

Специализированные радиационно-защитные корпуса для изделий микроэлектронной техники

Николай Василенков
Алексей Максимов

tr@test-expert.ru

Сергей Грабчиков,
д. ф.-м. н.
Станислав Ластовский,
к. ф.-м. н.

gss@ifftp.bas-net.by

В современных радиоэлектронных системах вопрос обеспечения высоких показателей эксплуатации надежности приборов и аппаратуры в условиях радиационных воздействий (электронов, протонов, тяжелых заряженных частиц, рентгеновского и гамма-излучения) является весьма актуальным. Проблема повышения их радиационной стойкости решается следующими путями:

- технологический (применение специализированных технологических процессов и материалов при изготовлении интегральных микросхем (ИМС) и других компонентов бортовой аппаратуры) [1, 2];

- конструктивный (специализированные корпуса ИМС — методы локальной защиты) [1–7];
- схемотехнический (методы мажоритирования и др.) [1];
- методика с помощью моделирования радиационных эффектов (на стадии проектирования ИМС) [1].

При использовании стандартных материалов (алюминий и его сплавы) конструкционной защиты космических аппаратов (КА) уровни радиационных воздействий оказываются все еще достаточно высокими, поэтому для наиболее уязвимых элементов следует использовать локальную защиту.

Локальная защита представляет собой дополнительный экран, предназначенный для предохранения только критических узлов и элементов аппаратуры, не приводит к серьезному увеличению массы или габаритов блоков КА, является одним из наиболее эффективных и экономичных подходов для обеспечения радиационной защиты ИМС. Именно поэтому весьма перспективно направление, связанное с созданием новых типов корпусов с интегрированными в конструкцию корпуса экранами радиационной защиты (ЭРЗ).

Использование коммерческих кристаллов ИМС и полупроводниковых приборов в военных и гражданских космических системах стало возможным после того, как экспериментальным путем была показана эффективность экранирования с применением защитных материалов [8]. Локальное экранирование ИМС впервые было предложено в 1979 году, а исследования, доказывающие преимущества данного подхода, были проведены в 1980-х годах в США [8–10].

Основные эффекты воздействия радиации на элементы и аппаратуру КА определяются типом излучения, энергией, интенсивностью и проникающей способностью первичных и вторичных частиц в объеме вещества. ЭРЗ эффективны для защиты электронной аппаратуры от воздействия мягкой компоненты космического излучения (электронов, протонов), не обладающей способностью глубокого проникновения в вещество.

Для ионизирующих излучений с более высокой проникающей способностью (рентгеновское, гамма-излучение, мюоны, тяжелые заряженные частицы (ТЗЧ) и др.) защита электронных систем с помощью экранов менее эффективна. Также необходимо отметить, что, используя лишь один метод, невозможно обеспечить достаточную защиту КА от всего

