

ФОТОЭЛЕКТРОННЫЕ УМНОЖИТЕЛИ С МНОГОСЛОЙНЫМИ ПЛЕНОЧНЫМИ ЭКРАНАМИ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВНЕШНИХ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

*Батищев А.Г.¹, Власик К.Ф.¹, Грабчиков С.С.², Грачев В.М.¹, Дмитренко В.В.¹,
Калашиников Н. П.¹, Муравьев-Смирнов С.С.¹, Ньютон П.В.¹, Улин С.Е.¹, Утешев З.М.¹,
Челедюк А.В.²*

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Российская Федерация

²НПЦ НАН Беларуси по материаловедению, г. Минск, Республика Беларусь

Изучена эффективность экранирования постоянного магнитного поля многослойными пленочными экранами системы NiFe/Si, сформированными на цилиндрических корпусах фотоэлектронных умножителей, и проведено сопоставление с экраном на основе металлургического материала – пермаллой марки 80НХС. Показано, что наиболее эффективным является экран на основе многослойных пленочных структур, который обеспечивает значения эффективности экранирования 8–10 в магнитных полях с индукцией 0,1–1 мТл, и 80–100 – в магнитных полях с индукцией 2–4 мТл, что в 4–5 раз выше, чем для экрана из материала 80НХС. (E-mail: gss@ifit.bas-net.by)

Ключевые слова: магнитный экран, эффективность экранирования, многослойный пленочный экран.

Введение

Научная аппаратура, устанавливаемая на борту космических аппаратов (КА), развивается в направлении внедрения современных цифровых технологий, повышения тактовых частот обработки информации, расширения спектра обрабатываемых сигналов. Одновременно минимизируются масса и габариты аппаратуры, увеличивается плотность ее компоновки в объеме КА. Все это усложняет обстановку с точки зрения электромагнитной совместимости приборов и узлов бортовой радиоэлектронной аппаратуры. Кроме того, при работе в околоземном космическом пространстве научная аппаратура подвергается интенсивному воздействию внешних постоянных магнитных и переменных электромагнитных полей. Известно [1], что максимальная индукция постоянного магнитного поля вдоль орбиты станции «МИР» достигает 0,06 мТл, а ее вариации – 0,04 мТл. Такие поля могут оказывать влияние на фотоэлектронные умножители (ФЭУ), работающие в сцинтилляционных детекторах и других приборах: ФЭУ особенно чувствительны к воздействию постоянного магнитного поля. Магнитное поле изменяет

направление движения электронов внутри ФЭУ, тем самым снижает коэффициент усиления и искажает полезный сигнал, что, в свою очередь, вносит погрешности в результаты измерений и вызывает ошибки в работе электроники. В связи с этим исследования по влиянию постоянного магнитного поля на функционирование ФЭУ и разработке новых способов защиты от его воздействия являются актуальными.

Целью данной работы являлось создание многослойных пленочных экранов (МПЭ) для экранирования серийных ФЭУ с применением технологии электролитического осаждения и исследование эффективности их магнитного экранирования.

Методика получения и исследования образцов многослойных пленочных экранов и фотоэлектронных умножителей

Многослойные пленочные экраны, содержащие слои материалов с высокой магнитной проницаемостью на основе сплавов никель–железо и слои меди, формировались в едином технологическом цикле методом электролитического осаждения [2]. В качестве подложек

для МПЭ использовались алюминиевые корпуса цилиндрической формы. Внешний диаметр цилиндра составлял 4 см, внутренний диаметр 3,7 см, длина 13 см. Были изготовлены образцы МПЭ с толщинами магнитных слоев 150, 45 и 10 мкм и количеством магнитных слоев 3, 10 и 45 соответственно (экраны № 1; № 2 и № 3). Таким образом, суммарная толщина магнитных слоев составляла 450 мкм. Толщина каждого медного слоя, разделяющего магнитные слои, была постоянной и составляла 5 мкм, а их количество – 2, 9 и 44, соответственно для экранов № 1, № 2 и № 3.

