

# Локальная радиационная защита электронной компонентной базы космических аппаратов

А. Якушевич<sup>1</sup>, Ю. Богатырев, д. т. н.<sup>2</sup>, С. Грабчиков, д. ф. - м. н.<sup>3</sup>,  
С. Ластовский, к. ф. - м. н.<sup>4</sup>, Н. Василенков<sup>5</sup>, А. Козюков<sup>6</sup>, Г. Протопопов<sup>7</sup>

УДК 621.382 | ВАК 05.27.01

Для снижения дозовых нагрузок на электронную компонентную базу космических аппаратов от потоков электронов и протонов радиационных поясов Земли применяются экраны локальной радиационной защиты. Такие экраны изготавливают на основе материалов с большим порядковым номером и высокой плотностью (вольфрам, тантал, композит W-Cu и др.), а затем интегрируют в металлокерамические корпуса электронных компонентов с недостаточным уровнем радиационной стойкости. Методом Монте-Карло рассмотрены способы снижения уровня поглощенной дозы кристаллами активных элементов с помощью экранов радиационной защиты на основе композита W-Cu в гибридных металлических корпусах.

Экраны локальной радиационной защиты (ЭЛРЗ) применяются для снижения дозовых нагрузок на электронную компонентную базу космических аппаратов (КА) от потоков электронов и протонов радиационных поясов Земли (РПЗ). Суть метода применения ЭЛРЗ заключается в интегрировании защитных экранов в металлокерамические корпуса электронных компонентов с недостаточным уровнем радиационной стойкости [1–6]. Метод прост в реализации и применяется в блоках радиоэлектронных средств третьего поколения, где используется монтаж корпусированных электронных компонентов на платы [6]. Экраны локальной радиационной защиты изготавливают на основе материалов с большим порядковым номером и высокой плотностью (вольфрам, тантал, композит W-Cu и др.), что позволяет при незначительных изменениях конструкции и габаритных размеров существенно повысить защитные функции корпуса интегральных микросхем.

В блоках радиоэлектронных средств авиакосмической техники четвертого поколения используется бескорпусной монтаж кристаллов активных элементов на коммутационные платы [7]. Несколько микросборок в виде таких плат помещают в металлический корпус-экран, герметизируемый либо по торцам, либо по верхней крышке. Связь с другими блоками осуществляется через разъемы в боковых стенках. Помимо бескорпусных микросборок, в корпус блока могут быть вмонтированы пассивные электронные компоненты, которые, например, нельзя выполнить в пленочном исполнении. Если это каркасные катушки индуктивности, то высота боковых стенок такого корпуса составляет от 10 мм и более [7]. Подобного типа гибридные корпуса необходимы для различного рода мощных источников вторичного электропитания, преобразователей напряжения и др.

Цель настоящей работы – показать расчетными методами возможные способы снижения уровня поглощенной дозы кристаллами активных элементов с помощью экранов радиационной защиты на основе композита W-Cu в гибридных металлических корпусах радиоэлектронной аппаратуры при воздействии электронов радиационных поясов Земли.

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА

Определение поглощенных доз  $D$  проводилось для шести кремниевых кристаллов (активных элементов), обозначенных в данной работе как транзисторы VT1–VT6. Кристаллы транзисторов смонтированы по бескорпусной технологии в центральной области (VT5), по краям

<sup>1</sup> НПЦ НАН Беларуси по материаловедению, научный сотрудник.

<sup>2</sup> НПЦ НАН Беларуси по материаловедению, главный научный сотрудник.

<sup>3</sup> НПЦ НАН Беларуси по материаловедению, главный научный сотрудник.

<sup>4</sup> НПЦ НАН Беларуси по материаловедению, заведующий лабораторией.

<sup>5</sup> АО «ТЕСТПРИБОР», технический директор.

<sup>6</sup> Филиал АО «ОРКК» – «НИИ КП», заместитель руководителя, директор НТЦ-1.

<sup>7</sup> Филиал АО «ОРКК» – «НИИ КП», ведущий научный сотрудник.

