

ISSN 1561-8358 (Print)  
ISSN 2524-244X (Online)

## **МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, МЕТАЛЛУРГИЯ**

*MATERIALS ENGINEERING, METALLURGY*

УДК 517.958;537.9;537.868.4;538.975

Поступила в редакцию 20.10.2017  
Received 20.10.2017

**С. С. Грабчиков**

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

### **МАТЕРИАЛЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ И РАДИАЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОНИКИ**

**Аннотация.** Электромагнитные (ЭМИ) и ионизирующие (ИИ) излучения являются одними из основных дестабилизирующих факторов, воздействующих на функциональное оборудование ракетно-космических, авиационных и наземных комплексов. В связи с этим направление физического материаловедения, связанное с созданием новых материалов и технологий для высокоэффективной электромагнитной и радиационной защиты, является актуальным. В Научно-практическом центре Национальной академии наук Беларуси по материаловедению разработаны новые материалы и технологические процессы формирования электромагнитной и радиационной защиты на корпусах приборов и элементов широкого спектра назначения.

Наиболее сложными вариантами для защиты от ЭМИ являются постоянное магнитное поле и мощный электромагнитный импульс. Перспективные материалы для решения данной проблемы – многослойные пленочные структуры симметричного и градиентного типов. В связи с этим рассмотрены экспериментальные результаты по исследованию эффективности электромагнитных экранов на основе структур системы (Fe–Co–Ni)/Cu в постоянном магнитном поле, низкочастотном и импульсном ЭМИ. Показано, что при выборе материалов для магнитоэлектронных экранов следует учитывать как основные магнитные характеристики, так и роль неоднородности магнитного поля в объеме экрана и нелинейность магнитной проницаемости. Сделан вывод о высокой эффективности ослабления градиентными структурами импульсных магнитных полей микросекундной длительности, составляющих 58÷40 дБ при значениях напряженностей магнитных полей 1,25÷12,0 кА/м соответственно.

Для защиты электронных компонентов и интегральных микросхем от воздействия ИИ предложен композиционный материал на основе системы вольфрам–медь. Показано, что радиационные экраны, изготовленные на его основе, эффективно защищают от электронного и протонного излучений с энергиями до 2 МэВ и до 500 МэВ соответственно. Приведены результаты практического применения разработанных материалов и технологий.

**Ключевые слова:** электромагнитные и ионизирующие излучения, электромагнитная и радиационная защита, магнитные и композиционные материалы, электронные компоненты

**Для цитирования:** Грабчиков, С. С. Материалы электромагнитной и радиационной защиты для изделий электроники / С. С. Грабчиков // Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2018. – Т. 63, № 1. – С. 7–14.

**S.S. Grabchikov**

*Scientific and Practical Materials Research Centre of the National Academy of Belarus, Minsk, Belarus*

### **MATERIALS OF ELECTROMAGNETIC AND RADIATION PROTECTION FOR ELECTRONIC PRODUCTS**

**Abstract.** Electromagnetic (EMR) and ionizing (IR) radiation are one of the main destabilizing factors which affect functional equipment of space-rocket, aviation and ground-based complexes. Therefore, the direction of physical materials science, associated with the development of new materials and technologies for high-efficiency electromagnetic and radiation protection is of current interest. In the Scientific and Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus new materials and technological processes for the formation of electromagnetic and radiation protection of the devices packages and elements of a wide range of purposes have been developed.

A constant magnetic field and a powerful electromagnetic pulse are the most difficult variants for protection against EMR. Symmetric and gradient multilayer film structures are the promising materials for solving this problem. Thus, experimental results on the investigation of the efficiency of electromagnetic shields based on the structures of the system (Fe–Co–Ni)/Cu in a constant magnetic field, low-frequency and pulsed EMR are considered. It is shown that while choosing materials for magnetostatic shields, the main magnetic characteristics and the role of the inhomogeneity of the magnetic field in the shield volume and the nonlinearity of the magnetic permeability should be considered. It is concluded about the high efficiency of attenuation of microsecond duration pulsed magnetic fields by the gradient structures, which are 58–40 dB at the magnetic field strengths of 1.25–12.0 kA/m, respectively.

A composite material based on the tungsten-copper system is proposed for electronic components and integrated circuits protection from the effects of IR. It is demonstrated that radiation shields based on it provide the effective protection against electron- and proton radiation with energies up to 2 MeV and up to 500 MeV, respectively. The practical application results of developed materials and technologies are given.

