

ISSN 1561-2430 (Print)

ISSN 2524-2415 (Online)

УДК 539.12.043; 621.38

<https://doi.org/10.29235/1561-2430-2020-56-4-488-495>

Поступила в редакцию 13.07.2020

Received 13.07.2020

А. С. Якушевич¹, Ю. В. Богатырев¹, Н. А. Василенков², С. С. Грабчиков¹,
С. Б. Ластовский¹, А. Ю. Максимов²

¹Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению,
Минск, Беларусь

²АО «ТЕСТПРИБОР», Москва, Российская Федерация

ОСЛАБЛЕНИЕ ПОТОКОВ ЭЛЕКТРОНОВ РАДИАЦИОННЫХ ПОЯСОВ ЗЕМЛИ ЗАЩИТНЫМИ ЭКРАНАМИ НА ОСНОВЕ КОМПОЗИТА W-Cu

Аннотация. 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 при воздействии электронов круговой орбиты с углом наклона 30° и высотой 8000 км. Спектры электронов при максимуме и минимуме солнечной активности были получены с помощью программы OMERE 5.3. Установлено, что увеличение массовой толщины основания и крышки корпусов экранами до значения 1,67 г/см² позволяет снизить дозовую нагрузку в 3,5–3,7 раза при минимуме и 3,9–4,1 раза при максимуме солнечной активности. А оптимизация защиты путем опускания верхнего слоя композита W-Cu к основанию до высоты 1,2 мм уменьшает значение поглощенной дозы в 6,8–9,3 раза при минимуме и 7,6–10,7 раза при максимуме солнечной активности.

Ключевые слова: радиационный экран, композит W-Cu, электроны, метод Монте-Карло

Для цитирования. Ослабление потоков электронов радиационных поясов Земли защитными экранами на основе композита W-Cu / А. С. Якушевич [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-мат. наук. – 2020. – Т. 56, № 4. – С. 488–495. <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2020-56-4-488-495>

Hanna S. Yakushevich¹, Yrii V. Bogaturev¹, Nikolaj A. Vasilenkov², Sergey S. Grabchikov¹,
Stanislav B. Lastovski¹, Aleksey Y. Maksimov²

¹Scientific and Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

²JSC «TESTPRIBOR», Moscow, Russia

ATTENUATION OF EARTH'S RADIATION BELT ELECTRONS WITH PROTECTIVE SHIELDS BASED ON COMPOSITE W-Cu

Abstract. For decreasing the radiation effects of the cosmic environment on the electronic components of spacecraft, local protection shields are used. They are manufactured on the basis of materials with high density and large atomic numbers (tungsten, tantalum, the W-Cu composite etc.) and then integrated into the ceramic-and-metal package of electronic components with an insufficient level of radiation resistance. On the basis of the Monte Carlo approach we considered the methods of decreasing the level of the dose absorbed by the crystals of active elements if using the radiation shields based on the W-Cu composite in hybrid metal cases under the action of electrons of a circular orbit with an inclination angle of 30° and an altitude of 8000 km. The electron spectra at the maximum and minimum solar activity were obtained using OMERE 5.3 software. It was established that an increase in the mass thickness of the base and cover of cases with shields up to 1.67 g / cm² makes it possible to reduce the dose load by 3.5–3.7 times at the minimum and by 3.9–4.1 times at the maximum of solar activity. The optimization of protection by lowering the upper layer of the W-Cu composite to the base to a height of 1.2 mm reduces the absorbed dose by 6.8–9.3 times at the minimum and by 7.6–10.7 times at the maximum solar activity.

