

**Summary**

Peculiarities of the action of glow discharge plasma on aqueous solution containing different types of industrial contaminants, including soluble heavy and radioactive metal salts, surfactants, and pathogenic organisms, have been considered. A high effectiveness of the use of the method of low-temperature glow-discharge electrolysis in the purification of industrial wastewater of different composition has been shown.

С.А. Баранов

## КОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ МИКРОПРОВОДА ДЛЯ РАДИОПОГЛОЩАЮЩИХ ЭКРАНОВ

*Институт прикладной физики АН РМ  
ул. Академией, 5, г. Кишинев, MD-2028, Республика Молдова*

Использование высоких и сверхвысоких частот в технике привело к необходимости создания защитных экранов. Литой аморфный микропровод может применяться как радиопоглощающий элемент в композиционном материале, например в каучуке [1]. Широкополосный радиопоглощающий материал можно создавать из микропровода различных сплавов с разной частотой естественного ферромагнитного резонанса. Явление естественного ферромагнитного резонанса в литом аморфном магнитом микропроводе подробно описано в работах [2 – 6]. Обсудим задачи оптимального конструирования композитов на основе микропровода. Так как поглощающие свойства материала связаны с высокочастотной проводимостью, проведем анализ обобщенной проводимости композитов.

**Обобщенная проводимость композита**

Радиопоглощающий материал с применением микропровода может быть основан на двух принципах размещения поглощающих элементов: а) стохастическая смесь из поглощающих отрезков, б) упорядоченная решетка. На самом деле можно использовать комбинацию этих способов размещения микропровода, но здесь рассмотрим их в отдельности. Важной электродинамической характеристикой поглощающей системы в обоих случаях является обобщенная высокочастотная проводимость. Воспользуемся результатом работ [7 – 9] и представим обобщенную проводимость композита в случае а) в следующей форме:

$$\begin{aligned} \Sigma_{\text{ср}} &= A + \sqrt{A^2 + a\Sigma_1\Sigma_2}, \\ A &= \frac{1}{2}[\Sigma_1(x_1 - ax_2) + \Sigma_2(x_2 - ax_1)]. \end{aligned} \quad (1)$$

Для второго случая представим обобщенную проводимость

$$\begin{aligned} \Sigma_{\text{эф}} &= \Sigma_0(1 + x_2/B), \\ B &= (1 - x_2)/(1/a + 1) + \Sigma_0/(\Sigma_2 - \Sigma_0) \end{aligned} \quad (2)$$

(напомним, что это матричная система с эффективной проводимостью  $\Sigma_{\text{эф}}$ ).

Индексы  $i = 0; 1$  относятся к непоглощающей компоненте ( $0$  – это, например, основа на которую наматывается микропровод,  $1$  – это непроводящий элемент стохастической смеси, например, резина), индекс  $i = 2$  – микропровод,  $x_i$  – объемная концентрация и  $\Sigma_i$  – обобщенная проводимость данной компоненты смеси (которая в данном случае может быть импедансом или комплексной магнитной проводимостью).

Параметр фрактальной размерности системы в обоих случаях  $a$  согласно [7 – 9] определяется:

$$a = 1/(L - 1), \quad (3)$$

где  $L$  – фрактальная размерность пространства, которая, как показано в [7], определяется из уравнения, имеющего для плоской задачи (с геометрической размерностью  $L_2^0 = 2$ ) формальное решение вида

$$1/L = 1/L_2^0 + \Sigma_{cp}/(\Sigma_2 - \Sigma_1 + M), \quad (4)$$

где  $\Sigma_{cp} \sim \sqrt{\Sigma_1 \Sigma_2}$ , а  $M \sim \Sigma_{cp}/(\Sigma_2 - \Sigma_1 + M)$  (строится итерационная система вычисления). Для трехмерной системы подобное вычисление параметра  $1/L_3$  сложнее и не сводится к замкнутому виду. Пример простейшего расчета для трехмерной системы приведен в [9].

В высокочастотную проводимость входят параметры – действительная и мнимая часть импеданса микропровода. Ниже рассматривается методика измерения этих параметров.