**Keywords:** electromagnetic and ionizing irradiation, electromagnetic and radiation protection, magnetic and composite materials, electronic components

**For citation.** Grabchikov S.S. Materials of electromagnetic and radiation protection for electronic products. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2018, vol. 63, no. 1, pp. 7–14 (in Russian).

**Введение.** Электромагнитные (ЭМИ) и ионизирующие (ИИ) излучения являются одними из основных дестабилизирующих факторов, воздействующих на элементы, блоки и аппаратуру ракетно-космических, авиационных и наземных комплексов в изделиях двойного и специального назначения. Эти излучения представляют серьезную угрозу для надежной и стабильной работы оборудования в течение всего срока активного существования (САС) [1].

Источниками ЭМИ могут являться как естественные (солнечное космическое и галактическое космическое излучения, магнитосфера Земли, атмосферные явления), так и искусственные (радиопередающая и электронная аппаратура, нештатные ситуации в системах энергообеспечения) объекты. При этом, с одной стороны, в результате бурного развития электротехнической, радиоэлектронной, информационной и военной техники в последние годы значительно повысился уровень электромагнитного фона, расширился диапазон используемых частот ЭМИ, возросла их амплитуда. С другой стороны, совершенствование бортовой радиоэлектронной и информационной техники, исследовательских и интеллектуальных комплексов происходит в направлении минимизации массы и габаритов, увеличения плотности компоновки. Все это значительно осложняет проблему формирования электромагнитной обстановки, обеспечивающей нормальное функционирование и электромагнитную совместимость (ЭМС) бортовых комплексов и аппаратуры.

Еще одна, не менее важная проблема связана с обеспечением эксплуатационной надежности изделий двойного и специального назначения в условиях повышенного уровня радиационных воздействий. Потоки заряженных частиц космического пространства (КП) (электроны, протоны, тяжелые заряженные частицы и т. д.), а также излучения, возникающие при работе атомных реакторов, ускорителей заряженных частиц и др., являются одной из основных причин нарушения работоспособности технических систем [2]. Существует несколько путей повышения радиационной стойкости [3]: применение специализированных технологических процессов и материалов на этапе изготовления бортовой аппаратуры и интегральных микросхем (ИМС), конструкционная защита из материалов на основе алюминия, метод мажоритирования и др. Во многих случаях данные методы защиты недостаточны и радиационные воздействия все еще высоки, поэтому для наиболее уязвимых элементов ракетно-космической аппаратуры следует использовать дополнительную радиационную защиту.

В связи с этим ясна актуальность направления, связанного с разработкой новых материалов и технологий для эффективной электромагнитной и радиационной защиты. При этом временные, финансовые и материальные затраты на выполнение данных работ несопоставимы с издержками и потерями, возникающими при эксплуатации ракетно-космических, авиационных и наземных комплексов.

**Электромагнитная защита.** Основным и наиболее эффективным способом защиты от ЭМИ является экранирование. Традиционные методы экранирования с помощью массивных листовых и ленточных материалов на основе железа и его сплавов во многих случаях позволяют ре-

шить проблему электромагнитной защиты, однако это дорогостоящий, технологически сложный и материалоемкий путь. Один из наиболее перспективных способов экранирования – это применение многослойных экранов. В этих экранах, состоящих из металлов с различными волновыми сопротивлениями, за счет многократного отражения электромагнитной волны между слоями эффективность экранирования возрастает [4].

В Научно-практическом центре НАН Беларуси по материаловедению разработан новый способ формирования многослойных пленочных экранов (МПЭ) симметричного и градиентного типов, содержащих чередующиеся слои на основе сплавов Ni–Fe с высокой магнитной проницаемостью ( $\mu$ ) или с высокой индукцией насыщения ( $B_s$ ), слои меди с высокой электропроводностью ( $\sigma$ ) (Патент Республики Беларусь № 11843 от 28.01.2009 «Многослойный электромагнитный экран»; Патент на изобретение РФ № 2474890 от 10.02.2013 г. «Многослойный электромагнитный экран для защиты фотоэлектронных умножителей и способ его нанесения»). Он позволяет в едином технологическом цикле наносить МПЭ на различные корпуса и изделия сложной геометрической формы, варьировать в широких диапазонах толщину и количество отдельных слоев. Экспериментальные образцы магнитных экранов системы (Ni–Fe)/Cu характеризовались следующими параметрами: толщина ( $d_{\text{NiFe}}$ ) и количество ( $N_{\text{NiFe}}$ ) магнитных слоев, толщина ( $d_{\text{Cu}}$ ) и количество ( $N_{\text{Cu}}$ ) медных слоев, суммарная толщина магнитных слоев ( $\sum d_{\text{NiFe}}$ ) и суммарная толщина МПЭ ( $\sum d$ ).

