

# МНОГОСЛОЙНЫЕ ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Ю.В. ДИДЕНКО, И.В. ПАЦЁРА, Д.Д. ТАТАРЧУК

Построена модель многослойного экранирующего покрытия на основе структур диэлектрик-композитный материал. Приведены результаты моделирования и экспериментальных исследований таких покрытий в диапазоне частот 8...12 ГГц. Показано, что эффективность экранирования может быть увеличена путем создания многослойных покрытий. Результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными.

**Ключевые слова:** композитная структура, коэффициент экранирования по отражению, коэффициент экранирования по прохождению.

## ВВЕДЕНИЕ

Повсеместное использование электронных систем в различных сферах жизнедеятельности человека привело к формированию новых требований к электронным устройствам и составляющим их блокам. Среди этих требований важное место занимают повышение надежности и помехоустойчивости электронных систем, уменьшение их взаимного влияния, повышение уровня информационной безопасности, обеспечение экологичности электронного оборудования, в том числе путем защиты окружающей среды от электромагнитного излучения.

Для удовлетворения перечисленных выше требований используют различные методы. Однако одним из наиболее эффективных методов является экранирование [1, 2]. Поэтому задача повышения эффективности экранирующих покрытий является актуальной.

Одно из перспективных направлений решения этой задачи – использование многослойных экранирующих покрытий на основе композитных материалов. Поэтому целью данной работы является теоретическое и экспериментальное исследование многослойных экранирующих покрытий на основе композитных материалов для защиты от электромагнитного излучения.

## 1. МОДЕЛЬ МНОГОСЛОЙНОГО ПОКРЫТИЯ

Рассмотрим многослойное покрытие как последовательное соединение слоев с различными электродинамическими свойствами.

Для упрощения модели многослойного экранирующего покрытия сделаем некоторые допущения:

- рассматривается плоская электромагнитная волна, падающая по нормали на поверхность экранирующего покрытия;
- каждый слой характеризуется эффективными значениями магнитной и диэлектрической проницаемости;
- резонансные явления в слоях экранирующего покрытия отсутствуют.

При указанных допущениях каждый слой экранирующего покрытия можно рассматривать как взаимный четырехполюсник, а покрытие в

целом – как каскадное соединение четырехполюсников (рис. 1).

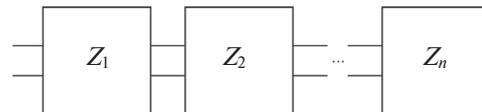


Рис. 1. Представление многослойного экранирующего покрытия в виде каскадного соединения четырехполюсников

Такой подход позволяет использовать для расчета электродинамических свойств покрытия матричные методы анализа теории СВЧ цепей. При последовательном соединении каскадов наиболее удобно использовать волновые матрицы передачи –  $T$ . В этом случае результирующая матрица для покрытия  $T_{\Sigma}$  может быть представлена как произведение волновых матриц передачи слоев экранирующего покрытия:

$$T_{\Sigma} = \prod_{i=1}^n T_i, \quad (1)$$

где  $n$  – количество слоев,  $i$  – номер слоя,  $T_i$  – волновая матрица передачи  $i$ -го слоя покрытия.

Компоненты матрицы  $T_i - t_{j,k}$  определяются электродинамическими параметрами  $i$ -го слоя покрытия [3, 4]:

$$t_{j,k} = f(\epsilon_i^*, \mu_i^*, d_i), \quad (2)$$

где  $\epsilon_i^*, \mu_i^*$  – соответственно комплексные диэлектрическая и магнитная проницаемости  $i$ -го слоя покрытия.

Исходя из представленной выше модели были рассчитаны коэффициенты экранирования по отражению и прохождению многослойных экранирующих покрытий на основе различных композитных материалов. Многослойное покрытие представляло собой периодическую систему, состоящую из чередующихся двухслойных структур диэлектрик-композитный материал с равной толщиной всех слоев (рис. 2).

Расчет проводился для покрытий с различным числом двухслойных структур при сохранении общей толщины покрытия (рис. 3). При расчете предполагалось, что при прохождении электромагнитной волны через покрытие первым слоем был полимер.

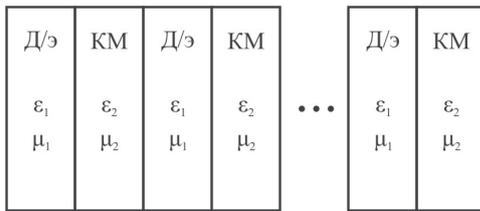


Рис. 2. Структура моделируемого покрытия:  
Д/э – диэлектрический слой;  
КМ – слой композитного материала

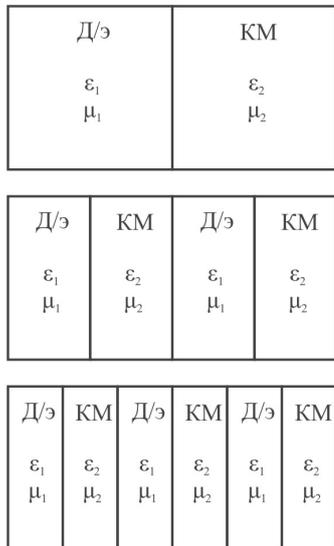


Рис. 3. Структура исследуемых многослойных композитных систем

Целью расчета было определение влияния структуры покрытия на его экранирующие свойства. Результаты расчета приведены на рис. 4, 5.

