

УДК 535.33

А.В. МАЧУЛЯНСКИЙ, Б.Б. БАБЫЧ, В.А. МАЧУЛЯНСКИЙ
Национальный технический университет Украины "КПИ им. И. Сикорского"

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ

Проведено моделювання ефективності екранування перфорованих плівочних багатофункціональних покриттів в залежності від їх конструктивних і структурних параметрів. Виготовлені зразки покриттів на основі перфорованих металевих плівок. Проведено комплексне експериментальне дослідження тестових зразків. Представлено порівняльний аналіз експериментальних і теоретичних досліджень багатофункціональних покриттів. Дані рекомендації щодо практичного застосування розроблених покриттів.

Ключевые слова: эффективность экранирования, перфорированные покрытия, оптически прозрачные экраны, математическое моделирование, многофункциональные покрытия.

О.В. МАЧУЛЯНСЬКИЙ, Б.Б. БАБИЧ, В.О. МАЧУЛЯНСЬКИЙ
Національний технічний університет України "КПІ ім. І. Сікорського"

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНИХ ПОКРИТТІВ

Проведено моделювання ефективності екранування перфорованих плівочних багатофункціональних покриттів в залежності від їх конструктивних та структурних параметрів. Виготовлені зразки покриттів на основі перфорованих металевих плівок. Проведено комплексне експериментальне дослідження тестових зразків. Представлено порівняльний аналіз експериментальних і теоретичних досліджень багатофункціональних покриттів. Дано рекомендації щодо практичного застосування розроблених покриттів.

Ключові слова: ефективність екранування, перфоровані покриття, оптично прозорі екрани, математичне моделювання, багатофункціональні покриття.

A. V. MACHULIANSHYI, B. B. BABYCH, V. A. MACHULIANSHYI
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky KPI"

MATHEMATICAL MODELING OF THE MULTIFUNCTION COATINGS

Modeling of the shielding effectiveness of the perforated film multifunction coatings, depending on their design and structural parameters, was conducted. Samples of the coatings based on the perforated metal film were manufactured. A comprehensive experimental study of the test samples was conducted. The comparative analysis of the experimental and theoretical investigations of the multifunction coatings was presented. The recommendations for the practical application of the developed multifunction coatings were proposed.

Keywords: shielding effectiveness, perforated coatings, optically transparent screens, mathematical modeling, multifunction coatings.

Введение. Анализ исследований и публикаций. Постановка проблемы

Необходимым условием эффективной работы электронных устройств отображения и защиты информации, аппаратов космического назначения, объектов авиации типа «Стэлс», а также светопрозрачных дисплеев является применение многофункциональных покрытий, которые позволяют одновременно решать несколько задач [1, 2]. Например, такие покрытия должны быть: прозрачными в видимой области спектра и выполнять функцию экранирования электромагнитного излучения в СВЧ диапазоне. Среди известных методов реализации таких покрытий, обладающих вышеупомянутыми свойствами, основным является применение перфорованных проволочных экранов. Однако недостатками таких экранов являются несовместимость с микроэлектронной технологией производства электронных устройств, невысокая прочность, потеря эффективности в процессе использования, нарушение электрического контакта в узлах сетки, сложность применения в устройствах с развитым рельефом [1, 3].

Указанных недостатков можно избежать путем использования экранов в виде пленочных токопроводящих покрытий, нанесенных на прозрачную подложку. Такие экраны могут быть реализованы в виде сплошного металлического покрытия, перфорируемого методом литографии [2, 4, 5].

По сравнению с традиционными экранами использование тонких металлических пленок имеет ряд преимуществ: такие покрытия практически не увеличивают массу и габариты экранируемого устройства, повторяют форму его корпуса; легко перфорируются при помощи литографии; процесс вакуумного напыления изначально обеспечивает достаточную герметичность экрана по отношению к утечке

электромагнитного излучения. Технология вакуумного осаждения позволяет наносить в виде тонких пленок различные материалы (металлы, диэлектрики, полупроводники), что позволяет не только получать экранирующие пленки разного состава и структуры, но и наносить защитные слои, повышающие их эксплуатационные свойства [4, 6].

В то же время некоторые положения, связанные с особенностями использования пленочных покрытий, не достаточно освещены в литературе, посвященной теории электромагнитного экранирования [1, 3, 7]. К примеру, в работах [1, 2, 5] утверждается, что использование многослойных покрытий из различных материалов позволяет увеличить эффективность экранирования в широком диапазоне частот. Проведенные авторами исследования посвящены исследованию условий одновременного проявления эффектов прозрачности и экранирования в разных частотных диапазонах, которые зависят от различных параметров.