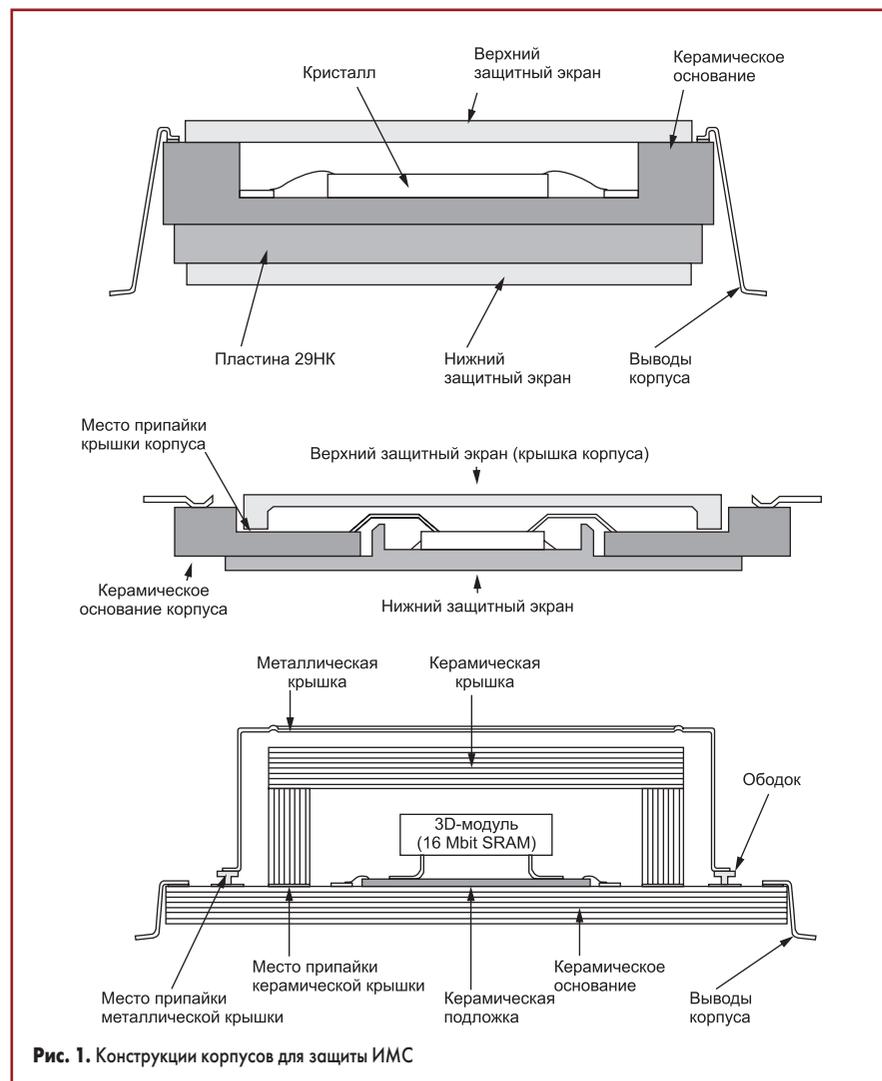


Рис. 1. Конструкции корпусов для защиты ИМС

спектра космических воздействий. При этом ЭРЗ предохраняют элементы космических аппаратов от накопительной (дозовой) составляющей радиационной нагрузки, в то время как высокоэнергетические частицы, в том числе и ТЗЧ, создающие одиночные радиационные эффекты, имеют вероятностный характер воздействия и требуют других способов повышения радиационной стойкости (см. выше).

В настоящее время разработкой материалов для ЭРЗ занимаются как российские, так и зарубежные производители [2–7]. За рубежом эти материалы носят условные названия: RAD-COAT (Space Electronics Inc., США), RAD-PAK (Maxwell Technologies Inc., США), WALOPACK (3D-Plus, Франция), X-Ray (Actel Inc., США) [4–6]. Для защиты ИМС в составе КА от воздействия ионизирующего излучения зарубежными компаниями разработан ряд конструкций корпусов (рис. 1).

По данным разработчиков фирмы Maxwell Technologies Inc. (США), технология RAD-PAK обеспечивает уровень стойкости не менее 100 крад по отношению к эффектам поглощенной дозы [5]. При этом принципиально важно, что эффективность такой защиты существенно зависит от параметров орбиты, сроков эксплуатации и компоновки КА.

В последние годы формируется точка зрения, согласно которой наиболее эффективными защитными свойствами от радиационных воздействий обладают многослойные структуры и композиционные материалы, позволяющие в несколько раз снизить дозовые нагрузки на элементы аппаратуры КА при сокращении массо-габаритных характеристик [6, 7]. К таким ЭРЗ относятся материалы WALOPACK, представляющие собой структуры с чередующимися слоями керамики Al_2O_3 и порошкообразного вольфрама. В работах [11, 12] показано, что для геостационарной орбиты (ГСО) наиболее эффективна трехслойная композиция защиты, в которой материал с высоким атомным номером Z располагается между слоями материала с низким Z , в частности композиция $Al-W-Al$.

По своей конфигурации и размерам ЭРЗ должны соответствовать конфигурации и размерам стандартных корпусов ИМС. С этой точки зрения более универсальной является технология нанесения защитных покрытий RAD-COAT, которая в отличие от технологий RAD-PAK и WALOPACK не привязана к конструкции стандартного корпуса ИМС. Покрытия типа RAD-COAT изготавливают на основе пластичной матрицы с наполнителем в виде порошка вольфрама.

В 2014 году компанией ЗАО «ТЕСТ-ПРИБОР» (г. Москва) начаты работы по созданию собственной оригинальной конструкции корпусов с интегрированными в них радиационно-защитными экранами. В ходе первого этапа работ были выполнены исследования перспективных материалов для ЭРЗ, обеспечивающих максимальную эффективность защиты при оптимальных массо-габаритных характеристиках и согласованных по температурному коэффициенту расширения (ТКР)

с материалами, применяемыми для изготовления металлокерамических корпусов ИМС (сплав 29НК и керамика Al_2O_3). Проведены компьютерные расчеты коэффициентов ослабления потоков протонов и электронов ЭРЗ для ряда космических орбит, результаты сопоставлены с экспериментом.

