

УДК 539.216:546.824-31

## ОПТИЧЕСКИ ПРОЗРАЧНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЭКРАНЫ

А.Т. ВОЛОЧКО, В.А.ЗЕЛЕНИН, Г.В. МАРКОВ, Е.О. НАРУШКО

Физико-технический институт НАН Беларуси  
Купревича, 6, Минск, 220141, Беларусь

Поступила в редакцию 25 февраля 2015

Рассмотрены примеры прозрачных электромагнитных экранов с высокой эффективностью экранирования, приведены результаты измерений эффективности экранирования конструкций, представляющих собой стеклянное основание с многослойным покрытием в системе металл-керамика.

*Ключевые слова:* вакуумное осаждение, прозрачный электромагнитный экран, многослойные покрытия, металл-керамика.

### Введение

Используемые в настоящее время электронные устройства излучают электромагнитные волны, которые оказывают воздействие на живые организмы, вносят изменения в работу особо чувствительных приборов, нарушая, таким образом, получение достоверных данных. Также электромагнитные излучения (ЭМИ) элементов компьютера могут послужить одним из каналов утечки информации. Принимая и декодируя эти электромагнитные волны, можно получить информацию о базе данных компьютера или внести изменения в его работу. Путем анализа радиоизлучения становится доступным многое из того, с чем имеет дело пользователь. Для того, чтобы этого не происходило, все эти электронные системы и компьютеры должны иметь эффективные экранирующие покрытия на поверхности пластмассового корпуса, а дисплей должен иметь защитный экран, который обладает электромагнитной экранирующей способностью, одновременно давая возможность оператору видеть информацию, отображаемую на дисплее.

В данной статье будем акцентировать внимание на экранирующих покрытиях для мониторов. Итак, защитный электромагнитный экран для дисплеев представляет собой специальное покрытие, нанесенное на стекло. Такое покрытие должно быть электропроводным, позволять оператору видеть всю картинку на экране дисплея и быть коррозионностойким в различных условиях эксплуатации.

Для применяемых в настоящее время экранирующих покрытий, наносимых на стекло, в подавляющем большинстве своем характерны недостаточное и даже высокое поверхностное электросопротивление (более 10 Ом/кв), пропускание в видимой области спектра 70–90 %, но хорошая коррозионная стойкость и износостойкость. В странах Евросоюза, СНГ, США, Японии, Китае наиболее часто применяются покрытия на основе оксида индия с добавлениями оксида олова, так называемый сплав ИТО [1, 2]. По экранирующей способности покрытия из такого материала довольно неэффективны, так как оксид индия – это полупроводник, и его электропроводимость обеспечивается содержанием в своем составе примесных элементов.

Хотя ИТО покрытие имеет высокое светопропускание (около 90 %), оно не способно защитить электронный объект при частотах излучения до 100 кГц. Его низкая эффективность экранирования обусловлена высоким поверхностным электросопротивлением из-за полупроводниковых характеристик данного материала (50 Ом/кв и более) [3, 4]. При нанесении  $\text{In}_2\text{O}_3$  с легирующей добавкой  $\text{SnO}_2$  необходима дополнительная операция отжига, а это

неизбежно накладывает ограничения на выбор материала основы. Так например, для стекла отжиг проводится при температуре 300–400 °С в течение часа, для полимерной основы температура отжига не должна превышать 70–80 °С, следовательно, время, необходимое для действенного результата, – 5 ч.

Исходя из этого, была поставлена задача за счет уменьшения в 5–10 раз поверхностного электрического сопротивления наносимого покрытия увеличить эффективность экранирования в широком диапазоне частот электромагнитного поля при достаточно высоком коэффициенте светопропускания (> 50 %). Как следует из результатов исследований [5, 6], для этих целей лучше всего подходят многослойные (металл-диэлектрик) покрытия. Металлический слой хорошо отражает электромагнитные волны, диэлектрический – поглощает ЭМИ, тем самым исключая их последующие переотражения или фокусирование в нежелательной области пространства [7]. В качестве металлов можно использовать медь, золото, серебро, никель, а в качестве диэлектрика – оксиды циркония, титана, алюминия, кремния, гафния, ниобия, тантала.