(VT1, VT3 и VT6) и в углах (VT2 и VT4) коммутационной платы (рис. 1а). Размер каждого кристалла составляет  $0,90 \times 0,90 \times 0,24$  мм<sup>3</sup>. Размер платы и положение каждого кристалла на ней указаны на рис. 1а. Отметим, что тип активных элементов и размеры их кристаллов выбраны произвольно и для определения значения *D* не играют существенной роли. Из расчетной модели исключены пассивные компоненты (резисторы, конденсаторы, каркасные катушки индуктивности и т. д.), способные создавать некоторую теньевую защиту активным элементам от ионизирующих излучений. Это позволяет

рассматривать защитные свойства только стенок корпуса и встроенных радиационных экранов.

Плата с транзисторами помещена в металлический корпус пенального типа, герметизируемый по верхней крышке. Внутренние размеры нижнего и верхнего оснований корпуса соответствуют размерам платы. Исследовались три типа корпусов: без экранов радиационной защиты (тип I) (рис. 1б), с экранами (тип II) (рис. 1в) и с экранами оптимизированной конструкции (тип III) (рис. 1г). Внешние размеры всех корпусов практически совпадают. Имеется лишь незначительное различие

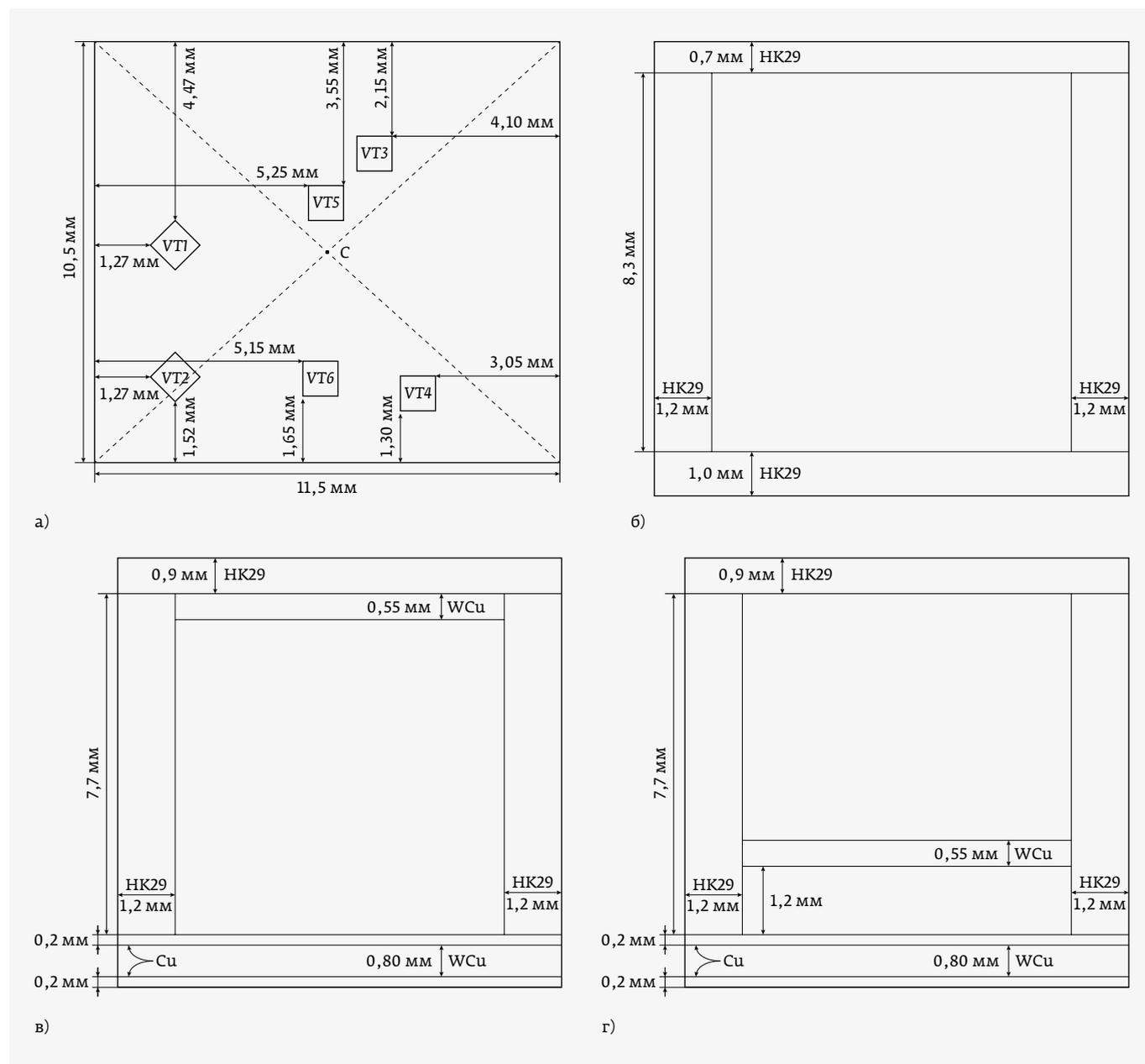
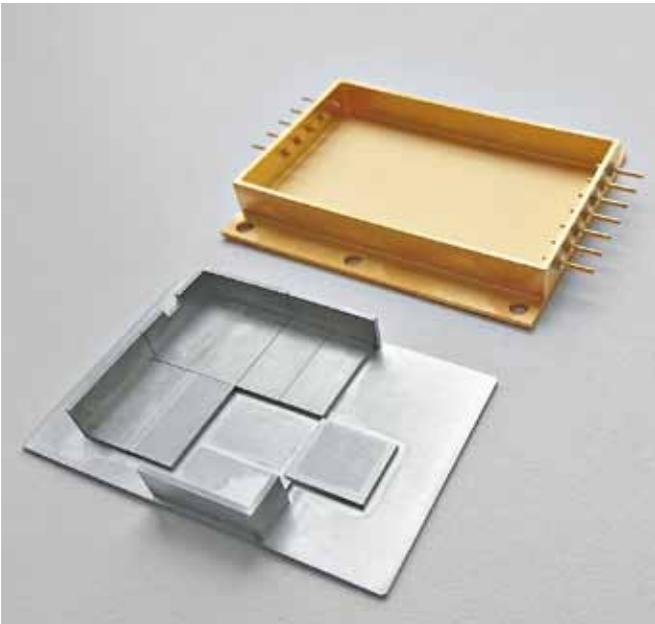


