

На правах рукописи

ПЬО ВЭЙ НЬОНТ

**Метод подавления влияния постоянных магнитных полей
на ядерно-физическую и космофизическую аппаратуру**

01.04.01 - Приборы и методы экспериментальной физики

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Автор:



Москва – 2015 г.

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ».

Научный руководитель: **Дмитренко Валерий Васильевич**
доктор физико-математический наук, профессор,
НИЯУ МИФИ, г. Москва

Официальные оппоненты: **Лубсандоржиев Баярто Константинович**
доктор физико-математический наук, профессор,
ведущий научный сотрудник
Институт ядерных исследований РАН, г. Троицк

Семенов Виталий Константинович
кандидат физико-математический наук,
ведущий научный сотрудник
ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий,
г. Протвино

Ведущая организация: **Физический институт им. П.Н. Лебедева**
РАН (ФИАН), г. Москва

Защита состоится «18» ноября 2015 г. в 15 час. 00 мин. На заседании диссертационного совета Д 212. 130. 07 на базе НИЯУ МИФИ по адресу: 115409, Москва, Каширское шоссе, дом 31, телефон (499) 324-84-98.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ и на сайте <http://ods.mephi.ru/>.

Автореферат разослан «__» _____ 2015 г.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в двух экземплярах, заверенный печатью организации.

Ученый секретарь диссертационного совета,
д.ф.-м.н., профессор



С.Е. Улин

Общая характеристика работы

Актуальность темы диссертации

В научной аппаратуре, используемой как в современных физических экспериментах, так и установках прикладного назначения применяются детекторы ионизирующего излучения (блоки детектирования), многие из которых чувствительны к воздействию постоянных магнитных полей. Например, в ускорительных установках (ATLAS CERN), широко используются фотоэлектронные умножители (ФЭУ), весьма чувствительные к воздействию магнитных полей, соседствуют со сверхпроводящими магнитами, создающими магнитные поля с напряженностью в несколько Тесла (10^4 Гаусс). Такая же ситуация наблюдается и в аппаратуре, устанавливаемой на ряде космических аппаратов. Например, в эксперимент «ПАМЕЛА», который является магнитным спектрометром, используется магнитная система на основе сильных постоянных магнитов совместно с ФЭУ. То же самое имеет место в аппаратуре, применяемой в ядерной медицине.

Во всех упомянутых случаях весьма актуальной является задача не только добиться большого коэффициента экранирования, но и сделать эти экраны возможно более компактными, легкими и технологичными в изготовлении, чтобы обеспечить возможность экранирования изделий со сложной геометрической конфигурацией или малыми размерами или защиты только определенной части устройства.

Теоретическая и экспериментальная работа по совершенствованию магнитных экранов ведется в течение многих лет. Одним из важнейших результатов этих исследований является вывод о преимуществе многослойных экранов перед монолитными. Однако применяющаяся до последнего времени технология изготовления многослойных экранов с помощью использования тонких листов из магнитомягких металлов материалов имеет существенные недостатки, которые ограничивают применение таких экранов.

В Научно-практическом центре по материаловедению Национальной академии наук Беларуси разработана технология изготовления многослойных пленочных экранов (МПЭ) методом электролитического осаждения с требуемыми магнитным и электрическими характеристиками [1]. Метод позволяет эффективно экранировать корпуса и детали сложной геометрической формы, обеспечивая при этом жесткую фиксацию экрана на защищаемом изделии. В результате этого удастся значительно снизить массу и габариты научной аппаратуры по сравнению с использованием традиционных магнитных экранов. Эти преимущества МПЭ и определяют актуальность диссертационной работы, в ходе выполнения которой изучены их экранирующие характеристики и продемонстрированы примеры практического применения.

МПЭ, использовавшиеся в данной работе, были изготовлены в Научно-практическом центре по материаловедению в рамках совместно выполняемой научно-технической программы Союзного государства «Разработка нанотехнологий создания материалов, устройств и систем космической техники и их адаптация к другим отраслям техники и массовому производству» (Шифр: «Нанотехнология-СГ»).

Цели работы

Целью данной диссертационной работы было разработка и создание многослойных магнитных экранов, обладающих высокой эффективностью экранирования и доступной технологии изготовления, исследование их характеристик, применение для экранирования ФЭУ-85 и использование в сцинтилляционной детекторной системе «Наномаг», предназначенной для работы на борту космического аппарата.

Следующие задачи были решены диссертатом для реализации данной цели:

- Разработан и создан многослойный пленочный экран (МПЭ) методом электролитического осаждения для экранирования ФЭУ с количеством двойных чередующихся слоев до 45.

- Разработана и создана экспериментальная установка с использованием катушек Гельмгольца и датчиков Холла для исследования эффективности экранирования постоянного магнитного поля МПЭ.

- Проведены эксперименты по исследованию эффективности экранирования постоянного магнитного поля, направленного перпендикулярно и вдоль оси различных типов цилиндрических МПЭ.

- Разработана и создана экспериментальная установка для изучения влияния магнитного поля на работу ФЭУ.

- Проведены измерения с ФЭУ-85 по изучению защитных свойств различных типов магнитных экранов.

- Создана сцинтилляционная детекторная система с использованием ФЭУ с защитными экранами от магнитных полей для работы в космосе и проведены её испытания.

Научная новизна

- Впервые разработаны и созданы многослойные пленочные экраны методом электролитического осаждения для защиты ФЭУ от воздействия постоянных магнитных полей. Экраны имели до 45 чередующихся слоев с высокой магнитной проницаемостью (Ni-Fe) и слоев с высокой электропроводимостью (Cu). Общая толщина магнитомягкого материала составляла 450 мкм в каждом экране.

- Впервые получена зависимость коэффициента экранирования от количества слоев и напряженности магнитного поля. Показано, что коэффициент экранирования МПЭ в 3-5 раз превосходит экранирующую способность обычно используемого многослойного пермаллового экрана с эквивалентной толщиной магнитомягкого материала.

