

Ослабление потоков электронов радиационных поясов Земли защитными экранами на основе композита W-Cu

А.С. Якушевич, Ю.В. Богатырев, С.С. Грабчиков,
С.Б. Ластовский, Н.А. Василенков, А.Е. Козюков, Г.А. Протопопов

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 атомным номером и высокой плотностью (вольфрама, тантала, композита W-Cu и др.), а затем интегрируют в металлокерамические корпуса электронных компонентов с недостаточным уровнем радиационной стойкости. Методом Монте-Карло рассмотрены способы снижения уровня поглощённой кристаллами активных элементов дозы 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.

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]. Данный метод достаточно просто реализуется 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 атомным номером и высокой плотностью (вольфрама, тантала, композита 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 разъёмы в боковых стенках. Помимо бескорпусных микросборок в корпус блока могут монтироваться пассивные электронные компоненты, которые, например, нельзя изготовить в плёночном исполнении. Если это каркасные катушки индуктивности, то высота боковых стенок такого корпуса составляет 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 расчётными методами возможные способы снижения уровня поглощённой кристаллами активных элементов дозы с помощью экранов радиационной защиты на основе композита W-Cu в гибридных металлических корпусах радиоэлектронной аппаратуры при воздействии электронов радиационных поясов Земли.

Методика расчёта

Определение поглощённых 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) ком-

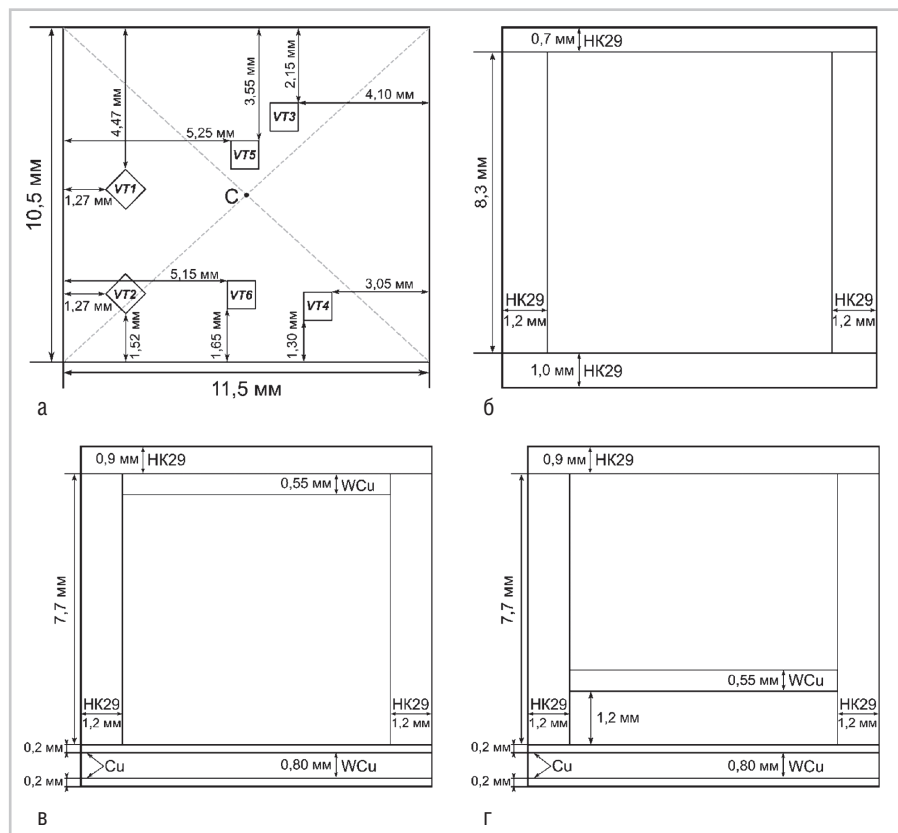
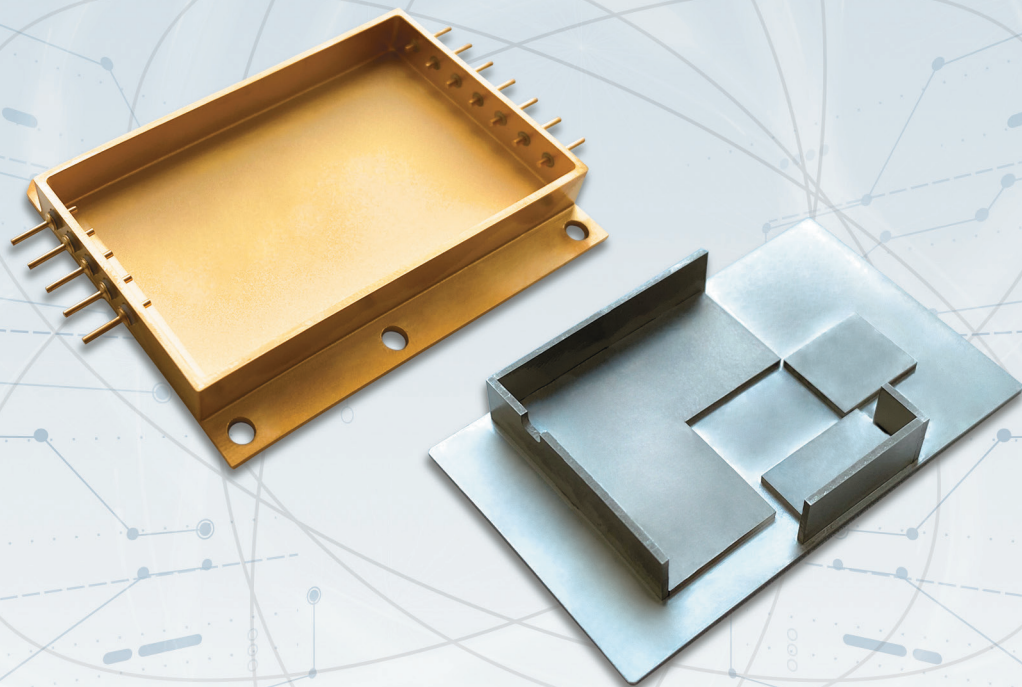