Количественная оценка эффективности экранирования (Э) МПЭ проводилась по результатам измерений отношения индукций (или напряженностей) постоянного магнитного поля в защищаемой области пространства при отсутствии экрана B_0 (или H_0), и при наличии его B (или H) [3]:

$$\text{Э} = B_0/B = H_0/H. \quad (1)$$

Установка для исследования эффективности экранирования состояла из пары катушек Гельмгольца с радиусом 20 см и числом витков 154, двух цифровых тесламетров и мультиметра, двух датчиков Холла и универсального блока питания [4]. Катушки Гельмгольца создавали постоянное магнитное поле, в которое помещался испытываемый образец экрана. Неоднородность магнитного поля вдоль радиуса катушек (R) на расстоянии 10 см в обе стороны от центра катушки составляла не более 4–5 %, в зоне испытываемого образца ($R = 2$ см) – не более 2–3 %, в направлении, перпендикулярном радиусу катушек в зоне испытываемого образца, – не более 2–3 %.

Датчики Холла были механически связаны между собой таким образом, что один из них находился внутри экрана, второй – снаружи него, на расстоянии 5 мм от внешней стенки экрана. Это позволяло одновременно перемещать датчики вдоль оси экрана, исследуя поведение магнитного поля как снаружи, так и вне экрана. Для случаев параллельной и перпендикулярной ориентаций магнитного поля относительно оси экрана были измерены B и B^* , где B^* – индукция магнитного поля на расстоянии 5 мм от внешней стенки экрана, в интервале значений B_0 от 0 до 2,5 мТл с шагом 0,1 мТл. Для сравнения эффективности экранирования образцов МПЭ с традиционными материалами

были проведены измерения величин Э цилиндрического экрана из пермаллоя толщиной 500 мкм, изготовленного из промышленной фольги 80НХС толщиной 100 мкм.

Влияние внешнего магнитного поля на выходные характеристики ФЭУ-85 оценивалось по изменениям величин относительной амплитуды выходного сигнала (U/U_0) и распределению набранных сигналов с ФЭУ по их амплитуде ($K_{\text{раз}}$) в следующих условиях: ФЭУ без экрана, с экранами из пермаллоя и МПЭ (экраны № 1–3). Под относительной амплитудой выходного сигнала понимается отношение амплитуды выходного импульса с ФЭУ при наличии магнитного поля к амплитуде выходного импульса при отсутствии магнитного поля. Под распределением сигналов с ФЭУ по амплитуде (амплитудное распределение импульсов) понимается отношение полной ширины распределения набранных за 20 мин выходных импульсов на половине высоты максимума распределения к положению максимума пика распределения. Измерения проводились в магнитном поле и без поля. Измерение величин U/U_0 и $K_{\text{раз}}$ проводились в продольных и поперечных магнитных полях относительно оси цилиндрического корпуса ФЭУ. Внешняя граница входного окна ФЭУ совпадала с торцом экрана. В качестве сигнала, подаваемого на вход ФЭУ-85, использовался световой импульс от светодиода BL-L48BC, возникающий при подаче на него импульса стандартной амплитуды 3 В и длительностью 10 нс.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Эффективность экранирования постоянного магнитного поля, направленного перпендикулярно оси экрана

На рисунке 1 представлено распределение индукции постоянного магнитного поля от центра экрана в направлении его продольной оси для различных типов экранов. Магнитное поле с индукцией величиной 2,4 мТл было направлено перпендикулярно оси экрана. Вертикальной линией показано место, где заканчивается магнитный экран; центр экрана соответствует точке 0. Зависимости эффективности экранирования от величины B_0 для образцов экранов в центральной точке приведены на рисунке 2. Из данных, приведенных на рисунках 1–2, видно,

что наибольшей эффективностью экранирования магнитного поля, направленного перпендикулярно оси испытываемых образцов, обладают МПЭ № 1–3. При этом с ростом количества слоев МПЭ наблюдается возрастание эффекта экранирования постоянных магнитных полей. Необходимо отметить, что экранирование ослабевает вблизи края экранов, но эффект сохраняется вне зоны экранов на расстоянии до 10 см от центра. Данный результат позволяет сделать практический вывод – для эффективной защиты край экрана должен выходить за край прибора на расстояние 1–1,5 см (при сопоставимых размерах объектов). Сравнивая эффективность экранирования МПЭ и на основе пермаллоя

видно, что у последнего значения \mathcal{E} примерно в 2–3 раза ниже и зона защиты внутри экрана менее протяженная.

Данные, приведенные на рисунке 2, свидетельствуют о том, что эффективность экранирования магнитных экранов увеличивается также и с ростом значений B_0 . В области низких магнитных полей (0,1–0,2 мТл) значения \mathcal{E} для МПЭ составляют 8–10, в области более высоких магнитных полей (1,5–2,5 мТл) – 80–100. Данный результат связан с тем, что магнитная проницаемость материалов магнитных слоев МПЭ увеличивается до определенных значений с ростом величины индукции магнитного поля B_0 [3].