Рис. 1. Расположение кристаллов кремния на коммутационной плате (а) и вертикальные сечения корпусов типов I (б), II (в) и III (г)



**Рис. 2.** Фотография корпуса и крышки с установленными радиационными экранами

по высоте: у корпуса типа I она составляет 10,0 мм, а у типов II и III – 9,8 мм. Боковые стенки всех корпусов изготовлены из сплава НК29 (ковар) толщиной 1,2 мм.

Верхнее и нижнее основания корпуса типа I также выполнены из ковара, толщины которых показаны на рис. 1б. У корпусов типов II и III усиление защиты проведено только для крышки и основания, что проще реализовать технически в процессе изготовления серийных гибридных корпусов. Основание обоих корпусов с радиационными экранами (см. рис. 1, в и г) имеет толщину 1,2 мм и состоит из слоя композита W–Cu толщиной 0,8 мм между двумя слоями меди по 0,2 мм толщиной для усиления теплоотводящих свойств.

Плотность материала композита W–Cu равна 16,5 г/см<sup>3</sup>, а суммарная массовая толщина основания с защитным экраном и слоями меди – 1,67 г/см<sup>2</sup>. Верхние крышки корпусов, изготовленные из ковара толщиной 0,9 мм, усилены дополнительным слоем композита W–Cu толщиной 0,55 мм до суммарной массовой толщины, равной 1,67 г/см<sup>2</sup>. Основным отличием между корпусами типов II и III является различное положение верхнего защитного слоя W–Cu относительно основания. В первом случае он располагается непосредственно под крышкой корпуса (см. рис. 1в), а во втором – на высоте 1,2 мм от основания корпуса, то есть, приближен к активным элементам на расстояние ~1 мм (см. рис. 1г). Указанное значение высоты в данной модели выбрано произвольно. Положение экрана относительно основания в реальных корпусах может быть другим, так как будет зависеть от толщины и типа печатной платы, а также размеров элементов

навесного монтажа. Оно будет отличаться, например, для одно- и двухсторонних, а также многослойных печатных плат. В настоящее время существует большое количество конструктивно-технологических разновидностей печатных плат, и все их невозможно рассмотреть в рамках настоящей работы. Учитывая то, что коммутационная плата в весьма незначительной степени ослабляет поток ионизирующего излучения по сравнению с основанием и другими стенками корпуса, она, так же как и пассивные компоненты, исключена из расчетной модели, то есть кристаллы транзисторов расположены на основаниях корпусов всех трех типов согласно рис. 1а.

Суммарная поглощенная доза  $D$  рассчитывалась по формуле [8]:

$$D = \int \frac{D_0(E)}{\Phi} \varphi(E) dE, \quad (1)$$

где  $\varphi(E)$  – дифференциальный спектр электронов;  $D_0(E)$  – поглощенная доза в зависимости от энергии  $E$  электронов;  $\Phi$  – флюенс электронов.

Величина поглощенной дозы от электронного излучения на единичный флюенс  $\left(\frac{D_0(E)}{\Phi}\right)$  в формуле (1) фактически определяет уровень поглощенной дозы от одного электрона.

С помощью программного комплекса Geant4 v. 10.5 методом Монте-Карло [9] для каждого значения энергии  $E$  из спектра электронов рассчитывалась поглощенная доза  $D_0$  в каждом кристалле кремния для всех типов корпусов. Корпуса размещались в изотропном поле электронного излучения с флюенсом  $\Phi = 4,1 \cdot 10^6 \text{ см}^{-2}$ . При этом учитывался вклад от вторичных электронов и тормозного излучения. Далее, в соответствии с формулой (1), методом численного интегрирования были получены значения суммарных поглощенных доз  $D$  в кристаллах кремния за 1 сут. В настоящей работе расчеты проводились для круговой орбиты с углом наклона  $i = 30^\circ$  высотой  $H = 8000 \text{ км}$ . Дифференциальные спектры электронов  $\varphi(E)$  при максимуме и минимуме солнечной активности были получены с помощью программы OMERE 5.3 [10].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные в результате моделирования зависимости  $D_0(E)$  для кристаллов кремниевых транзисторов в корпусах трех типов представлены на рис. 3. Для каждого типа корпуса показаны семейства из шести зависимостей, которые на графике наиболее заметно различаются для корпуса типа III. Для корпусов типов I и II кривые  $D_0(E)$  всех шести активных элементов платы лежат достаточно близко.

Согласно представленным результатам можно заключить, что все зависимости  $D_0(E)$  имеют одинаковый вид, а именно: с ростом энергии электронов значение

поглощенной дозы растет нелинейно. При этом до определенной энергии электронов значение  $D_0$  совсем незначительно. Для корпуса типа I значение этой «пороговой» энергии составляет порядка 1,2 МэВ, а для типов II и III – 2,0 МэВ. Не вызывает особых возражений и то, что электроны с энергией ниже «пороговой» полностью тормозятся стенками корпусов, а накопленная кристаллами доза определяется исключительно низкоэнергетичным вторичным излучением, сгенерированным при взаимодействии первичных электронов с атомами материала стенок. Такой результат согласуется с данными экстраполированного пробега электронов в веществе. Так, у корпуса типа I крышка из ковара имеет наименьшую по сравнению с остальными стенками массовую толщину, равную 0,59 г/см<sup>2</sup>, и ей соответствует длина экстраполированного пробега электронов с  $E=1$  МэВ в Fe [11]. Боковые стенки двух других корпусов имеют массовую толщину 1,0 г/см<sup>2</sup>. В то же время длина экстраполированного пробега электронов с  $E=1,5$  МэВ в Fe составляет 0,96 г/см<sup>2</sup>. При этом для электронов с  $E=2,0$  МэВ длина экстраполированного пробега в Fe равна 1,31 г/см<sup>2</sup>, а в W – 1,55 г/см<sup>2</sup> [11]. Следовательно, электроны с энергией до 2 МэВ активно поглощаются корпусами II и III типов.