Достоверность

Достоверность результатов, приведенных в диссертации, обеспечивается использованием сертифицированной измерительной аппаратуры, а так же тем, что характер зависимостей экранирующих свойств МПЭ от напряженности магнитного поля, конфигурации экрана, количества

и толщины слоев полностью объясняющимся в рамках фундаментальных законов электричества (электротехники).

Практическая значимость

Проведенные испытания продемонстрировали высокую эффективность экранирования магнитных полей МПЭ. Они могут найти применение в аппаратуре, использующей элементы чувствительные к воздействию постоянных магнитных полей и находящиеся в зоне влияния источников магнитного поля (ускорительные установки, аппаратура для космических исследований, приборы ядерной медицины и т.п.). Разработанный метод подавления влияния постоянных магнитных полей может быть рекомендован для внедрения в ОИЯИ, ИФВЭ, ИТЭФ, ИЯИ РАН, ФИАН, НИИЯФ МГУ, ИКИ РАН, ЛФТИ РАН, СНИИП, НПП «Доза», НПП «Аспект», ИПГ и других научных учреждениях.

Личный вклад автора

Автор, практически, самостоятельно собрал установку для исследования экранирующих свойств магнитных экранов и провел на ней исследование различных типов экранов.

Автор принял активное участие в создании установки для изучения влияния магнитного поля на рабочие характеристики ФЭУ-85 и эффективности экранирования этого ФЭУ различными типами магнитных экранов.

Автор участвовал в создании лабораторного телескопа сцинтилляционной детекторной системы «Наномаг» для работы в космосе, в которой используются МПЭ для защиты ФЭУ от магнитных полей, и проведении её испытаний.

Автор внес значительный вклад в подготовку трёх научных статьи по теме диссертации, опубликованных в журналах, включенных в списки «Web of Science» и «SCOPUS».

Автор выносит на защиту

- Экспериментальную установку с использованием катушек Гельмгольца и датчиков Холла для исследования эффективности экранирования постоянного магнитного поля различными типами экранов.

- Результаты экспериментов по изучению защитных свойств различных типов магнитных экранов на основе многослойных пленочных структур.

- Экспериментальную установку для изучения влияния магнитного поля на работу ФЭУ.

- Результаты измерений эффективности экранирования ФЭУ-85 различными типами магнитных экранов.

- Сцинтилляционную детекторную систему «Наномаг» с использованием ФЭУ с защитными экранами от магнитных полей для работы в космосе.

- Результаты исследования работоспособности научной аппаратуры «Наномаг» при воздействии постоянного магнитного поля.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

- Международной сессии-конференции Секции ядерной физики ОФН РАН «Физика фундаментальных взаимодействий», в 2012 году.

- Научных сессиях НИЯУ МИФИ, секция «Актуальные проблемы физики ядра, частиц, астрофизики и космологии» в 2014 и 2015 годах.

- III международной молодежной научной школе-конференции НИЯУ МИФИ «Современные проблемы физики и технологий» в 2014 году.

- 48-ой Школе ПИЯФ по физике конденсированного состояния (ФКС-2014), Санкт-Петербург в 2014 году.

Соискатель имеет 9 опубликованных работ по теме диссертации, из них 3 работы, опубликованы в рецензируемых научных изданиях, входящих в ведущие международные базы цитирования «Web of Science» или «Scopus»,

и 6 публикаций в материалах Всероссийских и Международных конференций.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации: 121 страниц, 70 рисунков, 7 таблицы, 43 наименований цитируемой литературы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обосновывается актуальность темы исследования, указаны объект и цель работы, положения, которые выносятся на защиту, отмечена их научная новизна, научная и практическая ценность, апробация и достоверность, описывается структура диссертации.

В первой главе проведен анализ основных теоретической и экспериментальной работы, посвященных многослойными магнитным экранам, которые ведутся уже в течении многих лет. В 1895 году Rucker [2] получил решение для коэффициента экранирования бесконечно длинных многослойных концентрических экранов в постоянном поперечном магнитном поле. В 1912 году Esmarch [3,4] экспериментально исследовал зависимость коэффициента экранирования вдоль оси открыто-закрытых многослойных цилиндрических экранов при направлении магнитного поля перпендикулярно продольной оси цилиндра. Он также изучил степень экранирования от числа слоев, вплоть до 63 слоев. В 1979 году Gubser и др. [5] предложили обобщенную формулу для многослойного осевого экранирования.

Дальнейшее развитие эти исследования получили в работах Mager [6] и Summner [7], которые предложили методику расчёта эффективности экранирования многослойными магнитными экранами. Позже эта методика была усовершенствована Paperno [8,9]. Результаты экспериментальной реализации многослойных магнитных экранов приведены в работах Sasada [10,11].

Проанализированы существующие пакеты программ для расчета эффективности экранирования от постоянных магнитных полей. Выяснилось, что ни одна из программ не может быть использована для расчета эффективности экранирования многослойными пленочными экранами.

В настоящее время, когда с одной стороны в различной аппаратуре широко используются элементы чувствительные к воздействию постоянных магнитных полей, а с другой расширяется использование постоянных магнитов, актуальность создания эффективных экранов от постоянных магнитных полей все возрастает. И хотя, как было указано выше, несмотря на то, что многослойные магнитные экраны гораздо более эффективны, чем экраны монолитной конструкции (при одинаковой общей толщине магнитомягкого материала), технологические трудности ограничивали их использование, особенно при сложной конфигурации экранируемого объекта [12].