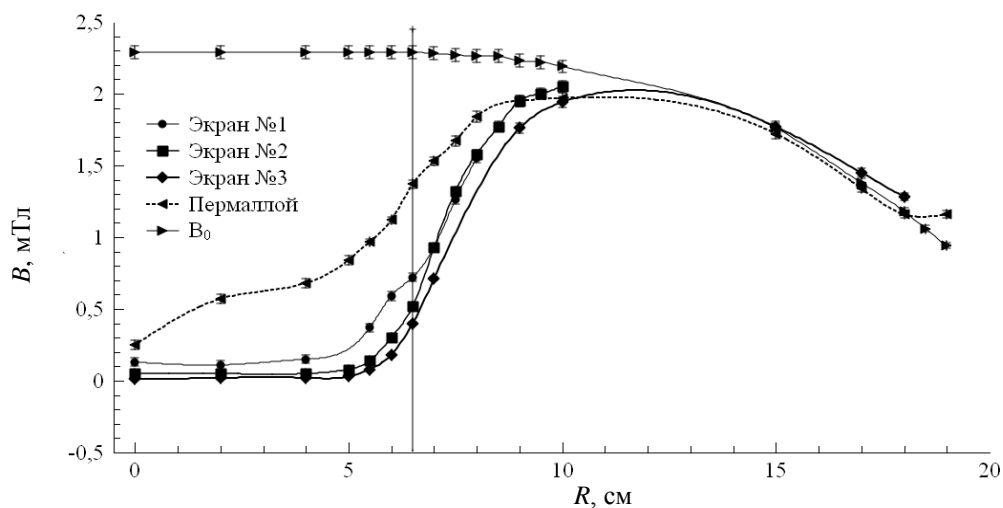


Рисунок 1 – Распределение индукции постоянного магнитного поля внутри различных типов экранов от центра экрана в осевом направлении (B_0 перпендикулярно оси экрана)

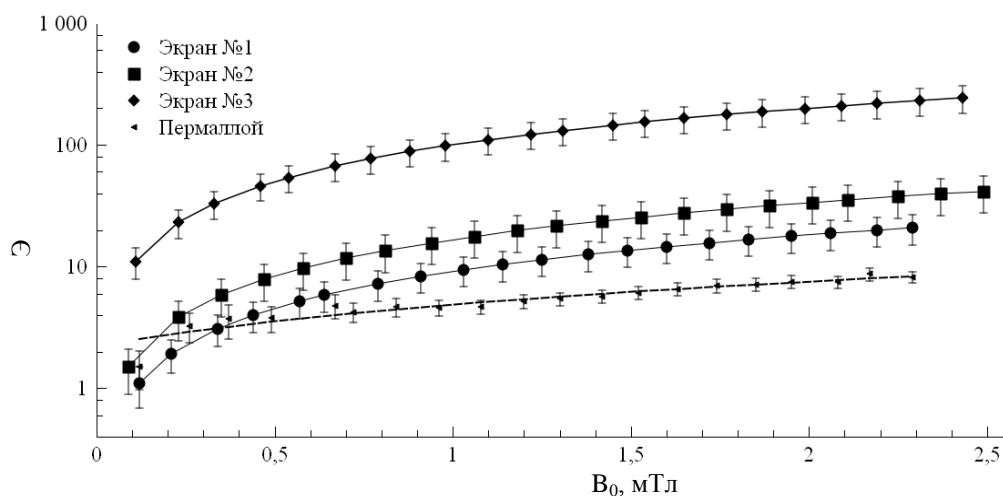


Рисунок 2 – Эффективности экранирования различных типов экранов (в центре экрана) в зависимости от величины индукции внешнего магнитного поля (B_0 перпендикулярно оси экрана)

Эффективность экранирования постоянного магнитного поля направленного вдоль оси экрана

На рисунке 3 представлены зависимости индукции постоянного магнитного поля для различных типов экранов от расстояния в направлении от центра экрана. Магнитное поле с величиной индукции 2,4 мТл было направлено вдоль оси экрана. Из рисунка 3 видно, что образцы МПЭ № 1–3 обладают высокой эффективностью экранирования магнитного поля, направленного вдоль оси, на расстоянии до 4 см от центра экрана. Эффект экранирования ослабевает на расстоянии 4–5 см от центра экрана. В зоне края экрана, на расстоянии около 6 см от центра экрана, эффективность экранирования снижается и становится близкой

