

Поступило в Редакцию
27 сентября 1990 г.

Письма в ЖТФ, том 17, вып. 3

12 февраля 1991 г.

09

© 1991

ПОГЛОЩЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ТОНКИМ ПРОВОДЯЩИМ ЦИЛИНДРОМ

А.И. К а ш и р и н, П.П. М и х а й л и к

Интерес к процессам взаимодействия электромагнитного излучения с ферромагнитными частицами не случаен и объясняется как появлением ряда новых эффектов, не свойственных диэлектрическим и проводящим частицам, так и практической потребностью исследования свойств многочисленных магнитных материалов в конкретных ситуациях их использования. В частности, в работе [1] рассматривалось взаимодействие электромагнитного СВЧ излучения со сплошными сферическими магнитными частицами. Один из выводов работы состоял в том, что малые (по сравнению с длиной волны падающего излучения λ) магнитные частицы могут обладать гораздо большей поглощающей способностью, чем диэлектрические частицы таких же размеров (в длинноволновом пределе аналогичный вывод качественно можно распространить и на несферические частицы).

В отличие от сплошных однородных частиц принципиально новые свойства появляются у малых многослойных частиц. В работе [2] показано, что малые металлические частицы, покрытые магнитной оболочкой, могут проявлять аномальные, в том числе и частотно-избирательные свойства при рассеянии электромагнитного излучения. Многослойность, по-видимому, может привести и к особым поглощающим свойствам малых частиц. В данной работе рассматривается поглощающая способность тонкой длинной металлической частицы, покрытой слоем магнетика.

Для простоты расчетов будем рассматривать бесконечный металлический цилиндр радиуса R_0 , покрытый слоем магнетика с внешним радиусом R , на который падает плоская электромагнитная волна с электрическим полем, параллельным оси цилиндра. Однородное уравнение Гельмгольца решалось в цилиндри-

ческих координатах методом разделения переменных. Для бесконечной проводимости металлического цилиндра в длинноволновом пределе ($R \ll \lambda$) напряженность магнитного поля в слое магнетика ($R_0 < r < R$) может быть получена в виде

$$H = -i \frac{E_0}{Wkr [\mu \ln(R/R_0) - \ln(kR/2)]},$$

где E_0 - амплитуда электрического поля в падающей волне, $W = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0}$, $k = 2\pi/\lambda$, $\mu = \mu' + i\mu''$ - магнитная проницаемость магнетика, r - расстояние от оси цилиндра. Для оценки поглощающих свойств рассматриваемой частицы будем использовать удельное (на единицу длины) сечение поглощения σ , которое определим как отношение поглощаемой в слое магнетика мощности

$$P = \frac{\omega}{2} \int_V \mu_0 \mu'' H H^* dV$$

к плотности потока мощности падающего излучения. Интегрируя по объему V магнетика ($R_0 < r < R$) получаем

$$\sigma = \lambda \mu'' \frac{\ln(R/R_0)}{|\mu \ln(R/R_0) - \ln(kR/2)|^2} = \lambda \mu'' Q.$$

Характерная особенность сечения поглощения σ состоит в том, что оно слабо зависит как от радиуса магнитной оболочки, так и от радиуса центрального металлического цилиндра. Это означает, что в отличие от сплошной магнитной частицы, у которой поглощенная энергия уменьшается при уменьшении ее радиуса (пропорционально объему), двуслойная частица сохраняет свою поглощающую способность примерно постоянной даже для очень тонких нитей.

Для количественного сравнения с характеристиками однородной частицы было использовано отношение сечения σ к удельному сечению поглощения (σ_0) тонкого сплошного магнитного цилиндра радиуса. При поляризации магнитного поля в падающей волне параллельно оси цилиндра

$$\sigma_0 = \frac{2\pi}{\lambda} \mu'' \pi R^2.$$

Отношение сечений в этом случае будет равно

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = \frac{2}{\nu^2} Q(R, R_0, \mu),$$

где $\nu = kR$. Функция является медленно меняющейся и в широком диапазоне вариаций своих аргументов изменяется от 0.02 до 0.1. Параметр ν для СВЧ диапазона может составлять 0.01-0.0001. Отсюда видно, что сечение поглощения двуслойной частицы может

на несколько порядков превышать сечение поглощения однородной частицы тех же размеров. Для примера рассчитаем σ/σ_0 для магниевого феррита с $\mu' = 2.84$ и $\mu'' = 0.341$, использовавшегося для расчетов в работе [2]. При $\lambda = 3$ см, $R = 10$ мкм, $R_0 = 1$ мкм получим $\sigma/\sigma_0 = 10^4$. Здесь необхо-

димо отметить, что при переходе от рассмотренных выше длинных частиц к частицам резонансной длины вследствие значительного роста возбуждаемого в них тока, а значит, и роста напряженности магнитного поля вблизи поверхности этих частиц, σ/σ_0 будет еще больше увеличиваться.

Таким образом, можно утверждать, что тонкие длинные металлические частицы с магнитным слоем могут обладать на много порядков большей поглощающей способностью, чем однородные магнитные частицы таких же размеров. В принципе это свойство может быть эффективно использовано в поглотителях электромагнитной энергии, например, путем заполнения ферритового поглотителя тонкими металлическими нитями.

Поглотитель подобного типа описан, в частности, в [3]. В нем используется ферритовый композит, содержащий около 70 % мелких ферритовых частиц и около двух процентов (по весу) тонких металлических волокон. Авторы [3] экспериментально регистрировали значительное поглощение радиоизлучения в этом композите и приписывали его увеличению мнимой части диэлектрической проницаемости, происходящему за счет появления тока при внесении в композит металлических волокон. Данная интерпретация наблюдаемого эффекта поглощения недостаточно убедительна, так как идеально проводящие элементы могут привести лишь к рассеянию электромагнитной энергии. На наш взгляд, более реальной причиной поглощения является значительное, как показано выше, увеличение магнитных потерь в ферритовых частицах композита, непосредственно примыкающих к металлическим волокнам.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Пришивалко А.П., Бабенко В.А. // ДАН БССР. 1988. Т. 32. № 7. С. 606-608.
- [2] Ключник А.В., Лозовик Ю.Е. // Письма в ЖТФ. 1986. Т.12. В. 15. С. 948-951.
- [3] Hatakeyama K., Inui T. Proc. Int. Symp. on Electromagnetic Compatibility. Tokyo, 1984. V. 1. P. 504-508.

Поступило в Редакцию
29 мая 1990 г.

В окончательной редакции
15 декабря 1990 г.