

МНОГОСЛОЙНЫЕ МАГНИТНЫЕ ЭКРАНЫ НА ОСНОВЕ ПЛЕНОЧНЫХ НАНОСТРУКТУР *

С.С. Муравьев-Смирнов, А.Г. Батищев, К.Ф. Власик,
С.С. Грабчиков, В.М. Грачев, В.В. Дмитренко, Е.Е. Земсков,
Н.П. Калашников, С.Е. Улин, З.М. Утешев, В.Ф. Федоров

Представлены результаты исследований эффективности экранирования при использовании магнитных экранов цилиндрической конфигурации на основе многослойных пленочных наноструктур NiFe/Cu. При проведении испытаний экран помещали в однородное магнитное поле, создаваемое с помощью катушек Гельмгольца. Индукцию магнитного поля в зависимости от расстояния до центра экрана измеряли с помощью датчиков Холла в направлении, перпендикулярном к оси цилиндрического экрана. Показано, что магнитные экраны на основе многослойных пленочных структур обладают эффективностью экранирования в 2 – 3 раза большей, чем экран на основе пермаллоя сопоставимой толщины. Представлена установка для исследования эффективности магнитного экранирования. Разработана методика исследования эффективности экранирования многослойных пленочных экранов в условиях учебной лаборатории.

Ключевые слова: многослойные пленочные наноструктуры, магнитное экранирование, катушки Гельмгольца, датчик Холла.

Введение

Проблема надежной защиты сложных изделий электронной техники от внешних постоянных магнитных полей и требования по соблюдению условий магнитной совместимости различных приборов определяют актуальность разработки новых материалов и технологий для создания магнитных экранов. Перспективными для этих целей являются магнитные пленки NiFe и многослойные структуры на их основе. В связи с этим исследования магнитных свойств указанных материалов заслуживают особого внимания.

Многослойные образцы представляли собой алюминиевые трубки диаметром 4 см и длиной 13 см с толщиной стенки 0,15 см (рис. 1), на которые методом электролитического осаждения [1, 2] были нанесены чередующиеся слои NiFe и Cu. Толщина ферромагнитных слоев варьировалась от 10 до 150 мкм, а толщина слоев Cu составляла 5 мкм. В эксперименте были испытаны пять образцов, в которых коли-

чество магнитных слоев изменялось от 3 до 45, а медных – от 2 до 44. Кроме того, были проведены исследования экранов из пермаллоевой фольги (два слоя толщиной по 0,25 мм каждый) и экранов в виде алюминиевых цилиндрических трубок без какого-либо покрытия.

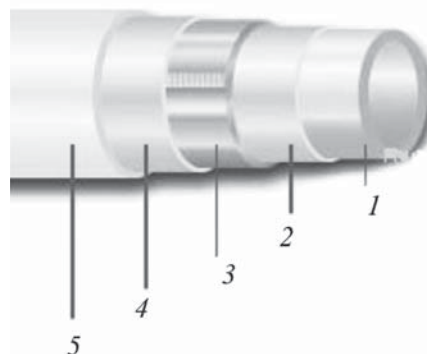


Рис. 1. Схема многослойного пленочного экрана:
1 – алюминиевая трубка; 2, 4 – магнитные
слои; 3, 5 – медные слои

* Работа выполнена в рамках договора между НИЯУ МИФИ и НИИ КС им. А.А. Максимова – филиала ФГУП «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева», реализующего программу Союзного государства: «Разработка нанотехнологий создания материалов, устройств и систем космической техники и их адаптация к другим отраслям техники и массовому производству» («Нанотехнология – СГ») на 2009 – 2012 гг.

Принцип действия цилиндрического экрана, помещенного в однородное магнитное поле, можно объяснить следующим образом. Густота линий индукции внешнего магнитного поля при переходе из среды с магнитной проницаемостью, значительно меньшей проницаемости экрана ($\mu < \mu_{\text{эк}} \gg 1$), в материал экрана заметно увеличивается, а в полости цилиндра уменьшается, т.е. магнитное поле внутри цилиндра оказывается ослабленным [3]. Многослойные пленочные экраны содержат слои материалов с высокой магнитной проницаемостью (материалов на основе поликристаллических сплавов системы FeNi) и слои материалов с высокой удельной электрической проводимостью σ – в данном случае меди. В экранах такого типа линии магнитной индукции дополнительно испытывают многократное преломление на границах раздела сред с различными значениями величин μ и σ .