Представленные в данной работе многослойные магнитные экраны, созданные с помощью технологии электролитического осаждения [13], существенно упрощают создание таких экранов и позволяют добиться высокой степени экранирования от постоянных магнитных полей. Данная технология позволяет в едином технологическом цикле формировать МПЭ, содержащие чередующиеся слои материалов с высокой магнитной проницаемостью и слои материалов с высокой электрической проводимостью [14, 15]. Следует также отметить такое важное достоинство метода электролитического осаждения, как возможность формирования экранов на заданных, локальных участках изделий, на блоках сложной геометрической формы или с малыми линейными размерами.

Во второй главе дано описание методики создания МПЭ, состоящих из чередующихся слоев с высокой магнитной проницаемостью и слоев с высокой электропроводимостью. Среди магнитных сплавов, которые могут использоваться для создания экранов методом электролитического

осаждения, наиболее высокими значениями магнитной проницаемости обладают сплавы системы Ni-Fe ($\mu_0=(1-3)\times 10^3$, $\mu_{\max}=(1-5)\times 10^4$). Кроме того, в сплавах Ni-Fe, содержащих 20-22 ат. % Fe, остальное – никель, реализуются составы с гомогенной однофазной структурой, постоянной магнитострикцией близкой к нулю и низкими внутренними напряжениями [14]. Сплавы системы Ni-Fe осаждают из сульфатных электролитов, которые отличаются высоким катодным выходом по току, стабильностью в работе и доступностью используемых реактивов [16]. Как известно [17], среди металлов наиболее низкими величинами удельного электрического сопротивления обладают медь, серебро и золото. Все указанные материалы могут быть получены методом электролитического осаждения. Однако, исходя из соображений экономической целесообразности и технологичности процесса, для формирования слоев с высокой удельной электропроводностью МПЭ была выбрана медь. Роль слоев с высокой электропроводимостью не ограничивается разделением магнитомягких слоев и обеспечением прочности экрана, но превращает его в высокоэффективный электромагнитный экран. Однако, результаты изучения эффективности экранирования МПЭ переменных электромагнитных полей в данную работу не вошли.

В данной работе приведены результаты исследований эффективности экранирования МПЭ только от постоянных магнитных полей. Учитывая, что практически во всех экспериментальных физических установках и приборах, используемых как в наземных условиях (ускорительные эксперименты, ядерно-медицинские установки), так и в аппаратуре, устанавливаемой на космические аппараты, широко применяются ФЭУ. В качестве основы для создания экрана использовался алюминиевый защитный (монтажный) корпус умножителя ФЭУ-85. Он имеет цилиндрическую конфигурацию. Его внутренний диаметр – 37 мм, длина – 130 мм, толщина стенки 2 мм (Рис.1).

Было испытано шесть образцов магнитных экранов (см. Таблицу 1), пять из которых имели многослойное пленочное покрытие общей толщиной

магнитных слоев 450 мкм, нанесенное методом электролитического осаждения, а один образец был изготовлен из промышленной пермаллоевой фольги марки 80НХС толщиной 100 мкм путем послойной намотки с общей толщиной 500 мкм.

Таблица 1. Характеристики испытываемых образцов экранов.

Образец	Толщина магнитного слоя, мкм	Число магнитных слоев	Суммарная толщина магнитных слоев, мкм	Толщина медного слоя, мкм	Число медных слоев	Суммарная толщина медных слоев, мкм	Общая толщина экрана, мкм
МПЭ №1	150	3	450	5	2	10	460
МПЭ №2	90	5	450	5	4	20	470
МПЭ №3	45	10	450	5	9	45	495
МПЭ №4	22.5	20	450	5	19	95	545
МПЭ №5	10	45	450	5	44	220	670
Пермалой	100	5	500	нет	нет	нет	500

В третьей главе приведены результаты экспериментов по исследованию эффективности экранирования постоянного магнитного поля для МПЭ. Для проведения измерений была собрана установка, состоящая из пары катушек Гельмгольца с радиусом 20 см, расстояние между которыми составляло 20 см, двух цифровых тесламетров, одного мультиметра, двух датчиков Холла и универсального блока питания (рис. 2). Катушки Гельмгольца создавали магнитное поле, в которое помещался испытываемый образец экрана. Неоднородность магнитного поля вдоль радиуса катушек на расстоянии 10 см в обе стороны от центра катушки составляла не более 4-5%, а в зоне испытываемого образца – не более 2-3%. Неоднородность магнитного поля в направлении перпендикулярном радиусу катушек в зоне испытываемого образца ($L = 13$ см) – не более 2-3%.

Количественная оценка эффективности экранирования (K) МПЭ проводилась по результатам измерений отношения магнитных индукций (или напряженностей) постоянного магнитного поля в отсутствие экрана B^* (или H^*) и внутри экрана B_2 (или H_2) и определялась следующим выражением [18]:

$$K = B^*/B_2 = H^*/H_2 \quad (1)$$



Рис. 1. Вид кожуха ФЭУ-85, покрытого магнитным экраном на основе многослойных пленочных структур (вверху) и без магнитного экрана (внизу).



Рис. 2. Экспериментальная установка для исследования экранов.

На рисунке 3 представлены результаты измерений индукции магнитного поля в исследуемых образцах экранов в зависимости от расстояния, в направлении вдоль его продольной оси от центра экрана. 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 см. Зависимости K в центре исследуемых образцов экранов от величины B_0 приведены на рисунке 4. Из данных, приведенных на рисунках 3÷4, видно, что эффективность экранирования магнитного поля МПЭ №1÷№5, направленного перпендикулярно оси испытываемых образцов примерно в 2÷3 раза превосходит многослойный пермалоевый экран. При этом с ростом количества слоев МПЭ наблюдается возрастание эффекта экранирования постоянных магнитных полей. Эффект экранирования ослабевает вблизи края экранов, но сохраняется вне зоны экранов на расстоянии до 10 см от центра.

