

УДК 621.315.5; 621.318.1

**ЭКРАНЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ  
НА ОСНОВЕ ПОРОШКООБРАЗНОГО ШУНГИТА**

*д-р техн. наук, проф. Л.М. ЛЫНЬКОВ, М.Ш. МАХМУД  
(Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск);  
канд. техн. наук Е.А. КРИШТОПОВА  
(Минский государственный высший радиотехнический колледж)*

*Представлены результаты исследования характеристик ослабления и отражения электромагнитного излучения экранами на основе порошкообразного минерала шунгита, содержащего графитоподобный глобулярный углерод, в диапазоне частот 8...12 ГГц. Изучено влияние концентрации порошкообразного шунгита и геометрических неровностей поверхности экрана на коэффициент отражения. Определена оптимальная с точки зрения минимума коэффициента отражения величина концентрации порошкообразного шунгита в многослойном экране. Показано, что геометрические неровности конструкции позволяют снизить величину коэффициента отражения экранов электромагнитного излучения с –6...–14 до –6...–18 дБ.*

**Введение.** В современном мире проблема контроля электромагнитной обстановки для обеспечения нормального функционирования радиоэлектронных устройств, защиты информации и экологической безопасности является весьма актуальной. Одно из решений данной проблемы – экранирование электромагнитных излучений с помощью специальных материалов и конструкций [1; 2].

Наиболее эффективными с точки зрения подавления электромагнитных излучений являются металлические экраны. Однако их использование ограничивается тем, что они «работают на отражение» и поэтому создают помехи работающему в помещении радиоэлектронному оборудованию и неблагоприятную для здоровья персонала электромагнитную среду [2; 3]. Поэтому для изготовления экранов электромагнитного излучения используют неметаллические компоненты и композиционные материалы, реализующие различные механизмы потерь: диэлектрические и магнитные потери, дисперсию, дифракцию, интерференцию и внутренние переотражения электромагнитных волн, вызывающие дополнительно ослабление энергии электромагнитной волны вследствие рэлеевского рассеяния, сложения волн в противофазе и др. [2; 4 – 6].

Для обеспечения широкого диапазона рабочих частот экранов электромагнитных излучений применяются многослойные конструкции [2 – 4; 7], а также конструкции с геометрическими неоднородностями поверхности [2 – 4; 7; 10]. Основными недостатками большинства существующих конструкций экранов электромагнитного излучения являются значительная масса и габариты, что может быть преодолено благодаря использованию порошкообразных наполнителей при сохранении технологичности их изготовления и эффективности экранирования.

В качестве порошкообразных наполнителей экранов электромагнитного излучения широкое применение нашли материалы, обладающие магнитными свойствами и имеющие высокую электропроводность, диэлектрики с высокими значениями магнитной проницаемости и полупроводники. Наиболее распространенными являются металлические и ферритовые порошки, технический углерод и фуллерены. Инкорпорирование указанных материалов в виде порошков в связующие диэлектрические вещества позволяет создавать композиционные экраны электромагнитного излучения с требуемым значением ослабления энергии электромагнитного излучения в рабочем диапазоне частот и температур [3; 8 – 10].

Перспективным порошкообразным наполнителем для создания экранов электромагнитного излучения представляется углеродсодержащий минерал шунгит [3; 10; 11]. Порошкообразный шунгит используется в качестве модифицирующей технологически активной добавки при производстве композиционных материалов и способствуют улучшению технических и эксплуатационных характеристик изделий на их основе [3; 11].

Целью настоящего исследования явилось получение эффективных экранов электромагнитного излучения для защиты информации от несанкционированного перехвата, обеспечения условий безопасного труда персонала с радиоэлектронным оборудованием и электромагнитной совместимости путем управления концентрацией наполнителя и формирования геометрических неровностей поверхности экрана.

