

09;12

## Магнитные свойства аморфного микропровода в СВЧ диапазоне

© С.А. Баранов

(Поступило в Редакцию 20 декабря 1996 г.)

Проведен учет частотной дисперсии магнитной проницаемости при нахождении импеданса аморфного микропровода. Проанализированы возможности измерения магнитных параметров и приведены основные характеристики аморфного микропровода в СВЧ области.

Для создания поглощающих экранов в СВЧ диапазоне необходимы материалы, обладающие большим значением компонент магнитной проницаемости  $\mu$  (см., например, [1]). Литой аморфный микропровод, насколько нам известно, является уникальным материалом, так как благодаря естественному ферромагнитному резонансу в диапазоне частот до 10 GHz [2–4] композиты на его основе обладают радиопоглощающим свойством [5].

Отметим, что  $\mu$  в данном диапазоне частот имеет резонансный характер [2–8], поэтому модельные расчеты радиопоглощающих сред, не учитывающих частотную дисперсию к композитам на основе литого аморфного микропровода, вряд ли применимы. В данной работе ограничимся вопросами измерения магнитных характеристик аморфного микропровода.

Существенным отличием при учете дисперсии является то, что для электрического и магнитного поля в цилиндрическом длинном отрезке микропровода имеет место разложение для электрического и магнитного поля [9]

$$\begin{aligned} \frac{E}{H} &\rightarrow \sum_n \frac{A_n}{B_n} f_{n,k}(r, \phi), \\ f_{n,k}(r, \phi) &= e^{\pm i n \phi} J_n(kr), \end{aligned} \quad (1)$$

$J_n(x)$  — функция Бесселя;  $r, \phi$  — цилиндрические координаты;  $k$  — волновой вектор, который для рассматриваемой нами моды однородной прецессии ЕФМР стремится к величине [9]

$$k \rightarrow (1 + i)/\delta, \quad (2)$$

$\delta$  — величина скин-слоя.

В отличие от бездисперсионного случая, когда существует только одна мода и волновое сопротивление выражается [7]

$$Z_1 = \text{const } k \frac{J_0(kr_c)}{J_1(kr_c)}, \quad (3)$$

где  $r_c$  — радиус центральной жилы микропровода, в нашем случае

$$Z = \sum_n Z_n, \quad (4)$$

где

$$Z_n \sim \text{const } k \frac{J_{n-1}(kr_c)}{J_n(kr_c)}. \quad (5)$$

Магнитная проницаемость уже не представляется аддитивной величиной, но для каждой моды можно ввести

$\mu_n$ , которую, согласно методу, предложенному в [7], можно вычислить из уравнения

$$\frac{d\mu_n}{d\tau} \approx \frac{2\mu_n}{2\tau - n\tau^2 - n\mu_n} \quad (6)$$

численным методом (граничные условия и отбор корней следуют из физических соображений [7,9]).

Конкретный расчет показывает, что ограничиться  $\mu_1$  ( $n = 1$ ) можно только для достаточно толстого ( $r_c \sim 5 \mu\text{m}$ ) микропровода. Отметим, что моды с  $n > 1$  в волноводе затухают быстрее. Стандартные измерители КСВН вообще не пригодны для измерения параметров естественного ферромагнитного резонанса в тонких микропроводах, так как, если  $r_c \lesssim \delta$ , микропровод ”прозрачен” для поля.

Существует и другое принципиальное ограничение рефлектометрического метода, предложенного в [6,7]. При учете дисперсии на частоте, близкой к частотам максимума мнимой части магнитной проницаемости  $\mu''$ , действительная часть магнитной проницаемости  $\mu'$  стремится к нулю. Это приводит к необходимости учитывать реактивное сопротивление контакта провода с волноводом, которое вносит вклад в систематическую погрешность. Не приводя эквивалентной схемы (см., например, [10]), Ограничимся замечанием, что в этом случае

$$T \neq 1 - R \quad (7)$$

( $T, R$  — коэффициенты прохождения и отражения), и для вычисления  $Z$  недостаточно модулей  $|T|$  и  $|R|$ , а нужно

Характеристика аморфного сплава	Резонансные частоты, GHz	Мнимая часть магнитной проницаемости в резонансе	Оценка полуширины, GHz
Сплав на основе железа	7–10	$2 \cdot 10^2 - 10^3$	0.5–2
Сплав на основе кобальта с железом в отношении 5/2	6–3.5	$2 - 5 \cdot 10^2$	1–2
Сплав на основе кобальта с железом в отношении 6/1.5	до 3	$1.5 - 3 \cdot 10^2$	2

знать фазу между  $R$  и  $T$ . Однако оценка мнимой части магнитной проницаемости для толстого микропровода в данной методике измерений (как отмечено в [4,8]) более корректна.

В таблице приводятся характеристики магнитных свойств аморфных микропроводов в области естественного ферромагнитного резонанса, которые могут найти применение в радиопоглощающих материалах.

## Список литературы

- [1] *Алексеев А.Г., Корнев А.Е.* Магнитные эластомеры. М.: Химия, 1987. 239 с.
- [2] *Баранов С.А., Бержанский В.Н., Зотов С.К.* и др. // ФММ. 1989. Т. 67. № 1. С. 73–78.
- [3] *Баранов С.А., Зотов С.К., Ларин В.С., Торкунов А.В.* // ФММ. 1991. № 12. С. 172–173.
- [4] *Баранов С.А., Зотов С.К., Ларин В.С., Торкунов А.В.* Магнитные резонансы в аморфном микропроводе и магнитные структуры. Материалы конф. молодых ученых физ. фак. Львовского университета. Львов, 1990. С. 5–7. Деп. № 763-УК91. 1991.
- [5] *Баранов С.А.* // Вестник Приднестровского университета. 1994. № 1(2). С. 126–130.
- [6] *Газян Л.Г., Суслов Л.М.* // Радиотехника. 1988. № 7. С. 92–93.
- [7] *Пономаренко В.И., Бержанский В.Н., Дзодилик И.В.* и др. // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 1989. Т. 32. № 3. С. 38–40.
- [8] *Бержанский В.Н., Газян Л.Г., Коккоз В.Л., Владимиров Д.Н.* // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. Вып. 12. С. 14–17.
- [9] *Баранов С.А.* // Вестник Приднестровского университета. 1996. № 6. С. 110–120.
- [10] *Вайсфлор А.* Теория цепей и техника измерений в дециметровом и сантиметровом диапазонах. М.: Сов. радио, 1961. 424 с.