В работе [4] было показано, что многослойные пленочные экраны должны иметь более высокую эффективность экранирования по сравнению с однослойными экранами сопоставимой толщины, такими как пермалловый экран (36 – 85 % Ni, остальное Fe).

Цель данного эксперимента – исследование эффективности экранирования электромагнитных экранов на основе многослойных пленочных структур в однородном магнитном поле. Для исследования использовали многослойные пленочные экраны, разработанные в Научно-практическом центре по материаловедению НАН Беларуси. Характеристики этих экранов представлены в таблице.

Методика измерений и описание экспериментальной установки

Для исследования эффективности экранирования необходимо знать магнитную индукцию поля внутри магнитного экрана и снаружи. Исследуемый экран помещали в центр катушки

Гельмгольца в пределах однородного магнитного поля. При этом вектор магнитного поля был направлен перпендикулярно к оси экрана. Датчики Холла были механически связаны между собой, причем один из них находился внутри экрана, а второй – снаружи, на расстоянии 5 мм от стенки экрана. Это позволяло одновременно перемещать датчики вдоль оси экрана, исследуя поведение магнитного поля как снаружи экрана, так и внутри него. Изначально датчики Холла помещали на расстоянии $R = 6,5$ см от торцевой поверхности экрана. Это положение датчиков принято за начальную точку отсчета, с которой начинали проводить измерения индукции магнитного поля. Показания датчиков снимали вдоль оси в направлении от начальной точки с шагом 1 – 2 см, причем в области резкого изменения поля шаг уменьшали до 0,5 см. Измерения индукции магнитного поля проводили в пределах 0 – 2,5 мТл с шагом порядка 0,1 мТл для каждой точки измерений.

На рис. 2 показана экспериментальная установка, собранная на базе оборудования фирмы RHYWE (Германия), а на рис. 3 приведена структурная схема этой установки. Система колец Гельмгольца представляет собой две соосно расположенные одинаковые катушки, расстояние между центрами которых приблизительно равно их среднему радиусу. В состав экспериментальной установки входят две катушки, имеющие радиус 200 мм и число витков 154, два цифровых тесламетра, мультиметр, два датчика Холла (входят в комплект тесламетра), универсальный блок питания, лабораторный штатив и соединительные провода.

Результаты работы

В ходе эксперимента были получены данные для семи различных экранов, исходя из которых можно судить об эффективности экранирования каждого из них. На представленных

Характеристики экранов

Экран	Толщина слоя, мкм		Число слоев	
	магнитного	медного	магнитных	медных
№ 1	150	5	3	2
№ 2	90		5	4
№ 3	45		10	9
№ 4	22,5		20	19
№ 5	10		45	44

ниже графиках зависимостей приняты следующие обозначения: B_1 , B_2 – индукции магнитного поля снаружи экрана на расстоянии 5 мм от его боковой поверхности и внутри него (в точках вдоль оси экрана); B – индукция однородного магнитного поля, создаваемого катушками Гельмгольца вдоль оси при отсутствии экрана. На рис. 4–7 вертикальная линия обозначает границу экрана.

На рис. 4–6 показаны зависимости индукции магнитного поля от расстояния до начальной точки отсчета для экранов различных типов при силе тока 3,5 А в катушках Гельмгольца. Причем для экрана № 5 и экрана из пермалллевой фольги приведены данные измерений и на больших расстояниях от торцевой поверхности экрана. Погрешности измерений лежат в пределах экспериментальных точек.

