

УДК 53.082.78;669.018

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЭКРАНЫ НА ОСНОВЕ МНОГОСЛОЙНЫХ ПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУР

В. В. Дмитренко<sup>1</sup>, П. В. Ньюнт<sup>1</sup>, К. Ф. Власик<sup>1</sup>, В. М. Грачев<sup>1</sup>,  
С. С. Грабчиков<sup>2</sup>, С. С. Муравьев-Смирнов<sup>1</sup>, А. С. Новиков<sup>1</sup>, С. Е. Улин<sup>1</sup>,  
З. М. Утешев<sup>1</sup>, И. В. Чернышева<sup>1</sup>, А. Е. Шустов<sup>1</sup>

*Электроосажденные многослойные пленочные электромагнитные экраны являются очень перспективными для защиты различных устройств, так как они имеют высокую эффективность экранирования и могут наноситься на изделия со сложной конфигурацией. В данной работе представлены результаты измерений эффективности экранирования такими экранами. Экраны представляют собой чередующиеся слои из материала с высокой магнитной проницаемостью (Ni-Fe) и высокой электропроводностью – Си. Максимальное количество двойных слоев составляло 45. Показано, что в слабых магнитных полях (0.1–0.2 мТл) эффективность экранирования составляет 8–10, а при напряженностях магнитных полей выше (1.5–2.5 мТл) она достигает 80–100. Показано, что чем больше слоев имеет экран при той же общей толщине магнитомягкого материала, тем больше его коэффициент экранирования. Экран из пермаллоя при том же количестве магнитомягкого материала имеет эффективность в 3–15 раз меньше в зависимости от величины напряженности магнитного поля.*

**Ключевые слова:** многослойные экраны, постоянные магнитные поля, коэффициент экранирования.

<sup>1</sup> Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, 115409 Россия, Москва, Каширское ш., 31; e-mail: VVDmitrenko@gmail.com.

<sup>2</sup> НПЦ НАН Беларуси по материаловедению, 220072 Республика Беларусь, Минск, ул. П. Бровки, 19.

*Введение.* Создание эффективных экранов для защиты от постоянных магнитных полей, а также от переменного электромагнитного излучения является весьма актуальным [1]. Уже давно было показано, что многослойные магнитные экраны гораздо более эффективны, чем экраны монолитной конструкции при одинаковой общей толщине магнитомягкого материала. Однако технологические трудности ограничивали их использование, особенно при сложной конфигурации экранируемого объекта [2]. Представленный в данной работе метод создания многослойных магнитных экранов с помощью технологии электролитического осаждения, существенно упрощает создание экранов и позволяют добиться высокой степени экранирования от постоянных магнитных полей.

Теоретическая и экспериментальная работа над многослойными экранами и их совершенствованием ведется в течение многих лет. В 1895 году Rucker [3] получил решение для коэффициента экранирования в постоянном поперечном магнитном поле для бесконечно длинных многослойных концентрических экранов. В 1912 году Esmarch [4, 5] экспериментально исследовал коэффициент экранирования вдоль оси открыто-закрытых многослойных цилиндрических экранов при направлении магнитного поля перпендикулярно продольной оси цилиндра. Он также изучил зависимость эффективности экранирования от числа слоев, вплоть до 63 слоев. В 1979 году Gubser и др. [6] предложили обобщенную формулу для определения коэффициента экранирования многослойными экранами.

Дальнейшее развитие эти исследования получили в работах Mager [7] и Summner [8], которые предложили методику расчета эффективности экранирования многослойными магнитными экранами. Позже эта методика была усовершенствована Paperno [9, 10]. Экспериментальная реализация многослойных магнитных экранов описана в работах Sasada [11, 12].