### Методика эксперимента

Методом создания экранирующего прозрачного электропроводящего покрытия в нашем случае был ионно-плазменный метод, а именно, – электронно-лучевой. Процесс электронно-лучевого испарения является наиболее перспективным в данном случае, так как позволяет получать покрытия из металлов, сплавов и диэлектриков с высокой адгезией покрытия к основанию при малой температурной нагрузке. Структура покрытий, полученных данным методом, характеризуется малым размером зерен при повышенной плотности упаковки, вследствие высокой плотности точечных дефектов и активных центров зародышеобразования. Кроме всего прочего, технология электронно-лучевого испарения отличается высокой производительностью.

После предварительных расчетов и исследований было изготовлено несколько образцов: стеклянные пластинки толщиной 2 мм с нанесенными на них электронно-лучевым методом покрытий Ni-ZrO<sub>2</sub>, ZrO<sub>2</sub>-Ni-ZrO<sub>2</sub>, Ni-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZrO<sub>2</sub>-Ni-Cu-Ni-ZrO<sub>2</sub>, а также образцы, необходимые для сравнения с предложенными Cu, Ni, ZrO<sub>2</sub>, In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(SnO<sub>2</sub>). Суммарная толщина таких покрытий находилась в диапазоне 200–300 нм.

В вакуумной установке ВУ-1А, где происходило напыление предложенных покрытий, вмонтирован спектрометр СФКТ-7518. Спектрофотометр достаточно универсален и позволяет в диапазоне 40–1800 нм измерять толщину наносимого покрытия и тем самым контролировать процесс нанесения. В нашем случае толщина слоев из чистых металлов и сплавов контролировалась по пропусканию покрытием света определенной длины волны. Для каждого металла эта длина волны выбиралась из его известных оптических характеристик. Процесс нанесения покрытий из оксидов контролировался по отражению света определенной длины волны света от наносимого покрытия. Наличие интерференционных максимумов и минимумов позволяло наносить слои оксидов с точностью до 0,5–2,0 нм. Для слоев из металлов эта точность была ниже и составляла 2–5 нм [6].

### Результаты и их обсуждение

После нанесения на стеклянные пластинки необходимых покрытий, было измерено поверхностное электрическое сопротивление. Оказалось, что Ni-ZrO<sub>2</sub>, ZrO<sub>2</sub>-Ni-ZrO<sub>2</sub>, Ni-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZrO<sub>2</sub>-Ni-Cu-Ni-ZrO<sub>2</sub> имели  $\rho \approx 10$  Ом/кв, тогда как In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(SnO<sub>2</sub>)  $\rho \approx 150$  Ом/кв, Ni  $\rho \approx 3$  Ом/кв, ZrO<sub>2</sub> – неэлектропроводящий оксид.

Также были проведены измерения и расчет коэффициентов отражения ( $K_{отр}$ ) и передачи ( $K_{пер}$ ) для данных образцов. Для измерения экранирующих характеристик использовался панорамный измеритель ослабления и КСВН Я2Р-67 с ГКЧ-61 и волноводным трактом, который обеспечивает выделение и детектирование уровней падающей и отраженной волн электромагнитного излучения, прошедших и отраженных от образца. Для исследуемых образцов экспериментально были получены значения коэффициента передачи, который по абсолютной величине равен ослаблению ЭМИ, и коэффициента стоячей волны по напряжению, переведенного в коэффициент отражения в диапазоне частот 8–12 ГГц. Относительная

погрешность установки составляет 5 % [3, 6]. На основании полученных данных были построены графики зависимостей  $K_{отр}(f)$  и  $K_{пер}(f)$  в диапазоне частот 8–12 ГГц (рис. 1, 2).

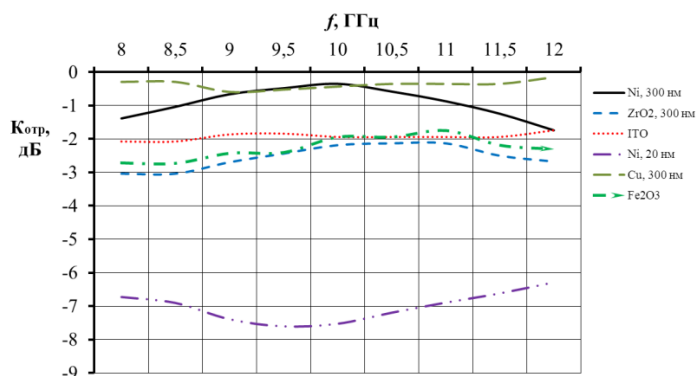


Рис. 1. Частотная зависимость коэффициента отражения образцов прозрачных электромагнитных экранов с однослойным покрытием

