

УДК [004.353.2:537.531]:537.622.6

## ЭКРАНЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ФЕРРИМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

О.В. БОЙПРАВ, М.Р. НЕАМАХ, В.Б. СОКОЛОВ, Т.В. БОРБОТЬКО

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь

Поступила в редакцию 16 марта 2012

Приводятся описание и анализ результатов измерений и расчета параметров магнитных характеристик (зависимостей относительной магнитной проницаемости от величины индукции внешнего магнитного поля и температуры окружающей среды) порошкообразного шлама очистки ваграночных газов, который предложено использовать для разработки конструкций экранов электромагнитного излучения градиентного типа.

*Ключевые слова:* вибрационный магнитометр, индукция магнитного поля, относительная магнитная проницаемость, ферромагнетик, ферримагнетик, шлам очистки ваграночных газов, электромагнитное излучение.

### Введение

Современные устройства обработки данных (УОД) базируются на микропроцессорных и микроселектронных элементах и, в связи с этим, способны оперативно формировать и обрабатывать информационные сигналы в широком диапазоне частот. Однако в процессе своего функционирования эти устройства способны наводить друг на друга паразитные емкостные и индуктивные связи, которые могут нарушать целостность обрабатываемых данных. Снизить значения коэффициентов этих связей возможно путем обеспечения электромагнитной совместимости УОД, которое предполагает использование конструкций, экранирующих ЭМИ, в широком диапазоне частот.

Эффективность экрана ЭМИ определяется уровнем диэлектрических и магнитных потерь энергии электромагнитных волн в его материале, а также уровнем потерь на проводимость. Уровни диэлектрических и магнитных потерь в среде прямо пропорциональны значениям ее относительной диэлектрической ( $\epsilon$ ) и магнитной ( $\mu$ ) проницаемости. В силу этого для создания эффективного экрана ЭМИ необходимо выбирать материалы с высокими показателями  $\epsilon$  и  $\mu$  [1].

Таким образом, базовый этап разработки экранов ЭМИ сопровождается измерением и сравнением электрических параметров (электропроводности, диэлектрической проницаемости) набора предполагаемых к использованию материалов, а также исследованием и сравнительным анализом магнитных характеристик последних.

По реакции на внешнее магнитное поле и по характеру внутреннего магнитного упорядочения все вещества в природе можно разделить на пять групп: диамагнетики, парамагнетики, ферромагнетики, антиферромагнетики, ферримагнетики. Диа-, пара- и антиферромагнетики можно объединить в группу слабомагнитных веществ, относительная магнитная проницаемость которой примерно равна 1. Ферро- и ферримагнетики являются сильномагнитными материалами. Значения их относительной магнитной проницаемости зависят от величины внешнего магнитного поля ( $B$ ) и лежат в пределе  $10^2 \dots 10^6$  у ферромагнетиков,  $1 \dots 10^2$  – ферримагнетиков [2, 3]. К ферромагнетикам относят железо, никель, кобальт и сплавы данных металлов. Основным недостатком ферромагнетиков заключается в их подверженности коррозии, а также низкой температурной стабильности их магнитных свойств. Данных недостатков лишены фер-

римагнетики, свойствами которых в большинстве случаев обладают различные оксидные соединения металлов, в частности, ферриты. Поэтому ферримагнетики более приемлемы, чем ферромагнетики, для изготовления конструкций, экранирующих ЭМИ. Так как перечень требований к свойствам последних является разнообразным и постоянно расширяющимся, то набор существующих ферримагнетиков следует совершенствовать, дополняя его новыми образцами. Базовый этап поиска новых ферримагнетиков включает в себя процессы выявления особенностей и исследования магнитных характеристик ранее не исследованных оксидных соединений металлов. К числу последних относится шлак очистки ваграночных газов (ШОВГ), в состав которого входят 22,66% по масс. оксида кальция, 11,37% по масс. оксида трехвалентного железа, 3,57% по масс. оксида магния, 3,38% по масс. оксида натрия, 3,25% по масс. оксида алюминия, 1,96% по масс. оксида калия, а также 24,35% по масс. оксида кремния, 2,68% по масс. оксида серы и др. [4]. ШОВГ представляет собой порошкообразные отходы, образующиеся в результате фильтрации и обработки в осевом циклоне газов, отбираемых через трубы шахтных печей в процессе переплавки в них чугуна с использованием древесного угля и кокса. Отличительной особенностью ШОВГ по сравнению с ферритами и иными оксидными соединениями металлов является его низкая стоимость.