Дальнейший рост энергии падающих на стенки корпуса первичных электронов выше «порогового» значения ведет к увеличению энергии и количества частиц, достигающих кристаллы кремния, в результате чего наблюдается существенное возрастание значения  $D_0$  (см. рис. 3). Зависимости  $D_0(E)$  для корпусов с дополнительными радиационными экранами (II и III типы) лежат значительно ниже, чем таковые для корпуса типа I. Это обусловлено большими значениями суммарных массовых толщин (1,67 г/см<sup>2</sup>) крышек и оснований корпусов со слоями композита W–Cu.

Опускание слоя композита W–Cu к основанию в конструкции корпуса типа III приводит к существенному увеличению массовой толщины вышележащих частей всех боковых стенок. Здесь электронам необходимо преодолеть не только эти стенки, но и защитный слой композита, чтобы попасть в кристаллы активных элементов (см. рис. 1г). Несложно оценить, что суммарная массовая толщина указанных элементов корпуса возрастает до 2,7–3,5 г/см<sup>2</sup>. При этом суммарные массовые толщины остальных элементов (крышка,

основание и части боковых стенок, лежащие ниже слоя композита W–Cu,) остаются такими же, как и у корпуса типа II. Из вышесказанного становится понятно, почему на графике (см. рис. 3) зависимости  $D_0(E)$  кристаллов транзисторов в корпусе типа III лежат ниже таких же зависимостей, рассчитанных для корпуса типа II.

Таким образом, можно сделать вывод, что наибольшей эффективностью защиты активных элементов от потоков электронов радиационных поясов Земли обладает корпус типа III. Это полностью подтверждается данными по вычислению в соответствии с формулой (1) суммарных поглощенных доз  $D$  в кристаллах кремниевых транзисторов (табл. 1).

Эффективность радиационной защиты электронных компонентов корпусами от воздействия электронов  $K_e$  можно оценить из отношений

$$K_e = D_1 / D_{sh}, \tag{2}$$

где  $D_1$  – накопленная доза кристаллами кремния в корпусе без радиационного экрана типа I, а  $D_{sh}$  – накопленная доза в корпусе с радиационными экранами. Эффективность экранирования корпусом типа II составляет 3,5–3,7 при минимуме солнечной активности и 3,9–4,1 при ее максимуме. Соответственно эффективность экранирования корпусом