Данные, приведенные на рисунке 4 свидетельствуют о том, что эффективность экранирования МПЭ увеличивается также и с ростом значений B^* . В области малых магнитных полей (0,1÷0,2 мТл) значения K для

МПЭ составляют $8 \div 10$, в области более сильных магнитных полей ($1,5 \div 2,5$ мТл) – $80 \div 100$.

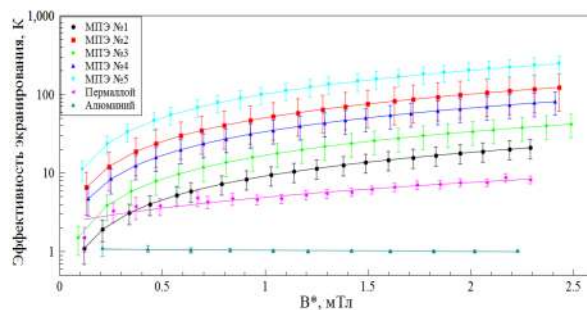
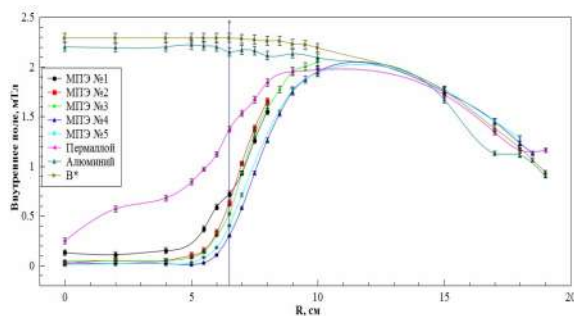


Рис. 3 – Распределение индукции магнитного поля внутри различных типов экранов от центра экрана в осевом направлении B^* . (Магнитное поле \perp оси экрана). Вертикальная линия – торец экрана.

Рис. 4 – Эффективности экранирования различных типов экранов (в центре экрана) в зависимости от величины индукции внешнего магнитного поля B^* . (Магнитное поле \perp оси экрана).

Данный результат связан с тем, что магнитная проницаемость материалов магнитных слоев МПЭ зависит от индукции магнитного поля до определенных значений B^* [18]. Наилучшей эффективностью экранирования обладает МПЭ с наибольшим количеством слоев (МПЭ № 5).

Аналогичные измерения были проведены для магнитных полей, направленных вдоль продольной оси экранов, которые показали, что эффективность экранирования при такой ориентации магнитного поля в несколько раз ниже, чем для перпендикулярной ориентации. Эти результаты представлены в диссертации.

В четвертой главе приведены результаты испытания эффективности защиты ФЭУ различными типами магнитных экранов от постоянного магнитного поля. Эффективность экранирования МПЭ проводилась с использованием ФЭУ-85. Для изучения влияния магнитного поля на работу ФЭУ он был помещен в магнитное поле между двумя магнитами. Магнитное поле в месте расположения ФЭУ-85 измерялось датчиком Холла и варьировалось в диапазоне от 0.2 до 3 мТл. В качестве источника световых вспышек использовался светодиод, который крепился к корпусу ФЭУ с помощью переходной втулки, исключая попадание света в ФЭУ. На светодиод подавался импульсный ток от генератора Г5-56. На ФЭУ

подавалось напряжение 800 В от источника высокого напряжения БНВ2-95. При помощи усилителя-формирователя и анализатора импульсов (плата SBS-50М фирмы «Green Star»), с ФЭУ снимался спектр электрических импульсов от светодиода. На рисунке 5. представлена схема экспериментальной установки.

Чтобы определить влияние магнитного поля на работу ФЭУ-85 была проведена серия измерений по изучению зависимости коэффициента усиления и импульсного разрешения ФЭУ для следующих вариантов: ФЭУ без экрана, ФЭУ в алюминиевом корпусе, ФЭУ с экраном из пермаллоя толщиной 0,5 мм, ФЭУ с пятью многослойными пленочными экранами с разным количеством слоев (см. табл. 1). Система координат, “привязанная” к ФЭУ, показана на рисунке 6.

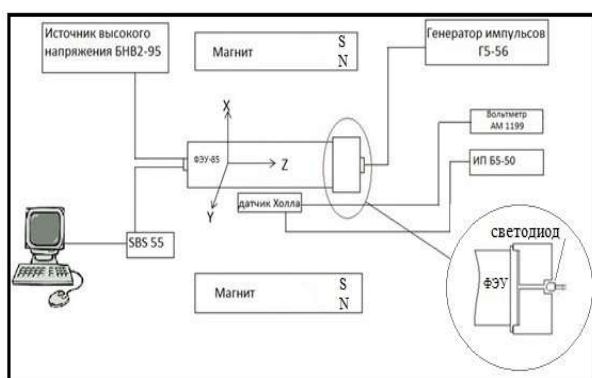


Рис. 5. Схема экспериментальной установки.

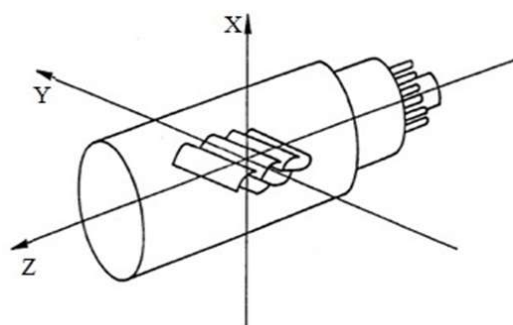


Рис. 6. Система координат, “привязанная” к ФЭУ.

Вначале были проведены измерения по изучению влияния магнитного поля на амплитуду выходного сигнала с ФЭУ-85 при воздействии на него магнитного поля поочередно вдоль трех взаимно перпендикулярных осей ФЭУ (Рис. 6). Измерялась относительная амплитуда выходного сигнала (U/U_0) и амплитудное распределение набранных импульсов с ФЭУ. Где U_0 —амплитуда выходного сигнала ФЭУ от световых вспышек фиксированной амплитудой при отсутствии магнитного поля, U – амплитуда выходного сигнала ФЭУ от вспышек той же амплитуды при различных значениях напряженности постоянного магнитного поля. Результаты измерений значений U/U_0 неэкранированного ФЭУ-85 для

случаев продольной и перпендикулярной ориентации внешнего магнитного поля представлены на рисунке 7.

