

УДК 539.216:546.824-31

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

ВЛИЯНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ПОДЛОЖЕК НА ЭКРАНИРУЮЩИЕ ОТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ СВОЙСТВА ФОРМИРУЕМЫХ НА НИХ ПОКРЫТИЙ

Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск

(Поступила в редакцию 26.03.2015)

Введение. Все электронные объекты формируют вокруг себя электромагнитное поле, действие которого может повлиять на нормальное функционирование биологических объектов, работу радиоэлектронных устройств, конфиденциальность информации, хранящейся в компьютере, и в целом нарушить экологическую безопасность. Одним из часто применяемых способов исключения нежелательного воздействия электромагнитного излучения (ЭМИ) «наших помощников» является их экранирование. Наиболее эффективными средствами с точки зрения подавления ЭМИ являются металлические экраны. В некоторых случаях, когда излучающий ЭМИ объект имеет малые размеры, сложную форму или критичную массу конструкции, применяют покрытия. В зависимости от функционального назначения экрана разрабатывают его архитектуру, выбирают материалы, определенным образом готовят поверхности подложек для нанесения покрытий. Существенную роль играет и профиль поверхности (рельеф поверхности, образовавшийся после финишной или черновой механической обработки), на которую наносится покрытие.

Для создания эффективных экранов, способных защищать биологические объекты и микроэлектронное оборудование от воздействия электромагнитных полей и ЭМИ, необходимо сопоставить полученные экспериментальные зависимости влияния микро- и макронеровностей (шероховатости) поверхности подложек на электрические и магнитные свойства формируемых на них покрытий с имеющимися теоретическими представлениями о рассеянии ЭМИ развитым рельефом поверхности.

Результаты эксперимента и их обсуждение. Для создания экранов от ЭМИ в качестве подложек использовали пластины из поликарбоната размерами 100×100 мм и толщиной 4 мм с различной микро- и макронеровностью поверхности, имитирующие материал корпуса источника излучения электромагнитных волн, например компьютера.

Неровности на поверхности пластин из поликарбоната в интервале 0,05–12,5 мкм создавались с помощью наждачной бумаги различных номеров (Р 600, Р 800, Р 1000, Р 1200, Р 1500, Р 2000, Р 2500), а в диапазоне 0,1–1 мм – на токарном станке марки 16К20.

Экранирующие ЭМИ многослойные покрытия состояли из периодически чередующихся диэлектрических (Cu) и ферромагнитных (Ni – Fe) слоев заданного состава с различной толщиной каждого отдельного слоя. Известно, что слои из материалов с высокими значениями относительной магнитной проницаемости (пермаллой, электротехническая сталь, сепермаллой и др.) хорошо поглощают ЭМИ в диапазонах частот 0,1–10 кГц и > 1 МГц, замыкая линии магнитного поля через толщу ферромагнитной пленки [1]. При частотах от 0,1 до 1 МГц, где величина потерь ЭМИ за счет механизма отражения преобладает над величиной потерь за счет механизма поглощения, эффективно использование высокоэлектропроводящих слоев (Cu, Ag) [1].

Следовательно, эффективность экранирования (Э) многослойного покрытия будет тем выше, чем больше значения электропроводности σ или относительной магнитной проницаемости μ его

отдельных слоев. Поскольку данные параметры в тонких пленках можно изменять в широких пределах ($\mu \sim$ в $1 \cdot 10^6$ раз, $\sigma \sim$ в $1 \cdot 10^5$ раз), то они и вносят основной вклад в эффективность экранирования покрытия [2]:

$$\mathcal{E} = (0,5 \cdot 2\pi f \mu \sigma)^{0,5} h + 20 \lg(0,25 \varepsilon_0 \varepsilon (\sigma / 2\pi f \mu)^{0,5}), \quad (1)$$

где \mathcal{E} – эффективность экранирования ЭМИ, дБ; f – частота ЭМИ, Гц; μ – относительная магнитная проницаемость покрытия; σ – электропроводность покрытия, См/м; h – толщина слоя покрытия, м; ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума; ε – диэлектрическая проницаемость материала покрытия.

В качестве ферромагнитного слоя экранирующего ЭМИ покрытия выбран пермаллой, в качестве диамагнитного слоя с высокой электропроводностью – медь. Толщины слоев определены из условий соответствия с толщиной скин-слоя [1, 2] и обеспечения высокой адгезии к подложке и к нижележащим слоям: 100 нм Cu + 400 нм Ni₈₀Fe₂₀.

Экранирующее ЭМИ покрытие состава 100 нм Cu + 400 нм Ni₈₀Fe₂₀ наносили на поверхность полированных пластин, а также на поверхность пластин с различной шероховатостью электронно-лучевым методом на вакуумной установке ВУ-1А. Параметры процесса следующие: давление остаточных газов не более $7 \cdot 10^{-3}$ Па, ток пучка электронов 80–120 мА, энергия электронов в пучке более 6 кэВ. Медь и пермаллой испаряли поочередно из графитовых тиглей без герметизации камеры.

