

Особенности оценки радиационной стойкости микросхем в специализированных защитных корпусах

А.В. Уланова^{1,2}, А.В. Сокоян², А.И. Чумаков¹, А.Ю. Никифоров^{1,2}, А.Г. Петров¹

¹Институт экстремальной прикладной электроники НИЯУ МИФИ, avulan@spels.ru

²ОАО "ЭНПО Специализированные электронные системы"

Аннотация — Проведены расчетно-экспериментальные исследования эффективности защитных покрытий WALOPACK и RAD-PAK® по степени ослабления интенсивности электронного и гамма излучения. Рассмотрены особенности проведения испытаний микросхем в корпусах с локальной радиационной защитой.

Ключевые слова — радиационная стойкость, ионизирующее излучение, доза, коэффициент ослабления, ИС, сертификация.

I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время для локальной защиты кристаллов интегральных микросхем (ИС) в составе космической аппаратуры (КА) от воздействия ионизирующего излучения (преимущественно электронного) космического пространства (КП) предложен ряд конструктивных решений корпусов на основе использования в качестве материалов корпусов специальных составов WALOPACK (ф. 3D Plus [1]) и RAD-PAK® (ф. Maxwell Technologies [2]). По данным разработчиков [2], технология RAD-PAK обеспечивает уровень стойкости не ниже 100 крад по отношению к эффектам поглощенной дозы в условиях КП. При этом принципиально важно, что эффективность такой защиты существенно зависит от параметров орбиты, сроков эксплуатации и компоновки КА [2], без учета которых декларируемые в документации на ИС уровни дозовой стойкости не следует воспринимать как окончательные. В общем случае необходимо проведение дополнительных расчетно-экспериментальных оценок, уточняющих уровни стойкости к поглощенной дозе, с учетом состава и спектральных характеристик излучения на конкретно заданной орбите. Важно отметить, что применение локальной радиационной защиты не является эффективной мерой обеспечения радиационной стойкости микросхем по эффектам структурных повреждений и одиночным эффектам (сбоям и отказам) от отдельных ядерных частиц.

Необходимо подчеркнуть, что при сертификации ИС в рассматриваемых корпусах не применим стандартный подход к оценке дозовой стойкости путем

проведения испытаний на гамма источниках с применением типовой процедуры дозиметрии без соответствующего учета защитных свойств материалов корпусов по отношению к воздействию электронов. Анализу данных вопросов посвящена настоящая статья.

II. ОЦЕНКА КОЭФФИЦИЕНТА ОСЛАБЛЕНИЯ КОРПУСОВ НА ОСНОВЕ МАТЕРИАЛА WALOPACK

Покрытие корпусов WALOPACK представляет собой структуру с чередующимися слоями с преимущественным содержанием керамики (Al_2O_3) и порошкообразного вольфрама (W).

В работе исследован фрагмент защитного покрытия толщиной 2 мм. Средняя плотность материала составила $4,42 \pm 0,03$ г/см³. Исследования коэффициента ослабления электронного излучения проводились на ускорителе «У-31/33» (НИЯУ МИФИ) при энергии электронов $2,1 \pm 0,1$ МэВ. На рис. 1 показаны значения коэффициента ослабления электронного излучения (по поглощенной дозе) при различных углах падения пучка. Расчет проводился с помощью пакета GEANT в рамках системы моделей PENELOPE. Наблюдается удовлетворительное согласие расчета с экспериментом, особенно в области углов падения до 60° .

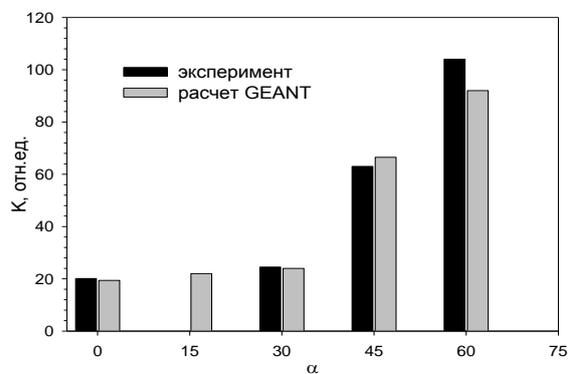


Рис. 1. Значения коэффициента ослабления электронного излучения (по поглощенной дозе) при различных углах падения пучка материалом WALOPACK

III. ОЦЕНКА КОЭФФИЦИЕНТА ОСЛАБЛЕНИЯ КОРПУСОВ НА ОСНОВЕ МАТЕРИАЛА RAD-PAK®

Продукция фирмы ф. Maxwell Technologies [2] производится по принципу COTS (Commercial-Off-The-Shelf). При этом радиационная стойкость готовых микросхем на коммерчески доступных кристаллах обеспечивается путем использования специализированных корпусов по технологиям RAD-PAK®, XRAY-PAK®, RAD-STAK® и т.д. Согласно данным официального дистрибьютора ф. Maxwell Technologies в России [3], эффективность защиты RAD-PAK® может варьироваться в сотни раз в зависимости от параметров орбиты КА. На рис. 2 показаны дифференциальные спектры электронного излучения для трех типовых орбит КА, полученные с помощью программы SPENVIS [4], которые использовались в данной работе для расчетной оценки коэффициента ослабления электронного излучения материалом RAD-PAK®.