Цель исследования

Целью данной работы является математическое моделирование эффективности экранирования многофункциональных покрытий, прозрачных в видимой области спектра и экранирующих в СВЧ диапазоне электромагнитного излучения, в зависимости от конструктивных и структурных параметров.

Моделирования перфорированного пленочного покрытия

Рассмотрим влияние на эффективность экранирования конструктивных параметров перфорируемых пленочных покрытий, считая, что они состоят из идеально проводящего материала. К конструктивным параметрам относятся: период решетки – a , ширина лент – $2h$ и расстояние между ними – $2l$ (рис. 1). Так как присутствует допущение, что используется идеальный металл, в расчетах толщина пленки d не учитывается.

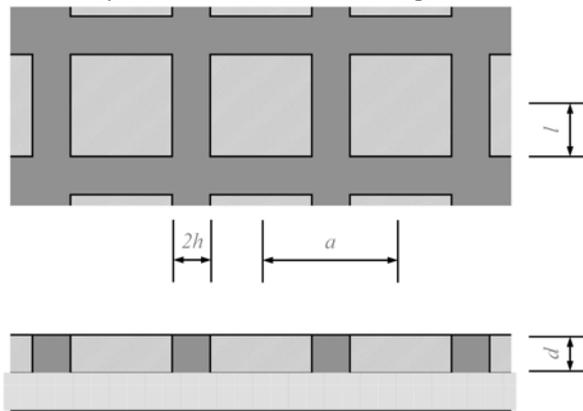


Рис. 1. Структура перфорированного пленочного покрытия

Производными параметрами являются:
коэффициент заполнения

$$g = \frac{2h}{a}, \tag{1}$$

коэффициент прозрачности

$$K_n = \frac{S_n}{S}, \tag{2}$$

где S_n – площадь прозрачной части решетки, а S – полная площадь экранируемой поверхности.

Из (1) и (2) следует, что

$$K_n = (1 - g)^2 \tag{3}$$

Для моделирования перфорированного пленочного покрытия рассмотрим случай нормального падения электромагнитной волны длиной λ на поверхность. При этом коэффициенты отражения R и прохождения T равны [3]

$$R = -\frac{1}{1 + y} \tag{4}$$

$$T = \frac{1}{1 + y} \tag{5}$$

где $y = \frac{2ia}{\lambda} \ln \left[\frac{1}{\sin\left(\frac{h\pi}{a}\right)} \right]$.

В общем случае эффективность экранирования определяется

$$k_{\text{экр}} = 20 \log \frac{1}{|T|} = 20 \log \frac{\lambda}{2a \ln \left(\frac{1}{\sin \left(\frac{h\pi}{a} \right)} \right)}, \text{ [дБ]} \tag{6}$$

Таким образом, из выражения (6) следует, что при заданных значениях λ и a , эффективность экранирования растет с уменьшением периода решетки со скоростью 20 дБ/дек, но при этом уменьшается коэффициент прозрачности в видимом диапазоне.

Одним из путей решения данной проблемы является использование экрана, в котором пленочное покрытие нанесено с обеих сторон прозрачной подложки. Анализ подобной структуры показывает, что решетки в таком экране не совмещены. Для того чтобы коэффициент прозрачности структуры не уменьшался по сравнению с одной решеткой, необходимо при том же периоде решетки уменьшить коэффициент заполнения в два раза ($g'=g/2$ или $h'=h/2$ при $a=\text{const}$). Коэффициент экранирования двухслойного пленочного покрытия $k_{\text{экр}}^0$ можно определить из выражения [3]

$$k_{12\text{экр}}^0 = \frac{k_{1\text{экр}}^0 k_{2\text{экр}}^0}{1 - R_1 R_2} \tag{7}$$

где $k_{1\text{экр}}^0 = \frac{1}{|T_1|}$ – коэффициент экранирования первого слоя, аналогично $k_{2\text{экр}}^0 = \frac{1}{|T_2|}$ – второго слоя.

Подставив выражения (4) и (5) в (7), получим

$$k_{12\text{экр}} = 60 \log \frac{\lambda}{2a \ln \left(\frac{1}{\sin \left(\frac{h\pi}{2a} \right)} \right)} - 20 \log 2, \text{ [дБ]} \tag{8}$$

Из сравнения выражений (4) и (6) видно, что эффективность двухстороннего пленочного покрытия равна

$$k_{12\text{экр}} \approx 3k_{\text{экр}} - 6, \text{ [дБ]} \tag{9}$$

Таким образом, эффективность экранирования двухстороннего перфорированного пленочного покрытия имеет более выраженную зависимость от периода решетки (или длины падающей волны).