к 1, на выходе из экрана и вне его наблюдается усиление индукции магнитного поля. Значения \mathcal{E} для экрана из пермаллоя примерно в 4–5 раз ниже, чем для МПЭ № 1–3. Из данных, приведенных на рисунке 4, видно, что наиболее высокой эффективностью экранирования обладает МПЭ № 3. При этом эффективность экранирования для экрана № 3 с увеличением B_0 от 0,1 до 0,8 мТл растет от 3 до 40, а затем с увеличением B_0 от 0,8 до 2,5 мТл изменяется от 40 до 30. Для образцов экранов № 1, 2 и пермаллоя в области магнитных полей от 0,1 до 0,8 мТл также наблюдается рост эффективности, однако при дальнейшем увеличении B_0 значения \mathcal{E} изменяются незначительно. Данный результат, по-видимому, связан с характером зависимости магнитной проницаемости материалов экранов от величины B_0 .

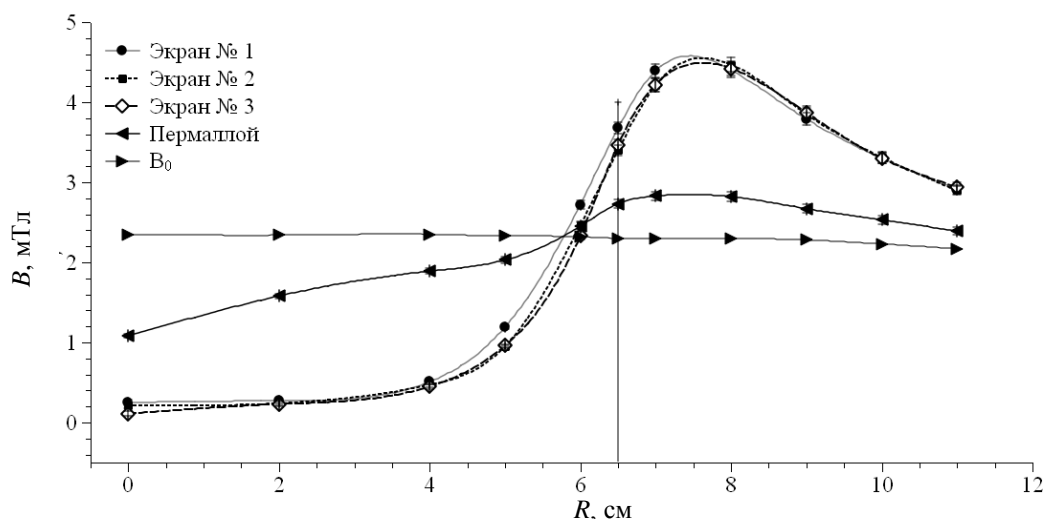


Рисунок 3 – Распределение индукции магнитного поля внутри различных типов экранов от их центра в осевом направлении (B_0 параллельно оси экрана)

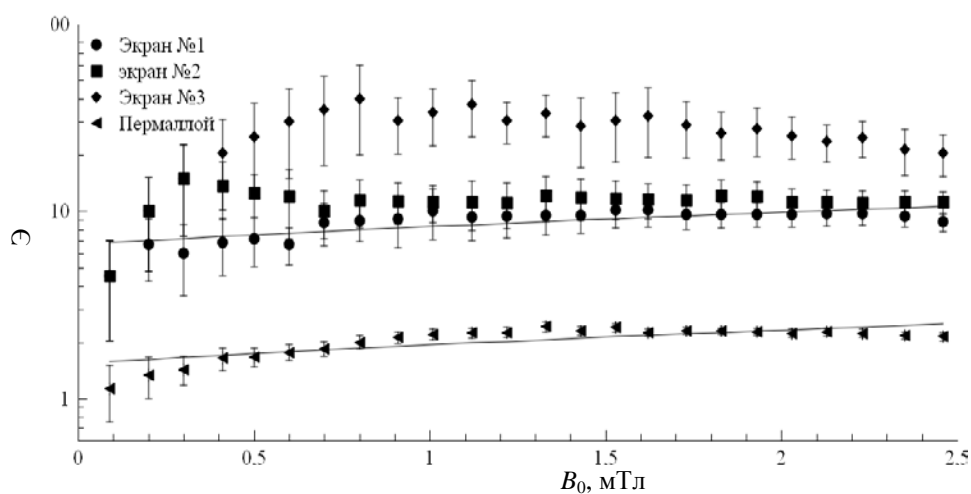


Рисунок 4 – Эффективности экранирования различных типов экранов (в центре экрана) в зависимости от величины индукции внешнего магнитного поля (B_0 , параллельно оси экрана)