Оценка эффективности экранирования ( $\mathcal{E}$ ) проводилась по формуле

$$\mathcal{E} = H_{\text{внешн.}}/H_{\text{внутр.}}, \quad (1)$$

а оценка эффективности экранирования ( $A$ , дБ) – по формуле

$$A = 20 \lg(H_{\text{внешн.}}/H_{\text{внутр.}}), \quad (2)$$

где  $H_{\text{внешн.}}$  – напряженность внешнего магнитного поля;  $H_{\text{внутр.}}$  – напряженность магнитного поля, прошедшего через экран.

**Защита от магнитостатических полей.** Наиболее сложным случаем защиты от воздействия внешних ЭМИ является случай экранирования статических магнитных полей [5]. Как правило, при рассмотрении магнитостатического экранирования исходят из принципа шунтирования магнитного поля ферромагнитным материалом [6]. Основная суть данного принципа заключается в замыкании силовых линий через материал с низким сопротивлением магнитному потоку, из чего следует, что эффективность экранирования прямо пропорциональна значениям магнитной проницаемости ( $\mu$ ) материала экрана и обратно пропорциональна площади его поперечного сечения. Однако ранее нами было показано [7], что ряд экспериментальных результатов по магнитостатическому экранированию не согласуется с положениями принципа шунтирования. Подобные результаты эксперимента связаны с нелинейным характером изменения магнитной проницаемости по толщине экрана. Данная нелинейность может быть представлена следующим образом: в то время как внешний магнитный слой экрана под действием  $H_{\text{внешн.}}$  находится в состоянии  $\mu(H_{\text{внешн.}})$ , внутренние слои по мере проникновения вглубь экрана находятся под действием более слабых магнитных полей со значениями  $H_{\text{внешн.}} < H_1 < H_2 < H_3 < H_4 < \dots < H_{\text{внутр.}}$ , где  $H_1, H_2, H_3, H_4$  – напряженности магнитного поля в экране при сканировании от внешней стороны к внутренней. Тогда внутренний слой экрана будет находиться в состоянии  $\mu(H_{\text{внутр.}})$ .

Другая важная особенность магнитостатического экранирования – отличие топологий магнитных полей для случая магнитопровода с витками тока (рис. 1, *a*) и случая цилиндрического экрана (рис. 1, *b*). В первом случае во всем объеме магнитопровода индуцируется однородное замкнутое магнитное поле и значение  $\mu$  можно считать постоянным. Во втором случае направление силовых линий магнитного поля носит незамкнутый характер, то есть значение  $\mu$  не является постоянными в объеме материала экрана. Поэтому использовать магнитные характеристики, определенные на замкнутых образцах, не всегда корректно для оценки параметров эффективности магнитостатического экранирования.

Для подтверждения роли этого отличия приведем экспериментальные результаты зависимостей  $\mathcal{E} = \mathcal{E}(H)$ , полученные при исследовании экранов из промышленной аморфной ленты 84КХСР и электролитического сплава Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub> (рис. 2) [7]. В области магнитных полей от 15 до

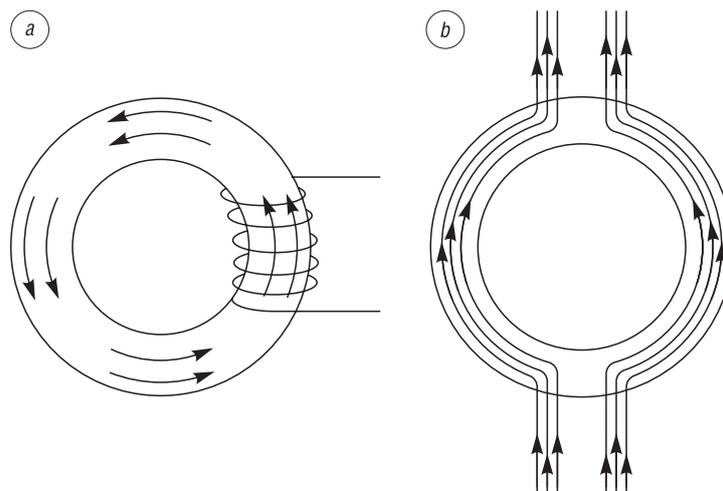


Рис. 1. Топологии магнитных полей для случаев магнитопровода с витками тока (а) и цилиндрического экрана (b)

