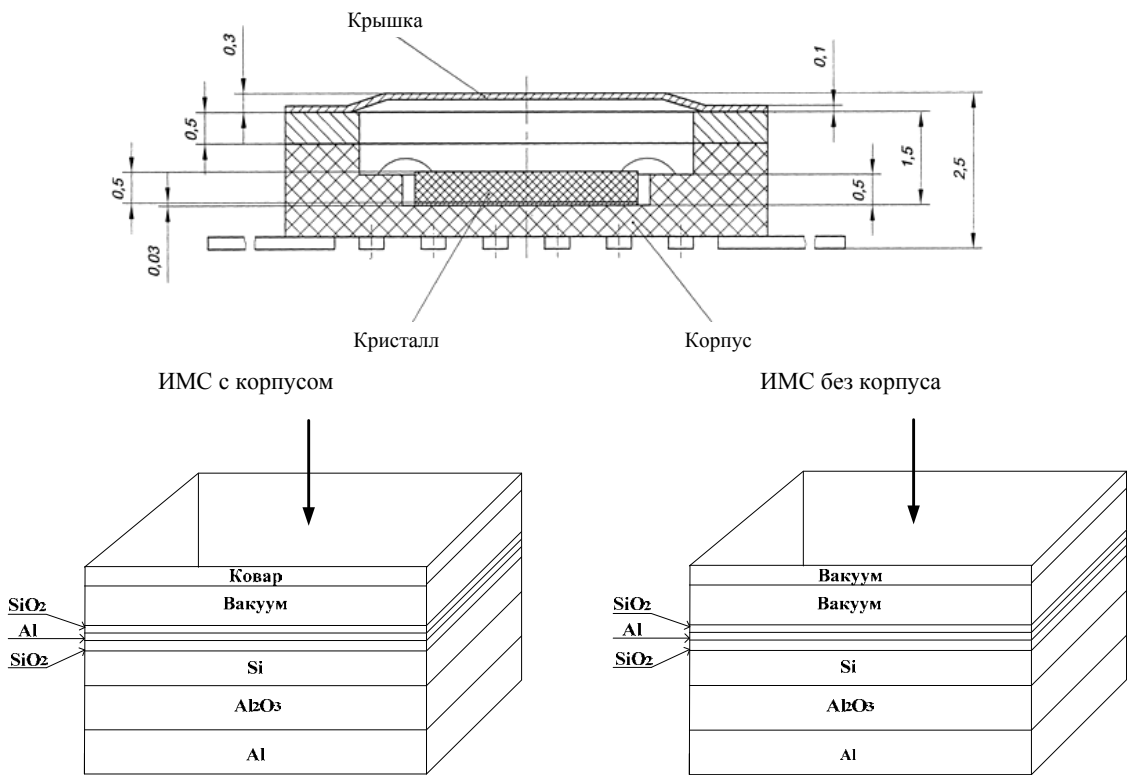


Рис. 1. Схематичное изображение ИМС

Таблица 1

Состав и толщины слоев ИМС

№ слоя	1	2	3	4	5	6	7	8
Материал	Ковар	Вакуум	SiO ₂	Al	SiO ₂	Si	Al ₂ O ₃	Al
Толщина, см	0,01	0,1	0,0001	0,0001	0,00015	0,04965	0,07	0,2
Плотность, г/см ³	8,319	0,00129	2,6	2,699	2,6	2,33	4,00	2,699

При моделировании эффектов в микросхеме от отдельных зараженных частиц условие возникновения эффектов зависит как от физико-топологических параметров интегральной микросхемы, так и от характеристик ядерной частицы. Большое значение при моделировании эффектов от отдельных ядерных частиц имеет корректная оценка эффективной длины ($L_{\text{ЭКВ}}$) собирания носителей заряда в активном объеме элемента микросхемы [3]. В данной работе все выводы приведены для $L_{\text{ЭКВ}}$, равной толщине кремниевой подложки 500 мкм.

Расчеты были проведены путем моделирования прохождения различных типов частиц в слоях микросхемы. В качестве инструмента для численного моделирования методом Монте-Карло было выбрано программное обеспечение (ПО) на основе библиотеки GEANT4 [4].