Целью работы является исследование магнитных характеристик (зависимостей относительной магнитной проницаемости от величины внешнего магнитного поля и температуры) образцов порошкообразных соединений оксидов металлов – шлама очистки ваграночных газов (ШОВГ) – отличающихся друг от друга размером фракций.

### **Методика проведения эксперимента**

В рамках настоящей работы были проведены измерения магнитных характеристик (зависимостей относительной магнитной проницаемости от величины внешнего магнитного поля и температуры окружающей среды) образцов порошкообразного ШОВГ, отличающихся друг от друга степенью измельчения фракций. У образцов №1 и №2 размер фракций составил 5 мкм и 20 мкм соответственно (мелкоизмельченные фракции), у образца №3 – 30 мкм (среднеизмельченные фракции).

Измерения параметров зависимостей относительной магнитной проницаемости ШОВГ от величины внешнего магнитного поля проводились при комнатной температуре и при значениях магнитной индукции, изменяющихся равномерно, с шагом 0,02 Тл, в пределах диапазона (–3 Тл...3 Тл). Измерения температурных зависимостей относительной магнитной проницаемости ШОВГ проводились в диапазоне от комнатной до гелиевой температуры при постоянном значении  $B$ , равном 0,5 Тл.

Исследование магнитных характеристик ШОВГ проводилось при помощи вибрационного метода измерений с использованием вибрационного магнитометра Cryogenic 14T VIBRATING SAMPLE MAGNETOMETER. Принцип действия прибора основан на измерении значений магнитной индукции исследуемого образца, колеблющегося в постоянном магнитном поле.

Основными узлами вибрационного магнитометра Cryogenic 14T VIBRATING SAMPLE MAGNETOMETER являются генератор механических колебаний, электронный измерительный блок, соленоид, измерительные катушки, датчик поля Холла, шток с кварцевым держателем образца. В конструкцию генератора механических колебаний входит емкостной датчик, стабилизирующий амплитуду колебаний образца. Электронный измерительный блок имеет модульную структуру. В его состав входят источник питания, генератор синусоидального сигнала с усилителем мощности для питания генератора механических колебаний, модуль управления, фазовый детектор, усилитель сигнала, поступающего с измерительных катушек, измеритель поля Холла, регистрирующий значения магнитной индукции исследуемого образца.

В процессе измерений исследуемый образец помещался в пластиковую трубку и закреплялся между фиксаторами штока. Источником магнитного поля служил соленоид. Направление колебаний образца – вертикальное, а магнитный момент образца, индуцированный внешним магнитным полем, был ориентирован горизонтально. Сигнал от измерительных катушек после фазового детектирования и усиления поступал на вход измерителя поля Холла. Генератором механических колебаний выступал электродинамический громкоговоритель,

движение образцу передавалось от него посредством штока. Амплитуда колебаний образца была постоянной и составляла 0,0344 м.

Относительная погрешность проведенных измерений составила  $\pm 1\%$ . Источником погрешности является нестабильность частоты колебаний образца, равная  $10^{-2}$  Гц. Возникновение данной нестабильности может быть связано с дрейфом электрических параметров схемы, питающей генератор механических колебаний.

### Результаты и их обсуждение

На основании результатов измерений значений магнитной индукции образцов ШОВГ рассчитаны значения их относительной магнитной проницаемости. По результатам расчета построены зависимости относительной магнитной проницаемости ШОВГ от величины индукции внешнего магнитного поля и температуры окружающей среды.