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. Представленные в данной работе многослойные магнитные экраны изготовлены с помощью технологии электролитического осаждения, существенно упрощающей создание таких экранов и позволяющей добиться высокой степени экранирования от постоянных магнитных полей и электромагнитного излучения [13, 14]. Данная технология позволяет в едином технологическом цикле формировать многослойные пленочные экраны (МПЭ) (рис. 1), содержащие череду-

ющиеся слои материалов с высокой магнитной проницаемостью и слои материалов с высокой электрической проводимостью. Следует также отметить следующие важные достоинства метода электролитического осаждения: возможность формирования экранов на заданных, локальных участках заготовки, на изделиях сложной геометрической формы или с малыми линейными размерами.

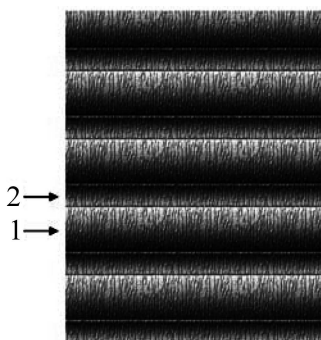


Рис. 1: Структура многослойного пленочного экрана. Слой с высокой: 1 – магнитной проницаемостью; 2 – электрической проводимостью.



Рис. 2: Экспериментальная установка.

*Эксперимент.* Для получения магнитных слоев с высокой магнитной проницаемостью использовались сплавы на основе системы Ni-Fe, содержащие 20–22 ат.% Fe, остальное – никель. Осаждение магнитных слоев проводилось из сульфатных электролитов при плотности катодного тока  $D_c = 20 - 25 \text{ mA/cm}^2$ , температуре электролита  $T = 30 - 35 \text{ }^\circ\text{C}$ , кислотности  $pH = 2.4$ . Анод – никелевый.

Для формирования слоев с высокой удельной электропроводностью использовалась медь. Осаждение слоев меди проводилось из пиррофосфатного электролита при  $D_c = 5 - 7 \text{ мА/см}^2$ ;  $pH = 8.2 - 8.4$ ;  $T = 35 - 40 \text{ }^\circ\text{C}$ . Анод – медный.

На рис. 1 представлено типичное оптическое изображение шлифа МПЭ.

В данной работе приведены результаты исследований эффективности экранирования МПЭ только при работе в постоянных магнитных полях. Учитывая, что во многих экспериментальных физических установках и приборах используются фотоэлектронные умножители (ФЭУ), в качестве основы для создания экрана использовался алюминевый защитный (монтажный) корпус ФЭУ-85. Он имеет цилиндрическую конфигурацию. Его внутренний диаметр – 37 мм, длина – 130 мм, толщина стенки – 1.5 мм. Заметим, что на коэффициент усиления ФЭУ оказывают влияние даже слабые магнитные поля, например, магнитное поле Земли, поэтому во многих случаях приходится прибегать к их экранированию.

Было испытано четыре образца магнитных экранов (см. табл. 1), три из которых имели многослойное пленочное покрытие общей толщиной магнитных слоев 450 мкм, а один имел покрытие из 100 мкм пермаллоевой фольги общей толщиной 500 мкм.

Т а б л и ц а 1

*Характеристики испытываемых образцов экранов*

Образец	Толщина магнитн. слоя, мкм	Число магнитн. слоев	Сумм. толщина магнитн. слоев, мкм	Толщина медного слоя, мкм	Число медных слоев	Сумм. толщина медных слоев, мкм	Общая толщина экрана, мкм
МПЭ № 1	150	3	450	5	2	10	460
МПЭ № 2	45	10	450	5	9	45	495
МПЭ № 3	10	45	450	5	44	220	670
Пермаллой	100	5	500	нет	нет	нет	500

Установка для исследования эффективности экранирования состояла из системы катушек Гельмгольца с радиусом катушек 200 мм и числом витков 154, двух цифровых тесламетров и мультиметра, двух датчиков Холла и универсального блока питания (рис. 2). Датчики Холла были жестко зафиксированы между собой таким образом, что один из них находился в районе продольной оси экрана, другой – на расстоянии 5 мм от наружной поверхности экрана напротив внутреннего датчика. Катушки Гельмгольца

создавали магнитное поле, в которое помещался испытываемый образец экрана. Неоднородность магнитного поля вдоль радиуса катушек на расстоянии 100 мм в обе стороны от центра катушки составляла не более 4–5%, а в направлении, перпендикулярном плоскости катушек, в зоне испытываемого образца ( $L = 130$  мм) – не более 2–3%.