Fig. 1. The topologies of magnetic fields for magnetic guide with current loops (a) and a cylindrical shield (b)

135 А/м эффективность экрана из ленты 84КХСР выше, чем экрана из сплава  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ . В интервале от 135 до 2700 А/м экраны на основе сплава  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  более предпочтительны, несмотря на то, что по значениям  $\mu$  они существенно уступают экранам на основе аморфной ленты 84КХСР. Из данного эксперимента следует, что области эффективного экранирования у разных материалов существенно различаются. При этом необходимо отметить, что в аморфных сплавах 84КХСР максимальная магнитная проницаемость достигается в области магнитных полей ниже, чем 1 А/м, однако их высокая эффективность экранирования реализуется в интервале магнитных полей от 15 до 135 А/м (рис. 2). Для экрана из электролитического сплава  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  максимальная магнитная проницаемость достигается в области магнитных полей 60–80 А/м, а максимальная эффективность экранирования – 800–2000 А/м. Исходя из приведенных результатов можно сделать следующий вывод, что при подборе материалов для магнитоэкранных устройств следует учитывать как основные магнитные характеристики, так и роль неоднородности магнитного поля в объеме материала экрана и связанную с этим нелинейность магнитной проницаемости.

Одним из примеров успешного применения технологии МПЭ является совместная с НИЯУ МИФИ (Москва, Россия) работа по защите научных приборов от воздействия постоянных

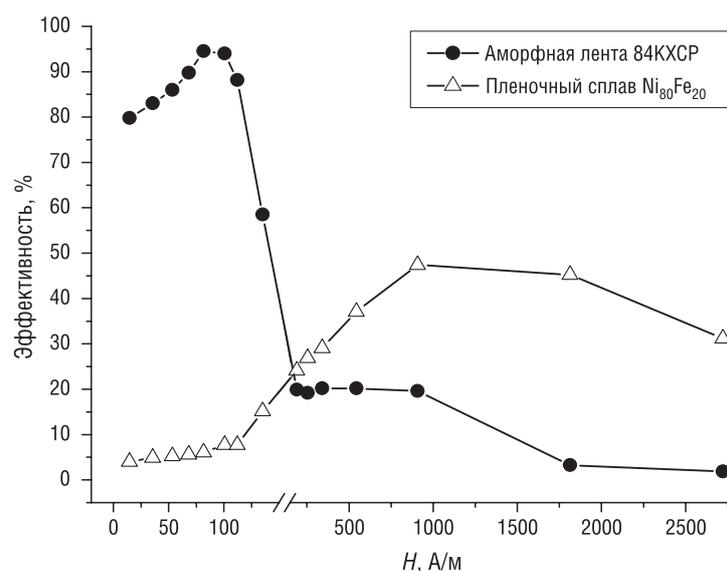


Рис. 2. Зависимости эффективности экранов на основе электроосажденного сплава  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  и аморфной ленты 84КХСР от напряженности магнитного поля

Fig. 2. Field dependences of the shields efficiency based on electrodeposited  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  alloy and amorphous 84KHSSR tape

магнитных и низкочастотных электромагнитных полей (программа Союзного государства «Нанотехнология-СГ»). Как известно [8], при работе в околоземном пространстве бортовая ракетно-космическая и авиационная аппаратура подвергается воздействию внешних постоянных магнитных и переменных электромагнитных полей. Так, максимальная индукция постоянного магнитного поля вдоль орбиты станции «МИР» достигает 0,06 мТл, а ее вариации – 0,04 мТл. Эти поля негативно влияют на работу фотоэлектронных умножителей (ФЭУ) и других приборов, принцип действия которых основан на регистрации движущихся заряженных частиц, что в свою очередь приводит к снижению значений коэффициента усиления и искажению полезного сигнала. Применение экранов на основе МПЭ позволило полностью устранить влияние слабых магнитных полей с индукцией до 0,5 мТл на работу ФЭУ и снизить их воздействие на амплитудное разрешение импульсов [9].