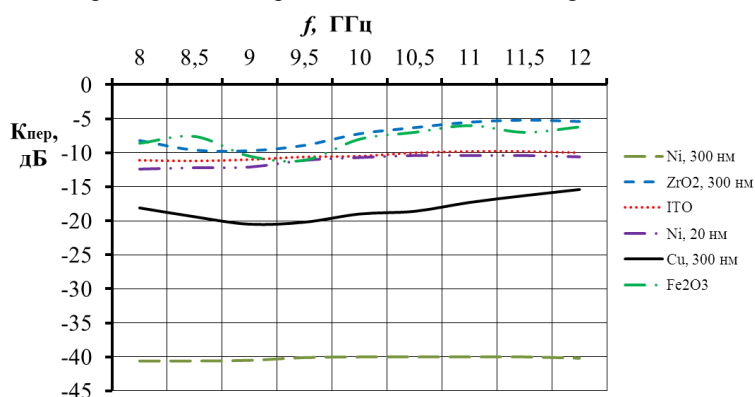


Рис. 2. Частотная зависимость коэффициента передачи образцов прозрачных электромагнитных экранов с однослойным покрытием

Наиболее эффективно отражает и ослабляет ЭМИ образец с покрытием Ni толщиной 300 нм. Так, значения коэффициента отражения находятся в интервале  $-0,5 \dots -1,5$  дБ, коэффициента передачи ниже  $-40$  дБ. Такие неплохие результаты обусловлены тем, что никель является ферромагнетиком и относится к элементам с недостроенной 3d-электронной оболочкой (к переходным 3d-металлам). Электроны недостроенной оболочки создают нескомпенсированный спиновый магнитный момент. Положительное значение обменного взаимодействия в кристаллах никеля приводит к параллельной ориентации атомных магнитных моментов. На частотах 8–12 ГГц никель работает в квазимагнитостатическом режиме и обладает лучшими экранирующими свойствами, чем диамагнитный металлический материал с высокой электрической проводимостью (медь, алюминий и др.), так как линии магнитного поля замыкаются через толщу магнитного слоя экрана подобно буравчику.

Однако, при всех положительных сторонах никеля, электромагнитный экран при толщине металлического покрытия в 300 нм, не прозрачен, поэтому не может быть использован в качестве экрана для монитора электронного устройства. При уменьшении толщины покрытия до 20 нм, при которой экран будет полупрозрачным, эффективность экранирования ЭМИ низкая. Так, значения коэффициента отражения  $-6,8 \dots -7,8$  дБ, коэффициента передачи  $-12$  дБ. Использование диэлектрических покрытий в виде следующих оксидов  $Fe_2O_3$ ,  $ZrO_2$  и ITO не дало высоких результатов по экранированию ЭМИ:  $K_{отр} = -2 \dots -3$  дБ,  $K_{пер} = -5 \dots -10$  дБ.

В качестве альтернативы покрытиям из оксидов для электромагнитных экранов были получены покрытия типа металл-керамика. Чередование металлических и диэлектрических слоев позволило достичь высоких значений эффективности экранирования (рис. 3, 4).

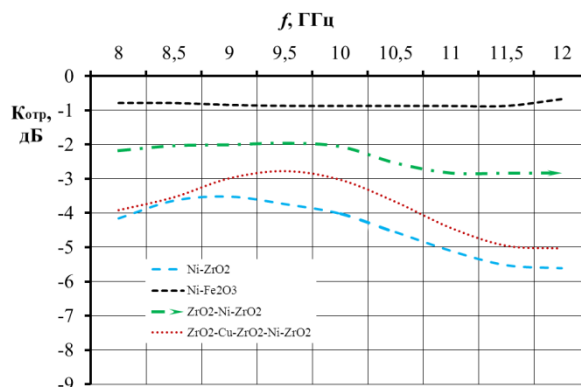


Рис. 3. Частотная зависимость коэффициента отражения образцов прозрачных электромагнитных экранов с многослойным покрытием системы металл-керамика

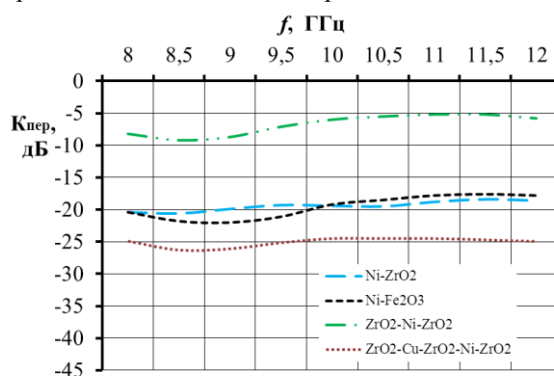


Рис. 4. Частотная зависимость коэффициента передачи образцов прозрачных электромагнитных экранов с многослойным покрытием системы металл-керамика

Толщина металлического слоя выбиралась, исходя из величины скин-слоя [7], толщина слоя диэлектрика – в соответствии с принципами интерференции (данные таблицы).