Сравнение данных по эффективности экранирования для случаев параллельной и перпендикулярной ориентации внешнего магнитного поля относительно оси экранов показывает, что постоянное магнитное поле, направленное перпендикулярно, экранируется в несколько раз выше, чем поле, направленное вдоль оси магнитного экрана. Необходимо также отметить, что при продольной (осевой) ориентации магнитного поля эффективная защита внутри экрана обеспечивается в менее протяженной зоне, а вне зоны экрана последний работает как концентратор (усилитель) магнитного поля.

Влияние постоянного магнитного поля на выходные характеристики ФЭУ-85

В начале исследований выходных характеристик серийных образцов ФЭУ-85 была изучена временная стабильность положений максимумов выходных импульсов. Установлено, что за первые 120 мин работы неэкранированного ФЭУ-85 положение максимума распределения выходных импульсов изменяется на величину 1,7 канал/мин, а в последующее время – на величину 0,46 канал/мин (0,5 мВ/мин при амплитуде выходного сигнала с ФЭУ 1,6 В). При этом показано, что использование предварительного прогрева в течение 6 ч и длительности измерений 15 мин обеспечивает погрешность измерений выходных характеристик ФЭУ-85 не более 0,5 %. В магнитных полях 0,2 и 1,0 мТл нестабильность сигнала ФЭУ-85 после предварительного прогрева длительностью 6 ч составила 0,3 канал/мин. В этом случае погрешность измерений не превышала 0,3 %. В связи с чем, все образцы ФЭУ-85 перед измерениями подвергались предварительному прогреву в течение 6 ч.

Для исследования влияния магнитного поля на выходные характеристики ФЭУ-85 проводились измерения относительной амплитуды выходного сигнала и амплитудного распределения набранных импульсов с ФЭУ. Результаты измерений величины U/U_0 неэкранированного ФЭУ-85 для случаев продольной и перпендикулярной ориентации внешнего магнитного поля представлены на рисунке 5. Ось Z совпадает с осью цилиндрического корпуса ФЭУ, оси X и Y перпендикулярны оси корпуса ФЭУ.

Из приведенных данных видно, что в слабых магнитных полях с индукцией 0,1–0,5 мТл

для случаев поперечной и продольной ориентаций снижение относительной амплитуды выходного сигнала составило 20 % и 1 % соответственно. В магнитных полях величиной 2–3 мТл снижение относительной амплитуды выходного сигнала составило 95 % (поперечная) и 60 % (продольная ориентация).

На рисунке 6 представлены зависимости относительных амплитуд выходных сигналов ФЭУ-85 с экранами различных типов от величины индукции магнитного поля. Из приведенных данных видно, что практически все исследованные образцы МПЭ устраняют отрицательное влияние магнитного поля в области значений до 0,5 мТл на выходные характеристики ФЭУ-85 – снижение U/U_0 составляет менее 1–2 %. Для магнитных полей в интервале значений 2–4 мТл в зависимости от типа МПЭ снижение U/U_0 составило 10–40 %. Лучший эффект экранирования достигнут на образце № 3, для которого снижение относительной амплитуды выходного сигнала ФЭУ в поле 2 мТл не превысило 10 % (рисунок 6).

Экран, изготовленный из пермаллоя, не обеспечил достаточно надежную защиту ФЭУ. Для него снижение U/U_0 в магнитном поле величиной 0,1–0,5 мТл, ориентированном перпендикулярно оси Z , составило 5–10 %, а в магнитном поле величиной 2–3 мТл – 50–80 %.