Установлено, что относительная магнитная проницаемость ШОВГ увеличивается по мере увеличения уровня внешнего магнитного поля. Значение начальной относительной магнитной проницаемости (при  $B = 0$ ) для образца №1 составляет 0,28, для образца №2 – 0,53, для образца №3 – 1,1, значения максимальной относительной магнитной проницаемости равны 4,04; 7,18; 41,1 соответственно. Кроме того, для образцов ШОВГ характерны явления остаточной намагниченности.

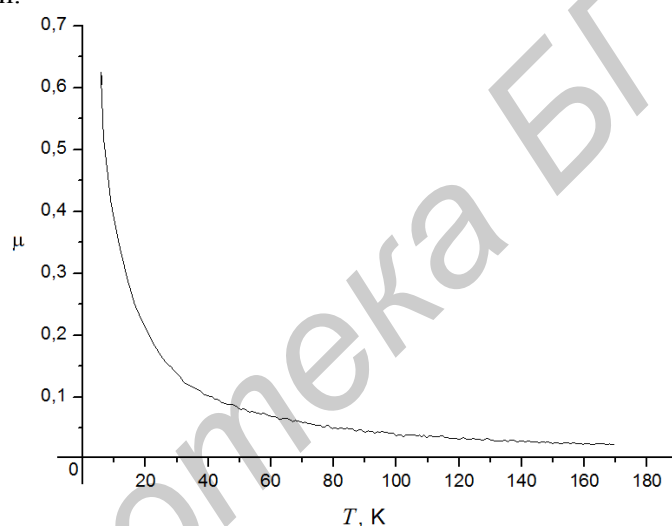


Рис. 1. Температурная зависимость относительной магнитной проницаемости образца №1

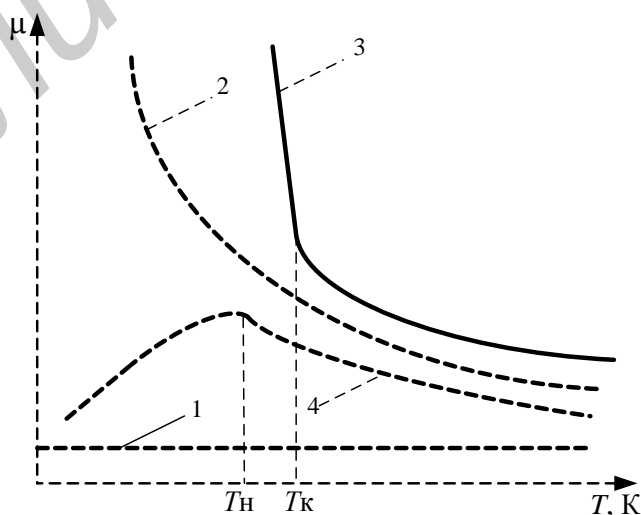


Рис. 2. Общий вид температурной зависимости относительной магнитной проницаемости диамагнетиков (1), парамагнетиков (2), ферро- и ферримагнетиков (3), антиферромагнетиков (4)

Выявлено, что относительная магнитная проницаемость ШОВГ изменяется с изменением температуры окружающей среды. Характер графика температурной зависимости относительной магнитной проницаемости ШОВГ (см. рис. 1) схож с характером аналогичного графика для ферромагнетиков (рис. 2). На рис. 2  $T_N$  – точка Нееля (температура, при которой антиферромагнетик переходит в парамагнитное состояние),  $T_K$  – точка Кюри (температура, при которой ферро- либо ферримагнетик переходит из упорядоченного магнитного состояния в неупорядоченное (парамагнитное) и тем самым утрачивает свои магнитные свойства) [5].

Для описания характера изменения магнитных свойств материала при изменении температуры окружающей среды может быть использован температурный коэффициент магнитной проницаемости ( $TK_\mu$ ) [6]

$$TK_\mu = \frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu_1} \cdot \frac{1}{T_2 - T_1}, \quad (1)$$

где  $\mu_1$  и  $\mu_2$  – значения относительной магнитной проницаемости материала при температурах  $T_1$  и  $T_2$  соответственно.