Рис. 1. Расположение кристаллов кремния на коммутационной плате (а) и вертикальные сечения корпусов типа I (б), II (в) и III (г)



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

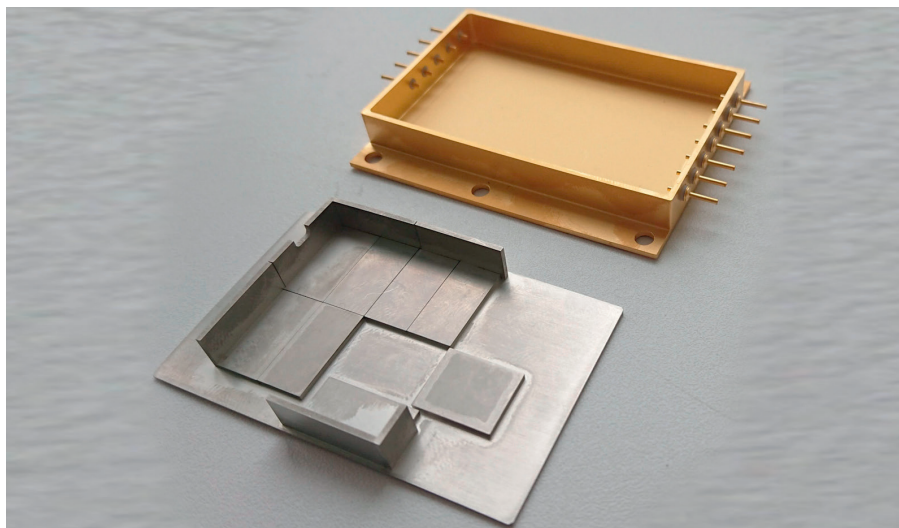


Рис. 2. Фотография корпуса и крышки с установленными радиационными экранами

мутационной платы (см. рис. 1а). Размер каждого кристалла составляет $0,90 \times 0,90 \times 0,24$ мм³. Размер платы и положение каждого кристалла на ней указаны на рисунке. Отметим, что тип активных элементов и размеры их кристаллов выбраны произвольно и для определения значения D не играют существенной роли. Из расчётной модели исключены пассивные компоненты (резисторы, конденсаторы, кардасные катушки индуктивности и т. д.), способные создать некоторую теневую 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 (см. рис. 2). Внутренние размеры нижнего и верхнего оснований корпуса соответствуют размерам платы. Исследовались три типа корпусов: без экранов радиационной защиты – тип I (см. рис. 1б), с экранами – тип II (см. рис. 1в) и с экранами оптимизированной конструкции – тип III (см. рис. 1г). Внешние размеры всех корпусов практически совпадают и показаны на рисунках 1б–г. 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 (ковара) толщиной 1,2 мм.