Оценка эффекта экранирования на выходные характеристики ФЭУ-85 проводилась также с помощью измерений амплитудных распределений импульсов с ФЭУ. На рисунке 7 представлены зависимости $K_{\text{раз}}$ от индукции магнитного поля для ФЭУ-85 с различными магнитными экранами. Из приведенных данных видно, что для неэкранированного ФЭУ-85 величина $K_{\text{раз}}$ уменьшается на 20 % в магнитных полях с индукцией до 1 мТл и снижается в 2,5–3 раза при увеличении индукции от 1 до 2,5 мТл. Амплитудное распределение импульсов ФЭУ-85 с экраном из пермаллоя практически не изменяется для индукции магнитного поля вплоть до величины 2,5 мТл. Однако с увеличением индукции магнитного поля от 2,5 до 4 мТл оно ухудшается в 2,5 раза. Из рисунка 7 видно, что наиболее стабильные результаты по амплитудному распределению импульсов получены на ФЭУ-85 экранированных с помощью МПЭ. В области магнитных полей с индукцией от 0,2 до 4 мТл значения $K_{\text{раз}}$ для образцов МПЭ № 2 и № 3 незначительно

изменяются – от 1,1 % до 1,3 %. Для МПЭ № 1 амплитудное распределение импульсов с ФЭУ-85 практически не изменяется в магнитных полях с индукцией до 4 мТл.

В таблице представлены результаты измерения выходных характеристик серийных образцов ФЭУ-85 без экрана и с различными типами экранов.

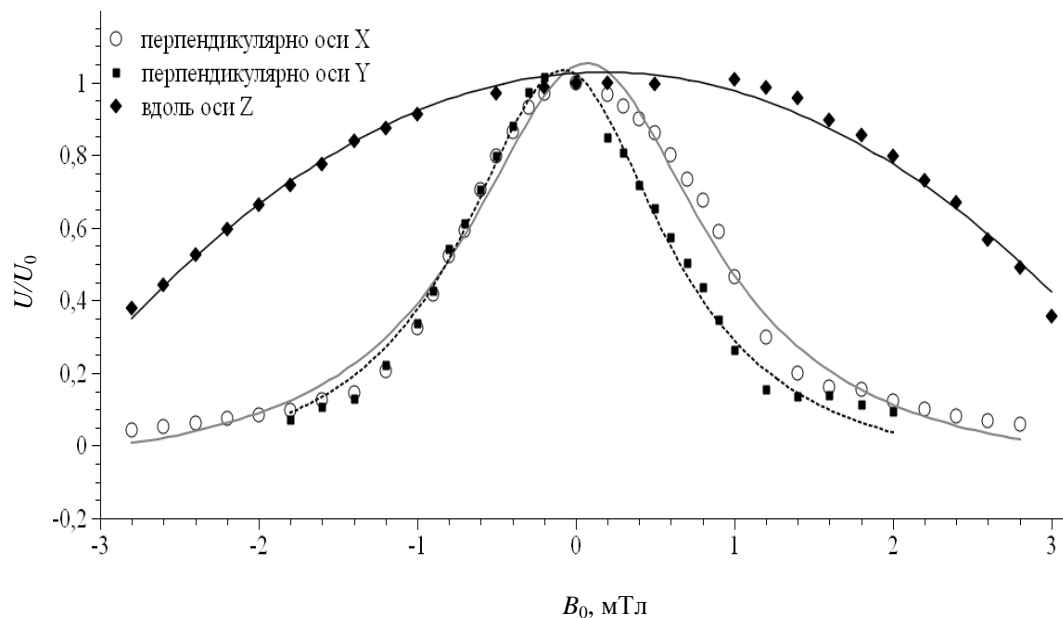


Рисунок 5 – Зависимость относительной амплитуды выходного сигнала незэкранированного ФЭУ-85 от величины индукции магнитного поля, направленного перпендикулярно осям X, Y и параллельно оси Z