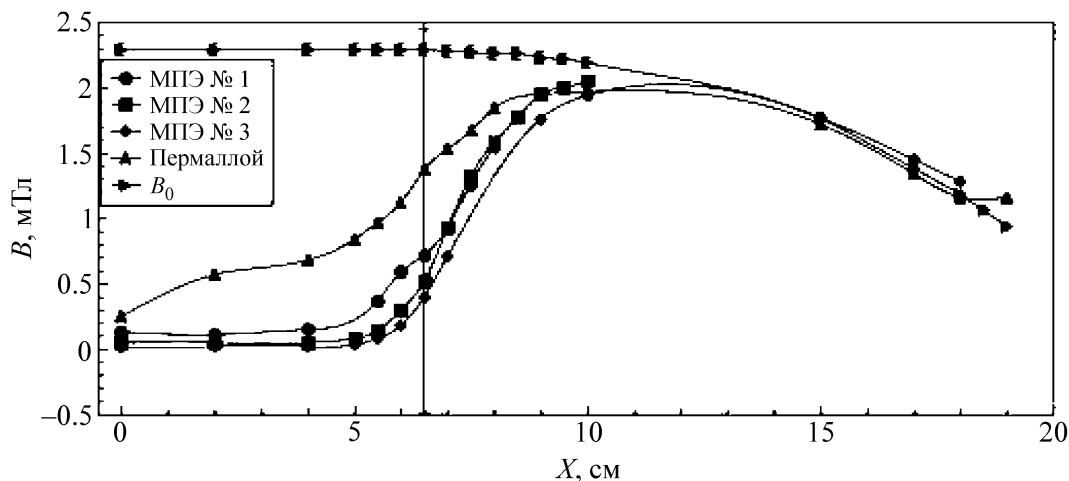


Рис. 3: Распределение индукции магнитного поля вдоль продольной оси различных типов экранов. 0 на горизонтальной оси соответствует середине продольного размера экрана. Вертикальная линия – торец экрана. Магнитное поле катушки ( $B_0$ ) направлено перпендикулярно продольной оси экрана.

Количественная оценка эффективности экранирования ( $K$ ) МПЭ проводилась по результатам измерений отношения магнитных индукций (или напряженностей) постоянного магнитного поля в отсутствие экрана  $B_0$  (или  $H_0$ ) и внутри экрана  $B$  (или  $H$ ) и определялась следующим выражением [15]:

$$K = B_0/B = H_0/H. \quad (1)$$

*Экспериментальные результаты.* Ниже представлены результаты измерений величины эффективности экранирования исследуемых экранов в зависимости от величины магнитной индукции внешнего поля и её ориентации по отношению к экрану.

В области малых магнитных полей (0.1 – 0.2 мТл), направленных перпендикулярно продольной оси экрана, значения эффективности экранирования для МПЭ составляют 8–10, в области более высоких магнитных полей (1.5–2.5 мТл) – 80–100. Наилучшей эффективностью экранирования обладает МПЭ с наибольшим количеством слоев (МПЭ № 3). Пермалловый экран, практически при той же толщине магнитомягкого материала