**Защита от переменных электромагнитных полей.** В случае экранирования переменных ЭМИ наряду с механизмом шунтирования магнитной составляющей начинает работать второй механизм, основанный на вытеснении переменного магнитного поля помех магнитным полем вихревых токов, так называемый поверхностный эффект (скин-эффект) [6]. Также необходимо учитывать вклад отражения электромагнитной волны на границах раздела двух сред. Роль этого эффекта особенно велика при использовании многослойных металлических экранов [4]. Таким образом, суммарный эффект определяется следующими механизмами – шунтированием, поверхностным эффектом и отражением.

Для эксперимента использовали три образца МПЭ с постоянными значениями  $\Sigma d_{\text{NiFe}} = 400$  мкм, содержащих 40 слоев  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  по 10 мкм, 10 слоев  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  по 40 мкм и два слоя  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  по 200 мкм. Толщина разделительных медных слоев  $d_{\text{Cu}} = 2$  мкм. Измерения эффективности экранирования показали, что с ростом частоты ЭМИ в области частот 50 Гц и выше отчетливо наблюдается эффект «многослойности», выраженный в резком увеличении значений  $\mathcal{E}$  для экранов с большим количеством  $N_{\text{NiFe}}$  и  $N_{\text{Cu}}$  слоев. Так, с ростом  $N_{\text{NiFe}}$  от 2 до 40 при  $\Sigma d_{\text{NiFe}} = 400$  мкм значения  $\mathcal{E}$  возрастают в 1,9; 3,2 и 17,7 раз для частот 50, 500 и 5000 Гц соответственно.

Примером успешного применения МПЭ для экранирования ЭМИ может служить работа, выполненная Научно-практическим центром НАН Беларуси по материаловедению совместно с Институтом космических исследований РАН (Москва, Россия) (программа Союзного государства «Космос-НТ»). Перед разработчиками стояла задача обеспечения ЭМС бортовых блоков космического аппарата (КА), содержащих линейный шаговый двигатель (ЛШД), блок электроники и оптическую систему. Проблема состояла в том, что основным прибором научного комплекса КА являлся высокоточный магнитометр, поэтому КА должен быть «магниточистым». Вместе с тем магнитометр размещен на расстоянии 0,7 м от приводов сканирующей системы и датчиков положения, содержащих ЛШД, которые в свою очередь индуцировали помехи. Прибор необходимо было экранировать. Однако согласовать требования по массогабаритным параметрам с технологией изготовления экранов из традиционных массивных материалов не представлялось возможным. По нашей технологии на стандартных корпусах бортовых приборов были сформированы МПЭ. Приемочные испытания показали, что в диапазоне частот от 100 Гц до 10 МГц при включении ЛШД уровень паразитных электромагнитных помех возрастал на 30÷50 дБ по сравнению с фоновым режимом, а использование МПЭ позволило без каких-либо конструкционных доработок полностью убрать наводки, генерируемые ЛШД, и тем самым обеспечить «магниточистые» условия эксплуатации.

**Защита от импульсных электромагнитных полей.** Еще одним очень сложным случаем защиты радиоэлектронной аппаратуры от ЭМИ является мощный электромагнитный импульс. Поражающее действие электромагнитного импульса обусловлено индуцированными токами в проводниках и полупроводниках, а также пробоем диэлектрических компонентов [10]. Согласно требованиям обеспечения электромагнитной стойкости и безопасной эксплуатации, электронная и радиоэлектронная аппаратура должна надежно работать в условиях действия внешних поражающих факторов (короткое замыкание линий электропередач, разряд молнии и др.). Эффективными средствами защиты от мощного ЭМИ могут являться МПЭ. Совместно с ОАО «Корпорация МИТ» (Москва, Россия) было изучено влияние типа и внутреннего строения МПЭ на эффективность экранирования импульсного излучения микросекундного диапазона

частот [11]. Измерения проводились на трех замкнутых цилиндрических образцах: медь с толщиной стенок 2 мм (№1); МПЭ симметричного типа (№2), содержащий 30 магнитных слоев сплава  $Ni_{80}Fe_{20}$  толщиной по 10 мкм и 30 слоев Cu толщиной по 2 мкм; а также образец МПЭ градиентного типа (№3), содержащий 15 магнитных слоев сплава  $Ni_{80}Fe_{20}$  и 15 магнитных слоев сплава  $Ni_{50}Fe_{50}$  толщиной по 10 мкм, 30 слоев Cu толщиной по 2 мкм.