#### Методика измерений отрезка из микропровода

В работах [5 – 7] предложен волноводный метод измерения импеданса, основывающийся на формулах

$$\begin{aligned} \alpha &= 0,5 \cdot [(1 - |T|^2 - |R|^2)/|R|^2], \\ \beta^2 &= |T|^2/|R|^2 - 0,5 \cdot [1 - |T|^2 - |R|^2]^2/|R|^4, \end{aligned} \quad (5)$$

$|T|$ ,  $|R|$  – коэффициенты прохождения и отражения от микропровода в волноводе;  $\alpha$ ,  $\beta$  относительные (деленные на половину сопротивления волновода) действительная и мнимая части импеданса. Значение величины  $\beta$  необходимо изменить на  $\beta'$ , учитывающее приконтактное емкостное сопротивление. Для этого комплексные величины

$$\begin{aligned} R &= 1/(1 + \alpha + i\beta'), \\ T &= (\alpha + i\beta')/(1 + \alpha + i\beta') \end{aligned} \quad (6)$$

должны удовлетворять уравнению [10]:

$$\alpha + i\beta' = \{1 - R + T + 0,5 \cdot [(1 - T)^2 - R^2]\}/[(1 - R)^2 - T^2]. \quad (7)$$

Вычисление величины приконтактной емкости в модели плоскость – цилиндр (покрытый стеклянной оболочкой) приводит к формуле

$$\begin{aligned} C &= \pi \epsilon \epsilon_0 L \Phi(r_{ж}, h_{изол}), \\ \Phi(r_{ж}, h_{изол}) &= \left[ \operatorname{Ln} \left| h_{изол}/r_{ж} + \sqrt{(h_{изол}/r_{ж})^2 + 1} \right| \right]^{-1}, \end{aligned} \quad (8)$$

где  $h_{изол}$  – толщина стеклянной изоляции,  $r_{ж}$  – радиус жилы,  $L$  – длина, через которую осуществляется емкостная связь (обычно  $L \sim 0,01$  м), а также ее измерение приводит к величинам 1 – 10 ПФ. Эта величина даст несущественный вклад в  $\beta$  в области, далекой от ферромагнитного резонанса. Как отмечалось в [7 – 11] вблизи резонанса необходимо учитывать реактивное сопротивление контакта провода с волноводом. Осуществить это позволяет численное решение (7) относительно  $\beta'$  с учетом емкостного сопротивления с емкостью (8).

#### Электродинамические характеристики решетки из микропровода

Ранее нами подробно рассматривался вариант создания радиопоглощающего материала из хаотических диполей микропровода, которые находились в резине (то есть стохастическая смесь) [1]. Ниже рассмотрим подробно дифракционную решетку из микропровода с шагом  $A < \lambda$ , где  $\lambda$  – длина волны электромагнитного поля. В этом случае имеет смысл рассматривать поверхностный импеданс

$$Z = R + iX. \quad (9)$$

Измеряемой величиной могут быть коэффициенты прохождения  $|T|$  и отражения  $|R|$ , которые, как и в предыдущем пункте, определяются через относительные реальную и мнимую части импеданса

$$\begin{aligned} |T|^2 &= (\alpha^2 + \beta^2)/[(1 + \alpha)^2 + \beta^2], \\ |R|^2 &= 1/[(1 + \alpha)^2 + \beta^2], \end{aligned} \quad (10)$$

где  $\alpha = 2R/Z_0$ ;  $\beta = 2X/Z_0$ ;  $Z_0 = 120\pi/A$ .

Здесь используется аналогия между задачей проводника в волноводе и дифракционной решетке, отмеченное в [10, 12]. Введем функцию:

$$|G|^2 = 1 - |T|^2 - |R|^2 = 2\alpha / [(1 + \alpha)^2 + \beta^2], \quad (11)$$

которая является функцией поглощения. Несложно видеть, что данная функция имеет максимум при согласовании

$$\alpha \rightarrow 1 \text{ и } \beta \rightarrow 0.$$

$$\text{Тогда } |G|^2 = 1/2, |T|^2 = |R|^2 = 1/4. \quad (12)$$

Таким образом, поглощательные свойства нитей в данной модели сильно ограничены, что также не соответствует реальным экспериментальным данным.

#### Результаты исследований и выводы

Показатели ослабления электромагнитного поля дифракционной решетки с шагом  $10^2 \text{ м}^{-1}$  (измерения проводились согласно [13, 14]) в диапазоне 0,1 – 10 ГГц изменялись от 18 до 15 дБ. Для решетки с шагом  $10^3 \text{ м}^{-1}$  – от 20 до 40 дБ.