В установке ВУ-1А, где происходило нанесение покрытий, смонтирован спектрометр СФКТ-7518, позволяющий измерять толщину наносимых покрытий в диапазоне 40–1800 нм. Кроме того, толщину слоев наносимых металлов и сплавов контролировали по пропусканию света определенной длины волны. Для каждого металла она выбиралась из его известных оптических характеристик. Погрешность измерения толщины слоев не превышала 5 нм [3].

Поверхностное сопротивление покрытий измеряли четырехзондовым методом. Для определения экранирующих характеристик использовали панорамный измеритель ослабления КСВН Я2Р-67 с ГКЧ-61 и волноводным трактом, обеспечивающий выделение и детектирование уровней падающей и отраженной волн ЭМИ, поглощенных образцом и отраженных от него. Для исследуемых образцов экспериментально получены значения коэффициента передачи, равного абсолютной величине ослабления ЭМИ, и коэффициента стоячей волны по напряжению, переведенного в коэффициент отражения [4].

Результаты измерений поверхностного электросопротивления ρ_{Σ} вышеуказанных покрытий, нанесенных на пластины из поликарбоната с различной шероховатостью Rz в разных диапазонах, представлены на рис. 1.

Из рис. 1, а, б видно, что с увеличением высоты микронеровностей поверхности подложек растет и величина поверхностного электросопротивления покрытий. При $Rz = 0,05$ –100 мкм данная закономерность объясняется ростом высоты неровностей подложек, что способствует неоднородности наносимых на них покрытий, так как на пластинах с развитым рельефом поверхности

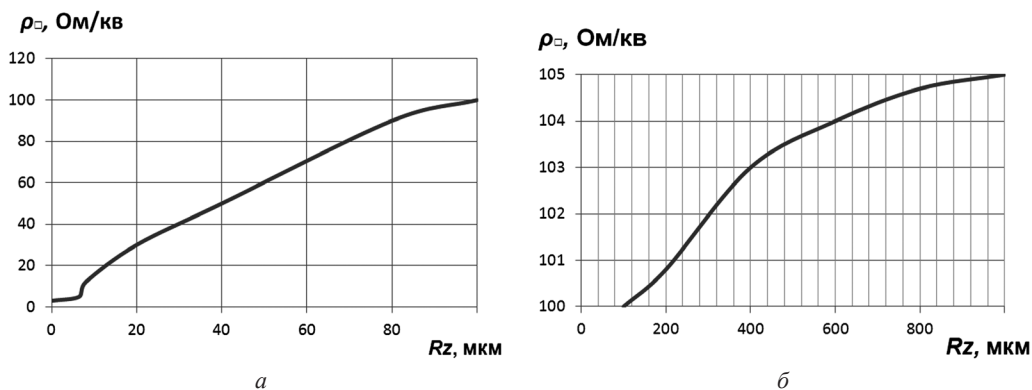


Рис. 1. Зависимость поверхностного электросопротивления покрытия состава 100 нм Cu + 400 нм Ni₈₀Fe₂₀ от шероховатости поверхности пластин с высотой неровностей профиля Rz в диапазонах 0,05–100 мкм (а) и 100–1000 мкм (б)

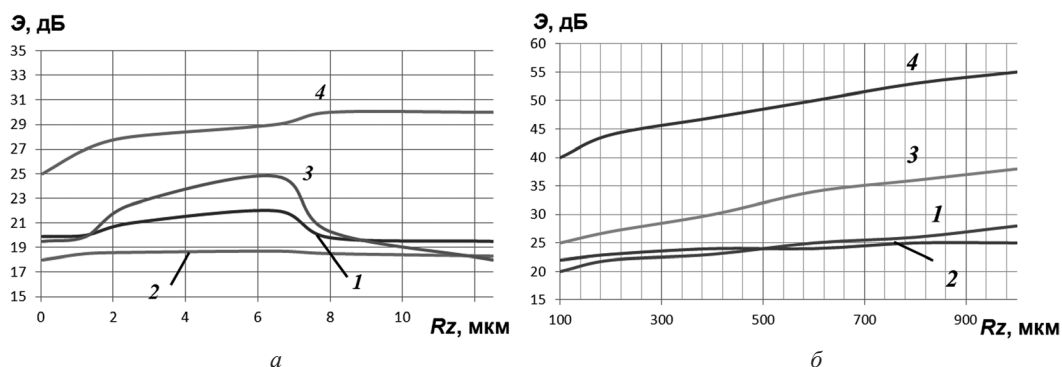


Рис. 2. Зависимости эффективности экранирования покрытия состава 100 нм Cu + 400 нм Ni₈₀Fe₂₀ от величины шероховатости поверхности пластин из поликарбоната с высотой неровностей профиля $Rz = 0,05\text{--}12,5$ (а) и 100–1000 мкм (б); длина волны ЭМИ λ : 1 – $3 \cdot 10^3$ м; 2 – $3 \cdot 10^2$; 3 – $3 \cdot 10^{-1}$; 4 – $3 \cdot 10^{-2}$ м

толщина пленки меньше. При $Rz = 100 - 1000$ мкм поверхностное электросопротивление возрастает за счет увеличения проходимого силой тока пути между зондами. Результаты измерения эффективности экранирования покрытий, нанесенных на пластины из поликарбоната с шероховатостью Rz в разных диапазонах, приведены на рис. 2.