Верхнее и нижнее основания корпуса типа I также выполнены из ковара, их толщина которых показана на рисунке 1б. У корпусов типов II и III усиление защиты проведено только для крыш-

ки и основания, что проще реализовать технически в процессе изготовления серийных гибридных корпусов. Основание обоих корпусов с радиационными экранами (см. рис. 1в, г) имеет толщину 1,2 мм и состоит из слоя композита W-Cu толщиной 0,8 мм между двумя слоями меди толщиной 0,2 мм для улучшения теплоотводящих свойств.

Плотность 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 дополнительным слоем композита W-Cu толщиной 0,55 мм до суммарной массовой толщины, равной 1,67 г/см². 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, т. е. приближён 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 оно будет зависеть от толщины и типа печатной платы, а также размеров элементов навесного монтажа. Положение экрана будет отличаться, например для одно- и двухсторонних, а также многослойных печатных плат. В настоящее время существует большое число конструктивно-технологических разновидностей печатных плат, и невозможно рассмотреть их все в рамках данной

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 расчётной модели, т. е. кристаллы транзисторов расположены на основаниях корпусов всех трёх типов согласно рисунку 1а.

Суммарная поглощённая доза D рассчитывалась по формуле [8]:

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

где $\varphi(E)$ – дифференциальный спектр электронов; $D_0(E)$ – поглощённая доза в зависимости от энергии E электронов; Φ – флюенс электронов. Величина поглощённой дозы от электронного излучения на единичный флюенс $\frac{D_0(E)}{\Phi}$ в формуле (1) фактически определяет уровень поглощённой 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 поглощённая доза D_0 в каждом кристалле кремния для всех типов корпусов. Корпуса размещались в изотропном поле электронного излучения с флюенсом $\Phi = 4,1 \cdot 10^6$ см⁻². При этом учитывался вклад от вторичных электронов и тормозного излучения. Далее в соответствие с формулой (1) методом численного интегрирования были получены значения суммарных поглощённых доз D в кристаллах кремния за 1 сутки. В настоящей работе расчёты проводились для круговой орбиты с углом наклона $i=30^\circ$ высотой $H=8000$ км. Дифференциальные спектры электронов $\varphi(E)$ при максимуме и минимуме солнечной активности (СА) 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 трёх типов представлены на рисунке 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 зависи-