**1. Методика, оборудование и аппаратура исследования, характеристика исходного материала**

Шунгит – природный материал с равномерным распределением высокодисперсных кристаллических силикатных частиц размером в среднем около 1 мкм в аморфной графитоподобной углеродной матрице с элементами глобулярной структуры. Между углеродом и силикатами в материале имеется исключительно развитый (около 20 м<sup>2</sup>/г) и плотный контакт [12]. Остальные составляющие шунгита – оксиды

металлов железо- и алюмосиликаты и т.д. [13] – также могут содержать микровключения сульфидов металлов  $\text{Fe}_2\text{S}$ ,  $\text{NiS}$ ,  $\text{Ni}_2\text{FeS}_4$  и др. Предполагается присутствие вкраплений типа углерод – карбид металла – металл [14].

По мнению исследователей [12], в большинстве случаев элементарным фрагментом структуры шунгитового углерода является глобула с размерами  $\sim 100 \text{ \AA}$ . Элементы структуры могут быть окружены случайной сеткой атомов углерода и атомами примесей, они могут быть ориентированы как случайным образом, так и собираться в пачки, волокна, пакеты, слои, т.е. упорядочены настолько, что может проявляться анизотропия физических свойств. Предполагается, что углерод присутствует в цепочечном виде и характеризуется устойчивыми связями типа  $-\text{C}\equiv\text{C}-$  и  $=\text{C}=\text{C}=\text{C}=[13]$ . В углеродных глобулах распределены вода, микроэлементы, дифильная битумоидная органика, фуллерены в форме  $\text{C}_{60}$  и  $\text{C}_{70}$  и нанотрубки (рис. 1) [12].

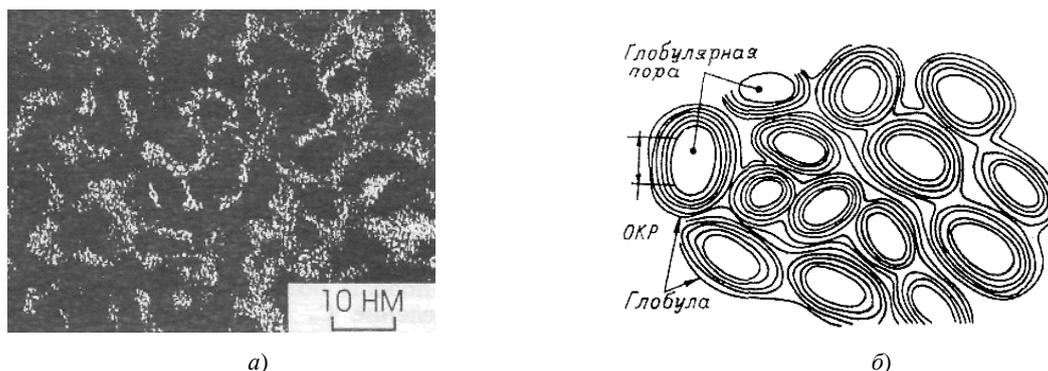


Рис. 1. Электронно-микроскопический снимок шунгитового углерода на просвет (а) и соответствующая ему модель глобулярного строения (б) [15]

В таблице приведен химический состав шунгита, предоставленного НПК «Карбон-Шунгит» для данной работы.

Химический состав шунгита [16]

$\text{SiO}_2$	$\text{TiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{FeO}$	$\text{MgO}$	$\text{CaO}$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$	S	C	$\text{H}_2\text{O}_{\text{крст.}}$ (в хлорите и слюдах)
57,0	0,2	4,0	2,5	1,2	0,3	0,2	1,5	1,2	29,0	4,2

Шунгит является проводником, и при комнатной температуре его удельное сопротивление составляет  $3,29 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}\cdot\text{см}$  [17].

Для эксперимента были изготовлены образцы многослойных экранов электромагнитного излучения двух конструкций – плоский и с геометрическими неровностями поверхности в виде пирамид. Также изготовили несколько образцов экранов электромагнитного излучения с плоской поверхностью с различными концентрациями порошкообразного шунгита с целью изучения их влияний на характеристики ослабления и отражения электромагнитного излучения. Все они были сформированы по принципу четвертьволнового экрана электромагнитных излучений со следующим чередованием слоев: первый слой толщиной 1 мм – порошкообразный шунгит, закрепленный в акриловом связующем; второй слой – целлюлозное полотно толщиной 2 мм; третий слой – металлический отражатель (алюминиевая фольга толщиной 9 мкм).