Keywords: radiation shield, W-Cu composite, electrons, Monte Carlo method

For citation. Yakushevich H. S., Bogaturev Y. V., Vasilenkov N. A., Grabchikov S. S., Lastovski S. B., Maksimov A. Y. Attenuation of Earth's radiation belt electrons with protective shields based on composite W-Cu. *Vestsi Natsyianal'nai akademii navuk Belarusi. Seriya fizika-matematychnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physics and Mathematics series*, 2020, vol. 56, no. 4, pp. 488–495 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2020-56-4-488-495>

Введение. 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 просто реализуем 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 монтироваться пассивные электронные компоненты, которые, например, нельзя выполнить в пленочном исполнении. Если это каркасные катушки индуктивности, то высота боковых стенок такого корпуса составляет от 10 и более миллиметров [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 (VT1, VT3 и VT6) и в углах (VT2 и VT4) коммутационной платы (рис. 1, *a*). Размер каждого кристалла составляет $0,90 \times 0,90 \times 0,24$ мм³. Размер платы и положение каждого кристалла на ней указаны на рис. 1, *a*. 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 создать 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. 1, *b*), с экранами (тип II) (рис. 1, *c*) и с экранами оптимизированной конструкции (тип III) (рис. 1, *d*). Внешние размеры всех корпусов практически совпадают и показаны на рис. 1, *b–d*. Имеется лишь незначительное различие 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. 1, *b*. 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, *c* и *d*) 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/см³, а суммарная массовая толщина основания с защитным экраном и слоями меди – 1,67 г/см². Верхние крышки корпусов, изготовленные из ковара толщиной 0,9 мм, усилены