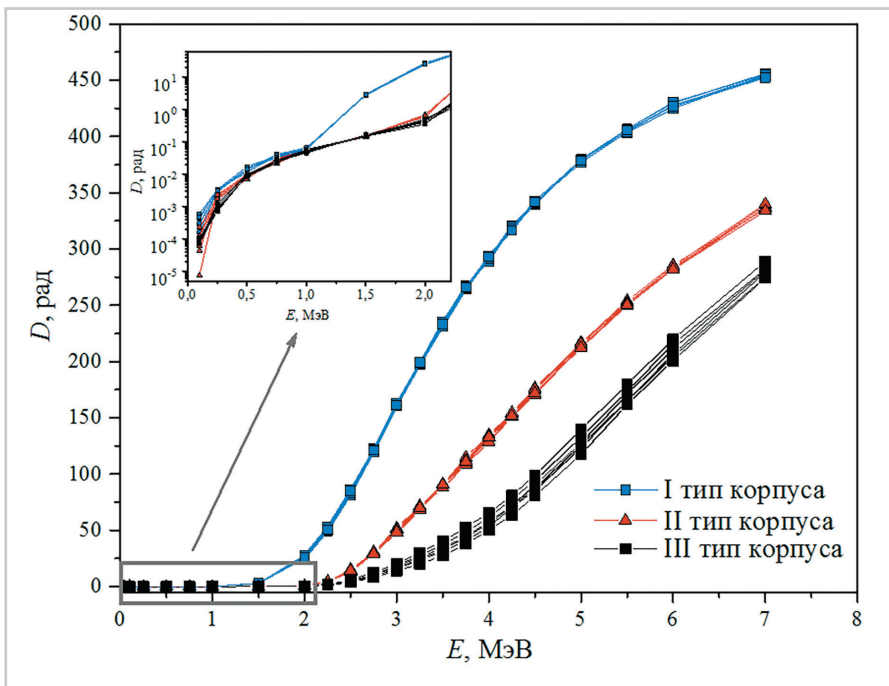


Рис. 3. Зависимости $D_0(E)$ для кристаллов кремниевых транзисторов в корпусах трёх типов при облучении электронами флюенсом $\Phi=4,1 \cdot 10^6 \text{ см}^{-2}$

мости $D_0(E)$ имеют одинаковый вид, а именно: с ростом энергии электронов значение поглощённой дозы растёт нелинейно. При этом до определённой 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 сомнений 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 железе [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 железе составляет $0,96 \text{ г/см}^2$. При этом для электронов с $E = 2,0 \text{ МэВ}$ длина экстраполированного пробега в железе равна $1,31 \text{ г/см}^2$, а в вольфраме – $1,55 \text{ г/см}^2$ [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 кристаллов 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 большим значением суммарной массовой толщины ($1,67 \text{ г/см}^2$) 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 попасть в кристаллы активных элементов (см. рис. 1г). Несложно оценить, что суммарная массовая толщина указанных элементов корпуса возрастает до $2,7...3,5 \text{ г/см}^2$. При этом суммарная массовая толщина остальных элементов (крышки, основания и частей боковых стенок, лежащих ниже слоя композита W-Cu) остаётся такой 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 поглощённых доз D в кристаллах кремниевых транзисторов (см. табл. 1).

Эффективность радиационной защиты электронных компонентов корпуса от воздействия электронов K_c можно оценить из отношения

$$K_c = D_1/D_{sb}, \quad (2)$$

где D_1 – накопленная доза кристаллами кремния в корпусе без радиационного экрана (типа I), а D_{sb} – 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 её максимуме. Соответственно, эффективность экранирования корпусом типа III составляет $6,8...9,3$ при минимуме и $7,6...10,7$ – при максимуме СА.

В заключение следует отметить тот факт, что значения D кристаллов транзисторов в корпусе типа III явно зависят от их положения на коммутационной плате (см. табл. 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 расхождений кривых $D_0(E)$ (см. рис. 3). Если расположить транзисторы по мере удалённости 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. табл. 1). Указанная закономерность позволяет дать следующее объяснение полученным результатам. Выше уже отмечалось, что у корпусов типов II и III массовая толщина 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 расчётах для корпуса типа III (см. табл. 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.

Заключение

Таким образом, с помощью программного комплекса Geant4 рассмотрены способы снижения уровня поглощённой дозы D кристаллами активных элементов с использованием экранов радиационной защиты на основе композита W-Cu в гибридных металлических корпусах блоков радиоэлектронных средств четвёртого

Таблица 1. Суммарные поглощённые 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

Положение на плате	D, рад/сут					
	минимум солнечной активности			максимум солнечной активности		
	тип корпуса I	тип корпуса II	тип корпуса III	тип корпуса I	тип корпуса II	тип корпуса III
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

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/см² позволяет снизить дозовую нагрузку в $3,5...3,7$ раза при минимуме и в $3,9...4,1$ раза – при максимуме солнечной активности. Оптимизация защиты путём 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.
3. Василенков Н. А. и др. Специализированные радиационно-защитные корпуса для изделий микроэлектроники. Технологии