**Толщины слоев многослойного покрытия электромагнитного экрана**

Элементный состав покрытия	Толщина каждого слоя, $h$ , нм
Ni-ZrO <sub>2</sub>	30–80
Ni-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	30–60
ZrO <sub>2</sub> -Ni-ZrO <sub>2</sub>	80–30–80
ZrO <sub>2</sub> -Ni-Cu-Ni-ZrO <sub>2</sub>	80–8–18–8–80



Рис. 5. Внешний вид прозрачных электромагнитных экранов (слева – ZrO<sub>2</sub>-Ni-Cu-Ni-ZrO<sub>2</sub>, справа – Ni-ZrO<sub>2</sub>)

Прозрачность таких экранов  $R$  составляла не менее 50 %, отражение  $T$  не более 5 %. Наилучшими характеристиками экранирования среди прозрачных электромагнитных экранов обладают образцы с покрытиями Ni-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZrO<sub>2</sub>-Ni-Cu-Ni-ZrO<sub>2</sub>. Высокие экранирующие

способности в первом случае ( $\text{Ni-Fe}_2\text{O}_3$ ) объясняются наличием магнитных материалов ( $\text{Ni}$ ,  $\text{Fe}$ ), во-втором случае ( $\text{ZrO}_2\text{-Ni-Cu-Ni-ZrO}_2$ ) – наличием магнитного и высокоэлектропроводящего металлов ( $\text{Ni}$ ,  $\text{Cu}$ ).

### Заключение

Разработаны прозрачные электромагнитные экраны с многослойными покрытиями в системе металл-керамики и обладающие высокими значениями эффективности экранирования. В состав многослойных покрытий входят слои металлов ( $\text{Ni}$ ,  $\text{Cu}$ ), хорошо отражающих ЭМИ, и диэлектрические слои ( $\text{ZrO}_2$ ), которые являются поглощающими и в то же время просветляют нижележащие металлические слои в соответствии с принципом интерференции. Таким образом, покрытия  $\text{Ni-Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2\text{-Ni-Cu-Ni-ZrO}_2$  обладают высокими значениями коэффициента отражения:  $K_{\text{отр1}} = -0,9 \dots -0,8$  дБ;  $K_{\text{отр2}} = -5 \dots -2,9$  дБ;  $K_{\text{пер1}} = -21 \dots -18$  дБ,  $K_{\text{пер2}} = -27 \dots -25$  дБ соответственно. Вместе с тем данные экраны имеют просветление  $R > 50$  %, отражение света  $T < 5$  %.

## OPTICAL TRANSPARENT ELECTROMAGNETIC SHIELDS

A.T. VOLOCHKO, V.A. ZELENIN, G.V. MARKOV, E.O. NARUSHKO

### Abstract

The examples of transparent electromagnetic high-efficiency screening shields have been analyzed, the results of measuring the screening efficiency of engineering designs consisting of a glass base and a multilayer metal-ceramic coating have been presented.

### Список литературы

1. Белов С.В., Козьяков А.Ф., Партолин О.Ф. и др. Средства защиты в машиностроении: Расчет и проектирование: Справочник. М., 1989.
2. Полонский Н.Б. Конструирование электромагнитных экранов для РЭА. М., 1979.
3. Лагарьков А.Н. // Радиотехника и электроника. Журнал Российской Академии Наук. 2009. Т. 54. № 5. С. 625–633.
4. Лыньков Л.М., Борботько Т.В., Криштопова Е.А. // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35, № 9. С. 44–48.
5. Крылов В.А., Юрченкова Т.В. Защита от электромагнитных излучений. М., 1972.
6. Шапиро Д.Н. Основы теории электромагнитного экранирования. Л., 1975.
7. Фастовского И.А. Измерители радиопомех. М., 1973.