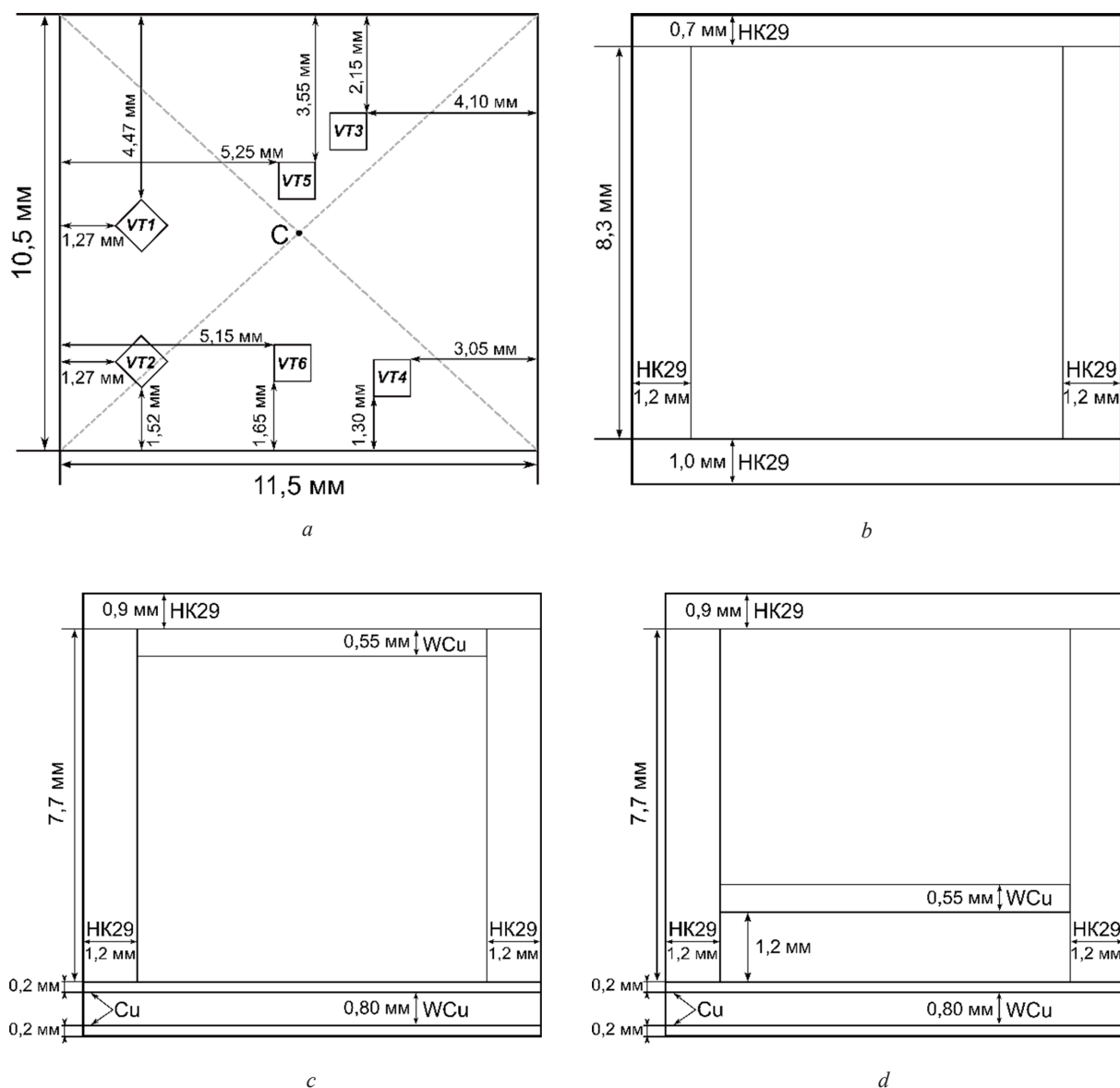


Рис. 1. Расположение кристаллов кремния на коммутационной плате (а) и вертикальные сечения корпусов типа I (b), II (c) и III (d)

Fig. 1. The arrangement of silicon crystals on the backplane (a) and the vertical sections of the packages of type I (b), II (c) and III (d)

дополнительным слоем композита W-Cu толщиной 0,55 мм до суммарной массовой толщины, равной $1,67 \text{ г/см}^2$. 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. 1, c), а во втором – на высоте 1,2 мм от основания корпуса, т. е. приближен к активным элементам на расстояние ~ 1 мм (см. рис. 1, d). 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 число 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, т. е. кристаллы транзисторов расположены на основаниях корпусов всех трех типов согласно рис. 1, а.

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; Φ – 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 $i = 30^\circ$ и высотой $H = 8000 \text{ км}$. Дифференциальные спектры электронов $\varphi(E)$ при максимуме и минимуме солнечной активности (С. а.) 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. 2. 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 кобальта имеет наименьшую по сравнению с остальными стенками массовую толщину, равную $0,59 \text{ г/см}^2$, и ей соответствует длина экстраполированного пробега электронов с $E = 1 \text{ МэВ}$ в Fe [11]. Боковые стенки двух других корпусов имеют массовую толщину $1,0 \text{ г/см}^2$. В то же время длина экстраполированного пробега электронов с $E = 1,5 \text{ МэВ}$ в Fe составляет $0,96 \text{ г/см}^2$. При этом для электронов с $E = 2,0 \text{ МэВ}$ длина экстраполированного пробега в Fe равна $1,31 \text{ г/см}^2$, а в W – $1,55 \text{ г/см}^2$ [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. 2). 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 ($1,67 \text{ г/см}^2$) 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

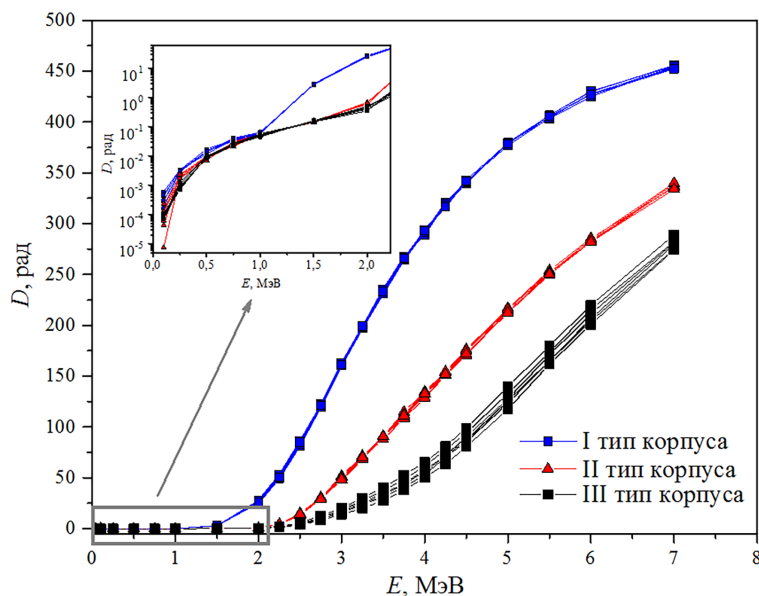


Рис. 2. Зависимости $D_0(E)$ для кристаллов кремниевых транзисторов в корпусах трех типов при облучении электронами флюенсом $\Phi = 4,1 \cdot 10^6 \text{ см}^{-2}$

