

- [3] Moncorgé R., Jacquier B., Bouillon G. // J. Lumin. 1976. V. 14. N 5-6. P. 337-348.
- [4] Itoh N. // Adv. Phys. 1982. V. 31. N 5. P. 491-552.

Вильнюсский университет

Поступило в Редакцию  
5 марта 1990 г.

Письма в ЖТФ, том 16, вып. 12

26 июня 1990 г.

05.2; 09

© 1990

### ПОВЕРХНОСТНЫЙ ЭФФЕКТ В ФЕРРОМАГНИТНОМ МИКРОПРОВОДЕ

В.Н. Бержанский, Л.Г. Газян,  
В.Л. Коккоз, Д.Н. Владимиров

Наличие магнитных свойств у материала проводника может привести в диапазоне СВЧ к изменению характера частотной зависимости погонного сопротивления, обусловленному поверхностным эффектом. Наиболее ярко это будет проявляться в проводниках из ферромагнитных сплавов, в которых высокие значения магнитной проницаемости могут реализоваться за счет возникновения естественного ферромагнитного резонанса (ЕФМР). Целью настоящей работы являлось обнаружение и исследование этого эффекта в аморфных магнитных микропроводах. Возможность направленного изменения магнитной проницаемости проводов позволяет использовать их для создания ряда устройств СВЧ-диапазона.

Микропровода в стеклянной изоляции были получены методом скоростной закалки из расплавов переходных металлов ( $Fe, Ni, Co$ ) с аморфизаторами ( $B, Si, P$ ) [1]. Диаметр проводящей жилы микропровода находится в интервале 3-20 мкм, а толщина стеклянной оболочки - 5-10 мкм. Наличие стеклянной изоляции микропровода приводит к его значительной деформации и появлению больших полей магнитоупругих напряжений, которые способствуют возникновению ЕФМР [2]. При этом погонное сопротивление цилиндрического проводника на СВЧ  $R_{\tilde{\pi}}$  будет существенно отличаться от его значения на постоянном токе  $R_{\bar{\pi}}$  [3].

$$\frac{R_{\tilde{\pi}}}{R_{\bar{\pi}}} = \frac{d}{4} \sqrt{\pi f \mu \sigma} = \frac{d \sqrt{\mu_r}}{4 \delta}, \quad (1)$$

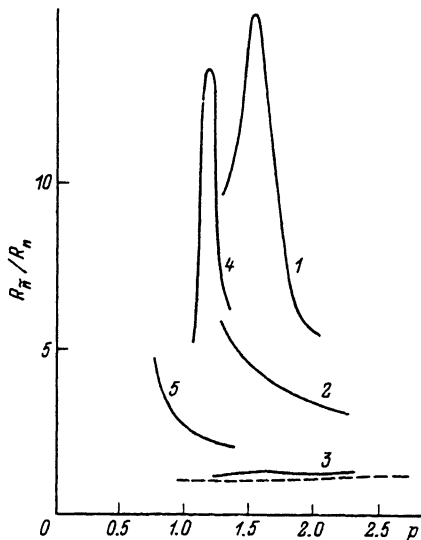


Рис. 1.

где  $d$  - диаметр проводника,  $\mu = \mu_0 \mu_r$  - магнитная проницаемость,  $\delta$  - глубина скин-слоя немагнитного проводника,  $f$  - частота,  $\sigma$  - электропроводность.

Определение погонного сопротивления микропровода на СВЧ выполнялось косвенным путем в результате измерения электродинамических параметров коэффициентов отражения  $|R|^2$  и прохождения  $|T|^2$  панорамными измерителями КСВН и ослабления в волноводном тракте с включенной в него неоднородностью - электропроводящим штырем, расположенным перпендикулярно широким стенкам волновода на оси симметрии последнего. Комплексное сопротивление такого штыря [3] имеет вид

$$R_{\pi} = \frac{60\pi}{\alpha} \cdot \frac{\lambda_b}{\lambda_0} \left( \frac{1 - |T|^2}{|R|^2} - 1 \right), \quad (2)$$

где  $\lambda_0, \lambda_b$  - длины волн в свободном пространстве и волноводе.