На основании расчета установлено, что в диапазоне отрицательных температур (169 К...6 К) среднее значение температурного коэффициента магнитной проницаемости ( $TK_\mu$ ) ШОВГ составляет  $0,055 \text{ K}^{-1}$ , т.е. при изменении температуры окружающей среды на 1 К значение относительной магнитной проницаемости ШОВГ изменяется на 0,055. В области гелиевых температур (27 К...6 К), значение относительной магнитной проницаемости ШОВГ начинает резко возрастать и  $TK_\mu$  при этом составляет  $0,2 \text{ K}^{-1}$ . Подобное поведение присуще температурным зависимостям относительной магнитной проницаемости ряда ферритов [7].

### Заключение

Порошкообразный ШОВГ можно отнести к новым образцам ферромагнетиков, т. к. значения его относительной магнитной проницаемости ниже  $10^2$ , зависят от величины внешнего магнитного поля и характеризуются высокой температурной стабильностью. ШОВГ обладает способностью намагничиваться в слабых магнитных полях, величина индукции которых не превышает 3 Тл.

Размер фракций ШОВГ оказывает влияние на магнитные характеристики данных порошкообразных материалов: увеличение размера фракций ШОВГ приводит к увеличению его магнитной проницаемости.

На основе порошкообразного ШОВГ можно формировать конструкции, которые будут эффективно экранировать ЭМИ. Одна из разновидностей таких конструкций может быть реализована путем засыпания порошка ШОВГ со среднеизмельченными фракциями в каналы листа сотового поликарбоната. Эти листы можно использовать для отделки внутренних стен экранируемых помещений (например, серверных комнат). В диапазоне частот 0,7...16 ГГц значения коэффициентов отражения таких конструкций составляют от –8 дБ до –16 дБ, а коэффициентов передачи – от –5 дБ до –16 дБ.

Кроме того, на основе порошкообразного ШОВГ возможно реализовать многослойные конструкции экранов ЭМИ градиентного типа, в которых магнитная проницаемость будет увеличиваться по мере перехода электромагнитной волны от одного слоя к другому. При этом в качестве первого слоя должен выступать лист сотового поликарбоната, заполненный порошком ШОВГ, обладающим наименьшим значением относительной магнитной проницаемости, т. е. с размером фракций 5 мкм, второго и третьего – порошком ШОВГ с размером фракций 20 мкм и 30 мкм соответственно. Таким образом будет улучшено согласование волновых сопротивлений начальной среды распространения электромагнитных волн и материала подобной экранирующей конструкции, что приведет к уменьшению ее коэффициента отражения и расширению рабочего диапазона частот относительно соответствующих параметров однослойных конструкций.

# ELECTROMAGNETIC RADIATION SHIELDS BASED ON FERRIMAGNETIC MATERIALS

O.V. BOIPRAV, M.R. NEAMAN, V.B. SOKOLOV, T.V. BORBOTKO

## Abstract

A description and analysis of the magnetic properties measurement and calculation results (dependences of the relative magnetic permeability from the external magnetic field induction and ambient temperature) of powdered sludge treatment cupola gases are shown. It's proposed to use this material for the development of electromagnetic radiation shields of the gradient type.

## Литература

1. Козловский В.В., Софиенко И.И. // Вісник ДУІКТ. 2009. №7 (3). С. 233-245.
2. Андреев В.М. Материалы микроэлектронной техники. М., 1989.
3. Гуревич А.Г. Магнитный резонанс в ферритах и антиферромагнетиках. М., 1973.
4. Протокол испытаний № 5018 от 23.02.2011. НИИПРУП «Институт НИИСМ». Научно-исследовательская лаборатория физхимии силикатов.
5. Великанов Д.А., Юркин Г.Ю., Патрин Г.С. // Научное приборостроение. 2008. №3 (18). С. 86-94.
6. Ивлев Ю.Н. Химия радиоматериалов. М., 2003.
7. Смит Я., Вейн Х. Ферриты. М., 1962.