Четвертьволновой экран электромагнитного излучения может работать как идеальный поглотитель в случае нормального падения электромагнитной волны, если волновое сопротивление резистивного слоя равно сопротивлению свободного пространства ( $377 \text{ Ом}/\text{м}^2$ ), а толщина диэлектрического слоя равна нечетному количеству четвертей длины волны [7]:

$$d = \frac{\lambda}{4} + \frac{n\lambda}{2}, \quad n = 0, 1, 2, \dots, \quad (1)$$

где  $d$  – толщина диэлектрического слоя, м;  $\lambda$  – длина волны электромагнитного излучения, м.

Для изучения влияния геометрии поверхности экрана на его характеристики ослабления и отражения был изготовлен образец экрана с геометрическими неровностями поверхности, который представлял собой модуль из 25 элементов пирамидальной формы ( $5 \times 5$ ), форма сечения которых приведе-

на на рисунке 2. В качестве подложки выбрана промышленно выполненная целлюлозная форма. Каждый отдельный элемент может быть описан размерами основания (квадрат со стороной  $G_L = 30$  мм), высотой  $P_H = 36$  мм и размерами усечения вершины (в основании – квадрат со стороной  $T_L = 8$  мм). Размеры геометрических неровностей основания экрана соизмеримы с длинами волн в исследуемом диапазоне частот 8...12 ГГц. Образец экрана представлял собой целлюлозное основание с нанесенным на него слоем порошкообразного шунгита в акриловом связующем толщиной 1,5 мм.

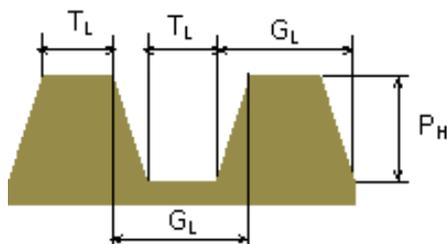


Рис. 2. Форма сечения основания поверхности экрана с геометрическими неровностями поверхности

Оценка эффективности экранирования уровня электромагнитных излучений исследуемых образцов проводилась в лабораторных условиях с помощью измерительного комплекса SNA 0,01-18 в диапазоне частот 8...12 ГГц, выбранном с учетом дальнейшего применения экранов электромагнитного излучения. При проведении измерений исследуемый образец экрана закреплялся между фланцев волноводов измерительного тракта, как показано на рисунке 3.

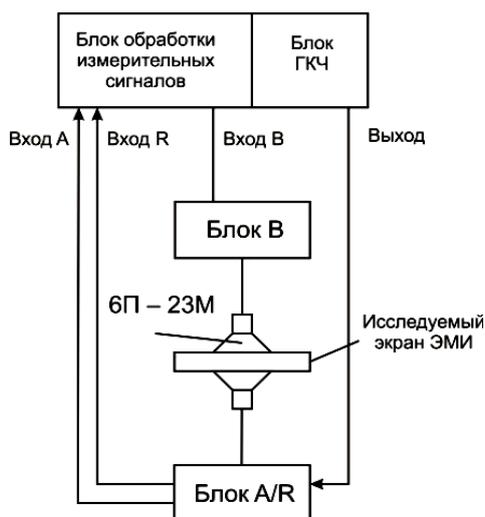


Рис. 3. Схема измерения модулей коэффициентов передачи  $S_{21}$  и отражения  $S_{11}$  образцов экранов электромагнитного излучения

Измерения проводились как отдельно образца экрана, так и образца с металлическим отражателем. В ходе измерений были получены частотные зависимости коэффициентов передачи  $S_{21}$  (по модулю равны значению ослабления электромагнитного излучения) и отражения  $S_{11}$ .

## 2. Результаты и обсуждение

Для реализации низкого значения коэффициента отражения экрана необходимо, чтобы первый слой конструкции имел относительно высокую электропроводность, но ниже, чем у металлов, что достигается подбором соотношения связующего и порошкообразного шунгита. Отражение энергии электромагнитной волны происходит вследствие следующих факторов: диэлектрических потерь в первом слое, многократных переотражений электромагнитной волны между двумя электропроводными слоями и интерференционной компенсации электромагнитных волн, отраженных от различных слоев (рис. 4).