- в электронной промышленности. 2015. № 4. С. 85–88.
4. Spratt J. P. Effectiveness of IC shielded packages against space radiation. IEEE Trans. Nucl. Sci. 1997. Vol. 44. № 6. URL: <https://doi.org/10.1109/23.658984>. P. 2018–2025.
5. Fan W. S. Shielding considerations for satellite microelectronics. IEEE Trans. Nucl. Sci. 1996. P. 2790–2796. URL: <https://doi.org/10.1109/23.556868>. № 6. Vol. 43.
6. Богатырёв Ю. В. и др. Экраны локальной радиационной защиты изделий микроэлектронной техники. Вопросы атомной науки и техники. 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. С. 237.
8. Чумаков А. И. Действие космической радиации на интегральные схемы. М. Радио и связь. 2004. С. 320.
9. Geant4 Collaboration. URL: <http://geant4.web.cern.ch>.
10. OMERE 5.3. TRAD Tests & Radiations. URL: <https://www.trad.fr/en/space/omere-software>.
11. Баранов В. Ф. Дозиметрия электронного излучения. М. Атомиздат. 1974. С. 232. ©

НОВОСТИ МИРА

Крошечный полноцветный лазерный модуль для AR-очков

TDK разработала полноцветный лазерный модуль размером $6,7 \times 5,5$ мм и высотой $2,7$ мм и весом всего $0,35$ г для AR-очков дополненной реальности. Рынок очков дополненной реальности (AR) с использованием лазерных диодов, по прогнозам, вырастет почти в 100 раз в течение следующих десяти лет, и TDK стремится выйти на этот рынок. Полноцветный лазерный модуль использу-

ет плоскую световодную схему (PLC) от NTT для объединения всех цветов в один оптический путь. PLC и три лазерных чипа используются в новой конструкции узла меньшего размера – всего одной десятой размера обычного модуля. Чтобы продемонстрировать работу полноцветного лазерного модуля его установили в очки RETISSA Display 2, которые представляют собой изделие от QD Laser. В дополнение к AR и VR-очкам модуль применим и в других приложениях.

Например, в проекционных дисплеях для легковых автомобилей. Полноцветный лазерный модуль чрезвычайно лёгок и весит всего $0,35$ г. Три лазерных диода имеют длины волны соответственно 636 нм (красный), 520 нм (зелёный) и 455 нм (синий), с выходной мощностью каждого цвета менее 5 мВт. Модуль оснащён фотоприёмником и термистором для контроля внутренней температуры блока и предотвращения перегрева.

www.tdk.com

НОВОСТИ МИРА

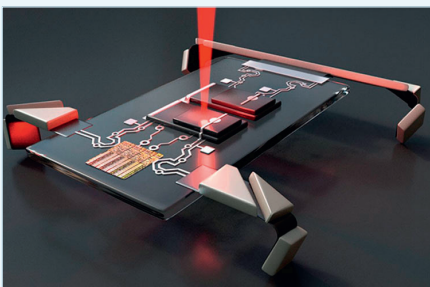
Топ-5 микроботов, которые изменят будущее робототехники

Революция через роботизацию идёт полным ходом. В области микробототехники происходит перекрёстное слияние микротехнологий и робототехники. Уже разрабатываются микроботы, которые смогут ходить, летать, плавать, лазать, ползать и выполнять различные задачи, например доставку лекарств в наши тела, выявление раковых и уничтожение опухолей. Учёные и инженеры придумали микроботы размером менее 1 мм. Благодаря последним достижениям в области электроники, механики, нанотехнологий и вычислительной техники сейчас разрабатываются модели, которые нельзя будет увидеть невооружённым глазом.

Некоторые из разработок становятся невероятно полезными инструментами, в то время как другие – лишь творческие идеи для дальнейших инноваций в области микробототехники. Перед вами топ-5 невероятно креативных и продвинутых микроботов, разработанных в 2020 году.

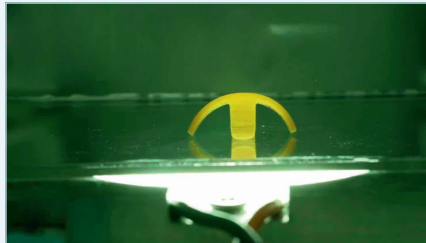
Робот, активируемый лазерным лучом

Исследователи из Корнелла и Пенсильванского университета построили роботов, состоящих из простой схемы, сделанной из кремниевых фотоэлектрических элементов, и четырёх электрохимических приводов, приводящих в движение ноги. Эти микроботы имеют толщину около 5, ширину 40 и длину от 40 до 70 микрон. Управляются они лазерными импульсами, подаваемыми на разные фотоэлементы, что позволяет активировать отдельные ноги.