Fig. 2. $D_0(E)$ dependencies for crystals of silicon transistors in three types of package under electron irradiation with fluence $\Phi = 4,1 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-2}$

попасть в кристаллы активных элементов (см. рис. 1, *d*). Несложно оценить, что суммарная массовая толщина указанных элементов корпуса возрастает до 2,7–3,5 г/см². 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. 2) 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 (таблица).

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

Total absorbed doses in the crystals of silicon transistors located in all types of packages for trapped electrons on circular orbit of 8000 km with an inclination of 30° at solar minimum and solar maximum activity

| 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 |

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

$$K_e = D_I / D_{sh}, \quad (2)$$

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

В заключение следует отметить тот факт, что значения D кристаллов транзисторов в корпусе типа III явно зависят от их положения на коммутационной плате (см. таблицу). 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 расхождений кривых $D_0(E)$ (см. рис. 2). Если расположить транзисторы по мере удаленности от двух ближайших боковых стенок (см. рис. 1, а): 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). 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). 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.

Заключение. 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 $i = 30^\circ$ и высотой $H = 8000$ км. Показано, что увеличение массовой толщины основания и крышки корпусов экранами до значения $1,67$ г/см² 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.

Список использованных источников

1. Новые материалы локальной радиационной защиты / Г. Ефремов [и др.] // Физика и химия обработки материалов. – 2003. – № 1. – С. 34–37
2. Заболотный, В. Т. Оптимальные составы для локальной защиты бортовой электроники от космической радиации / В. Т. Заболотный, Е. Е. Старостин, А. В. Кочетков // Физика и химия обработки материалов. – 2008. – № 5. – С. 15–18.
3. Специализированные радиационно-защитные корпуса для изделий микроэлектроники / Н. А. Василенков [и др.] // Технологии в электронной промышленности. – 2015. – № 4. – С. 85–88.

4. Effectiveness of IC shielded packages against space radiation / J. P. Spratt [et al.] // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 1997. – Vol. 44, № 6. – P. 2018–2025. <https://doi.org/10.1109/23.658984>
5. Shielding considerations for satellite microelectronics / W. S. Fan [et al.] // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 1996. – Vol. 43, № 6. – P. 2790–2796. <https://doi.org/10.1109/23.556868>
6. Экраны локальной радиационной защиты изделий микроэлектронной техники / Ю. В. Богатырев [и др.] // Вопр. атом. науки и техники. Сер. Физика радиац. воздействия на радиоэлектрон. аппаратуру. – 2014. – Вып. 4. – С. 53–56.
7. Белоусов, Е. Л. Конструирование блоков бортовой авиационной аппаратуры связи / Е. Л. Белоусов, М. Н. Ушкар. – Н. Новгород: НГТУ, 2005. – 237 с.
8. Чумаков, А. И. Действие космической радиации на интегральные схемы / А. И. Чумаков. – 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 / В. Ф. Баранов. – М.: Атомиздат, 1974. – 232 с.