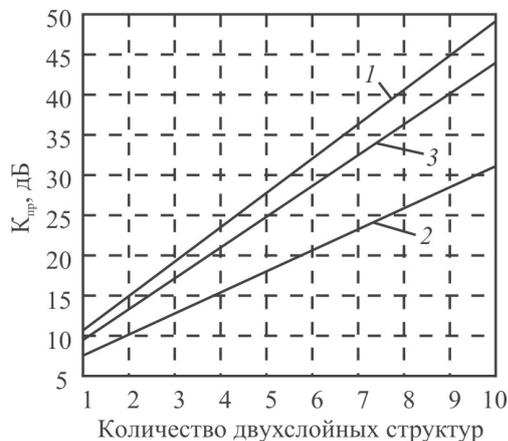


Рис. 4. Зависимость коэффициента экранирования по прохождению от количества двухслойных структур:  
1 – Al-полимерная матрица / полимерная матрица;  
2 – C-полимерная матрица / полимерная матрица;  
3 – Cu-полимерная матрица / полимерная матрица

Из результатов расчета следует:

- при увеличении количества двухслойных структур коэффициент экранирования по прохождению для многослойных систем увеличивается по линейному закону;
- при количестве двухслойных структур  $N < 4$  для многослойных систем коэффициент экранирования материала по отражению резко

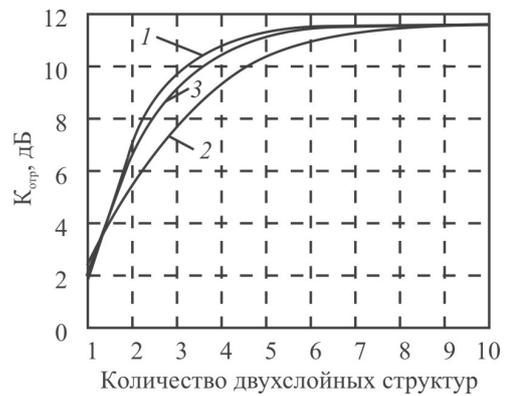


Рис. 5. Зависимость коэффициента экранирования по отражению от количества двухслойных структур:  
1 – Al-полимерная матрица / полимерная матрица;  
2 – C-полимерная матрица / полимерная матрица;  
3 – Cu-полимерная матрица / полимерная матрица

увеличивается, при  $N > 6$  значение коэффициента экранирования материала по отражению почти не изменяется с увеличением количества двухслойных структур.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для проверки результатов моделирования было проведено экспериментальное исследование образцов таких покрытий в диапазоне частот 8...12 ГГц. Композитные материалы были получены методом электромеханического перемешивания дисперсной фазы с материалом матрицы при комнатной температуре. Из полученного материала изготавливались образцы прямоугольной формы, размеры которых подбирались таким образом, чтобы исследуемый материал полностью заполнял сечение волновода. В качестве материала матрицы использовался полимер с комплексной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon = 2,73 - j0,2$ . В качестве дисперсной фазы при изготовлении композитных материалов использовался нанопорошок алюминия с размером частиц 0,06...0,2 мкм.

При измерении образец в волноводном тракте размещался таким образом, чтобы при прохождении электромагнитной волны первым слоем был полимер. Измерения проводились методом передачи-отражения [5]. Измерялись параметры волновой матрицы рассеяния покрытия  $S_{11}$ ,  $S_{22}$  с последующим расчетом на их основе коэффициентов экранирования по прохождению и отражению. Полученные результаты приведены на рис. 6, 7.

Из полученных результатов видно, что с увеличением количества двухслойных структур эффективность экранирования увеличивается. Такая зависимость возникает предположительно за счет рассеяния электромагнитной энергии на границах композит-полимер. При числе структур более 4-х увеличение их количества слабо влияет на значения коэффициентов экранирования. Это связано с тем, что толщина слоя становится значительно меньше длины волны.