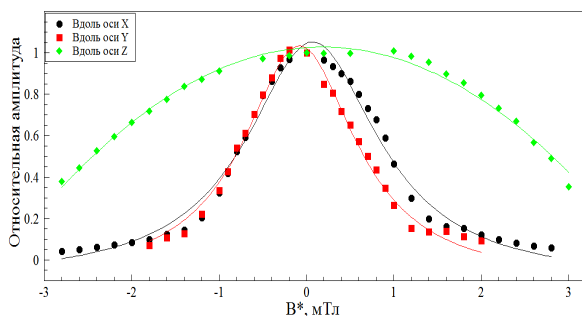


Рис.7. Зависимость относительной амплитуды выходного сигнала незранированного ФЭУ-85 от индукции магнитного поля. (Перпендикулярно оси X- кружок, перпендикулярно оси Y- квадрат и параллельно оси Z- ромб).

В слабых магнитных полях с индукцией $0,1 \div 0,5$ мТл для случаев поперечной и продольной ориентаций падение амплитуды выходного сигнала составило 20% и 1%, соответственно. В магнитных полях величиной $2 \div 3$ мТл падение амплитуды выходного сигнала составило 95% (поперечная) и 60% (продольная ориентация).

Результаты этих измерений подтверждают сильную зависимость коэффициента усиления ФЭУ-85 даже при сравнительно небольших напряженностях магнитного поля, особенно при его ориентации вдоль осей X и Y (перпендикулярно корпусу ФЭУ). Это ещё раз подчеркивает необходимость использования магнитных экранов для обеспечения работоспособности ФЭУ при наличии магнитного поля.

На рисунке 8 представлены обобщенные данные по зависимостям относительных амплитуд выходных сигналов ФЭУ-85 с экранами различных типов от величины индукции магнитного поля. Практически все исследованные образцы МПЭ устраняют отрицательное влияние магнитного поля в области значений до 0,5 мТл на выходные характеристики ФЭУ-85. Снижение $U_{вых}$ составляет менее $1 \div 2\%$. Для магнитных полей в интервале значений $2 \div 4$ мТл в зависимости от типа МПЭ, снижение $U_{вых}$ составило $10 \div 40\%$. Наилучший эффект экранирования достигнут на образце № 5, для которого падение амплитуды выходного сигнала ФЭУ в поле 2 мТл не превысило 10%.

Экран, изготовленный из пермаллоя, не обеспечил достаточно надежную защиту ФЭУ. Для него снижение $U_{вых}$ в магнитном поле

величиной $0,1 \div 0,5$ мТл, ориентированном перпендикулярно оси Z, составило $5 \div 10\%$, а в магнитном поле величиной $2 \div 3$ мТл – $50-80\%$.

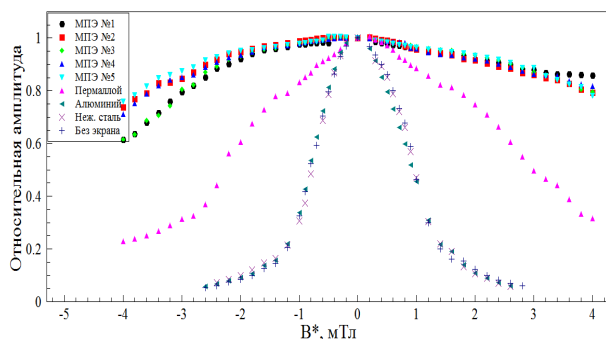


Рис.8. Относительная амплитуда выходного сигнала ФЭУ-85 для различных видов экранов в зависимости от индукции внешнего магнитного поля V^ при направлении магнитного поля перпендикулярно корпусу экрана.*

Оценка эффекта экранирования на выходные характеристики ФЭУ-85 проводилась также с помощью измерений амплитудных распределений импульсов с ФЭУ. На рисунке 9 представлены зависимости амплитудного разрешения импульсов ($D = \Delta A / A_{max}$) от индукции магнитного поля для ФЭУ-85 с различными магнитными экранами.

A – значение выходного сигнала ФЭУ в максимуме амплитудного распределения,

ΔA – полная ширина пика амплитудного распределения на полувысоте.

Из приведенных данных видно, что для неэкранированного ФЭУ-85 величина D ухудшается на 20% в магнитных полях с индукцией до 1 мТл и в 2,5 - 3 раза при увеличении индукции от 1 до 2,5 мТл. Амплитудное распределение импульсов с ФЭУ-85 с экраном из пермаллоя практически не изменяется вплоть до значения индукции магнитного поля 2,5 мТл. Однако с увеличением индукции магнитного поля от 2,5 до 4 мТл амплитудное разрешение ухудшается в 2,5 раза. На ФЭУ-85, экранированные с помощью МПЭ, магнитное поле оказывает значительно меньшее влияние. В области магнитных полей с индукцией от 0,2 до 4 мТл значения D для МПЭ №1 - №4 незначительно изменяются от 1,1% до 1,3%. Для МПЭ №5 амплитудное распределение с ФЭУ-85, практически, не изменяется в полях до 4 мТл.