Как видно из рис. 3, эффективность экранирования импульсных магнитных полей микросекундного диапазона в интервале напряженностей от 1,25 до 12,0 кА/м достигает  $58 \div 40$  дБ соответственно и зависит от внутреннего строения МПЭ. Экраны градиентного типа обладают более высокой (на  $8 \div 10$  дБ) эффективностью по сравнению с экранами симметричного типа. Эффект насыщения ферромагнитных слоев существенно сказывается на эффективности экранирования импульсных магнитных полей микросекундного диапазона. Насыщение ферромагнитных слоев МПЭ наблюдается в области 11 кА/м, что существенно превышает максимальные значения напряженности магнитного поля грозового происхождения  $H_{max} = 3$  кА/м. Эффективность защиты от импульсного воздействия конструкциями из меди (№1) невысока и составляет 30 дБ во всем исследованном интервале магнитных полей.

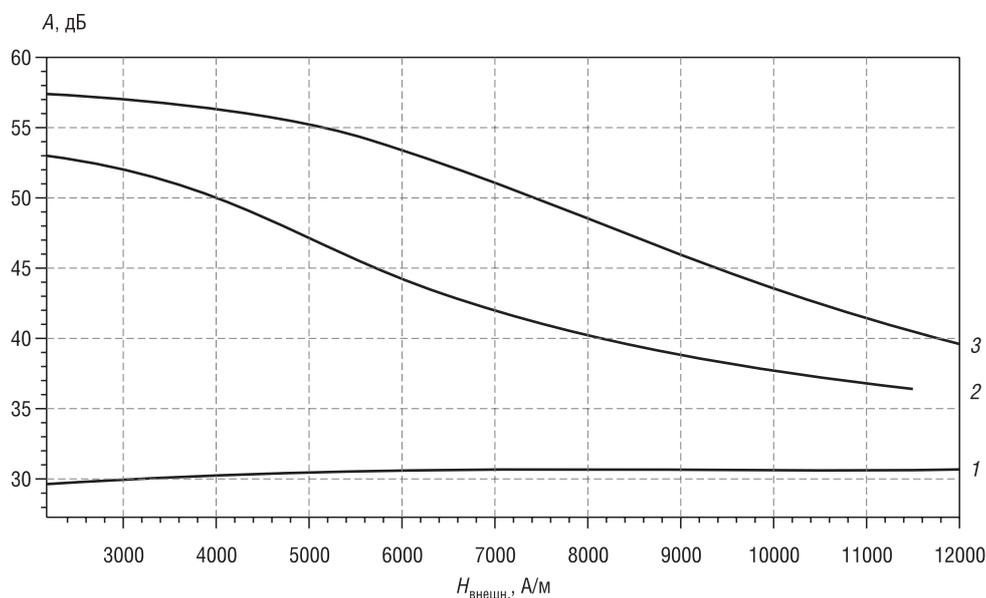


Рис. 3. Зависимости эффективности экранирования опытных образцов от напряженности импульсного электромагнитного поля: 1 – медный цилиндр без МПЭ, 2 – медный цилиндр с МПЭ симметричного типа, 3 – медный цилиндр с МПЭ градиентного типа

Fig. 3. Strength dependences of the pulsed electromagnetic fields shielding of prototypes: 1 – copper cylinder without shield, 2 – copper cylinder with shield of gradient type, 3 – copper cylinder with shield of symmetrical type

**Защита от ионизирующих излучений.** При использовании стандартных материалов конструкционной защиты КА уровни радиационных воздействий оказываются достаточно высокими. Необратимые изменения в полупроводниковых приборах и ИМС происходят при значениях поглощенных доз радиации  $D \geq 10^5 \div 10^6$  рад и  $D \geq 10^4 \div 10^5$  рад соответственно. Такие уровни радиационной стойкости элементной базы не обеспечивают требуемого САС КА даже при работе в условиях ряда околоземных орбит, не говоря уже о полетах на другие планеты Солнечной системы. Поэтому для наиболее критичных узлов и элементов аппаратуры необходимо использовать радиационную локальную защиту (РЛЗ).