Результаты определения частотных зависимостей  $R_{\pi}$  микропроводов из различных сплавов приведены на рис. 1. Для сравнения свойств микропроводов различных диаметров и составов сплава проводящей жилы графики построены в нормированных координатах:

$R_{\pi} / R_{\pi}$  и  $p = d \sqrt{\frac{1}{2} \pi f \mu_0 \sigma}$ . Кривые 1, 4 соответству-

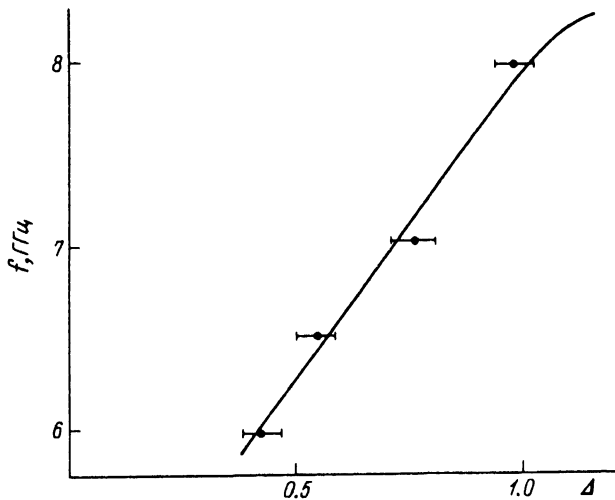


Рис. 2.

ют микропроводам различных диаметров из сплава на основе железа, кривые 2, 5 – кобальта и кривая 3 – никеля. Пунктирная кривая представляет собой теоретическую зависимость погонного сопротивления немагнитного проводника от частоты, рассчитанную согласно известному выражению для комплексного сопротивления тонкого электропроводящего штыря, вносимого им в волноводный тракт [4]:

$$R_{\pi} = \frac{120\pi}{\lambda_0} \cdot \frac{\text{ber}(\rho)\text{bei}'(\rho) - \text{ber}'(\rho)\text{bei}(\rho)}{\rho\{[\text{ber}'(\rho)]^2 + [\text{bei}'(\rho)]^2\}}. \quad (3)$$

Здесь  $\text{ber}(\rho)$  и  $\text{bei}(\rho)$  – функции Кельвина нулевого порядка [5], а штрих означает дифференцирование по аргументу  $\rho$ .

Экспериментальная зависимость СВЧ погонного сопротивления микропровода из сплава на основе никеля практически совпадает с приведенной расчетной зависимостью для немагнитного проводника. Это означает, что магнитные свойства данного микропровода в рассматриваемом диапазоне частот слабо влияют на величину  $R_{\pi}$ .

Резкое отличие экспериментальных и расчетных зависимостей  $R_{\pi}(\rho)$  микропроводов на основе сплавов обогащенных железом и кобальтом объясняется в соответствии с (1) наличием у них значительной магнитной проницаемости. Резонансный характер зависимостей свидетельствует о возникновении в диапазоне СВЧ ЕФМР во внутреннем магнитном поле, включающем размагничива-

ющее поле, обусловленное формой и эффективное поле анизотропии.

В микропроводе из-за отсутствия упорядоченной кристаллической структуры (аморфное или мелкокристаллическое состояние) основной вклад в эффективное поле анизотропии дают поля магнитоупругих напряжений  $H_{му} \sim \frac{\lambda \sigma_0}{M_0}$ , где  $\lambda$  - константа магнитоупругости, а  $\sigma_0$  - величина упругих напряжений, которая зависит от соотношения диаметра проводящей жилы и толщины стеклянной оболочки микропровода  $\Delta$ . Экспериментально полученные значения резонансной частоты для разных диаметров проводящей жилы на основе железа приведены на рис. 2. Сплошная кривая отражает функциональную зависимость частоты ЕФМР от поля магнитоупругих напряжений  $H_{му}$  при изменении  $\Delta$  [6]. Фактическое совпадение экспериментальных точек с расчетной кривой подтверждает определяющую роль магнитоупругих напряжений в возникновении ЕФМР. Возможность управления его характеристиками посредством изменения не только состава сплава микропровода, но и геометрических размеров микропровода позволяет вследствие поверхностного эффекта получать микропровода с заданной частотной характеристикой погонного сопротивления.

Авторы благодарят А.В. Торкунова и С.К. Зотова за предоставление образцов.

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Бадинтер Е.Я. и др. Литой микропровод и его свойства. Кишинев: Штиница, 1973. 320 с.
- [2] Бержанский В.Н. и др. // Физика металлов и металловедение. 1989. Т. 67. № 1. С. 104-107.
- [3] Гольдштейн Л.Д., Зернов Н.В. Электромагнитные поля и волны. М.: Сов. радио, 1971. 472 с.
- [4] Газян Л.Г., Суслов Л.М. // Радиотехника. 1988. № 7. С. 92-93.
- [5] Справочник по волноводам: Пер. с англ. / Под ред. Фельда Я.Н. М.: Сов. радио, 1952. 264 с.
- [6] Янке Е., Эмде Ф., Леш Ф. Специальные функции. М.: Наука, 1968. 186 с.

Поступило в Редакцию  
31 марта 1990 г.