Установлено, что все экраны с плоской поверхностью подавляют энергию электромагнитного излучения в диапазоне частот 8...12 ГГц на величину не менее 35...40 дБ. Без металлического отражателя значение ослабления электромагнитных излучений составляет не более 8 дБ.

Для образцов экранов была исследована возможность управления значением коэффициента отражения  $S_{11}$  путем изменения концентрации порошкообразного шунгита в объеме конструкции. Экспериментально полученные частотные зависимости коэффициентов отражения равномерны в диапазоне частот 8...12 ГГц, поэтому оценить влияние концентрации можно по значениям коэффициента отражения середины диапазона, равным 10 ГГц, что проиллюстрировано рисунком 5.

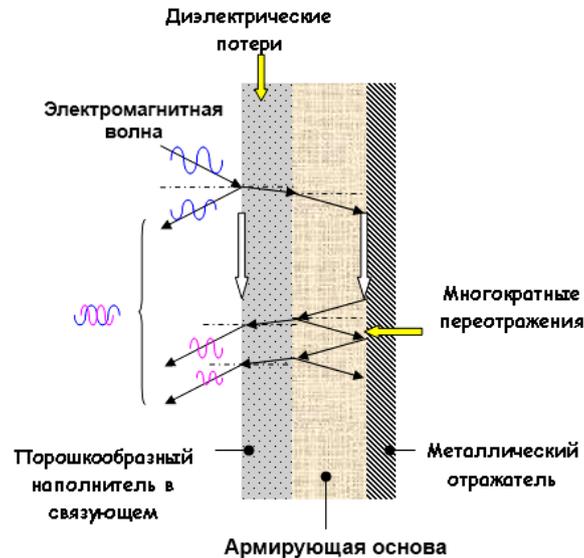


Рис. 4. Схема затухания электромагнитной волны в объеме многослойного экрана электромагнитных излучений

Установлено, что лучший результат коэффициента отражения  $S_{11}$  получен для концентрации порошкообразного шунгита  $20 \pm 5$  объем. % и составляет  $-14 \pm 1$  дБ. Во всем исследуемом частотном диапазоне коэффициент отражения  $S_{11}$  изменяется от  $-8$  до  $-14$  дБ.

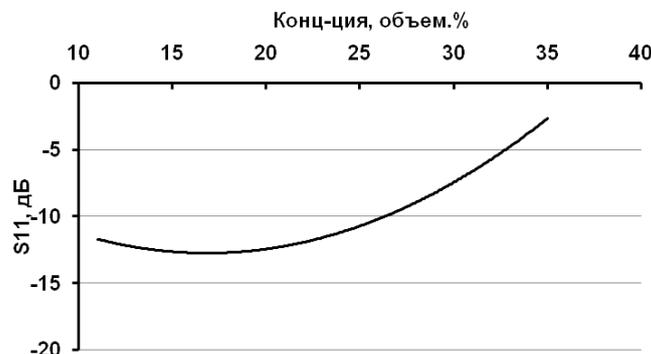


Рис. 5. Зависимость коэффициента отражения  $S_{11}$  от изменения концентрации порошкообразного шунгита в конструкции экрана электромагнитного излучения

Для изучения влияния геометрии неровностей поверхности на характеристики ослабления и отражения электромагнитного излучения экранами был исследован образец с геометрическими неровностями поверхности. Экспериментально полученные частотные характеристики отражения такого экрана приведены на рисунке 6.

Установлено, что при практически одинаковом с предыдущими образцами значения ослабления электромагнитного излучения величина коэффициента отражения экрана зависит от частоты электромагнитного излучения, имеет резонансный характер, обусловленный размерами геометрических неровностей поверхности, и увеличивается при установке за экраном металлического отражателя с  $-8...-16$  до  $-6...-18$  дБ. Причем, если в соответствии с формулой резонансов для четвертьволнового экрана (1) резонансы должны наблюдаться на частотах 8,3 ГГц (максимум поглощения) и 11,1 ГГц (максимум

отражения), то вследствие пирамидальной поверхности резонансов становится больше, они появляются реже с ростом частоты.