Образцы ЭРЗ в виде пластин разной толщины были изготовлены на основе чистых металлов (вольфрама, тантала, меди и алюминия), композитов системы $W-Cu$, а также покрытий сплавов $Bi-Al$, керамики Al_2O_3 и сплава системы $Fe-Ni-Co$ (29НК). Тестирование образцов экранов проводилось для электронов и протонов радиационных поясов Земли (РПЗ) на моделирующих установках и расчетными методами. Облучение электронами осуществлялось на ускорителях электронов ЭЛУ-4 (энергия электронов 4 МэВ) (НПЦ НАН Беларуси по материаловедению, г. Минск), а также «У-31/33» (2,2 МэВ) и «РЭЛУС» (3,6 МэВ) (ОАО «ЭНПО СПЭЛС», г. Москва). Для уменьшения энергии электронов до 1,6–1,8 МэВ на ускорителе ЭЛУ-4 между мишенью и окном вывода электронов устанавливалась алюминиевая пластина толщиной 5 мм. Облучение протонами проводилось на ускорителе протонов с перестраиваемой энергией (г. Протвино). Использовались следующие значения энергий протонов: 50, 70, 100, 150 и 200 МэВ.

Поглощенная доза определялась как детекторами ИС-7, так и по изменению вольтамперных характеристик (ВАХ) p -канальных МОП-транзисторов. Детекторы ИС-7 являются стандартными средствами дозиметрии в ОАО «ЭНПО СПЭЛС» при проведении испытаний на радиационную стойкость. Их погрешность не превышает 15%. В качестве тестовых образцов использовались транзисторные МОП-структуры (элементы логических КМОП ИМС IN74AC04N), изготовленные в ОАО «Интеграл» по стандартной эпитаксиально-планарной технологии с индуцированными каналами p -типа (длина канала $L = 2$ мкм и ширина $W = 50$ мкм).

Измерения параметров тестовых МОП-структур проводились до и после каждой дозы облучения с помощью измерителя параметров полупроводниковых приборов ИППП-1/6. Погрешность измерений составляла $\pm 5\%$. Эффективность экранирования определялась по изменению ВАХ, а именно порогового напряжения $U_{пор}$ МОП-структур, расположенных за экраном и без экрана. Значения коэффициента экранирования K_3 тестовых структур определяли из соотношения:

$$K_3 = D_{II}/D_{II0}$$

где D_{II} — доза параметрического отказа тестовой приборной структуры за защитным экраном; D_{II0} — доза параметрического отказа тестовой приборной структуры без экрана. Параметрический отказ фиксировался при изменении порогового напряжения $\Delta U_{пор} = 0,1$ В.

При использовании дозиметров ИС-7 эффективность экранирования также опреде-

лялась по отношению поглощенной дозы, измеренной без экрана, к поглощенной дозе за экраном.

Для перевода флюенса электронов в накопленную дозу использовались следующие соотношения:

$$1 \text{ крад} = 3 \times 10^{10} \text{ эл/см}^2;$$

$$1 \times 10^{12} \text{ эл/см}^2 = 33 \text{ крад.}$$

С помощью программы GEANT4 проводились расчеты поглощенной дозы радиации в кристалле кремния, облученном протонами с энергиями от 0,04 до 500 МэВ, расположенном за защитными экранами и без экрана.

Результаты исследования ЭРЗ на основе различных материалов позволили заключить, что по габаритным свойствам и стоимостным качествам наиболее подходящим материалом является вольфрам [13]. При этом для изменения его ТКР к нему следует добавлять примеси других металлов, в частности меди. Получаемый таким образом композит $W-Cu$ обладает нужными технологическими качествами для изготовления ЭРЗ, интегрированных в металлокерамические корпуса ИМС.

Результаты исследований защитных свойств испытанных образцов ЭРЗ на основе композиционного материала $W-Cu$, керамики Al_2O_3 и сплава системы $Fe-Ni-Co$ (29НК), облученных потоками электронов с $E = 1,6-1,8$ МэВ, на тестовых структурах p -канальных МОП-транзисторов представлены в таблице 1. Из таблицы 1 видно, что увеличение толщины элементов металлокерамических корпусов ИМС, изготовленных из различных материалов, приводит к росту значений коэффициентов эффективности экранирования. Экраны на основе керамики Al_2O_3 могут обеспечить требуемый уровень защиты ИЭТ при толщинах больше 3 мм, экраны из сплава 29НК — более 1,5 мм. Однако увеличение толщины керамического корпуса в большинстве случаев не представляется возможным как по габаритным свойствам, так и по требуемому уровню теплоотвода.