Теоретические оценки при учете только активного сопротивления провода дают гораздо меньшие значения коэффициента поглощения в пределах 5 – 15 дБ.

Существование ненулевой магнитной проницаемости позволяет расширить условия согласования для решетки. Как видно из экспериментальных данных, у полученных экранов аномально большие коэффициенты поглощения. Указанное различие нельзя объяснить только резистивными свойствами микропровода. Существенное увеличение поглощения обусловлено мнимой частью комплексной величины магнитной проницаемости  $\mu$  – магнитной вязкостью  $\mu''$ . Зависимость  $\beta$  от  $\mu''$  носит линейный характер, что приводит к уменьшению коэффициента отражения. Поскольку одновременно уменьшается и коэффициент прохождения, это означает, что энергия электромагнитного излучения поглощается в материале с элементами поглощения из микропровода.

Управляя магнитной проницаемостью микропровода, изменяя состав и диаметр жилы, возможно получение ряда материалов с различными диапазонными поглощающими свойствами.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Баранов С.А. Использование микропровода с естественным ферромагнитным резонансом для радиопоглощающих материалов // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. № 14. С. 21 – 23.
2. Баранов С.А., Бержанский В.Н., Зотов С.К. и др.. Ферромагнитный резонанс в аморфных магнитных проводах // ФММ. 1989. Т. 67. В. 1. С. 73 – 78.
3. Баранов С.А., Зотов С.К., Ларин В.С., Торкунов А.В. Особенности естественного ферромагнитного резонанса в аморфном микропроводе // ФММ. 1991. Т. 69. В. 12. С. 172 – 173.
4. Баранов С.А., Зотов С.К., Ларин В.С., Торкунов А.В. Структура и свойства аморфного микропровода // Металловедение и термическая обработка металлов. 1992. № 9. С. 26 – 28.
5. Баранов С.А. Магнитные свойства аморфного микропровода в СВЧ диапазоне // ЖТФ. 1998. Т. 68. № 1. С. 136 – 137.
6. Баранов С.А. Исследование микропровода методом ферромагнитного резонанса // Электронная обработка материалов. 1998. № 1 – 2. С. 66 – 68.
7. Баранов С.А. Обобщенная проводимость и оптимальное выделение энергии // ЖТФ. 1999. Т. 69. № 7. С. 128 – 129.
8. Баранов С.А. Обобщенная проводимость композита на основе микропровода // Вестник Приднестровского университета. 1994. № 1(2). С. 126 – 130.
9. Баранов С.А., Щеглов Ю.А. Электропроводность водно-стружечных смесей // Электронная обработка материалов. 1985. № 1. С. 71 – 72.
10. Газян Л.Г., Суслов Л.И. Номограмма определения параметров эквивалентного четырехполюсника для рефлектометрического метода измерений // Радиотехника. 1988. № 7. С. 92 – 93.
11. Баранов С.А., Щеглов Ю.А. Электропроводность водно-стружечных смесей // Электронная обработка материалов. 1983. № 6. С. 73 – 74.
12. Чебану В.Г., Баранов С.А., Щеглов Ю.А. Роль клеточных структур в определении электропроводности растительной ткани // Электронная обработка материалов. 1983. № 5. С. 77 – 79.
13. Материалы магнитомягкие высокочастотные (методы испытаний в диапазоне частот от 20 до 2000 МГц) ГОСТ 12637-67. М., 1967.
14. Поглотители электромагнитных волн для экранирования камер. ГОСТ Р500 11. 1992. С. 1 – 15.

Поступила 07.10.02

## Summary

Special absorbing screens and coverings made of microwire-based composite materials can serve as effective protection of data processing and data transfer devices from undesirable electromagnetic radiation. There are some significant achievements in the area of manufacturing of microwires based on various metals, alloys. Due to discovery of some special microwire properties such as natural ferromagnetic resonance the magnetic materials-based microwires are of great interest at the time being. In case of microwire, natural ferromagnetic resonance becomes apparent by abnormal absorption of electromagnetic wave energy and is caused by interaction of substance and electromagnetic radiation field. Phenomenon of electromagnetic radiation absorption has been investigated in a wide range of frequencies, up to 12 GHz. Depending on microwire strand material composition absorption characteristics of desirable frequency range and frequency bands, starting from unities GHz, can be achieved. Propagation of electromagnetic wave through an absorbing screen with microwire-based absorption elements can be characterized by propagation, reflection and absorption factor ~ 20 dB.

---