Источник излучения – точечный монохроматический пучок. Расчеты проводились для протонного излучения и пучка ионов Li, C, Na, Cl, Ti, Fe, Br, Ag,

J, Tb, W и Pb в диапазоне энергий 10–300 МэВ/нуклон. В результате расчетов были получены значения энерговыделения (МэВ/частицу) в каждом слое исследуемой микросхемы в зависимости от типа иона и его энергии. Далее энерговыделение пересчитывалось в ЛПЭ (1). Расчеты проводились для двух случаев: исследуемая микросхема в корпусе и исследуемая микросхема без корпуса (см. рис. 1).

$$L_i = \frac{E_i}{\rho_i x_i}, \quad (1)$$

где L_i – линейные потери энергии в i -м слое, МэВ·см²/мг; E_i – энерговыделение в i -м слое, МэВ; ρ_i – плотность вещества в i -м слое, мг/см³; x_i – толщина i -го слоя, см.

На рис. 2 приведен пример проявления эффекта Брэгга, который наблюдается при облучении исследуемой микросхемы пучком ионов свинца с энергией 50 МэВ/нуклон.

Из рисунка видно, что ЛПЭ и доза в различных слоях микросхемы могут существенно отличаться. Причиной, по которой возникает неравномерность ЛПЭ, может быть эффект Брэгга, в этом случае удельные потери энергии резко возрастают перед остановкой частицы в веществе.

Чтобы можно было однозначно интерпретировать результаты испытаний, необходимо добиться равномерного распределения доз и ЛПЭ в объекте исследований. Неравномерность ЛПЭ оценивалась по формуле

$$\xi = \frac{\max(L_{Si}) - \min(L_{Si})}{\max(L_{Si})}. \quad (2)$$

На рис. 2 неравномерность ЛПЭ составила 100 %.

На рис. 3 представлена зависимость ЛПЭ ионов свинца от энергии для передней и задней границ кристалла (слой Si) и неравномерность ЛПЭ, рассчитанная по формуле (2). Расчеты приведены для двух случаев: облучение ИМС в корпусе и облучение ИМС без крышки корпуса. Из рис. 3 видно, что на передней границе слоя Si энерговыведение ниже, чем на задней границе слоя. Наименьшее значение неравномерности ЛПЭ достигается при облучении микросхемы в корпусе (энергия пучка более 80 МэВ/нуклон). Ионы свинца проходят все слои чувствительной области исследуемой микросхемы при начальной энергии пучка более 60 МэВ/нуклон, если ИМС находится в корпусе, и более 40 МэВ/нуклон, если ИМС – без корпуса, в противном случае неравномерность ЛПЭ может достигать 100 %. При энергии первичного пучка ионов свинца более 175 МэВ/нуклон ЛПЭ стремится к постоянному значению, которое не зависит от эффективной длины ($L_{э\text{кв}}$) сбора носителей заряда в активном объеме элемента микросхемы и от того, присутствует крышка корпуса или нет.