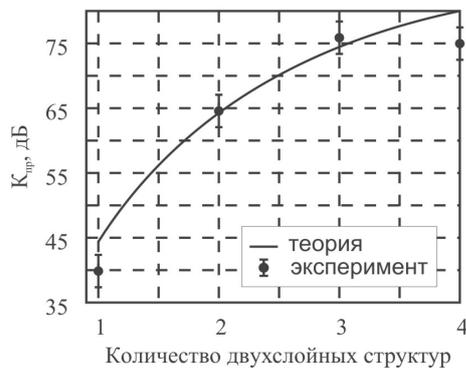


Рис. 6. Коэффициент экранирования по прохождению для двухслойных структур Al-полимерная матрица / полимерная матрица

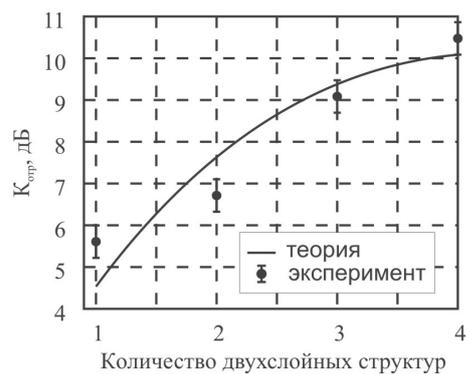


Рис. 7. Коэффициент экранирования по отражению для двухслойных структур Al-полимерная матрица / полимерная матрица

## ВЫВОДЫ

1. Разработана модель многослойного экранирующего покрытия на основе композитных материалов.
2. Получены расчетные и экспериментальные зависимости коэффициентов экранирования по отражению и прохождению от количества двухслойных структур для многослойных экранирующих покрытий на основе композитных материалов в СВЧ диапазоне.
3. Показано, что с увеличением количества двухслойных структур эффективность экранирования увеличивается за счет затухания электромагнитной волны в толще слоев и отражения на границах композит-полимер.
4. Расхождение между расчетными и экспериментальными результатами не превышает 3 дБ, что указывает на адекватность модели.

## Литература

- [1] Богуш В.А. Электромагнитные излучения. Методы и средства защиты / В.А. Богуш, Т.В. Борботько, А.В. Гусинский, Л.М. Лыньков, А.А. Тамело. Под ред. Л.М. Лынькова. – Мн.: Бестпринт, 2003. – 406 с.
- [2] Железняк В.К. Защита информации от утечки по техническим каналам / В.К. Железняк. – СПб.: ГУАП, 2006. – 188 с.
- [3] Диденко Ю.В. СВЧ-характеристики металлодиэлектрических нанокompозитных материалов / Ю.В. Диденко, А.В. Мачулянский, Д.Д. Татарчук, О.В. Теличкина, Ю.И. Якименко // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: 20-я Международная Крымская конференция, 13–17 сент. 2010 г.: тезисы докл. – Севастополь, 2010. – С. 811–812.

- [4] Мачулянский А.В. Анализ СВЧ-свойств нанодисперсных композитных систем / А.В. Мачулянский, Д.Д. Татарчук, В.А. Мачулянский // Технічна електродинаміка: тематичний випуск «Силова електроніка та енергоефективність», ч.1. – 2010. – С. 303–304.
- [5] Поплавко Ю.М. Микрохвильова діелектрична спектроскопія: навч. посіб. / Ю.М. Поплавко, В.І. Молчанов, В.А. Казміренко. – К.: НТУУ «КПІ», 2011. – 304 с.

Поступила в редколлегию 5.12.2012



**Диденко Юрий Викторович**, инженер кафедры микроэлектроники НТУУ «КПИ». Область научных интересов: СВЧ электроника, наноматериалы.



**Пацёра Ирина Валерьевна**, студентка кафедры микроэлектроники НТУУ «КПИ». Область научных интересов: СВЧ электроника, наноматериалы.



**Татарчук Дмитрий Дмитриевич**, к.т.н., доцент, доцент кафедры микроэлектроники НТУУ «КПИ». Область научных интересов: СВЧ электроника, наноматериалы.

УДК 621.372.41

**Багатошарові покриття на основі композитних матеріалів для захисту від електромагнітного випромінювання** / Ю.В. Діденко, І.В. Пацьора, Д.Д. Татарчук // Прикладна радіоелектроніка: наук.-техн. журнал. – 2012. – Том 11. – № 4. – С. 519–521.

Побудовано модель багатошарового екрануючого покриття на основі структур діелектрик-композитний матеріал. Наведено результати моделювання та експериментальних досліджень таких покриттів в діапазоні частот 8...12 ГГц. Показано, що ефективність екранування може бути збільшена шляхом створення багатошарових покриттів. Результати моделювання добре узгоджуються з експериментальними даними.

*Ключові слова:* композитна структура, коефіцієнт екранування по відбиттю, коефіцієнт екранування по проходженню.

Л. 07. Бібліогр.: 05 найм.

UDC 621.372.41

**Multilayer coatings based on composite materials for protection from electromagnetic radiation** / Yu.V. Didenko, I.V. Patsora, D.D. Tatarchuk // Applied Radio Electronics: Sci. Journ. – 2012. – Vol. 11. – № 4. – P. 519–521.

The model of multi-layer shielding coatings based on dielectric-composite material structures is built. The results of simulation and experimental studies of these coatings in the frequency range 8...12 GHz are given. It is shown that the screening effect can be increased by creating multi-layer coatings. The simulation results are in good agreement with experimental data.

*Keywords:* composite structure, shielding coefficient of reflection, shielding coefficient of transmission.

Fig. 07. Ref.: 05 items.