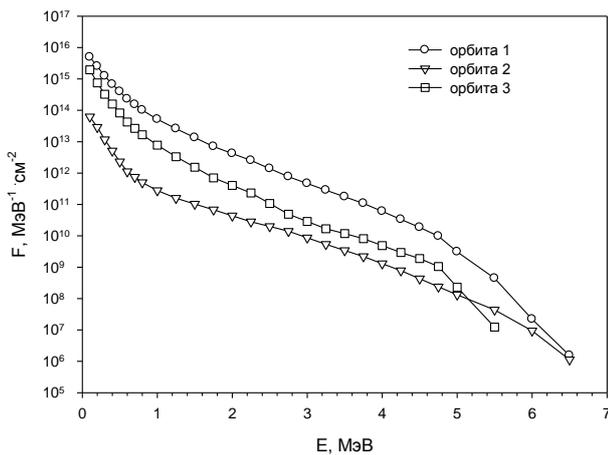


Рис. 2. Дифференциальные спектры электронного излучения для трех типовых орбит космических аппаратов: 1- эллиптическая 36000/400 км, наклонение 63°; 2- круговая 700 км, 85°; 3 – геостационарная 36000 км, 85°

Исследованные в данной работе защитные элементы RAD-PAK® представляли собой крышки корпусов ИС толщиной 0,93 мм. Элементный микроанализ, проведенный на каф. 78 НИЯУ МИФИ, указывает на доминирование в составе вещества корпусов вольфрама (85 % по массе) и меди, что согласуется с результатами измерения средней плотности объектов (16,4 г/см³).

Исследования коэффициента ослабления электронного излучения с энергией 2...4 МэВ проводились на ускорителях «У-31/33» и «РЕЛУС» (НИЯУ МИФИ). Энергия электронов на ускорителе «У-31/33» определялась методом магнитной сепарации и составила $2,2 \pm 0,05$ МэВ. Оценка энергии пучка ускорителя «РЕЛУС» проводилась путем анализа профиля поглощенной дозы в термолюминесцентных детекторах (ТЛД). Наилучшее согласие с расчетом

было получено при энергии 3,6 МэВ (рис. 3) в первой серии экспериментов и 3,2 МэВ во второй серии.

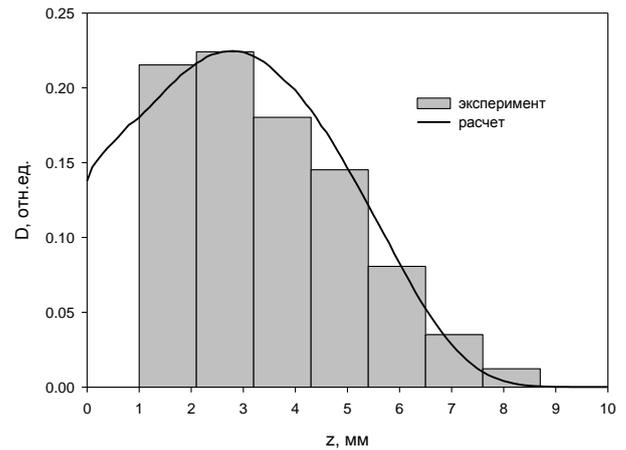


Рис. 3. Профиль поглощенной дозы в ТЛД. Расчет соответствует энергии электронов 3,6 МэВ с дисперсией 0,1 МэВ

Сопоставление экспериментальных и расчетных зависимостей коэффициента ослабления (по поглощенной дозе) излучения от энергии электронов представлены на рис. 4. В качестве абсцисс точек, соответствующих рассматриваемым орбитам, приняты средние значения энергий спектров. При расчете учитывался вклад электронов с энергией выше 1 МэВ. Расчет проводился с помощью системы GEANT в рамках модели индивидуального рассеяния.