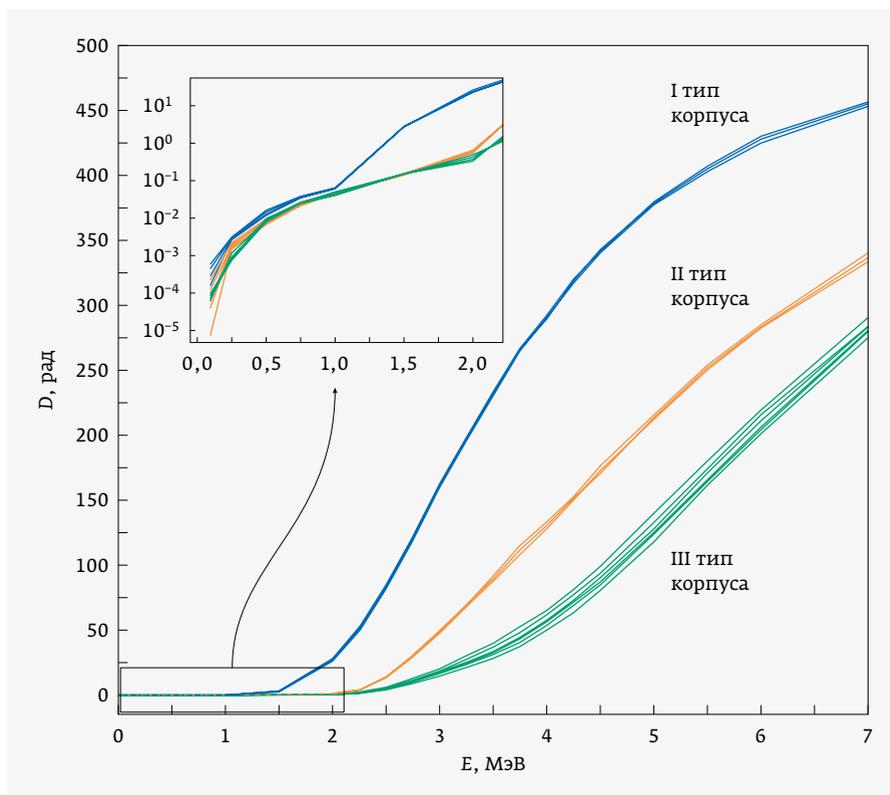


Рис. 3. Зависимости  $D_0(E)$  для кристаллов кремниевых транзисторов в корпусах трех типов при облучении электронами флюенсом  $\Phi = 4,1 \cdot 10^6 \text{ см}^{-2}$

**Таблица 1.** Суммарные поглощенные дозы в кристаллах кремниевых транзисторов, расположенных в корпусах всех типов, от электронов круговой орбиты с углом наклона  $i = 30^\circ$  и высотой  $H = 8000$  км при минимуме и максимуме солнечной активности

Положение на плате	$D$ , рад/сут.					
	Минимум солнечной активности			Максимум солнечной активности		
	I тип корпуса	II тип корпуса	III тип корпуса	I тип корпуса	II тип корпуса	III тип корпуса
VT1	36,01	9,96	4,63	117,13	29,82	13,53
VT2	35,62	10,05	5,24	115,74	29,79	15,27
VT3	36,63	9,86	4,32	119,47	29,61	12,36
VT4	35,81	10,03	4,79	116,63	29,93	13,60
VT5	36,74	9,87	3,95	119,38	29,37	11,12
VT6	36,18	10,06	4,42	117,86	30,27	12,71

типа III составляет 6,8–9,3 при минимуме и 7,6–10,7 при максимуме солнечной активности.

В заключение следует отметить, что значения  $D$  кристаллов транзисторов в корпусе типа III явно зависят от их положения на коммутационной плате (см. таблицу 1). Максимальная разница в накопленной дозе активными элементами в корпусе типа III при минимуме и максимуме солнечной активности составляет 25 и 27% соответственно. При этом такая же разница для корпусов типов I и II равняется 2–3% и сопоставима со статистической погрешностью моделирования. Столь большое различие в значениях  $D$  для корпуса типа III также вытекает и из расхождения кривых  $D_0(E)$  (см. рис. 3). Если расположить транзисторы по мере удаленности от двух ближайших боковых стенок (см. рис. 1а): VT2 (1,27 и 1,52 мм), VT4 (1,3 и 2,15 мм), VT1 (1,27 и 4,47 мм), VT6 (1,65 и 5,15 мм), VT3 (2,15 и 4,10 мм), VT5 (3,55 и 5,15 мм), то такой порядок соответствует монотонному уменьшению их значения  $D$  (см. таблицу 1). Указанная закономерность позволяет дать следующее объяснение полученным результатам. Выше уже отмечалось, что у корпусов типов II и III массовые толщины крышки и основания больше толщины боковых стенок. Суммарное количество излучения (первичные и вторичные электроны, а также тормозные гамма-кванты), падающего на кристалл от любой стороны корпуса, определяется телесным углом, под которым эта сторона видна из точки расположения кристалла. Очевидно, что величина телесного угла увеличивается с уменьшением расстояния между кристаллом и боковой стенкой и значение  $D$  должно возрастать, что и наблюдается при расчетах для

корпуса типа III (см. таблицу 1). С помощью геометрических построений несложно показать, что этот эффект уменьшается с увеличением высоты стенок, что подтверждается полученными результатами для корпуса типа II.