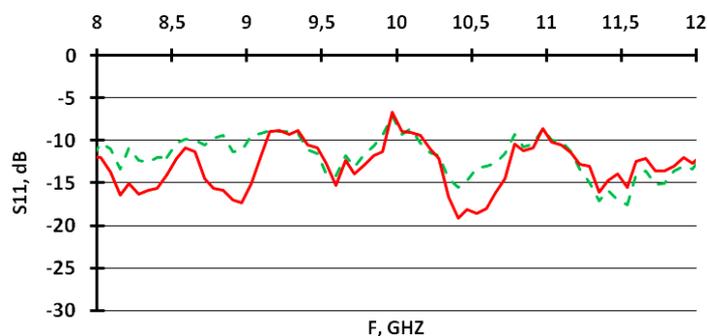


Рис. 6. Частотная зависимость коэффициента отражения  $S_{11}$  в диапазоне частот 8...12 ГГц: пунктирная линия – экран электромагнитного излучения без металлического отражателя, сплошная линия – экран электромагнитного излучения с установленным за ним металлическим отражателем

### Заключение

Установлено, что при использовании металлического отражателя все образцы экранов подавляют электромагнитное излучение на величину не менее 35 дБ. Оптимальная с точки зрения минимума коэффициента отражения величина концентрации порошкообразного шунгита в многослойном экране электромагнитного излучения составляет 20 объем. %. Порошкообразный шунгит вследствие своего сложного химического состава и структуры одновременно обладает электропроводностью и обеспечивает диэлектрические потери, что делает перспективным его использование в качестве наполнителя экранов электромагнитного излучения.

Показано, что введение в конструкцию экрана электромагнитного излучения геометрических неровностей поверхности позволяет снизить величину коэффициента отражения с  $-6...-14$  до  $-6...-18$  дБ. Управляя концентрацией порошкообразного шунгита в акриловом связующем, используя многослойные конструкции экранов электромагнитного излучения, и создавая конструкцию с геометрическими неровностями поверхности, соизмеримыми с длиной волны падающего электромагнитного излучения, возможно получение эффективных экранов электромагнитных излучений для различных применений (защита информации от утечки по электромагнитному каналу, обеспечение электромагнитной совместимости, создание безопасных условий труда персонала, работающего с радиоэлектронным оборудованием и т.д.).

Представленные материалы – результат исследований по выполняемому совместному белорусско-монгольскому проекту фонда фундаментальных исследований БРФФИ № Ф10Мн-001 «Физико-химический, мультифрактальный и микроструктурный анализ углеродных материалов для их рационального использования в промышленности».

### ЛИТЕРАТУРА

1. Шапиро, Д.Н. Основы теории электромагнитного экранирования / Д.Н. Шапиро. – Л.: Энергия, 1975. – 112 с.
2. Электромагнитные излучения. Методы и средства защиты / В.А. Богуш [и др.]; под ред. Л.М. Лынькова. – Минск: Бестпринт, 2003. – 406 с.
3. Углеродсодержащие минералы и области их применения / Т.В. Борботько [и др.]. – Минск: Бестпринт, 2009. – 156 с.
4. Шнейдерман, Я.А. Новые радиопоглощающие материалы / Я.А. Шнейдерман // Зарубежная радиоэлектроника. – 1969. – № 6. – С. 101 – 124.
5. Knott, E.F. Radar Cross Section / E.F. Knott, J.F. Shaeffer, M.T. Tuley. – Norwood, MA., USA: Artech House, Inc., 1993. – 611 p.
6. Маковецкий, П.В. Отражение радиолокационных сигналов. Лекции / П.В. Маковецкий, В.Г. Васильев. – Л.: ЛИАП, 1975. – 50 с.
7. Säily, J. Studies on specular and non-specular reflectivities of radar absorbing materials (RAM) at submillimetre wavelengths / J. Säily, A.V. Räsänen. – Espoo, Finland: Helsinki University of Technology Radio Laboratory Publications, 2003. – 56 p.