Промоделируем, используя выражения (3) и (6), изменения эффективности экранирования перфорированного пленочного покрытия в зависимости от значения параметра a и ответствующих ему значений коэффициента прозрачности при фиксированной длине волны.

Результаты расчета сведены в таблицу 1, где $\Delta k_{\text{экр}}$ – изменение эффективности экранирования относительно величины $k_{\text{экр}}$ вычисленной при $k_n = 0,5$.

Таблица 1

Изменение эффективности экранирования в зависимости от периода решетки перфорированного пленочного покрытия

$k_n, \%$	$a, \text{ mm}$	$\Delta k_{\text{экр}}, \text{ dB}$	$k_n, \%$	$a, \text{ mm}$	$\Delta k_{\text{экр}}, \text{ dB}$
35	0.408	3.96	65	0.194	-3.42
40	0.367	2.53	70	0.163	-4.56
45	0.329	1.23	75	0.134	-5.70
50	0.293	0	80	0.106	-6.91
55	0.258	-1.18	85	0.078	-8.30
60	0.225	-2.32	90	0.051	-9.86

В таблице 2 представлены расчетные значения эффективности экранирования перфорированного пленочного покрытия с прозрачностью 50%, для различных частот электромагнитного излучения, полученные по формуле (6). Отметим, что для вычисления эффективности экрана с другой прозрачностью можно использовать значения поправок из таблицы 2.

Для оценки эффективности экранирования реально используемого перфорированного пленочного покрытия, необходимо учитывать сопротивление пленки [7].

Таблица 2

Расчетные значения эффективности экранирования перфорированного пленочного покрытия с прозрачностью 50%

<i>a, mm</i>	<i>0.5</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>4</i>
<i>f, MHz</i>				
3	101.8	95.8	89.7	83.7
10	91.4	85.3	79.3	73.3
30	81.8	75.8	69.7	63.7
100	71.4	65.3	59.3	53.3
300	61.8	55.8	49.8	43.7
1000	51.4	45.3	39.3	33.3

Теоретические исследования показали, что максимальной эффективностью экранирования электромагнитного поля обладает однослойное покрытие, изготовленное из металла с высокой магнитной проницаемостью и низким удельным сопротивлением [1]. Так как в реальных однослойных покрытиях невозможно обеспечить указанные выше свойства материалов, то применяют многослойные покрытия, состоящие из чередующихся ферромагнитных и высокопроводящих слоев. Тем не менее, в этом случае необходимо учитывать как технологические, так и экономические факторы [2, 5].

Следует также отметить, что хотя теоретические модели экранирования пленочными покрытиями и позволяют получить качественно верные зависимости, но они не дают достаточно точных количественных результатов.

Исходя из этого, были изготовлены экспериментальные образцы пленочных многофункциональных покрытий, прозрачных в видимом диапазоне спектра (в виде перфорированных металлических пленочных покрытий) и исследована их эффективность экранирования электромагнитного поля. Перечень экспериментальных тестовых образцов электромагнитных экранов и их конструктивные параметры представлены в табл. 3.

Для оценки эффективности экранирования на примере многослойных покрытий были изготовлены образцы двухслойных пленочных структур. В частности, использовались сочетания слоев высокопроводящих и ферромагнитных металлов. В качестве высокопроводящего материала использовалась медь, а ферромагнитного – никель. Кроме того никель используется как барьерный слой для устранения эффектов деградации. Пленочные покрытия наносили на оптически прозрачную подложку из силикатного стекла. Период перфорированной решетки составлял 400 мкм, ширина полос – 200 мкм.

Таблица 3

Структура и параметры тестовых образцов

№ образца	Материал подложки	Материал покрытия	Толщина покрытия	Период сетки
1	стекло	Cu	2 мкм	400 мкм
2	–	Фольга Cu	50 мкм	400 мкм
3	стекло	Cu + Ni	2 мкм + 1 мкм	400 мкм

Результаты измерений эффективности экранирования тестовых пленочных образцов представлены в табл. 4.

Таблица 4

Эффективность экранирования электромагнитного поля

№ образца	Частота, МГц									
	1	3	5	10	30	100	300	500	800	1000
1	26	20	21	18	15	16	14	16	18	16
2	45	43	40	38	32	24	20	21	22	20
3	28	21	22	20	18	19	18	21	21	24

Как видно из табл. 4, значения эффективности экранирования (более 20 дБ) соответствуют напыленной пленке меди на частотах до 30 МГц, в то время как для медной фольги (толщиной 50 мкм) эта частота выше.