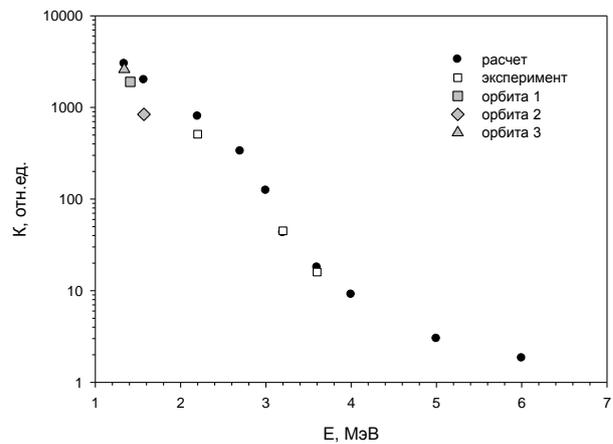


Рис. 4. Экспериментальные и расчетные значения коэффициента ослабления дозы электронного излучения материалом RAD-PAK®

Анализ результатов показывает сильную зависимость коэффициента ослабления от энергии излучения. При энергии электрона до 1,5...2 МэВ доза за экраном определяется тормозным излучением, при энергиях выше 4...5 МэВ – непосредственным прохождением электронов за защиту. В промежуточной области энергий доза за экраном формируется в значительной степени за счет разброса проективного пробега, т.е. определяется страгглингом, что требует при проведении моделирования

детального описания процессов рассеяния электронов в веществе.

Расчетные коэффициенты ослабления электронного излучения экраном RAD-PAK® толщиной 0,93 мм

	толстый детектор (1 мм)	тонкий детектор (100 мкм)
орбита 1	1900	1000
орбита 2	840	560
орбита 3	2600	1600
3,2 МэВ	43	
3,6 МэВ	18	12
6 МэВ	1,8	1,8

Как и следовало ожидать, в общем случае, коэффициент ослабления (по поглощенной дозе) для излучения сложного спектра не совпадает со значением коэффициента для средней энергии этого спектра. Данное обстоятельство затрудняет применение ускорителей электронов с моноэнергетическим пучком для корректных испытаний микросхем со специализированными защитными покрытиями на радиационную стойкость.

Анализ результатов расчета показывает также, что при экспериментальной оценке коэффициентов ослабления необходимо учитывать пространственное распределение поглощенной дозы в кристалле за защитным покрытием.

На рис. 5 показан расчетный профиль (распределение по глубине) поглощенной дозы в системе RAD-PAK®/кристалл для спектра орбиты 2 и установки «РЕЛУС» (3,6 МэВ).

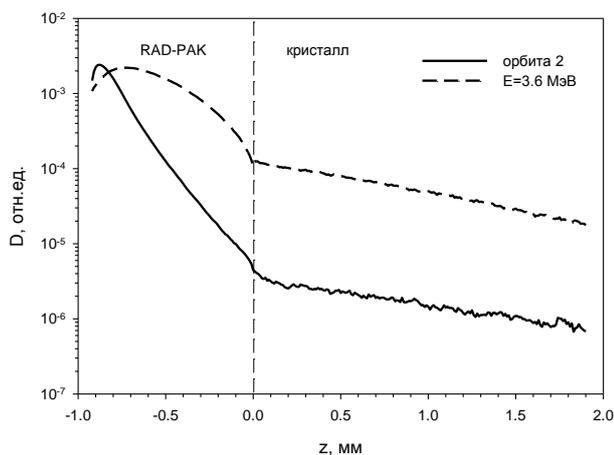


Рис. 5. Расчетный профиль поглощенной дозы в системе RAD-PAK®/кристалл для спектра орбиты 2 и установки «РЕЛУС»

Видно, что величина поглощенной дозы у поверхности кристалла, определяющая степень деградации структур ИС, может заметно превосходить среднее значение, экспериментально получаемое с помощью сравнительно толстых (около 1 мм) детекторов типа ТЛД, обычно применяемых при дозиметрическом сопровождении испытаний. Результаты расчета коэффициентов ослабления электронного излучения различного энергетического состава для толстых и тонких (100 мкм) детекторов представлены в табл. 1.

Оценка коэффициента ослабления гамма-излучения корпусов, изготовленных по технологии RAD-PAK®, проводилась на ускорителе «У-31/33», работающем в режиме генерации тормозного излучения. Полученные значения коэффициента ослабления гамма-излучения для корпусов RAD-PAK® не превышали 1,6...2 раз.

Таким образом, для получения адекватной оценки уровня дозовой стойкости аппаратуры, содержащей корпус ИС с локальной защитой, радиационные испытания должны проводиться с учетом условий эксплуатации, в первую очередь – состава и спектральных характеристик излучения. Проведение испытаний на гамма-установках может приводить к существенному (на несколько порядков) занижению уровней стойкости изделий, предназначенных для работы в условиях конкретной орбиты.

С другой стороны, распространение результатов оценок стойкости, полученных для орбиты с малым вкладом протонной компоненты излучения, на случай орбиты с большим уровнем флюенса протонов может приводить к завышению стойкости изделий.