Из общих представлений о взаимодействии ионизирующих излучений с веществом следует, что материал, эффективный для защиты электронных компонентов и ИМС от воздействия электронов и протонов КП, должен иметь композиционную структуру, а химический состав – содержать элементы с большим порядковым номером. Материалы РЛЗ также должны обеспечивать технологическую совместимость с материалами, используемыми для сборки изделий

микроэлектроники. Учитывая данные требования, в качестве материала для синтеза образцов РЛЗ нами были выбраны композиты системы W–Cu.

На их основе в Научно-практическом центре НАН Беларуси по материаловедению совместно с ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» разработаны и изготовлены экраны РЛЗ для металлокерамических корпусов ИМС (рис. 4). Проведенные на серийных ИМС ППЗУ 1632РТ 1Т (перепрограммируемые запоминающие устройства) испытания показали, что РЛЗ на основе композитов W–Cu толщиной 1,2÷1,5 мм обеспечивает снижение радиационной нагрузки по электронам с энергией 1,6÷1,8 МэВ в 145÷155 раз, по протонам с энергией от 0,04 до 500 МэВ – в 6 раз.

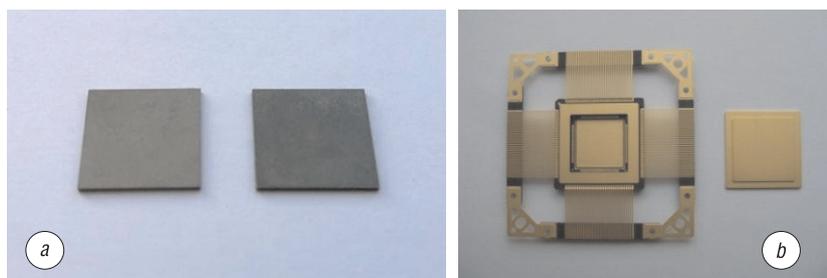


Рис. 4. Синтезированные образцы композиционного материала W–Cu (a), металлокерамический 144 выводной корпус ИМС с экранами РЛЗ (b)

Fig. 4. Samples based on W–Cu composite material (a), metal-ceramic 144 lead-out IC package with shields (b)

**Выводы.** В Научно-практическом центре НАН Беларуси по материаловедению разработаны новые материалы и технологии для защиты электронных и радиоэлектронных компонентов от широкого спектра ЭМИ и ИИ.

Технологический процесс формирования МПЭ позволяет на стандартных корпусах и блоках аппаратуры широкого спектра назначения формировать электромагнитные экраны, обеспечивающие электромагнитную совместимость и высокоэффективное экранирование и обладающие высокой прочностью сцепления с корпусом, а также низкими массогабаритными параметрами.

Экраны радиационной локальной защиты на основе композиционных материалов эффективно защищают от воздействия электронного и протонного излучений с энергиями до 2 МэВ и до 500 МэВ соответственно. Они позволяют обеспечить повышенную радиационную стойкость ИМС и электронных компонентов, снизить затраты на комплектацию при производстве космической аппаратуры, уменьшить ее весовые и габаритные параметры.

#### Список использованных источников

1. Кечиев, Л. Н. Экранирование технических средств и экранирующие системы / Л. Н. Кечиев, Б. Б. Акбашев, П. В. Степанов. – М.: Группа ИТД, 2010. – 470 с.
2. Модель космоса / под ред. М. И. Панасюка. – М.: Изд-во КДУ, 2007. – Т. 1. – 872 с.
3. Ионизирующие излучения космического пространства и их воздействие на бортовую аппаратуру космических аппаратов / под ред. Г. Г. Райкунова. – М.: Физматлит, 2013. – 256 с.
4. Шапиро, Д. Н. Основы теории электромагнитного экранирования / Д. Н. Шапиро. – Л.: Энергия, 1975. – 112 с.
5. Гроднев, И. И. Электромагнитное экранирование в широком диапазоне частот / И. И. Гроднев. – М.: Связь, 1972. – 112 с.
6. Чернушенко, А. М. Конструкции СВЧ устройств и экранов / А. М. Чернушенко. – М.: Радио и связь, 1983. – 400 с.
7. Effectiveness of the magnetostatic shielding by the cylindrical shells / S. S. Grabchikov [et. al.] // J. Magn. Magn. Mater. – 2016. – Vol. 398. – P. 49–53.
8. Применение многослойных пленочных экранов в бортовых космофизических спектрометрах / А. Г. Батищев [и др.] // Ядерная физика и инжиниринг. – 2012. – Т. 3, № 5. – С. 1–8.
9. Перспективы использования многослойных пленочных экранов для защиты космической аппаратуры от постоянных магнитных полей / В. В. Дмитренко [и др.] // Краткие сообщения по физике ФИАН. – 2015. – № 5. – С. 43–48.
10. Балюк, Л. Н. Мощный электромагнитный импульс: воздействие на электронные средства и методы защиты / Н. И. Балюк, Л. Н. Кечиев, П. В. Степанов. – М.: ООО «Группа ИДТ», 2008. – 478 с.
11. Многослойные пленочные экраны как средства защиты радиоэлектронной аппаратуры от воздействия импульсных электромагнитных полей / С. А. Акимов [и др.] // Технологии ЭМС. – 2017. – № 1 (60). – С. 21–30.