Как следует из данных рис. 2, шероховатость пластин в интервале 0,05–12,5 мкм незначительно влияет на величину эффективности экранирования ЭМИ ($\mathcal{E} \leq 30$ дБ). Это объясняется тем, что существенный вклад в отражение электромагнитной волны вносит диффузная составляющая, которую невозможно измерить [5].

Однако для $\lambda = 3 \cdot 10^{-2}$ м (рис. 2, б, кривая 4) шероховатость поверхности в интервале 0,1–1 мм существенно влияет на величину \mathcal{E} , которая повышается до 45–55 дБ. Полученные результаты не противоречат характеру индикатрисы рассеяния ЭМИ, зависящему от отношения высоты неровностей профиля Rz к длине падающей электромагнитной волны λ , т. е. от параметра Релея η [6, 7]:

$$\eta = \frac{Rz}{\lambda} \sin \beta, \quad (2)$$

где Rz – высота неровностей профиля; λ – длина волны ЭМИ; β – угол скольжения волны электромагнитного поля над неровной поверхностью, отсчитываемый от среднего уровня поверхности.

Чем больше значение параметра Релея η , тем сильнее влияние неровностей на отражение от исследуемой поверхности. В [8] получены решения задач отражения волн от тел разной формы и с различной шероховатостью поверхностей указанными значениями параметра Релея. Анализ данных решений показывает, что, начиная со значений $\eta \geq 0,1$, необходимо принимать во внимание неровности на поверхностях отражающих тел.

Таким образом, для волн миллиметрового диапазона необходим учет шероховатости поверхностей, получаемых при изготовлении пластмассовых корпусов электронных объектов ($Rz = 0,05\text{--}6$ мкм).

Заключение. Установлено, что эффективность экранирования ЭМИ двухслойным покрытием системы Cu – Ni₈₀Fe₂₀ общей толщиной 400–600 нм не зависит от высоты неровностей профиля поверхности, на которую оно нанесено, если значение Rz изменяется в интервале 0,05–12,5 мкм и частота ЭМИ ниже $1 \cdot 10^{10}$ Гц ($\lambda > 3 \cdot 10^{-2}$ м). В инженерных расчетах по созданию экранов от электромагнитных излучений шероховатость поверхности экрана может не приниматься во внимание, если длина волны электромагнитного излучения $\lambda > 1 \cdot 10^{-2}$ м. При $\lambda < 1 \cdot 10^{-2}$ м эффективность экранирования покрытий системы Cu – Ni₈₀Fe₂₀ с увеличением параметра шероховатости подложек от 100 до 1000 мкм возрастает от 40 до 55 дБ.

Литература

1. Шапиро Д. Н. Основы теории электромагнитного экранирования. Л., 1975.
2. Полонский Н. Б. Конструирование электромагнитных экранов для РЭА. М., 1979.
3. Лагарьков А. Н. и др. // Радиотехника и электроника. М., 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. Максимов Г. А., Ларичев В. А. // Акустика неоднородных сред. Ежегодник РАО. 2011. № 12. С. 89–102.
6. Штагер Е. А. Рассеяние радиоволн на телах сложной формы. М., 1986.
7. Басс Ф. Г., Фукс И. М. Рассеяние волн на статистически шероховатых поверхностях. М., 1975.
8. Jenn D. C. Radar and Lazer Cross Section Engineering. American Institute of Aeronautics and Astronautics. Hardcover, 2005.

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

INFLUENCE OF SURFACE ROUGHNESS OF SUBSTRATE LAYERS ON ELECTROMAGNETIC RADIATION SHIELDING CHARACTERISTICS OF COATINGS DEPOSITED ON THEM

Summary

Research has been carried out and regularities of influence of micro- and macro-roughness of surface of substrate layers on electromagnetic radiation shielding characteristics of coatings deposited on them have been determined. It has been shown that the bigger the value of the ratio of the product of the surface roughness R_z by the length of descent of an electromagnetic wave λ (the Rayleigh parameter), the bigger influence the roughness has on surface reflection. In engineering evaluations aimed at designing electromagnetic radiation shields roughness can be disregarded, if the wavelength of electromagnetic radiation exceeds $1 \cdot 10^{-2}$ m.