При исследовании алюминиевой трубки

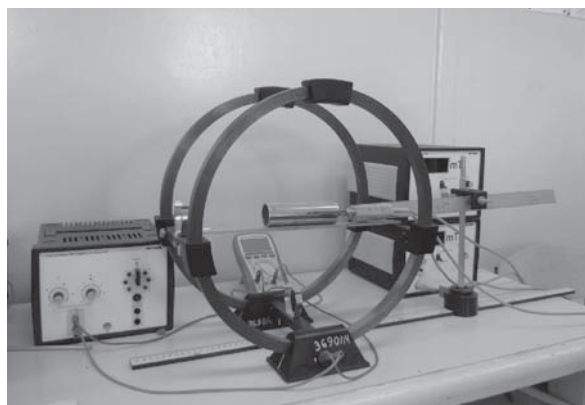


Рис. 2. Установка для исследования эффективности экранирования магнитных экранов различных типов

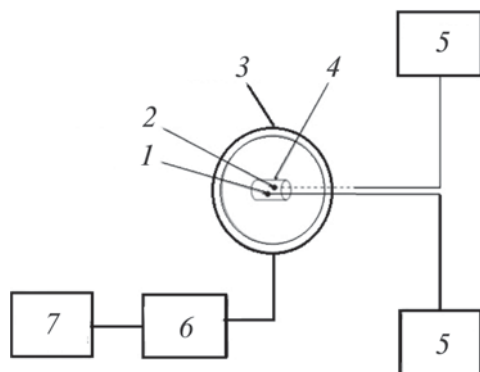


Рис. 3. Структурная схема экспериментальной установки:

1, 2 – датчики Холла; 3 – катушка Гельмгольца; 4 – экран; 5 – тесламетр (мТл);
6 – мультиметр (А);
7 – источник постоянного напряжения

с толщиной стенки 1,5 мм, на которую электрохимическим способом осаждались чередующиеся слои NiFe и Cu, установили, что трубка из алюминия ($\mu=1$) не экранирует внешнее магнитное поле, что и следовало ожидать.

Для сравнения эффективностей экранирования многослойных пленочных экранов и традиционных экранов проводили исследования эффекта ослабления магнитного поля цилиндрическим экраном из пермалллевой фольги (см. рис. 6).

Из рис. 7 видно, что эффективность экранирования магнитного поля (с индукцией 2,4 мТл), вектор которого направлен перпендикулярно к оси цилиндрического экрана, высокая. Экранирование ослабевает вблизи торцевой поверхности экрана и сохраняется за его границами еще до расстояния 10 см от центра экрана.

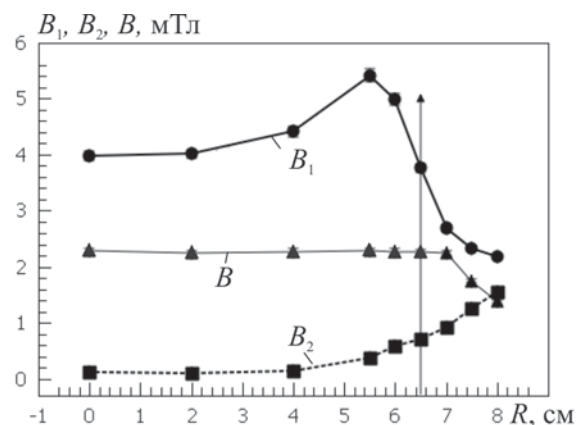


Рис. 4. Зависимость индукций B_1 , B_2 , B постоянного магнитного поля от расстояния R до начальной точки отсчета для экрана № 1

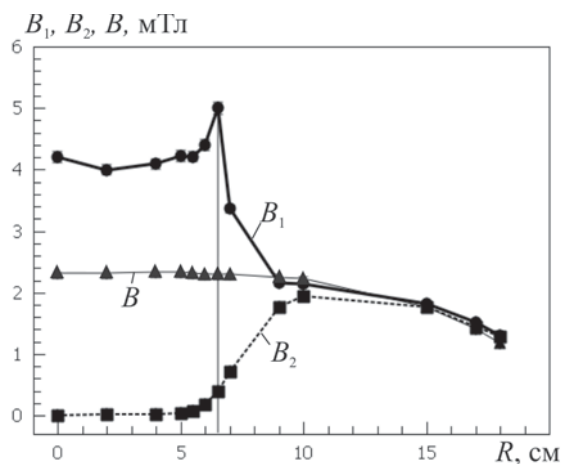


Рис. 5. Зависимость индукций B_1 , B_2 , B постоянного магнитного поля от расстояния R до начальной точки отсчета для экрана № 5