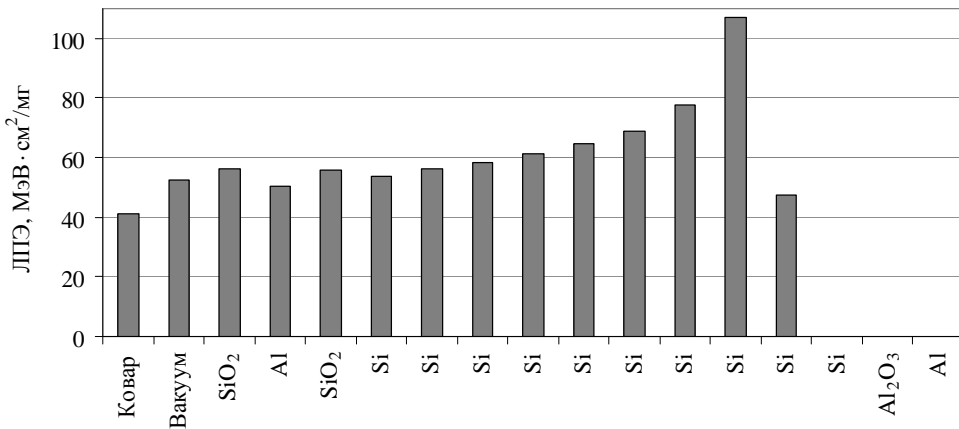


Рис. 2. Эффект Брэгга

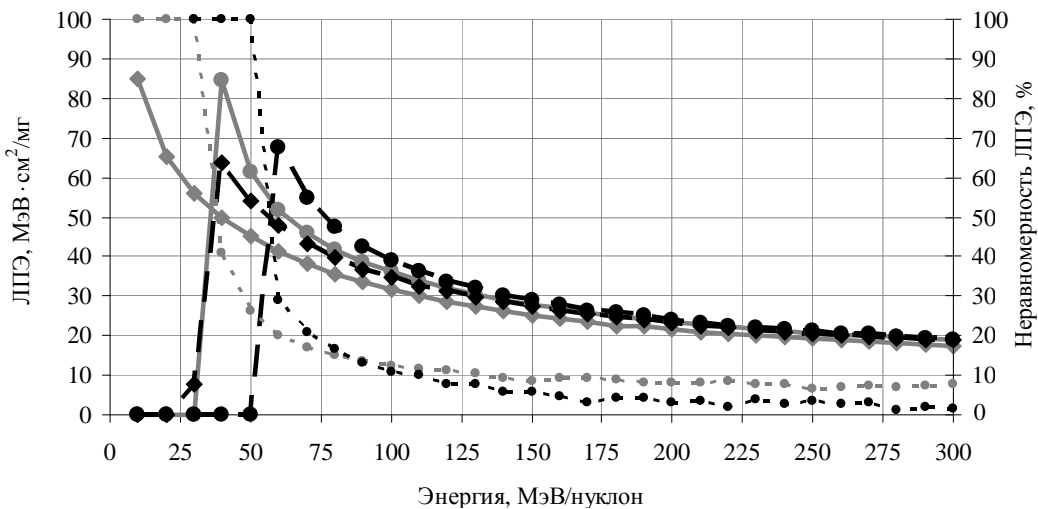


Рис. 3. Зависимость ЛПЭ от энергии пучка ионов свинца в чувствительной области:
 —◆— 1-й слой Si (ИМС без корпуса); —■— 1-й слой Si (ИМС с корпусом);
 - - - - - неравномерность ЛПЭ (ИМС без корпуса); —▲— 10-й слой Si (ИМС без корпуса);
 —●— 10-й слой Si (ИМС с корпусом); - - - - - неравномерность ЛПЭ (ИМС с корпусом)

На рис. 4 приведены зоны равномерного и неравномерного облучения чувствительной области ИМС в зависимости от типа частицы и ее энергии. Область I – область, рекомендуемая для проведения радиационных испытаний исследуемой микросхемы, так как неравномерность ЛПЭ в чувствительной области ИМС не превышает 10 %. Область II – это область, в которой неравномерность ЛПЭ превышает 10 %.

Из рисунка видно, что при облучении исследуемой микросхемы в корпусе пучком ионов, атомная масса которых более 80 а.е.м., неравномерность ЛПЭ достигает 10 % при меньшей энергии начального пучка, чем при облучении микросхемы без корпуса. Например, для пучка ионов свинца неравномерность ЛПЭ в чувствительной области ИМС составляет 10 %, начиная с энергии 110 МэВ/нуклон для экспериментов в корпусе и энергии 140 МэВ/нуклон для экспериментов без крышки корпуса. Для ионов, у которых атомная масса менее 80 а.е.м., наоборот, неравномерность ЛПЭ достигает 10 % при меньшей энергии пучка, если ИМС облучалась без корпуса.

Проведем анализ зависимости ЛПЭ в чувствительной области ИМС от атомного номера и энергии частицы.

На рис. 5 приведена зависимость ЛПЭ в слое микросхемы, соответствующему крайнему слою Si, при облучении ионами Fe, Ag, W и Pb. При равных значениях энергии начального пучка ЛПЭ выше для более тяжелых частиц. Наличие корпуса незначительно (для ионов Pb отличие составляет 7,5 %) влияет на ЛПЭ в чувствительной области исследуемой микросхемы при облучении ионами (рассмотренными в настоящей работе) с энергией более 100 МэВ/нуклон. С увеличением энергии частицы удельные потери энергии уменьшаются. Также из рис. 5 можно определить значение энергии, при которой частица не долетит (энерговыведение падает до нуля) до последнего слоя кристалла. Например, при облучении исследуемой микросхемы в корпусе ионами Ag с энергией менее 50 МэВ/нуклон частица полностью не пролетает слой Si, т. е. не обеспечивается доступ воздействия ко всему кристаллу микросхемы.