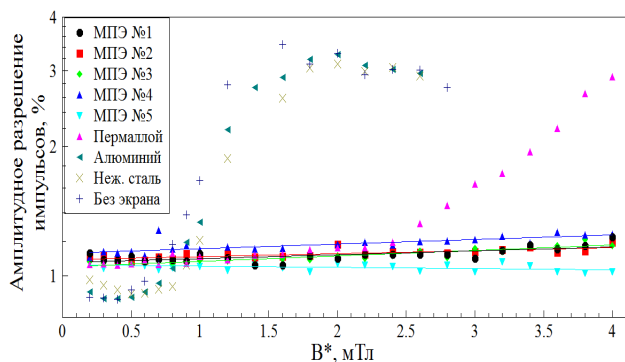


Рис.9. Зависимость амплитудного разрешения импульсов от индукции магнитного поля B^* для ФЭУ-85 без экрана и с экранами из пермаллоя и МПЭ № 1 - № 5 при направлении магнитного поля перпендикулярно корпусу экрана.

Сравнение экспериментальных результатов по исследованию эффективности экранирования постоянных магнитных полей на основе МПЭ и пермаллоя представлено в таблице 2.

Таблица 2. Эффективность экранирования ФЭУ-85 различными типами экранов.

Тип экрана	Уменьшение амплитуды сигнала ФЭУ в магнитном поле, %		Ухудшение энергетического разрешения ФЭУ в магнитном поле, %	
	0,5 мТл, (5 Гс,)	3 мТл. (30 Гс)	0,5 мТл, (5 Гс,)	3 мТл. (30 Гс)
Без экрана	20 ± 1	95 ± 5	менее 1%	210 ± 10
Экран из алюминия	20 ± 1	95 ± 5	менее 1%	230 ± 10
Экран из нерж. стали	20 ± 1	95 ± 5	менее 1%	220 ± 10
Экран из пермаллоя	10 ± 0.5	95 ± 5	менее 1%	63 ± 3
МПЭ №1	менее 1%	39 ± 2	менее 1%	13 ± 0,5
МПЭ №2	менее 1%	36 ± 2	менее 1%	11 ± 0,5
МПЭ №3	менее 1%	38 ± 2	менее 1%	9 ± 0,5
МПЭ №4	менее 1%	34 ± 2	менее 1%	6 ± 0,3
МПЭ №5	менее 1%	33 ± 2	менее 1%	менее 1%

В пятой главе приведено описание прототипа сцинтилляционного телескопа заряженных частиц для использования на борту космического аппарата и результаты его лабораторных испытаний.

Для оценки перспективности использования МПЭ в космической аппаратуре, был разработан и создан прототип сцинтилляционной детекторной системы «Наномаг» с использованием комбинации ФЭУ с

защитными экранами от магнитных полей и без них, предназначенной для работы в космосе. С прибором были проведены испытания в лабораторных условиях.

Прибор представляет собой телескоп из двух сцинтилляционных счетчиков. Общий сцинтиллятор каждого счётчика просматривается четырьмя ФЭУ-85, два из которых защищены магнитными экранами, другие два не защищены (рис. 10). При прохождении заряженной частицы через телескоп, сигналы с пары защищенных ФЭУ-85 каждого счетчика поступают на свои отдельные схемы совпадений. Выходные сигналы (срабатывание схемы совпадений) этих схем далее поступают на схему двойных совпадений, которая и выдает сигнал, свидетельствующий о регистрации заряженной частицы, прошедшей через телескоп в пределах его апертуры каналом, работающим на защищенных экранами ФЭУ. Аналогичным образом работает информационный канал, использующий ФЭУ без магнитных экранов. Темп счета с этих каналов позволяет оценить степень защищенности от воздействия постоянного магнитного поля информационного канала, использующего ФЭУ с МПЭ, по сравнению с каналом, в котором ФЭУ не имеют экранов.

В качестве электромагнитных экранов ФЭУ-85 использовался экран МПЭ №5, который продемонстрировал наилучшую эффективность экранирования постоянного магнитного поля во время проведения их испытаний.

В состав прототипа научной аппаратуры (НА) «Наномаг» входят:

- сцинтилляционная детекторная система (СДС);
- электронная система регистрации событий (ЭСРС);
- система электропитания (СЭП);
- система измерения магнитного поля (СИМП);
- блок команд (БК);



Рис.1.: Сцинтилляционный детектор системы «Наномаг». 1- ФЭУ-85 с МПЭ, 2- ФЭУ-85 без экрана

Телескоп «Наномаг» предназначен для регистрации заряженных частиц космического излучения в околоземном космическом пространстве, включая отроги радиационного пояса Земли с целью изучения корреляций между всплесками заряженных частиц, высыпающихся из радиационного пояса Земли и землетрясениями.

Конструктивно протип сцинтилляционной детекторной системы выполнен в виде моноблока, представленного на рисунке 11. Габаритные размеры детекторной системы определяются компоновкой его блоков и элементов и составляют величину $470 \times 258 \times 164 \text{ мм}^3$. Поле зрения телескопа «Наномаг» составляет 120 градусов. Масса НА 8,5 кг.



Рис 11. Общий вид и поблочная компоновка макета сцинтилляционной детекторной системы со снятым кожухом.

Во время наземных испытаний контролировались темп счета и амплитудные спектры для 2-х информационных каналов телескопа НА «Наномаг», использующих сигналы с защищенных и не защищенных

магнитными экранами ФЭУ, а также индукция магнитного поля, которые выводились на экран монитора с помощью программы «Nanomag.exe», входящей в состав контрольно измерительной аппаратуры (КИА) (Рис.12)

Влияние постоянного магнитного поля на амплитуду выходного сигнала отдельного ФЭУ с экраном и без него приведено на рис. 13. Из этих данных видно, что при приведенном на рисунке пороге срабатывания схемы совпадений на сигнал, поступающий на неё с ФЭУ, она не срабатывает при напряженностях выше 1,5 мТл. В результате этого информационный канал, защищенный МПЭ, сохраняет работоспособность в магнитных полях с индукцией до ± 4 мТл (± 40 Гс) практически без ухудшения своих характеристик, в то время как информационный канал, не защищенный магнитными экранами, перестает работать в магнитных полях с индукцией выше $\pm 1,5$ мТл (± 15 Гс).