Таблица 1. Защитные свойства образцов радиационно-защитных экранов на основе композиционного материала $W-Cu$, керамики Al_2O_3 и сплава системы $Fe-Ni-Co$ (29НК)*

W-Cu ($\rho = 16,6 \text{ г/см}^3$)						
$d, \text{ см}$	0,06	0,09	0,12	0,15		
$d_w, \text{ г/см}^2$	1,06	1,51	2,01	2,47		
K_3	96	130,8	142,3	155,8		
Al_2O_3 ($\rho = 3,62 \text{ г/см}^3$)						
$d, \text{ см}$	0,093	0,181	0,271	0,364	0,456	0,545
$d_w, \text{ г/см}^2$	0,337	0,655	0,981	1,317	1,651	1,973
K_3	2,3	6,9	36,2	103,8	126,9	140,3
29НК ($\rho = 8,4 \text{ г/см}^3$)						
$d, \text{ см}$	0,05	0,075	0,1	0,15	0,2	0,25
$d_w, \text{ г/см}^2$	0,42	0,63	0,84	1,26	1,68	2,1
K_3	4,2	9,6	21,9	115,4	130,7	138,5

*Примечание. $D_{II0} = 2,6 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$; $d_m = \rho \times d$ [г/см²]; где d — толщина образца, d_m — массовая толщина; ρ — плотность материала

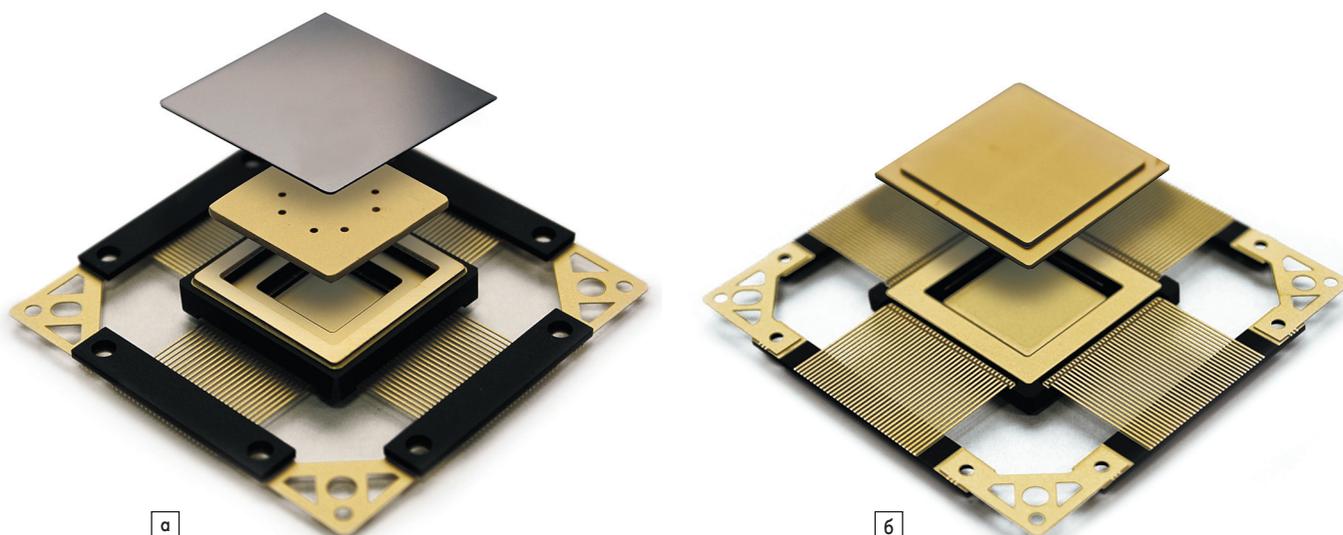


Рис. 2. Варианты МКК: а) специализированный 100-выводной планарный металлокерамический корпус с интегрированными радиационно-защитными экранами; б) специализированный 144-выводной планарный металлокерамический корпус с интегрированными радиационно-защитными экранами

Большой эффект удастся получить, интегрируя в корпуса микросхем дополнительные экраны на основе композиционного материала W-Cu (таблица 1). Здесь уже при толщине ЭРЗ $d = 0,6$ мм достигаются радиационно-защитные свойства значительно более высокие, чем у экранов, изготовленных на основе сплава 29НК или керамики Al_2O_3 . Однако следует отметить, что чрезмерное наращивание толщины пластин W-Cu также не дает существенного выигрыша в радиационно-защитных свойствах ЭРЗ как от электронного, так и от протонного облучения. Вероятнее всего, это вызвано увеличением тормозного излучения, которое обладает высокой проникающей способностью. Нами установлено, что для защиты от электронов и протонов РПЗ оптимальными толщинами экранов на основе W-Cu являются значения $0,9 \div 1,2$ мм.