Причина такого отличия заключается в структурных особенностях пленки, полученной при вакуумном напылении. Электронно-микроскопические исследования показали, что пленочные покрытия обладают дисперсной структурой и состоят из мелких зерен, размеры которых зависят от различных факторов, влияющих на осаждение металла на подложку [6, 10]. В среднем размер зерна может колебаться от единиц до десятков микрометров. В процессе роста пленки, зерна входят в соприкосновение. Однако на

поверхностях соприкосновения периодичность кристаллической структуры металла нарушается и между зернами образуется потенциальный барьер, который препятствует протеканию тока между зернами.

На основе исследуемых металлических покрытий на оптически прозрачной подложке можно создавать оптические фильтры с энергосберегающими и экранирующими свойствами, а также использовать их в соответствии с практическими рекомендациями, представленными нами в [11].

Выводы

Выполнено моделирование эффективности экранирования перфорированных пленочных электромагнитных экранов в зависимости от их конструктивных параметров. Определено, что эффективность экранирования двухстороннего перфорированного покрытия имеет более выраженную зависимость от периода решетки (или длины падающей волны), чем одностороннего. Изготовлены экспериментальные образцы многофункциональные покрытия. Представлены расчетные зависимости коэффициента экранирования перфорированного многофункциональные покрытия с прозрачностью 50 %, для различных частот электромагнитного излучения.

Список использованной литературы

1. Henry W. Ott. *Electromagnetic Compatibility Engineering*. New York, I. Wiley & Sons, 2009. 862 p.
2. Machuliansky Aleksandr, Pilinsky Vladimir, Telychkina Oksana, Rodionova Maria, Joskiewicz Zbigniew M., Wieckowski Tadeusz W. *Application of Nanostructured Materials Ensuring the Electromagnetic Compatibility of Power Electronic*. Int. Symposium EMC Europe, 13-17 September, 2010, Wroclaw, Poland, 2010, pp. 814-817.
3. Крылов Т. В. Юрченкова А. И. *Защита от электромагнитных излучений*. – М.: Сов. радио, 1972. – 216 с.
4. А.В. Мачулянский *Электромагнитные характеристики нанокompозитов на основе наноразмерных металлических включений*// *Технічна електродинаміка*.-2012.-ч.2.-С.193-197.
5. Borisova, A. Machulyansky, M. Rodionov, Y. Yakimenko, V. Bovtun, M. Kempa, B. Bondar “Conductivity of Metal (Al, Cu)-Dielectric Composites and Modeling of the Single- and Multi-layer Composite Coatings for Microwave Applications” – IEEE XXXIV International Scientific Conference “Electronics and Nanotechnology” (April, 16-19th, 2014) – p.164-167.
6. Borisova, A. Machulyansky, M. Rodionov, Y. Yakimenko, B. Babych “Properties of Aluminum Oxynitride Films Prepared by Reactive Magnetron Sputtering ” – IEEE XXXIV International Scientific Conference “Electronics and Nanotechnology” (April, 16-19th, 2014) – p.122-125.
7. *Конструирование экранов и СВЧ – устройств/ А. М. Чернушенко, Б. В. Петров, Л. Г. Малорацкий и др.*; Под ред. А. М. Чернушенко. – М.: Радио и связь. 1990.-352 с.
8. Золотухин И.В., Калинин Ю.В., Ситников А.В. *Нанокompозитные структуры на пути в наноэлектронику // Природа - 2006, № 1.- с.11-19.*
9. *Методика измерения эффективности экранирования электромагнитного поля плоскими экранирующими материалами*. ИСКШ. 032 П. 0102.95. Разработка НИИ ЭМП, г. Киев. 1996 г.
10. Бондарь Е. А., Мачулянский А. В. *Динамическая поляризуемость ультрадисперсных частиц никеля*// *Оптика и спектроскопия*. – 1990.- Т. 69. – вып. 4. – с. 876-880.
11. Borisova, B. Babych, V. Verbitskiy, A. Machulyansky, M. Rodionov, Y. Yakimenko, “Energy-Efficient Optically Transparent Coating Based on a Metal-Dielectric Composites”, IEEE 35th International Scientific Conference Electronics and Nanotechnology (ELNANO), pp. 93-96, Kyiv, Ukraine, April 21-24, 2015.