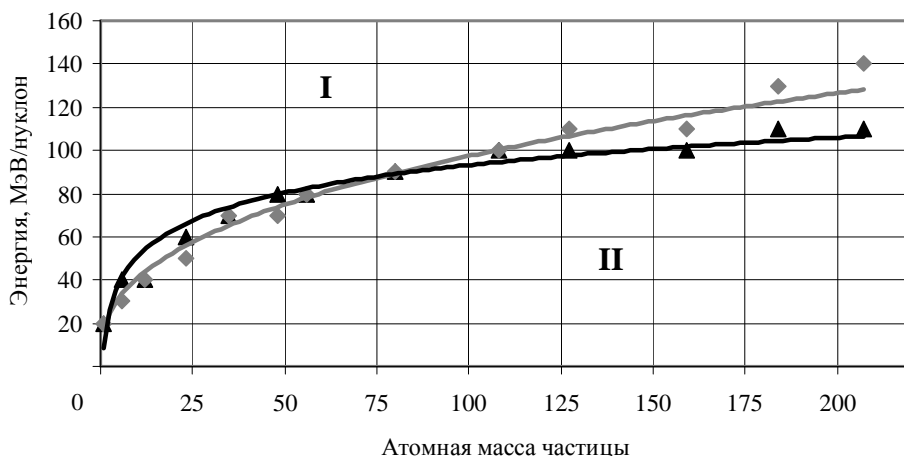


Рис. 4. Зоны равномерности и неравномерности ЛПЭ в чувствительной области ИМС:
▲ – ИМС с корпусом; ◆ – ИМС без корпуса

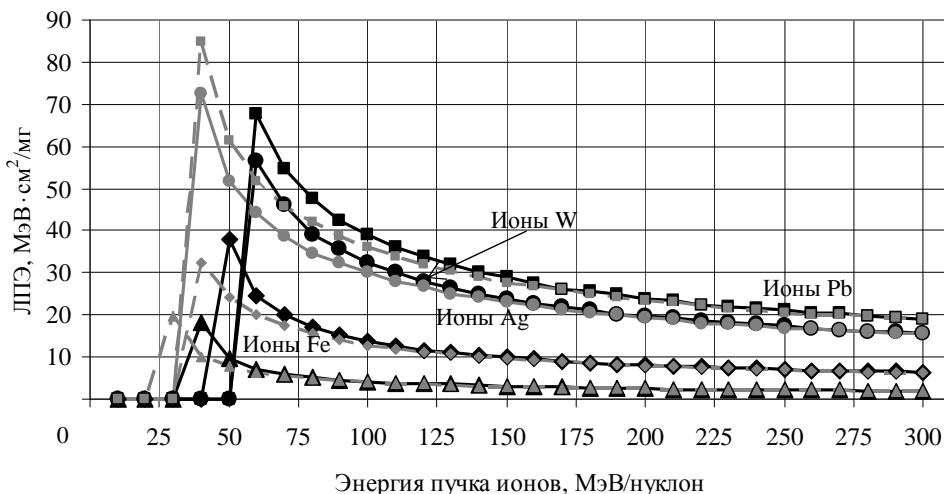


Рис. 5. Зависимость ЛПЭ от энергии: ◆ – ЛПЭ ионов Ag (ИМС в корпусе); ▲ – ЛПЭ ионов Fe (ИМС в корпусе); ● – ЛПЭ ионов W (ИМС в корпусе); ■ – ЛПЭ ионов Pb (ИМС в корпусе); —◆— ЛПЭ ионов Ag (ИМС без корпуса); —●— ЛПЭ ионов Fe (ИМС без корпуса); —●— ЛПЭ ионов W (ИМС без корпуса); —■— ЛПЭ ионов Pb (ИМС без корпуса)

На рис. 6 приведена зависимость ЛПЭ в чувствительной области ИМС с корпусом и без корпуса от энергии пучка. ЛПЭ сильно отличаются только при энергии пучка 50 МэВ/нуклон, начиная с ионов железа (атомная масса 56 а.е.м.). При облучении исследуемой микросхемы пучком ионов, тяжелее ионов железа, с энергией 50 МэВ/нуклон следует убирать крышку корпуса, так как частица тратит большую часть энергии на прохождение крышки корпуса ИМС. Устранить большую неравномерность ЛПЭ можно, увеличивая начальную энергию пучка ионов. Так при энергии пучка 100 МэВ/нуклон и более радиационные испытания исследуемой микросхемы можно проводить в корпусе. При облучении исследуемой микросхемы тяжелыми заряженными частицами с энергией менее 40 МэВ/нуклон частица не захватывает чувствительную область ИМС.