Приведенные выше результаты по ЭРЗ на основе W-Cu были подтверждены в испытательном центре ОАО «ЭНПО СПЭЛС» (табл. 2–4). В таблице 2 приведены результаты компьютерного моделирования коэффициента экранирования ЭРЗ на ос-

нове W-Cu толщиной 1,2 мм от электронов и протонов разных энергий.

Из полученных данных следует, что ЭРЗ на основе W-Cu весьма эффективно ослабляют излучение электронов РПЗ во всем диапазоне энергий (K_3 изменяется в диапазоне от 10 до 10^4 по порядку величины). Для протонов космического пространства (КП) с энергией менее 30 МэВ защитный экран обеспечивает ослабление поглощенной дозы на величину от 10^3 до 10^6 раз, для протонов с энергией в диапазоне 30–100 МэВ наблюдается усиление поглощенной дозы за защитным экраном от 1 до 3 раз. Использовать защитный экран для протонного излучения с энергией более 100 МэВ неэффективно. Удельные потери энергии протонов возрастают с уменьшением энергии частиц и особенно резко перед остановкой в веществе [1]. Этим обусловлено наблюдаемое уменьшение значения K_3 ниже единицы для протонов с энергией в диапазоне 30–100 МэВ (табл. 2).

В таблице 3 приведены результаты расчета значений K_3 для ЭРЗ на основе композита W-Cu толщиной 1,2 мм для потоков электро-

нов и протонов РПЗ на различных типах орбит. В таблице 4 для этих же экранов представлены суммарные (протоны и электроны) значения коэффициентов эффективности экранирования. Выбранные орбиты (орбита МКС, круговая полярная орбита, ВЭО, орбита ГЛОНАСС, ГСО) являются актуальными для современных КА, поскольку проходят через радиационные пояса протонов и электронов.

Из результатов численного моделирования коэффициентов ослабления электронов и протонов КП видно, что защитный экран ослабляет суммарную поглощенную дозу от заряженных частиц как минимум на порядок. При этом ЭРЗ являются наиболее эффективными для орбит ГСО, ГЛОНАСС и ВЭО с большим вкладом электронов. Применение их для орбит с большим вкладом протонов (МКС и круговой полярной) менее эффективно.

На основании результатов проведенных исследований были спроектированы и изготовлены корпуса для ИМС с интегрированными в них радиационно-защитными экранами, изготовленными на основе композитного материала W-Cu.

Нами предложено два варианта металлокерамического корпуса (МКК), основное различие которых в методах герметизации подкорпусного пространства (рис. 2):

- герметизация осуществляется методом шовно-роликовой сварки (рис. 2а);
- герметизация осуществляется методом пайки (рис. 2б).

Таблица 2. Результаты компьютерного моделирования коэффициента эффективности экранирования ЭРЗ на основе W-Cu толщиной 1,2 мм от электронов и протонов различных энергий

Электроны		Протоны			
$E_p, \text{ МэВ}$	K_3	$E_p, \text{ МэВ}$	K_3	$E_p, \text{ МэВ}$	K_3
0,5	max	3	$3,8 \times 10^7$	28	1×10^4
1	$3,95 \times 10^4$	5	$2,9 \times 10^6$	30	$7,5 \times 10^3$
1,5	$4,7 \times 10^3$	7	$1,1 \times 10^6$	31	34,92
2,2	$1,3 \times 10^3$	10	6×10^5	32	0,9
2,5	$9,4 \times 10^2$	12	$2,6 \times 10^5$	33	0,46
3	$4,6 \times 10^2$	15	$1,8 \times 10^5$	34	0,33
3,6	$3,2 \times 10^2$	17	$1,1 \times 10^5$	35	0,3
4	2×10^2	20	$3,8 \times 10^4$	36	0,39
5	34,3	22	$2,2 \times 10^4$	38	0,5
6	5,9	26	$1,2 \times 10^4$	40	0,57

Таблица 3. Эффективность экранирования ЭРЗ электронов и протонов РПЗ для различных типов орбит космического пространства

Тип орбиты	Электроны РПЗ		Протоны РПЗ	
	$K_{3 \text{ min}}$	$K_{3 \text{ max}}$	$K_{3 \text{ min}}$	$K_{3 \text{ max}}$
Круговая полярная орбита	51 375	2384	4	4
ГСО	152 537	152 582	*	*
ГЛОНАСС	38 759	47 244	*	*
ВЭО	45 941	146 137	270	273
МКС	9289	59 887	6	3

Примечание.