Следует отметить, что минимальная регистрируемая датчиками Холла индукция (0,02 мТл) позволила измерить только верхний предел индукции магнитного поля внутри цилиндрического экрана и, следовательно, реальная величина экранирования может быть выше полученной ($B/B_2 \approx 100$).

Для сравнения на рис. 8 представлена зависимость эффективности экранирования различных многослойных пленочных экранов, экрана из пермаллоя и «экрана» в виде трубки из алюминия в точке, находящейся в центре магнитного экрана, от индукции внешнего магнитного поля. Из приведенных зависимостей видно, что наилучшую эффективность экранирования имеет многослойный экран № 5, состоящий из наибольшего числа очень тонких чередующихся магнитных и немагнитных слоев.

Эффективность экранирования магнитного поля экрана из пермаллоя составляет около 5, что примерно в 2 – 3 раза ниже, чем многослойного экрана № 1 с наихудшими экранирующими свойствами, и в 100 раз ниже, чем экрана № 5 с наилучшими экранирующими свойствами.

Заключение

Магнитные экраны на основе многослойных пленочных структур имеют эффективность экранирования постоянных магнитных полей в направлении, перпендикулярном к экрану, в 2 – 3 раза выше, чем сравнимые по толщине

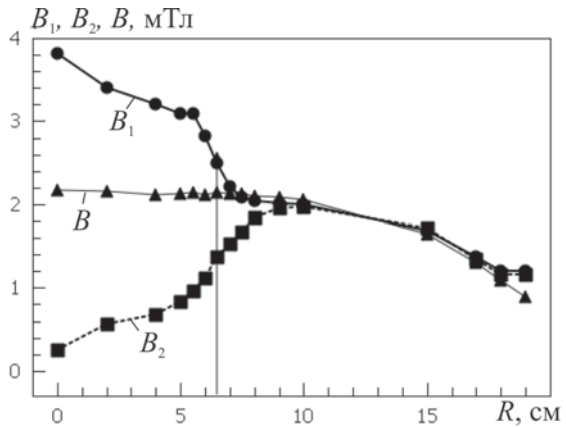


Рис. 6. Зависимость индукций B_1 , B_2 , B от расстояния R до экрана из пермаллоя

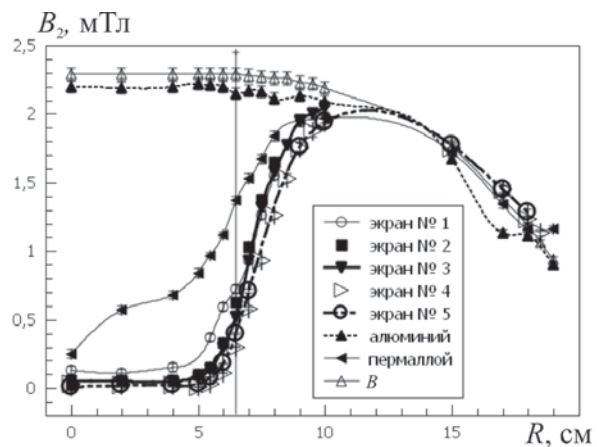


Рис. 7. Зависимость индукции B_2 постоянного магнитного поля внутри экранов различных типов от расстояния R до начальной точки отсчета