## References

1. Kechiev L. N., Akbashev B. B., Stepanov P. V. *Shielding of technical facilities and shielding systems*. Moscow, Gruppya ITD Publ., 2010. 470 p. (in Russian).
2. Panasyuk M. I. (ed.) *Space model. Volume 1*. Moscow, KDU Publ., 2007. 872 p. (in Russian).
3. Raikunov G. G. (ed.) *Ionizing radiation of outer space and their impact on the spaceborne apparatus of space vehicles*. Moscow, Fizmatlit Publ., 2013. 256 p. (in Russian).
4. Shapiro D. N. *The fundamentals of the theory of electromagnetic shielding*. Leningrad, Energiya Publ., 1975. 112 p. (in Russian).
5. Grodnev I. I. *Electromagnetic shielding in a wide frequency range*. Moscow, Svyaz' Publ., 1972. 112 p. (in Russian).
6. Chernushenko A. M. *Design of microwave devices and shields*. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1983. 400 p. (in Russian).
7. Grabchikov S. S., Trukhanov A. V., Trukhanov S. V., Kazakevich I. S., Solobay A. A., Erofeenko V. T., Vasilenkov N. A., Volkova O. S., Shakin A. Effectiveness of the magnetostatic shielding by the cylindrical shells. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2016, vol. 398, pp. 49–53. DOI: 10.1016/j.jmmm.2015.08.122
8. Batishchev A. G., Gal'per A. M., Dmitrenko V. V., Zamesov A. Yu., Naumov P. Yu., Grabchikov S. S., Sosnovskaya L. B., Cheledyuk A. V., Sharapa T. E., Grishin S. A., Petyuk A. L. The application of multilayer film shields in on-board cosmophysical spectrometers. *Yadernaya fizika i inzhiniring = Nuclear Physics and Engineering*, 2012, vol. 3, no. 5, pp. 1–8 (in Russian).
9. Dmitrenko V. V., N'yunt P. V., Vlasik K. F., Grachev V. M., Grabchikov S. S., Murav'ev-Smirnov S. S., Novikov A. S., Petrenko D. B., Ulin S. E., Uteshev Z. M., Chernysheva I. V., Shustov A. E. The application prospects of multilayer film shields for space equipment protection against constant magnetic fields. *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*, 2015, vol. 42, iss. 5, pp. 148–151. DOI: 10.3103/S1068335615050061
10. Balyuk N. I., Kechiev L. N., Stepanov P. V. *A powerful electromagnetic pulse: the impact on electronic means and protection methods*. Moscow, Gruppya ITD Publ., 2008. 478 p. (in Russian).
11. Akimov S. A., Vasilenkov N. A., Grabchikov S. S., Maksimov A. Yu., Simakov S. F., Trukhanov A. V. Multilayer film shields as a means of protecting electronic equipment from the pulsed electromagnetic fields impact. *Tekhnologii elektromagnitnoi sovmestimosti = Technologies of Electromagnetic Compatibility*, 2017, no. 1 (60), pp. 21–30 (in Russian).

## Информация об авторе

Грабчиков Сергей Степанович – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории физики магнитных пленок, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровки, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: gss@ifftp.bas-net.by

## Information about the author

Sergey S. Grabchikov – D. Sc (Physics and Mathematics), Chief Researcher at Physics of Magnetic Films Laboratory, Scientific-Practical Materials Research Center of National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: gss@ifftp.bas-net.by