* — протоны РПЗ для данных орбит полностью ослабляются защитным экраном, а также защитой $0,1 \text{ г/см}^2 \text{ Al}$, $K_{3 \text{ min}}$ — коэффициент ослабления для минимума солнечной активности (СА), $K_{3 \text{ max}}$ — для максимума СА.

Таблица 4. Суммарные значения эффективности экранирования ЭРЗ электронов и протонов РПЗ для различных типов орбит космического пространства

Тип орбиты	Минимум СА	Максимум СА
Круговая полярная орбита	39	8
ГСО	152 537	152 582
ГЛОНАСС	38 759	47 244
ВЭО	484	1266
МКС	12	533

Выводы

Компания ЗАО «ТЕСТПРИБОР» разработала материалы и технологию, которые могут быть использованы для изготовления корпусов нового поколения электронной компонентной базы, применяемой в аппаратуре ракетной и космической техники для обеспечения повышенных требований к радиационной устойчивости.

Применение корпусов с интегрированной радиационной защитой позволит:

- обеспечить повышенную радиационную стойкость ИМС, электронных компонентов и аппаратуры;
- использовать электронные компоненты коммерческого и индустриального классов для космических приложений и тем самым снизить затраты на комплектацию при производстве космической аппаратуры;
- расширить номенклатуру применяемых ИМС;
- обеспечить снижение весовых и габаритных параметров по сравнению со стандартными методами конструктивной защиты.

Авторы выражают благодарность компании «АО «ЭНПО СПЭЛС» за проведенные исследования.

Литература

1. Ионизирующие излучения космического пространства и их воздействие на бортовую аппаратуру космических аппаратов / Под ред. Г. Г. Райкунова. М.: Физматлит, 2013.
2. Ефремов Г. А., Епифановский И. С., Ширяев А. В. и др. Новые материалы для локальной радиационной защиты // Физика и химия обработки материалов. 2003. № 1.
3. Заболотный В. Т., Старостин Е. Е., Кочетков А. В. Оптимальные составы для локальной защиты бортовой электроники от космической радиации // Физика и химия обработки материалов. 2008. № 5.
4. www.spaceelectronics.com
5. www.maxwelltechnologies.com
6. www.3d-plus.com/radiation-assurance.php
7. Гульбин В. Н. Разработка композиционных материалов, модифицированных нанопорошками, для радиационной защиты в атомной энергетике / IX Всероссийская конф. «Физикохимия ультрадисперсных (нано-) систем – 2010», г. Ижевск.
8. Spratt J. P., Passenheim B. C., Leadon R. E., Clark S., Strobel D. J. Effectiveness of IC Shielded Packages Against Space Radiation // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1997. Vol. 44.
9. Adams L., Nickson R., Kelleher A., Millward D. G., Millward D. G., Strobel D. J., Czajkowski D. A Dosimetric Evaluation of the RAD-PAK Using Mono-Energetic Electrons and Protons // RADECS 1995, IEEE Trans. Nucl. Sci. 1996. Vol. 43.
10. Millward D. G., Strobel D. J. The Effectiveness of RAD-PAK ICs for Space Radiation Hardening // Proc. of 40-th ECTEC conference. Las Vegas, May 1990.
11. Fan W. S., Drumm C. R., Boeske S. B. Shielding Considerations for Satellite Microelectronics // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1996. Vol. 43, No 6.
12. Mangeret R., Carriere T., Beacour J. Effects of Material and/or Structure on Shielding of Electronic Devices // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1996. Vol. 43, No 6.
13. Богатырев Ю. В., Василенков Н. А., Грабчиков С. С., Ластовский С. Б., Якушевич А. С., Панкратов П. В. Экраны локальной радиационной защиты изделий микроэлектронной техники // Вопросы атомной науки и техники. Сер. «Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру». 2014. Вып. 4.