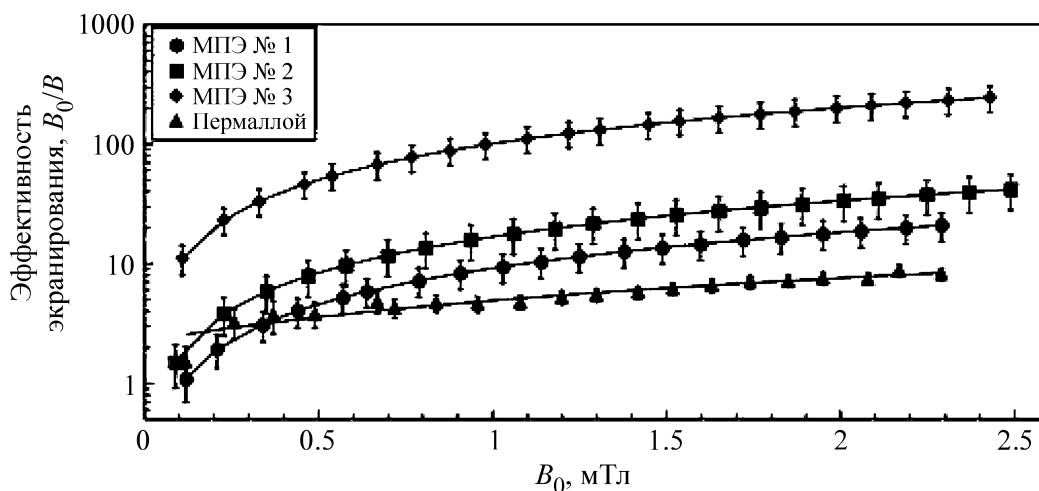


Рис. 4: Эффективности экранирования различных типов экранов (в середине экрана) в зависимости от величины индукции внешнего магнитного поля, направленного перпендикулярно продольной оси экрана.

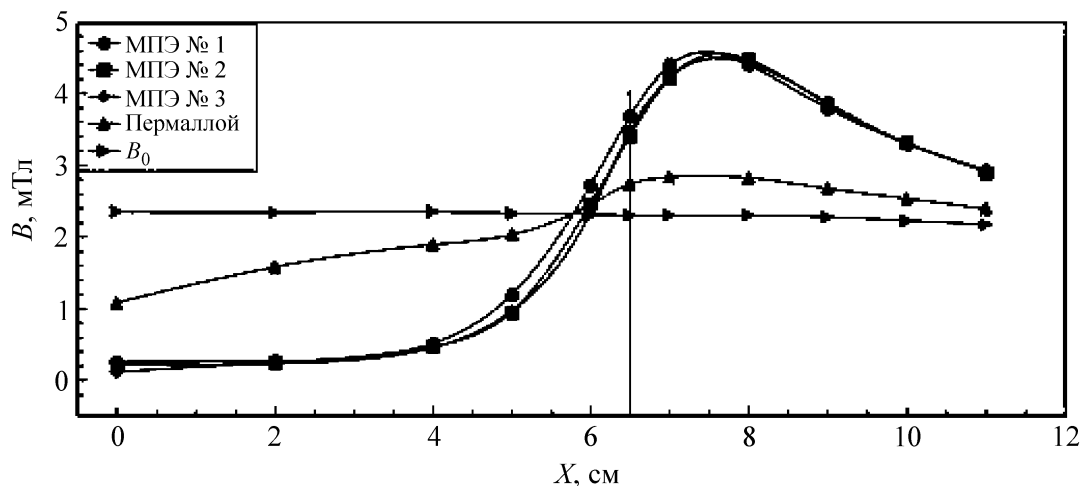


Рис. 5: Распределение индукции магнитного поля вдоль продольной оси различных типов экранов. 0 на горизонтальной оси соответствует середине продольного размера экрана. Вертикальная линия – торец экрана. Магнитное поле катушки ( $B_0$ ) направлено параллельно продольной оси экрана.

ла, что и у МПЭ, имеет в 3–15 раз меньшую эффективность экранирования, чем МПЭ, в зависимости от напряженности магнитного поля.