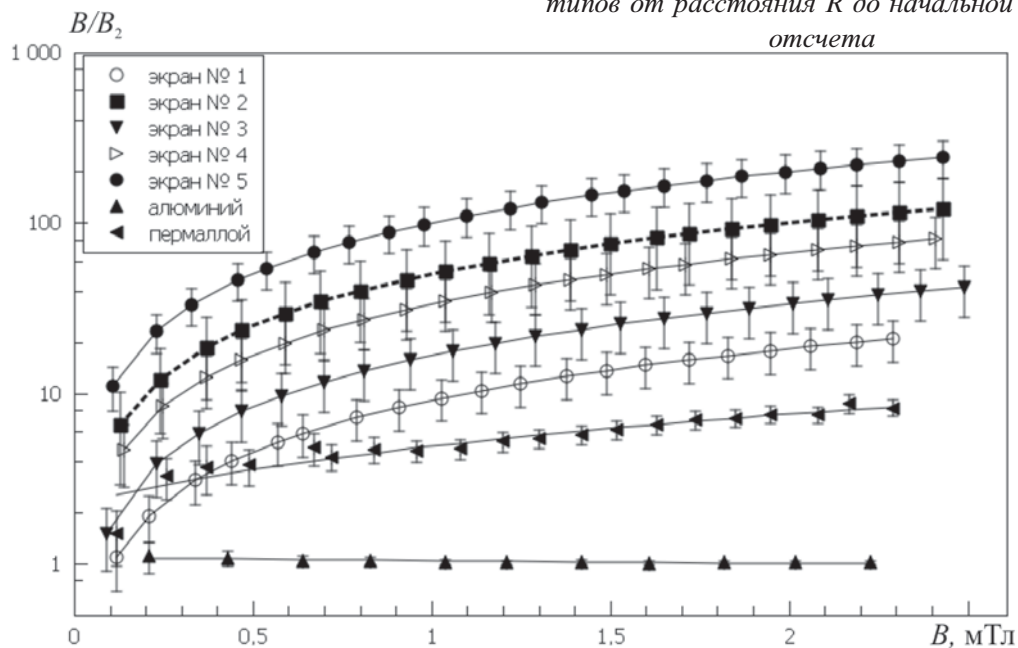


Рис. 8. Зависимость эффективности экранирования постоянного магнитного поля в начальной точке отсчета, расположенной в центре экранов различных типов, от индукции B

экраны из пермаллоя, широко используемые в промышленности. Максимальная эффективность экранирования составляла $B/B_2 = 100$.

Проведенные исследования позволили создать новую учебную лабораторную работу с использованием оборудования фирмы RNYWE (Германия) для изучения эффективности экранирования экранов различных типов, в том числе созданных с помощью современных нанотехнологий.

Полученные научные результаты могут быть воспроизведены на стандартном оборудовании учебных лабораторий вузов, что позволит ознакомить студентов с методом магнитной защиты, а также с магнитными свойствами современных многослойных пленочных наноструктур.

Список литературы

1. Федосюк В.М. Многослойные магнитные структуры. Минск: БГУ, 2000. – 197 с.
2. Точицкий Т.А., Федосюк В.М. Электролитически осажденные наноструктуры. Минск: БГУ, 2002. – 353 с.
3. Шапиро Д.Л. Основы теории электромагнитного экранирования. Л.: Энергия, 1975. – 112 с.
4. Грабчиков С.С.; Капранова Е.В.. Экраны для постоянных магнитных полей на основе электролитически осажденных многослойных пленок: сб. тр. XXI Междунар. конф. «Новое в магнетизме и магнитных материалах». М.: МГУ, 2009. С. 138–139.

Материал поступил в редакцию 05.10.2011

МУРАВЬЕВ-СМИРНОВ Сергей Сергеевич

E-mail: smuraviev@list.ru
Тел. +7 (495) 323-90-38

Ассистент кафедры общей физики НИЯУ «МИФИ». Сфера научных интересов – конструирование гамма-спектрометров, многомерная гравитация, физика магнитных явлений. Автор 9 научных работ.

БАТИЩЕВ Алексей Григорьевич

E-mail: Alexey-Batischev@mail.ru
Тел. +7 (495) 323-92-81

Ведущий инженер института Космофизики НИЯУ «МИФИ». Сфера научных интересов – аппаратура для регистрации потоков частиц в околоземном космическом пространстве, многопроцессорные спутниковые системы сбора и обработки информации. Автор более 50 научных работ.