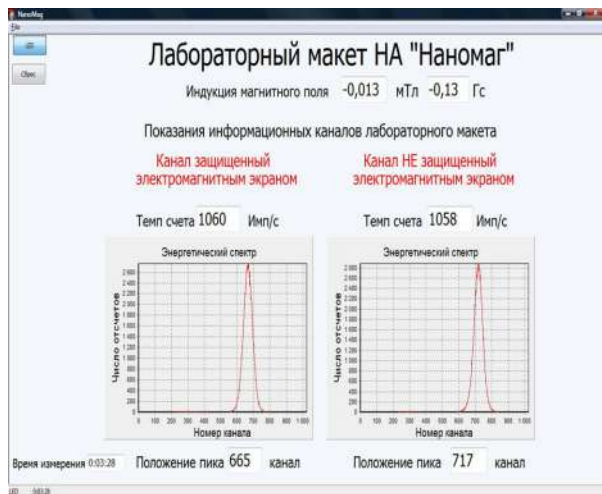


Рис. 12. Рабочее окно программы «Nanomag».

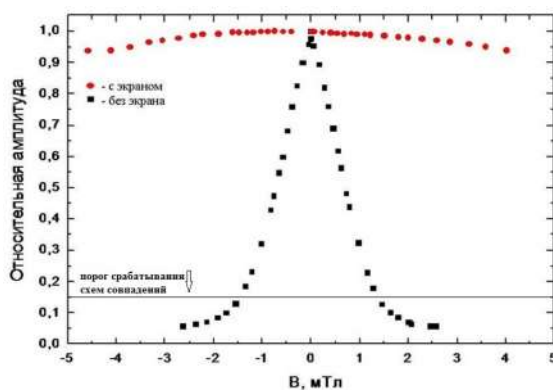


Рис. 13. Зависимость относительной амплитуды импульса ФЭУ от индукции магнитного поля для защищенного (вверху) и не защищенного (внизу) информационных каналов НА «Наномэг».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Впервые разработаны и созданы многослойные пленочные экраны методом электролитического осаждения для защиты ФЭУ от воздействия постоянных магнитных полей. Экраны имели до 45

чередующихся слоев с высокой магнитной проницаемостью (Ni-Fe) и слоев с высокой электропроводимостью (Cu). Общая толщина магнитомягкого материала составляла 450 мкм в каждом экране.

2. Разработана и собрана экспериментальная установка с использованием катушек Гельмгольца и датчиков Холла для исследования эффективности экранирования постоянного магнитного поля многослойными пленочными экранами.

3. Впервые исследована зависимость коэффициента экранирования МПЭ от количества слоев и напряженности магнитного поля. Показано, что коэффициент экранирования МПЭ в 3-5 раз превосходит экранирующую способность многослойного пермаллового экрана с эквивалентной толщиной магнитомягкого материала (500 мкм), для поля, направленного перпендикулярно и вдоль оси цилиндрического экрана. Наилучшую эффективность экранирования показал экран №5, имеющий наибольшее количество слоев (45 чередующихся слоёв).

4. МПЭ №5 в 1,5-10 раз (в зависимости от напряженности магнитного поля) лучше экранирует постоянное магнитное поле, направленное перпендикулярно, чем магнитное поле, направленное вдоль оси цилиндрического экрана.

5. Проведены эксперименты по изучению влияния постоянного магнитного поля с индукцией до 4 мТл на работу ФЭУ-85, экранированного МПЭ №1-№5. Смещение пика сигнала ФЭУ составило менее 1% в малых магнитных полях до 0.5 мТл и 33-39% для полей до 4 мТл для этих экранов. Амплитудное разрешение у них ухудшилось менее чем на 1% в слабых полях до 0.5 мТл, а в магнитных полях до 4 мТл ухудшение составило от 1 до 13%.

6. МПЭ №1-№5 позволяют успешно защитить ФЭУ от постоянных магнитных полей с напряженностью до 2 мТл, что может быть использовано как в наземных установках (современные ускорительные эксперименты, ядерная медицина и т. п.), так в бортовой аппаратуре космических аппаратов.

7. Результаты исследования экранирующих свойств МПЭ в составе

прототипа сцинтилляционного телескопа НА «Наномаг» показали что, они практически полностью устраняют влияние магнитного поля на работу телескопа НА «Наномаг» в магнитных полях с индукцией до ± 4 мТл (± 40 Гс), в то время как информационный канал, не защищенный магнитными экранами, перестает работать в магнитных полях с индукцией более $\pm 1,5$ мТл (± 15 Гс).

Список цитированных работ:

1. Грабчиков С.С., Капралова Е.В., Экраны для постоянных магнитных полей на основе электролитически осажденных многослойных пленок, АЦ-34, НПЦ НАН Беларуси по материаловедению.
2. Rucker A. W., Phil. Mag. **37**, 95 (1894).
3. Esmarch W., Annalender Physik (Leipzig) **39**, 1540 (1912).
4. Esmarch W., Annalender Physik (Leipzig) **39**, 1553 (1912).
5. Gusber D.U., Wolf S.A. and Cox J.E., Rev. Sci. Instrum. **50**, 751 (1979).
6. A. Mager, IEEE Trans. Magn. **6**, 67 (1970).
7. T.J. Summner, J.N. Pendlebury and K.F. Smith, J. Phys. D: Appl. Phys. **20**, 1095 (1987).
8. E. Paperno, H. Koide and I. Sasada, J. Phys. D: Appl. Phys. **87**(9), 5959 (2000).
9. E. Paperno, J. Phys. D: Appl. Phys. **97**, 10Q104 (2005).
10. I. Sasada, T. Yamamoto, and T. Yamauchi, J. Phys. D: Appl. Phys. **79** (8), 5490 (1996).
11. I. Sasada, E. Paperno, and H. Koide, J. Phys. D: Appl. Phys. **87** (9), (2000).
12. D.D.L. Chung, J. Mater. Eng. Perform., **9**, 350 (2000).
13. Ильюшенко Л.Ф., Шелег М.У., Болтушкин А.В., Электролитические осажденные магнитные пленки. Минск,: наука и техника, 1979, 280с.
14. Грабчиков С.С., Сосновская Л.Б., Шарапа Т.Е. Многослойный электромагнитный экран// Патент РБ № 11843 от 2009.01.28.