На рис. 7 приведена зависимость ЛПЭ в чувствительной области ИМС от энергии пучка. Как говорилось выше, устранить неравномерность ЛПЭ можно, увеличивая начальную энергию пучка. Однако, как видно из рис. 7, начиная с энергии 250 МэВ/нуклон, ЛПЭ практически не меняются. Например, для ионов свинца увеличение энергии пучка с 200 до 250 МэВ/нуклон приводит к уменьшению ЛПЭ на 15 %, при дальнейшем увеличении энергии с 250 до 300 МэВ/нуклон – к уменьшению на 10 %. Таким образом, при проведении радиационных испытаний исследуемой микросхемы на эффекты одиночных событий можно ограничиться данным диапазоном энергий.

Проведению испытаний ЭКБ предшествуют подготовительные операции, которые включают:

- выбор типа моделирующей установки (выбор типа ионов, энергии ионов) или имитатора (по результатам расчета энерговыделений и анализа доминирующих эффектов и конструктивного исполнения микросхемы);

- выбор параметров-критериев стойкости ЭКБ;
- подготовку образцов ЭКБ (например, удаление крышки корпуса) [1].

Исходя из результатов моделирования, были выбраны ТЗЧ и определены энергии ионов, при которых могут проходить испытания на эффекты от отдельных зараженных частиц с заданными ЛПЭ (табл. 2) в диапазоне от 1 до 60 МэВ/нуклон.

Заключение

1. Исследована зависимость ЛПЭ в слоях микросхемы от атомного номера иона и его энергии.

2. Исследовано влияние корпуса микросхемы на энерговыделение в чувствительной области микросхемы. В работе показано, что при условии учета потерь энергии ионов в корпусе микросхемы допускается проведение радиационных испытаний исследуемой микросхемы на эффекты одиночных событий при наличии корпуса микросхемы. Из работы видно, что для исследуемой микросхемы при энергиях больше 80 МэВ/нуклон наличие корпуса микросхемы позволяет уменьшить неравномерность энерговыделения в чувствительной области микросхемы. При облучении исследуемой микросхемы ТЗЧ с энергией менее 40 МэВ/нуклон крышка корпуса значительно ослабляет энергию частицы и испытание ИМС нужно проводить без крышки корпуса.

3. Проведение подобных расчетов поможет в будущем планировать эксперименты и проводить анализ результатов испытаний. Следует отметить, что все выводы верны для микросхемы, рассмотренной на рис. 1, и с $L_{\text{ЭКБ}} = 500$ мкм. Для микросхем других типов результаты расчетов и выводы могут существенно отличаться.

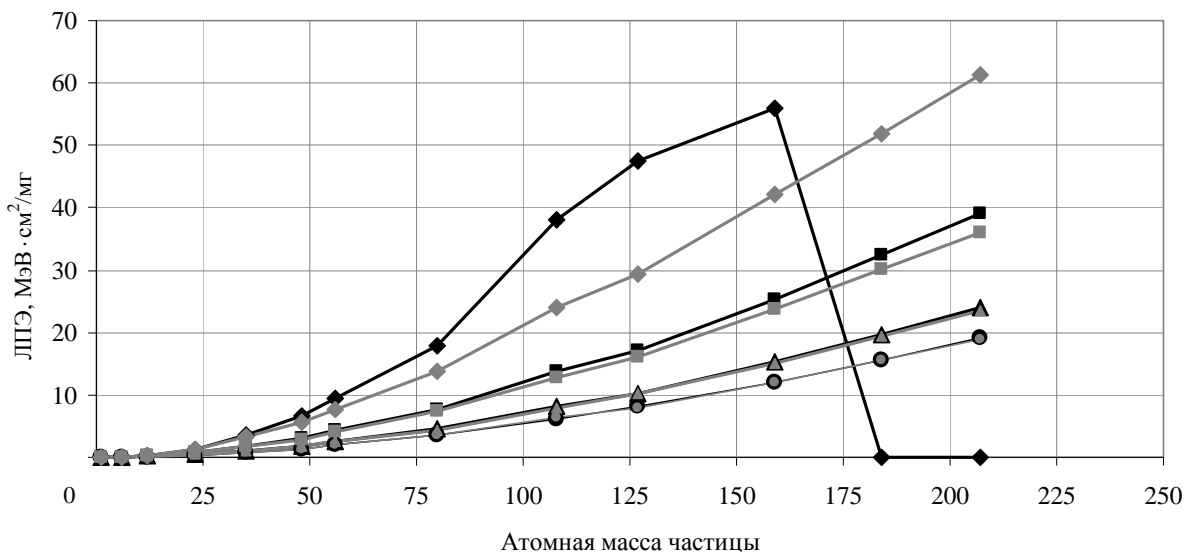


Рис. 6. Зависимость ЛПЭ в чувствительной области ИМС (10-й слой Si) в корпусе и без корпуса от энергии пучка:

- ◆ – 50 МэВ/нуклон (ИМС в корпусе); ▲ – 200 МэВ/нуклон (ИМС в корпусе);
- ◇ – 50 МэВ/нуклон (ИМС без корпуса); ▴ – 200 МэВ/нуклон (ИМС без корпуса);
- – 100 МэВ/нуклон (ИМС в корпусе); ● – 300 МэВ/нуклон (ИМС в корпусе);
- ▣ – 100 МэВ/нуклон (ИМС без корпуса); ○ – 300 МэВ/нуклон (ИМС без корпуса)

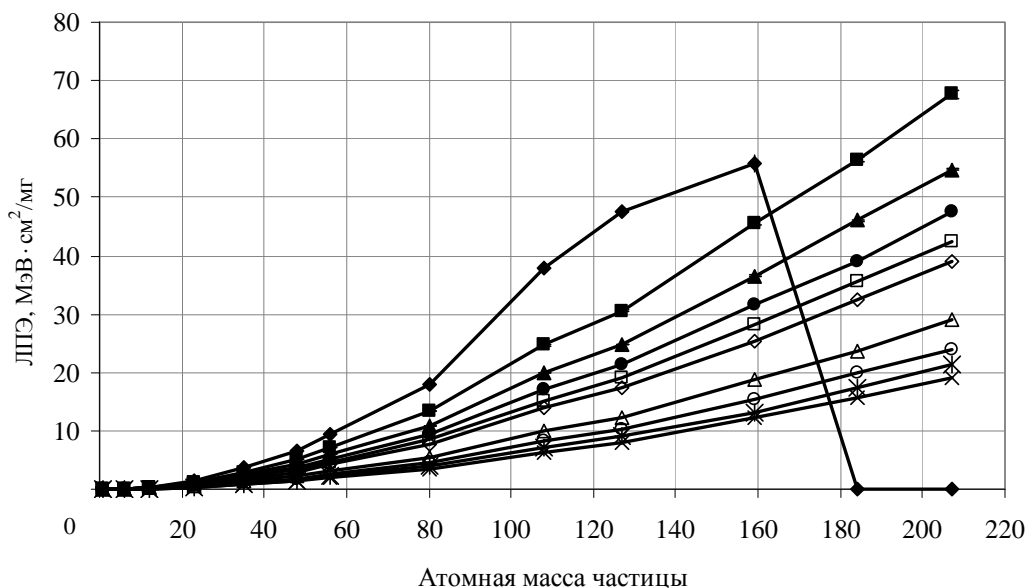


Рис. 7. Зависимость ЛПЭ в чувствительной области ИМС в корпусе от энергии пучка: ◆ — 50 МэВ/нуклон; ■ — 60 МэВ/нуклон; ▲ — 70 МэВ/нуклон; ● — 80 МэВ/нуклон; □ — 90 МэВ/нуклон; ◇ — 100 МэВ/нуклон; △ — 150 МэВ/нуклон; ○ — 200 МэВ/нуклон; * — 250 МэВ/нуклон; × — 300 МэВ/нуклон

Таблица 2

Типы ионов и их энергия для заданных ЛПЭ

ЛПЭ, МэВ·см ² /мг	Тип иона	Энергия пучка ионов, МэВ/нуклон	Неравномерность ЛПЭ, %
1	Na	70	5
	Cl	220	2
5	Fe	80	9
	Br	170	3
10	Br	70	15
	Ag	150	5
	J	210	2
20	Ag	70	18
	J	80	14
	Tb	130	6
	W	190	4
	Pb	260	3
40	Tb	60	29
	W	70	21
	Pb	90	13
60	Pb	60	29

Литература

1. Модель космоса: Научно-информационное издание: В 2 т. / Под ред. М. И. Панасюка, Л. С. Новикова. Т. 2. Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов. М.: Книжный дом «Университет», 2007.

2. Модель Космоса: Научно-информационное издание: В 2-х т. / Под ред. М. И. Панасюка, Л. С. Но-

викова Т. 1. Модели космоса. Т. 2. Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов. М.: Книжный дом «Университет», 2007.

3. Чумаков А. И. Действие космической радиации на интегральные схемы. М.: Радио и связь, 2004.

4. Geant4 User's Guide for Application Developers // Geant4 Collaboration.