Трудность экспериментальной оценки экранирующих свойств покрытия на моноэнергетических электронных пучках делает актуальным развитие установок, позволяющих воспроизводить заданный спектр электронного излучения КП. При этом необходимо учитывать неоднородность распределения поглощенной дозы в чувствительном объеме ИС.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ КРИСТАЛЛОВ ИС, ПРИМЕНЯЕМЫХ В КОРПУСАХ RAD-PAK®

Согласно данным представителей ф. Maxwell Technologies [2], оценка радиационной стойкости изделий с защитой RAD-PAK® включает проведение испытаний кристаллов ИС с применением источника гамма-излучения Co-60 по стандарту MIL-STD-883H и пересчет стойкости с учетом параметров орбиты.

В работе проводилось экспериментальное определение уровней стойкости кристаллов микросхем ф. Maxwell Technologies. В качестве объектов исследований были выбраны образцы флэш-памяти 29F0408RPF1 и перепрограммируемого постоянного запоминающего устройства (ППЗУ, EEPROM) 28C010TRPFS.

ИС 29F0408RPF1 представляет собой флэш-память NAND-типа информационной емкостью 32 Мбит, уровень дозовой стойкости производителем не

регламентируется. В данной микросхеме применяется кристалл KM29V32000 ф. Samsung Electronics.

ИС 28C010TRPFS представляет собой ППЗУ информационной емкостью 1 Мбит с декларируемым уровнем дозовой стойкости по спецификации более 100 крад [5]. В данной микросхеме используется кристалл с меткой «58C1001» производства ф. Hitachi.

Эффекты накопленной дозы исследовались на ускорителе электронов «У-31/33», работающем в режиме генерации гамма-излучения. Испытания проводились по методу 1000-5 ОСТ 11 073.013 (ч.10). Крышка корпуса при проведении исследований удалялась.

В результате исследований установлено:

- дозовая стойкость кристаллов в ИС 29F0408RPF1 составляет 2,4 крад по критерию функционирования (режим записи наиболее критичный) и 3,6 крад по параметрическому отказу тока потребления в режиме записи I_{CC2} (критерий 30 мА);

- дозовая стойкость кристаллов в ИС 28C010TRPFS составляет 18 крад по функционированию (режим программирования наиболее критичный), уровень стойкости в режиме считывания составляет 30 крад. Уровень стойкости по параметрическому отказу составляет 19 крад.

Как видно, уровень стойкости кристаллов ИС применяемых в изделиях ф. Maxwell Technologies относится к типовым показателям для коммерческих микросхем. Радиационная стойкость данных изделий достигается за счет локальной защиты, выполненной по технологии RAD-PAK®, которая потенциально может обеспечить дозовую стойкость только к воздействию электронного излучения при соответствующем расчете для конкретного спектрального состава орбиты КА. При этом в зависимости от орбиты фактические уровни стойкости изделий в специализированных корпусах даже к электронной компоненте радиационных полей могут отличаться в 2 и более раз. Так, с учетом приведенных расчетных оценок уровень стойкости ИС 29F0408RPF1 к воздействию электронного излучения составит порядка 1,3 Мрад для условий орбиты 2 и 3,6 Мрад для орбиты 3 при стойкости кристалла 2,4 крад.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, для получения достоверных значений уровней дозовой стойкости аппаратуры, содержащей корпуса ИС с локальной защитой, в ходе сертификации необходимо учитывать заданные условия эксплуатации, в первую очередь – состав и спектральные характеристики ионизирующего излучения. Проведение испытаний в соответствии с действующими стандартами на испытательных гамма-установках (по существу, являющихся имитаторами электронного и протонного излучения КП по дозовым эффектам) может приводить к существенному (на несколько порядков) занижению определенных уровней стойкости изделий (как микросхем, так и аппаратуры), предназначенных для работы в условиях КП. Трудность экспериментальной оценки экранирующих свойств покрытий на моноэнергетических электронных пучках определяет актуальность и перспективность развития испытательных установок, позволяющих воспроизводить заданный спектр электронного излучения КП.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность доценту кафедры №78 «Физико-технических проблем метрологии» НИЯУ МИФИ Пушкину М.А., а также старшему научному сотруднику Института экстремальной прикладной электроники НИЯУ МИФИ Артамонову А.С. за помощь в проведении работ.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] www.3d-plus.com/radiation-assurance.php.
- [2] www.maxwell.com/products/microelectronics.
- [3] <http://www.efo.ru/doc/Maxwell/Maxwell.pl?1061>.
- [4] <http://www.spervis.oma.be>.
- [5] [http://www.maxwell.com/products/microelectronics/docs/28C011T.PDF#search="28c010t"](http://www.maxwell.com/products/microelectronics/docs/28C011T.PDF#search=).