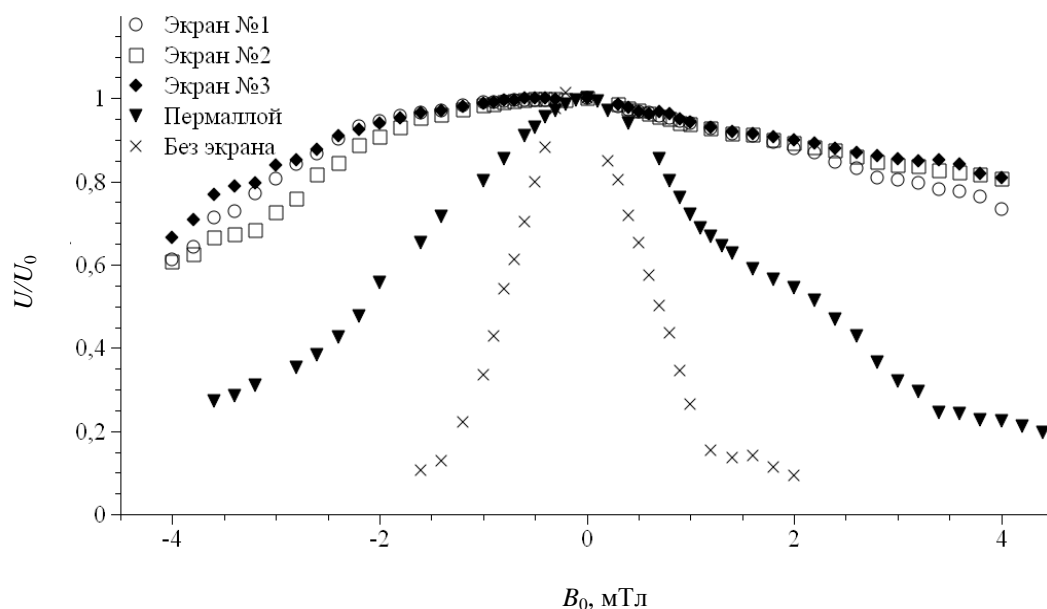


Рисунок 6 – Зависимость относительной амплитуды выходного сигнала от величины индукции внешнего магнитного поля, ориентированного перпендикулярно оси Z, для серийных образцов ФЭУ-85 с экранами различных типов

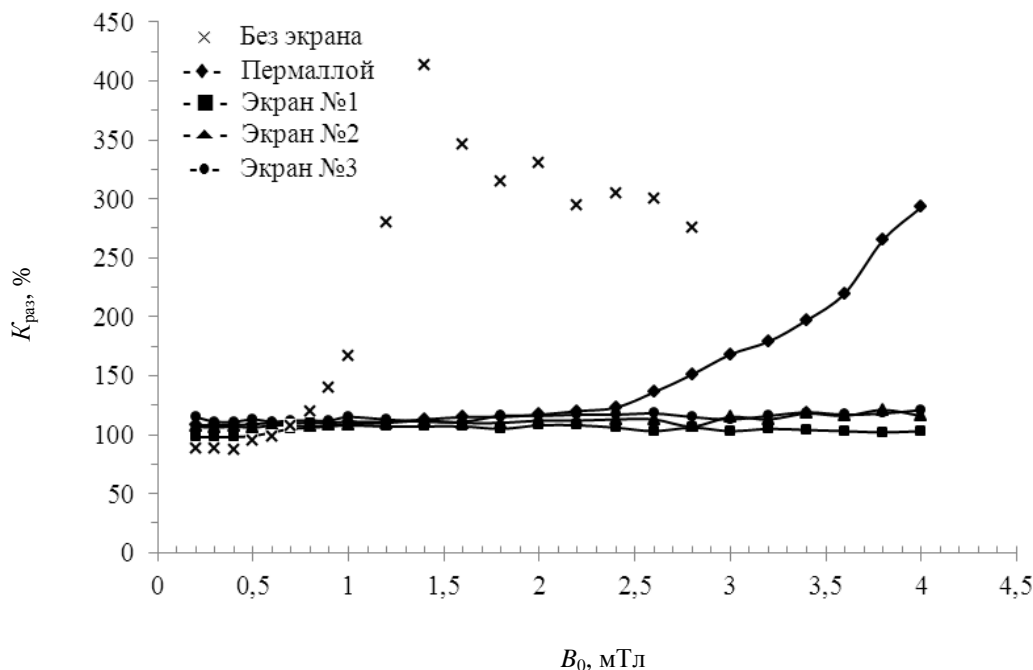


Рисунок 7 – Зависимость амплитудного распределения импульсов от величины индукции магнитного поля для ФЭУ-85 без экрана и с экранами из пермаллоя и МПЭ № 1– 3

Таблица

Выходные характеристики серийных образцов ФЭУ-85 без экрана и с различными типами экранов

Тип экрана/ выходные харак- теристики ФЭУ-85	U/U_0 ; $B < 0,5$ мТл; %	U/U_0 ; $B = 2,5$ мТл; %	$K_{раз}$; $B = 0,5-1$ мТл; %	$K_{раз}$; $B = 2,5-4$ мТл; %
Без экрана	20	> 95	1–20	250–300
80НХС	10	40	1–3	50–250
МПЭ № 1	~ 1	10	< 1	~ 1
МПЭ № 2	~ 1	10	~ 1	6–10
МПЭ № 3	~ 1	15	~ 1	8–12

Заключение

1. Методом электролитического осаждения в едином технологическом цикле получены многослойные электромагнитные экраны, состоящие из слоев магнитомягкого материала и слоев электропроводящего материала, на корпусах приборов и аппаратов различной формы и назначения. Количество и толщина отдельных слоев может варьироваться в широких

пределах, общая толщина экранов может достигать нескольких миллиметров.