References

1. Efremov G. A., Yepifanovskii I. S., Shiryayev A. V., Zabolotnyi V. T., Mileev V. N., Novikov L. S. New materials of local radiation protection. *Fizika i khimiya obrabotki materialov = Physics and Chemistry of Materials Treatment*, 2003, no. 1, pp. 34–37 (in Russian).
2. Zabolotnyi V. T., Starostin E. E., Kochetkov A. V. Optimal compositions for local protection of on-board electronics from space radiation. *Fizika i khimiya obrabotki materialov = Physics and Chemistry of Materials Treatment*, 2008, no. 5, pp. 15–18 (in Russian).
3. Vasilenkov N. A., Grabchikov S. S., Maksimov A. Y., Lastovski S. B. Specialized radiation-protective packages for microelectronics products. *Tekhnologii v elektronnoy promyshlennosti = Technologies in Electronic Industry*, 2015, no. 4, pp. 50–56 (in Russian).
4. Spratt J. P., Passenheim B. C., Leadon R. E., Clark S., Strobel D. J. Effectiveness of IC shielded packages against space radiation. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1997, vol. 44, no. 6, pp. 2018–2025. <https://doi.org/10.1109/23.658984>
5. Fan W. C., Drumm C. R., Roeske S. B., Scrivner G. J. Shielding Considerations for Satellite Microelectronics. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1996, vol. 43, no. 6, pp. 2790–2796. <https://doi.org/10.1109/23.556868>
6. Bogatyrev Y. V., Vasilenkov N. A., Grabchikov S. S., Lastovski S. B., Yakushevich H. S., Pankratov P. V. Shields for local radiation protection of microelectronics. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Ser. Fizika radiatsionnogo vozdeystviya na radioelektronnyy apparaturu = Problems of atomic science and technology. Series: Physics of radiation effects on electronic equipment*, 2014, vol. 4, pp. 53–56 (in Russian).
7. Belousov E. L., Ushkar M. N. *Design of Aircraft Communication Equipment Blocks*. Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod State Technical University, 2005. 237 p. (in Russian).
8. Chumakov A. I. *The Effect of Cosmic Radiation on Integrated Circuits*. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 2004. 320 p. (in Russian).
9. Geant4. *Geant4 Collaboration*. Available at: <http://geant4.web.cern.ch> (accessed 20 September 2019).
10. OMERE 5.3. *TRAD Tests & Radiations*. Available at: <https://www.trad.fr/en/space/omere-software/> (accessed 15 November 2019).
11. Baranov V. F. *Dosimetry of Electron Radiation*. Moscow, Atomizdat Publ., 1974. 232 p. (in Russian).

Информация об авторах

Якушевич Анна Сергеевна – младший научный сотрудник, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровки, 19, 220072, г. Минск, Республика Беларусь), E-mail: yakushevich@ifftp.bas-net.by

Богатырев Юрий Владимирович – доктор технических наук, главный научный сотрудник, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровки, 19, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: bogat@physics.by

Василенков Николай Алексеевич – технический директор, АО «ТЕСТПРИБОР» (ул. Планерная, 7а, 125480, г. Москва, Российская Федерация). E-mail: tp@test-expert.ru

Грбчикова Сергей Степанович – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник,

Information about the authors

Hanna S. Yakushevich – Junior Researcher, Scientific and Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: yakushevich@ifftp.bas-net.by

Yurii V. Bogatyrev – Dr. Sc. (Engineering), Chief Researcher, Scientific and Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: bogat@physics.by

Nikolaj A. Vasilenkov – Technical Director, JSC «TESTPRIBOR» (7a, Planernaya Str., 125480, Moscow, Russia). E-mail: tp@test-expert.ru

Sergey S. Grabchikov – Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Chief Researcher, Scientific and Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences

Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровки, 19, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: gss@ifftp.bas-net.by

Ластовский Станислав Брониславович – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровки, 19, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: lastov@ifftp.bas-net.by

Максимов Алексей Ювиславович – начальник конструкторского бюро, АО «ТЕСТПРИБОР» (ул. Планерная, 7а, 125480, г. Москва, Российская Федерация). E-mail: tp@test-expert.ru

of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: gss@ifftp.bas-net.by

Stanislav B. Lastovskii – Ph. D. (Physics and Mathematics), Head of the laboratory, Scientific and Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lastov@ifftp.bas-net.by

Aleksej Y. Maksimov – Chief of the Engineering Department, JSC «ТЕСТПРИБОР» (7а, Planernaya Str., 125480, Moscow, Russian Federation). E-mail: tp@test-expert.ru