ВЛАСИК Константин Федорович

E-mail: KFVlasik@mephi.ru
Тел. +7 (495) 323-92-56

Кандидат физико-математических наук, доцент кафедры экспериментальной ядерной физики и космофизики НИЯУ «МИФИ». Сфера научных интересов – разработка и конструирование новых гамма-спектрометров. Автор более 90 научных работ.

ГРАБЧИКОВ Сергей Степанович

E-mail: gss@ifftp.bas-net.by
Тел. 8-10-375-17-284-11-28

Доктор физико-математических наук, Главный научный сотрудник ГО «Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению». Сфера научных интересов – электролитически осажденные пленки и покрытия, магнитомягкие материалы. Автор 130 научных работ.

ГРАЧЕВ Виктор Михайлович

E-mail: VMGrachev@mephi.ru
Тел. +7 (495) 324-65-89

Кандидат физико-математических наук, доцент кафедры экспериментальной ядерной физики и космофизики НИЯУ «МИФИ». Сфера научных интересов – ядерная электроника, космическое гамма-излучение. Автор 180 научных работ.

ДМИТРЕНКО Валерий Васильевич

E-mail: VVDmitrenko@mephi.ru
Тел. +7 (495) 324-65-89

Доктор физико-математических наук, профессор, действительный член Российской академии космонавтики им. К.Э. Циолковского, заведующий кафедрой экспериментальной ядерной физики и космофизики НИЯУ «МИФИ». Ведущий ученый в области развития методов гамма-спектрометрии, один из создателей гамма-спектрометра на сжатом ксеноне. Сфера научных интересов – физика космических лучей, методика физических экспериментов в космосе. Автор более 250 научных работ.

**ЗЕМСКОВ
Евгений Евгеньевич**

E-mail: suffice@rambler.ru
Тел. +7 (495) 323-90-38

Инженер кафедры общей физики НИЯУ «МИФИ». Сфера научных интересов – компьютерное моделирование физических процессов.

**КАЛАШНИКОВ
Николай Павлович**

E-mail: kalash@mephi.ru
Тел. +7 (495) 324-34-14

Доктор физико-математических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, действительный член Международной академии наук высшей школы (МАН ВШ), Академии транспорта России, Общеобразовательной академии знаний, ведущий кафедрой общей физики Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» (НИЯУ «МИФИ»). Сфера научных интересов – ядерная физика, взаимодействие быстрых заряженных частиц с веществом, физика твердого тела в экстремальных состояниях и организация образовательного процесса в вузах. Автор более 280 научных трудов, 14 монографий, 10 авторских свидетельств и открытия, более 27 учебных пособий. Читал специальные курсы лекций по ядерной физике и физике твердого тела в университетах Италии, Египта, Югославии, Дании, Испании.

**УЛИН
Сергей Евгеньевич**

E-mail: seulin@gmail.com
Тел. +7 (495) 324-65-89

Доктор физико-математических наук, профессор кафедры экспериментальной ядерной физики и космофизики НИЯУ «МИФИ». Сфера научных интересов – гамма-спектрометрия, космофизика, физика солнца. Автор более 180 научных работ.

**УТЕШЕВ
Зияэтдин
Мухамедович**

E-mail: ZMUTEShev@mephi.ru
Тел. +7 (495) 323-92-56

Кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник кафедры экспериментальной ядерной физики и космофизики НИЯУ «МИФИ». Сфера научных интересов – ядерная спектроскопия. Автор более 110 научных работ.

**ФЕДОРОВ
Виталий Федорович**

E-mail: fvf48@yandex.ru
Тел. +7 (495) 323-90-38

Доктор физико-математических наук, профессор кафедры общей физики НИЯУ «МИФИ». Сфера научных интересов – электромагнитные явления, физика плазмы. Автор более 150 научных работ.

Уважаемые читатели!

*Журнал «Машиностроение и инженерное образование»
входит в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов
и изданий, в которых публикуются основные научные
результаты диссертаций на соискание ученых степеней
доктора и кандидата наук.*