Для более полного анализа зависимости значения  $D$  от положения кристаллов активных элементов на плате необходимо сравнить спектры рассеянных первичных и сгенерированных вторичных электронов, а также тормозных гамма-квантов всеми стенками и защитными экранами корпуса для каждого транзистора. Следует отметить, что одной из возможных причин зависимости значения  $D$  от положения кристалла на плате в корпусе типа III может быть также эффект теневого экранирования транзисторами друг друга.

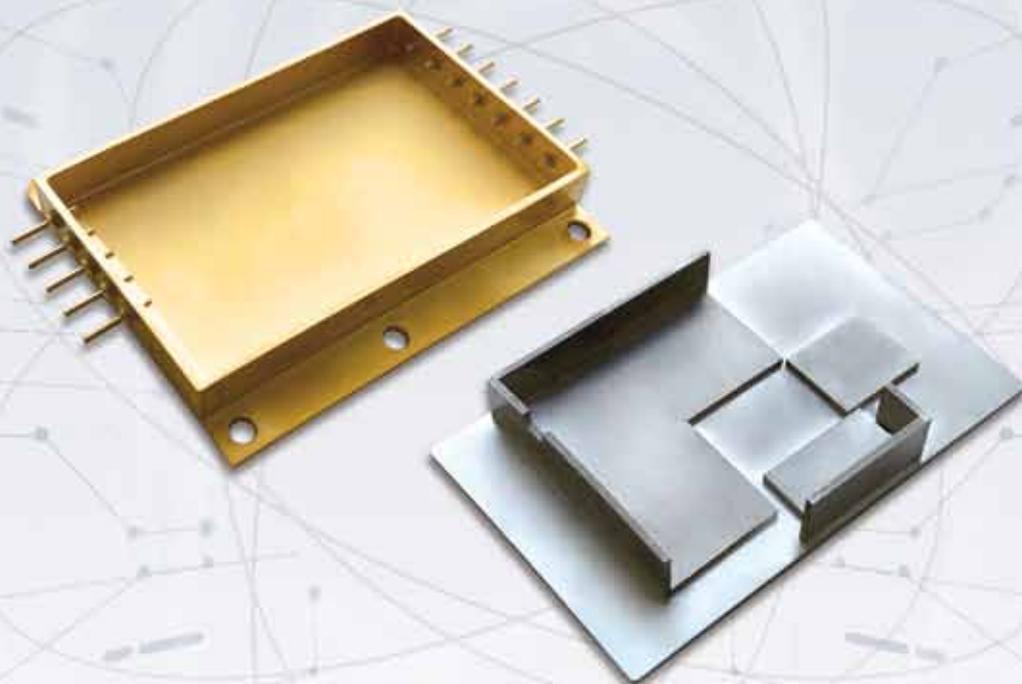
При этом изменение размеров корпуса может существенно изменить вид полей ионизирующих излучений. Все эти особенности требуют проведения дополнительных исследований.

\*\*\*

Таким образом, с помощью программного комплекса Geant4 рассмотрены способы снижения уровня поглощенной дозы  $D$  кристаллами активных элементов с использованием экранов радиационной защиты на основе композита W–Cu в гибридных металлических корпусах блоков радиоэлектронных средств четвертого поколения при воздействии электронов круговой орбиты с углом наклона  $i = 30^\circ$  высотой  $H = 8000$  км. Показано, что увеличение массовой толщины основания и крышки корпусов экранами до значения  $1,67$  г/см<sup>2</sup> позволяет снизить дозовую нагрузку в 3,5–3,7 раза при минимуме и 3,9–4,1 раза при максимуме солнечной активности. Оптимизация защиты путем опускания верхнего слоя композита W–Cu к основанию до высоты 1,2 мм уменьшает значение  $D$  в 6,8–9,3 раза при минимуме и 7,6–10,7 раза при максимуме солнечной активности.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Ефремов Г. и др.** Новые материалы локальной радиационной защиты // Физика и химия обработки материалов. 2003. № 1. С. 34–37.
2. **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. С. 15–18.