8. Iha, V. Composite based on waste-ferrites as microwave absorbers / V. Iha, A. Banthia // *Indian J. Phys.* – 1989. – Vol. 63, № 5. – P. 514 – 525.
9. Chung, D.D.L. Materials for Electromagnetic Interference Shielding / D.D.L. Chung // *Journal of Materials Engineering and Performance.* – 2000. – № 9(3). – P. 350 – 354.
10. Лыньков, Л.М. Микроволновые и оптические свойства многофункциональных экранов электромагнитного излучения на основе порошкообразного шунгита / Л.М. Лыньков, Т.В. Борботько, Е.А. Криштопова // *Современные методы и технологии создания и обработки материалов: материалы 4-й междунар. науч.-техн. конф., Минск, 19 – 21 окт. 2009 г. – Минск, 2009. – С. 23 – 25.*
11. Радиопоглощающие свойства гибких экранов электромагнитного излучения на основе порошкообразного шунгита / Л.М. Лыньков [и др.] // *Сб. науч. ст. Военной акад. Респ. Беларусь. – 2008. – № 15. – С. 57 – 61.*
12. Соловьева, А.Б. Органическое вещество шунгитовых пород / А.Б. Соловьева, Н.Н. Глаголев, Н.А. Зайченко // *Углеродсодержащие формации в геологической истории: тез. докл. междунар. симпоз., Петрозаводск, 2 – 7 июня 1998 г. – Петрозаводск: Карельский науч. центр Рос. акад. наук; Ин-т геологии, 2000. – С. 131 – 133.*
13. Березкин, В.И. Исследование структуры природного стеклоуглерода шунгитов методом рамановской спектроскопии / В.И. Березкин, Ю.В. Холодкевич, В.Ю. Давыдов // *Углеродсодержащие формации в геологической истории: тез. докл. междунар. симпоз., Петрозаводск, 2 – 7 июня 1998 г. – Петрозаводск: Карельский науч. центр Рос. акад. наук; Ин-т геологии, 2000. – С. 111.*
14. Зайденберг, А.З. Микроэлементный состав шунгитов первой разновидности / А.З. Зайденберг // *Сб. тез. докл. 7-й конф. по ХТТ России и стран СНГ, 1996 г. – М., 1996. – С. 66 – 67.*
15. Волков, И.А. Версия о фуллереновой природе пористости глобулярных шунгитов Карелии / И.А. Волков, И.А. Кушмар // *Углеродсодержащие формации в геологической истории: тез. докл. междунар. симпоз., Петрозаводск, 2 – 7 июня 1998 г. – Петрозаводск: Карельский науч. центр Рос. акад. наук; Ин-т геологии, 2000. – С. 121 – 124.*
16. Характеристики и свойства шунгита / Карбон-шунгит [Электронный ресурс]. – 2011. – Режим доступа: <http://www.shungit.ru/shungit/harakteristiki.html>.
17. Березкин, В.И. Эффект Холла в природном стеклоуглероде шунгитов / В.И. Березкин, П.П. Константинов, С.В. Холодкевич // *Физика твердого тела. – 1997. – Т. 39, № 10. – С. 1783 – 1786.*

Поступила 27.02.2012

## ELECTROMAGNETIC RADIATION POWDER MINERALS BASED SHIELDS

*L. LYNKOV, M. MAHMUD, E. KRYSHTOPOVA*

*The results of the studies of the characteristics of attenuation and reflection of electromagnetic radiation shields performed from powder mineral shungite containing globular graphite carbon, in the range of 8...12 GHz are given. The effect of the concentration of shungite and geometric irregularities of the shield's surface on the values of the reflection coefficient are investigated. It is shown that with using a metal reflector, all the samples attenuate electromagnetic radiation by the amount not less than 35 dB. The optimum in terms of minimum reflectance value of the concentration of shungite in a multi-layer shield is found. It is shown that using geometrical irregularities of the shield's surface can reduce the reflection coefficient from –6...–14 to –6...–18 dB.*