2. Многослойные пленочные экраны, состоящие из 3, 10, 45 слоев магнитного материала на основе сплава никель-железо и 2, 9, 44 слоев меди, общей толщиной магнитных слоев 450 мкм, обеспечивают значения эффективности экранирования 8–10 в магнитных полях с индукцией 0,1–1 мТл; и значения эффективности экранирования 80–100 в магнитных по-

лях с индукцией 2–4 мТл, что в 4–5 раз выше, чем для экрана, изготовленного из пермаллоя толщиной 500 мкм марки 80НХС.

3. Для неэкранированных ФЭУ-85 в магнитных полях с поперечной ориентацией и индукцией 0,5 и 2,5 мТл изменение относительной амплитуды выходного сигнала составляет 20 % и более 95 % соответственно, а энергетическое разрешение в магнитных полях с индукцией 1,0 и 2,5 мТл снижается на 20 и 250 % соответственно. Использование экранов из пермаллоя не обеспечивает достаточной защиты ФЭУ-85: при значениях $B_0 = 0,5$ и 2,5 мТл величина U/U_0 изменяется на 10 и 40 %, соответственно, а значения $K_{\text{раз}}$ при $B_0 = 1,0$ и 2,5 мТл изменяются на 3 и 50 % соответственно. Наиболее эффективными для защиты ФЭУ-85 являются экраны на основе МПЭ: в слабых магнитных полях значения U/U_0 и $K_{\text{раз}}$ изменяются менее чем на 1 %; в полях 2,5 мТл изменения величин U/U_0 и $K_{\text{раз}}$ не превышают 15 % и 8 %, соответственно.

4. Экраны на основе многослойных пленочных структур практически полностью устраняют влияние слабых магнитных полей с индукцией до 0,5 мТл на рабочие характеристики ФЭУ, что позволяет успешно использовать их в бортовой научной аппаратуре космических аппаратов и наземных экспериментах,

особенно на современных ускорителях заряженных частиц.

Работа выполнена при поддержке НТП Союзного государства «Разработка нанотехнологий создания материалов, устройств и систем космической техники и их адаптации к другим отраслям техники и массовому производству» («Нанотехнология СТ»).

Список использованных источников

1. Klimov, S.I. Interball-1 and MIR orbital station coordinated magnetic field and energetic particles measurements / S.I. Klimov, V.A. Grushin [et al.] // *Advances in Space Research*. – Volume 30, Issue 7. – 2002. – P. 1847–1853.
2. Грабчиков, С.С. Многослойный электромагнитный экран / С.С. Грабчиков, Л.Б. Сосновская, Т.Е. Шарапа // Патент РБ № 11843 от. 01.28.2009.
3. Шапиро, Д.Л. Основы теории электромагнитного экранирования / Д.Л. Шапиро. – Л. : Энергия, 1975. – 112 с.
4. Муравьев-Смирнов, С.С. Многослойные магнитные экраны на основе пленочных наноструктур / С.С. Муравьев-Смирнов, А.Г. Батищев, К.Ф. Власик [и др.] // *Машиностроение и инженерное образование*. – 2011. – № 4. – С. 24–29.

Batischev A.G., Vlasik K.F., Grabchikov S.S., Grachev V.M., Dmitrenko V.V., Kalashnikov N.P., Muravyev-Smirnov S.S., Ulin S.E., Uteshev Z.M., Cheledyuk A.V.

Application of multilayer film configuration to protect photomultiplier against external static magnetic fields

The effectiveness of the screening constant magnetic field is multi-layered film screens system of NiFe/Cu, formed on the cylindrical housing of photomultiplier tubes, and compared with screen-based steel material – brand 80NHS permalloy. It is shown that the most effective is the screen on the basis of the multi-layered film screens, which provide shielding effectiveness value 8–10 in magnetic fields with induction of 0,1–1 mT, and 80–100 – in magnetic fields with induction of 2–4 mT, which is 4–5 times higher than for the screen of the material 80NHS. (E-mail: gss@iftt.bas-net.by).

Key words: magnetic shield, the effectiveness of screening, multi-layer film screen.

Поступила в редакцию 13.02.2012.