# КОРПУСА RAD-PAK

для вторичных источников питания и электронных модулей

особенностью данных корпусов  
является локальная защита  
наиболее уязвимых элементов конструкции

**ТЕСТПРИБОР**

125480, г. Москва  
ул. Планерная, д. 7А  
тел./факс: (495) 657-87-37  
testpribor@test-expert.ru  
www.test-expert.ru

3. **Василенков и др.** Специализированные радиационно-защитные корпуса изделий микроэлектроники // Технологии в электронной промышленности. 2015. № 4. С. 85–88.
4. **Spratt J. P., et al.** Effectiveness of IC shielded packages against space radiation // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1997. V. 44, No. 6. PP. 2018–2025. <https://doi.org/10.1109/23.658984>.
5. **Fan W. S., et al.** Shielding considerations for satellite microelectronics // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1996. V. 43, No. 6. PP. 2790–2796. <https://doi.org/10.1109/23.556868>.
6. **Бокатырев Ю. В. и др.** Экраны локальной радиационной защиты изделий микроэлектронной техники // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2014. Вып. 4. С. 53–56.
7. **Белоусов Е. Л., Ушкар М. Н.** Конструирование блоков бортовой авиационной аппаратуры связи. Н. Новгород: НГТУ, 2005. 237 с.
8. **Чумаков А. И.** Действие космической радиации на интегральные схемы. М.: Радио и связь, 2004. 320 с.
9. Geant4 [Electronic resource] // Geant4 Collaboration. Mode of access: <http://geant4.web.cern.ch/>. Date of access: 20.09.2019.
10. OMERE 5.3. [Electronic resource] // TRAD Tests & Radiations. Mode of access: <https://www.trad.fr/en/space/omere-software/>. Date of access: 15.11.2019.
11. **Баранов В. Ф.** Дозиметрия электронного излучения. М.: Атомиздат, 1974. 232 с.

## КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ТЕХНОСФЕРА»



Цена 840 руб.

# ЭТАЛОНЫ И СТАНДАРТНЫЕ ОБРАЗЦЫ В ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКЕ. ЭЛЕКТРОРАДИОИЗМЕРЕНИЯ

Лукашкин В. Г., Булатов М. Ф.

*Издание осуществлено при финансовой поддержке Федерального агентства по печати и массовым коммуникациям в рамках Федеральной целевой программы «Культура России (2012–2018 годы)»*

М.: ТЕХНОСФЕРА,  
2018. – 402 с.,  
ISBN 978-5-94836-512-1

В книге рассмотрены общие вопросы метрологического обеспечения и единицы физических величин. Изложены основные задачи технических средств метрологического обеспечения в области электрорадиоизмерений. Даны методы воспроизведения единиц физических величин на основе современных научно-технических достижений с использованием квантовых эффектов и фундаментальных физических констант.

Рассмотрены структурные схемы и техническая реализация современных первичных, вторичных и рабочих эталонов с описанием их метрологических характеристик. Приведены способы передачи размера единиц физических величин от первичных эталонов и структурные схемы поверочных установок на базе государственных и локальных поверочных схем. Даются оценки погрешности и неопределенности первичных и рабочих эталонов.

Книга может быть полезна студентам и аспирантам при выборе и обосновании эталонной базы в области электрорадиоизмерений, а также специалистам, занимающимся вопросами разработки, производства и оценки качества средств измерений, контроля и испытаний.

### КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

✉ 125319, Москва, а/я 91; ☎ +7 495 234-0110; 📠 +7 495 956-3346; [knigi@technosphera.ru](mailto:knigi@technosphera.ru), [sales@technosphera.ru](mailto:sales@technosphera.ru)