**Акваробот**

Исследователи Северо-Западного университета разработали мягкого робота, который может ходить с человеческой скоростью, перемещать груз, преодолевать препятствия. Напоминающий четвероного осьминога, этот микробот функционирует внутри заполненного водой резервуара

и идеально подходит для использования в водной среде. Аква-робот сантиметрового размера имитирует поведение морских обитателей и движется со скоростью один шаг в секунду. Для движения он не требует сложного оборудования, гидравлики или электричества, вместо этого робот активируется светом и движется в направлении внешнего вращающегося магнитного поля. Заполненная водой структура этого бота и встроенный скелет из никелевых нитей являются ферромагнитными, что обеспечивает точное движение и маневренность.

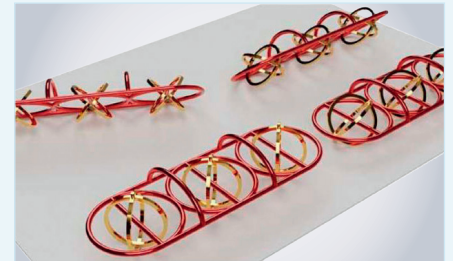
**Робожук**

Это 88-миллиграммовый автономный ползающий робот размером с насекомое (его длина 15 мм), работающий от энергии каталитического сжигания метанола. Исследователи из Университета Южной Калифорнии снабдили его искусственной мышечной системой на основе жидкого топлива (метанола), которая накапливает примерно в 10 раз больше энергии, чем батарея той же массы, позволяющей роботу ползать, карабкаться и переносить грузы на спине в течение двух часов. Жук имеет четыре ноги. Задние ноги неподвижны, а передние прикреплены к трансмиссии, соединённой с листовой пружиной, деформирующейся при нагреве. Тело робота представляет собой топливный бак, заполненный метанолом, и конструкция такова, что робот может стоять прямо. Механическая конструкция системы может модулировать поток топлива.

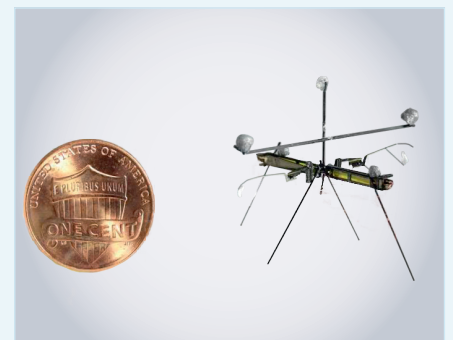
**Совсем крошечные роботы**

Исследователи из ETH Zurich разработали микроботы, печатаемые на 3D-принтере с помощью технологии, которая использует

сложное переплетение нескольких материалов. Два материала: металл и пластик-полимер переплетены как звенья цепи. Роботы способны доставлять полезные лекарства через кровеносные сосуды в человеческом теле. Эти микроботы настолько малы, что могут маневрировать по кровеносным сосудам и доставлять лекарства в определённые точки тела.

**Робомуха**

Исследователи из Вашингтонского университета создали этот 74-миллиметровый микробот с крыльями, который может перемещаться в воздухе, на земле и на водной поверхности. Этот новый робот был построен с использованием меньшего количества компонентов по сравнению с другими разработанными роботами, размером с насекомое. Это помогло упростить процесс изготовления. RoboFly использует два машущих крыла, приводимых в движение пьезоэлектрическими приводами. Используя хлопающие крылья, он может двигаться и по земле. Поскольку робот лёгкий, небольшая модификация позволит ему приземляться на поверхность воды. После приземления на воду робот может двигаться, используя тот же принцип, который задействуется для перемещения по земле.



Разве эти крошечные роботы не поражают воображение? Этот список, разумеется, неполон, так как число инноваций огромно и могли быть пропущены некоторые из них. Тем не менее краткий обзор даст вам довольно хорошее представление об уровне и направлениях исследований в области микробототехники.

circuitdigest.com