*Выводы.* Таким образом, экраны на основе многослойных пленочных структур обладают высокой эффективностью экранирования постоянного магнитного поля, а учи-

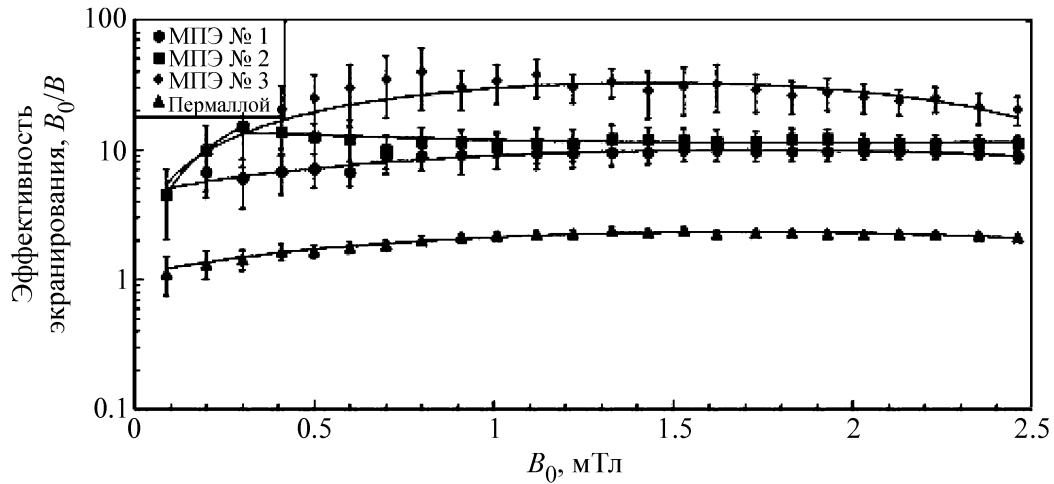


Рис. 6: Эффективности экранирования различных типов экранов (в середине экрана) в зависимости от величины индукции внешнего магнитного поля, направленного параллельно продольной оси экрана.

тывая, что метод электролитического осаждения позволяет делать экраны сложной геометрической формы и с различным количеством слоев, они будут востребованы как при проведении фундаментальных научных исследований в экспериментальной ядерной физике, ядерной медицине, космических экспериментах, так и в устройствах прикладного назначения.

Выражаем благодарность профессору А. М. Гальперу за постоянный интерес к работе и полезные замечания.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] S. L. Shi, L. Z. Zhan, and J. S. Li, Appl. Phys. Lett. **93**, 172903 (2008).
- [2] D. D. L. Chung, J. Mater. Eng. Perform. **9**, 350 (2000).
- [3] A. W. Rucker, Phil. Mag. **37**, 95 (1894).
- [4] W. Esmarch, Annalen der Physik (Leipzig) **39**, 1540 (1912).
- [5] W. Esmarch, Annalen der Physik (Leipzig) **39**, 1553 (1912).
- [6] D. U. Gusber, S. A. Wolf, and J. E. Cox, Rev. Sci. Instrum. **50**, 751 (1979).
- [7] A. Mager, IEEE Trans. Magn. **6**, 67 (1970).
- [8] T. J. Summner, J. N. Pendlebury, and K. F. Smith, J. Phys. D: Appl. Phys. **20**, 1095 (1987).
- [9] E. Paperno, H. Koide, and I. Sasada, J. Appl. Phys. **87**(9), 5959 (2000).
- [10] E. Paperno, J. Appl. Phys. **97**, 10Q104 (2005).

- [11] I. Sasada, T. Yamamoto, and T. Yamauchi, J. Appl. Phys. **79**(8), 5490 (1996).
- [12] I. Sasada, E. Paperno, and H. Koide, J. Appl. Phys. **87**(9), 5962 (2000).
- [13] С. С. Грабчиков, Л. В. Сосновская, Т. Е. Шарапа, Многослойный электромагнитный экран. Патент РБ № 11843 от 2009.01.28.
- [14] В. В. Дмитренко, А. Г. Батищев, С. С. Грабчиков и др., Многослойный экран для защиты фотоэлектронных умножителей и способ его нанесения. Патент на изобретение, РФ, № 2474890 от 10.02.2013 г.
- [15] Д. Л. Шапиро, *Основы теории электромагнитного экранирования* (Л., Энергия, 1975.)

Поступила в редакцию 3 декабря 2014 г.