15. Дмитренко В.В., Батищев А.Г., Грабчиков С.С., и др. Многослойный экран для защиты фотоэлектронных умножителей и способ его нанесения. Патент на изобретение, РФ, № 2474890 от 10.02.2013г.
16. Гальванотехника. Справочник под ред. А.М Гинберга, М.: Металлургия, 1987. 736с.
17. Шматко О.А., Усов Ю.В. Структура и свойства металлов и сплавов. Справочник. Киев. «Наукова думка», 1987, 280с.
18. Шапиро Д. Л. Основы теории электромагнитного экранирования. Л., «Энергия», 1975.

Результаты диссертации опубликованны в следующих работах:

1. Батищев А.Г., Власик К.Ф., Грабчиков С.С., Грачев В.М., Дмитренко В.В., Калашников Н.П., Муравьев-Смирнов С.С., Ньюнт П.В., Улин С.Е., Утешев З.М., Челедюк А.В. “Фотоэлектронные умножители с многослойными пленочными экранами для защиты от воздействия внешних постоянных магнитных полей”, Приборы и методы измерений. Минск, БНТУ, № 1 (4), стр. 16-23, 2012.

2. Дмитренко В.В., Грабчиков С.С., Власик К.Ф., Утешев З.М., Грачев В.М., Улин С.Е., Муравьев–Смирнов С.Е., Новиков А.С., Шустов А.Е., Пью Вэй Ньюнт, Челедюк А.В. “Электромагнитные экраны на основе нанопокровов для ядерно-физической аппаратуры”, // Тезисы докладов Международной сессии-конференции Секции ядерной физики ОФН РАН «Физика фундаментальных взаимодействий», Москва, 12-16 ноября 2012 г, Изд. НИЯУ МИФИ, с. 56-57, 2012.

3. Ньюнт В.Н., Власик К.Ф., Грачев В.М., Дмитренко В.В., Новиков А.С., Улин С.Е., Утешев З.М., Чернышева И.В., Шустов А.Е. “Многослойные электромагнитные экраны для космической аппаратуры”, // Тезисы докладов научной сессии НИЯУ МИФИ 2014, Актуальные проблемы физики ядра, частиц, астрофизики и космологии, том I, стр. 56.

4. Ньюнт П.В., Власик К.Ф., Грабчиков С.С., Грачев В.М., Дмитренко В.В., Новиков А.С., Муравьев-Смирнов С.С., Улин С.Е., Утешев

З.М., Чернышева И.В., Шустов А.Е. “Экранирующие свойства многослойных магнитных цилиндрических экранов”, //Тезисы докладов III международной молодежной научной школа-конференции МИФИ 2014, Современные проблемы физики и технологий, стр. 37.

5. С.С. Муравьев-Смирнов, К.Ф. Власик, С.С. Грабчиков, В.М. Грачев, В.В. Дмитренко, Н.П. Калашников, П.В. Ньюнт, С.Е. Улин, З.М. Утешев. “Магнитные свойства многослойных пленочных экранов при разных ориентациях внешнего магнитного поля”, // Сборник тезисов 48-ого Школы ПИЯФ по физике конденсированного состояния. (ФКС-2014), 10-15 марта 2014 г., Гатчина – 2014. Санкт-Петербург., стр.118.

6. V. V. Dmitrenko, Dabid Besson, Phyoo Wai Nyunt, S. S. Grabchikov, V. M. Grachev, C. C. Muraviev-Smirnov, S. E. Ulin, Z. M. Uteshev and K. F. Vlasik. “Multilayer Film Shields for the protection of PMT from constant magnetic field”, Rev. Sci. Instrum. 86, 013903-1 - 013903-3, 2015, doi: 10.1063/1.4904873.

7. П.В. Ньюнт, К.Ф. Власик, В.М. Грачев, В.В. Дмитренко, А.С. Новиков, С.Е.Улин, З.М. Утешев, И.В. Чернышева, А.Е. Шустов. “Перспективы использования многослойных пленочных экранов в аппаратуре для космических исследований”, // Тезисы докладов научной сессии НИЯУ МИФИ 2015, Актуальные проблемы физики ядра, частиц, астрофизики и космологии, том I, стр. 61.

8. V.V. Dmitrenko, Phyoo Wai Nyunt, K.F.Vlasik, V.M. Grachev, S.S. Grabchikov, S.S. Muravyev-Smirnov, A.S. Novikov, S.E. Ulin, Z.M. Uteshev, I.V. Chernysheva and A.Y. Shustov, “Electromagnetic Shields Based on Multilayer Film Structures”, Bulletin of the Lebedev Physics Institute, vol 42, № 2, 2, pp 43 – 47, 2015, doi: 10.3103/S1068335615020037.

9. V.V. Dmitrenko, Phyoo Wai Nyunt, K.F.Vlasik, V.M. Grachev, S.S. Grabchikov, S.S. Muravyev-Smirnov, A.S. Novikov, D.V. Petrenko, S.E. Ulin, Z.M. Uteshev, I.V. Chernysheva and A.Y. Shustov, “Application prospects of multilayer film shields for space equipment protection against constant magnetic fields”, Bulletin of the Lebedev Physics Institute, vol 42, № 5, pp 148 – 151, 2015.