

05.2; 09; 12

© 1991

КОМПОЗИЦИОННЫЕ СТРУКТУРЫ С ВЫСОКОЙ СВЧ - МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТЬЮ, ПРИБЛИЖАЮЩЕЙСЯ К ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ

Ю.Н. К а з а н ц е в, М.В. К о с т и н,
Г.А. К р а ф т м а х е р, В.В. Ш е в ч е н к о

Известно, что для магнитных металлов и сплавов характерно высокое значение магнитной проницаемости μ на СВЧ. Так, в сантиметровом диапазоне величина магнитной проницаемости железа достигает 10^2 . Однако, как ни велика магнитная проницаемость, она остается на несколько порядков меньше диэлектрической проницаемости ($|\epsilon| \approx 10^6$).

Задача создания и поисков материалов с максимально возможной величиной μ , близкой к ϵ , таким образом, сводится к проблеме уменьшения ϵ при сохранении величины μ .

В данной работе показано, что можно создать композиционный материал на основе пленочных включений с размерами много меньше длины волны, у которого магнитная проницаемость $\mu_{эфф}$ определяется произведением магнитной проницаемости включений μ на объемную концентрацию F

$$\mu_{эфф} = \mu F. \quad (1)$$

Диэлектрическая проницаемость же такого материала $\epsilon_{эфф}$ на несколько порядков меньше диэлектрической проницаемости включений ϵ , так, что

$$\frac{\epsilon_{эфф}}{\mu_{эфф}} \ll \frac{\epsilon}{\mu}. \quad (2)$$

Известные композиционные материалы на основе проводящих магнитных частиц железа сферической формы в диэлектрической матрице характеризуются (при концентрациях до порога протекания) относительно малыми значениями диэлектрической и магнитной проницаемости, что связано как с влиянием размагничивающих и деполяризующих факторов, так и со скин-эффектом. Иными словами, относительно малые значения диэлектрической и магнитной проницаемостей такого материала связаны со слабым проникновением электромагнитного поля в частицы. Поэтому даже увеличение концентрации наполнителя до 50 % позволяет достигнуть только значение $|\mu_{эфф}| = (0.1 - 0.2) \mu$ [1].

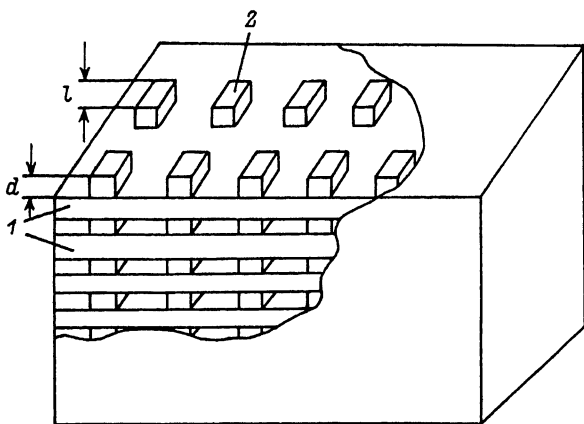


Рис. 1. Многослойная композиционная структура. 1 – диэлектрические пленки – подложки, 2 – периодическая структура из проводящих изолированных квадратов.

В предлагаемой структуре применяются проводящие магнитные включения в виде параллельных пленок толщиной d , близкой к скин-слою $d_{СК}$, что обеспечивает в геометрии нулевого размагничивающего фактора эффективное взаимодействие магнитного высокочастотного поля с пленкой. Взаимодействие же электрического высокочастотного поля с пленкой в данном случае уменьшено, что обусловлено малостью этого поля в пленке.

Качественно этот факт может быть пояснен граничными условиями для тангенциальных составляющих поля на металлической поверхности:

$$E_{\tau} = H_{\tau} W, \quad (3)$$

где $W = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \ll 1$ – волновое сопротивление. Условие (3) остается справедливым и на поверхности не очень тонких пленок, вплоть до толщин порядка скин-слоя. Поскольку на поверхности и внутри таких пленок магнитное поле по порядку величины равно магнитному полю падающей волны, то и вклад магнитной проницаемости пленки в $\mu_{эфф}$ существенен и приводит к соотношению (1). В то же время электрическое поле на границе и внутри пленки практически равно нулю, как это видно из (3). Это приводит к относительно небольшим значениям $\epsilon_{эфф}$ несмотря на огромное значение $|\epsilon|$ металлических пленок.

При переходе к пленкам существенно тоньше либо толще скин-слоя отмеченные выше уникальные свойства композиционной структуры исчезают.

Так, в пленках, очень тонких по сравнению со скин-слоем, электрические и магнитные поля равны соответствующим полям падающей волны. Поэтому $\epsilon_{эфф}$, так же как и $\mu_{эфф}$, определяется произведением соответственно ϵ на объемную концентрацию включений:

$$\epsilon_{эфф} = \epsilon F. \quad (4)$$

При этом соотношение между $\epsilon_{эфф}$ и $\mu_{эфф}$ по сравнению с ϵ и μ самой пленки сохраняется:

$$\frac{\epsilon_{эфф}}{\mu_{эфф}} = \frac{\epsilon}{\mu}. \quad (5)$$

В случае же толстой по сравнению со скин-слоем пленки магнитное поле не проникает на всю толщину, и $\mu_{эфф}$ снижается по сравнению с $\mu_{эфф}$ для $d \sim d_{ск}$ (при одинаковых концентрациях).

Предлагаемые композиционные структуры были реализованы и их электродинамические характеристики измерены в диапазоне 3–5 ГГц.

Образцы были выполнены в виде многослойной структуры из диэлектрических пленок толщиной 10–20 мкм (лавсановых и полиимидных), на которые методами фотолитографии наносилась периодическая структура из изолированных квадратов (магнитных, либо немагнитных) металлов и сплавов (рис. 1). В качестве магнитных включений были использованы пленки из магнитных аморфных сплавов. Обладая большей глубиной скин-слоя (в несколько раз) по сравнению с кристаллическими, они наиболее эффективно взаимодействуют с СВЧ – волной на большей толщине, малая толщина не всегда является химически устойчивой.

Поперечные размеры квадратов менялись от 1 мм до 100 мкм, а их толщины лежали в интервале от нескольких десятков ангстрем до нескольких микрон.

Были измерены комплексные эффективные диэлектрическая и магнитная проницаемости таких структур в геометрии нулевых деполяризующих и размагничивающих факторов.

Применялась резонаторная методика, при которой образцы помещались в пучность электрического поля и в пучность магнитного поля в соответствии с [2, 3]. При этом использовался ферромагнитный резонанс и ферромагнитный антирезонанс для установления точки отсчета [3].

Так, $\epsilon'_{эфф}$ и $\epsilon''_{эфф}$ композиционной структуры на основе пленок Al ($d \ll d_{ск}$) при объемной концентрации металла порядка 0.1 % составляют $\approx 10^2$, ($|\epsilon| \cdot 10^5$), что находится в соответствии с (5). При этом $\epsilon'_{эфф}$ и $\epsilon''_{эфф}$ практически не зависят от поперечного размера квадрата l (пока $l > 10d$, и не сказывается существенно влияние деполяризующего фактора).

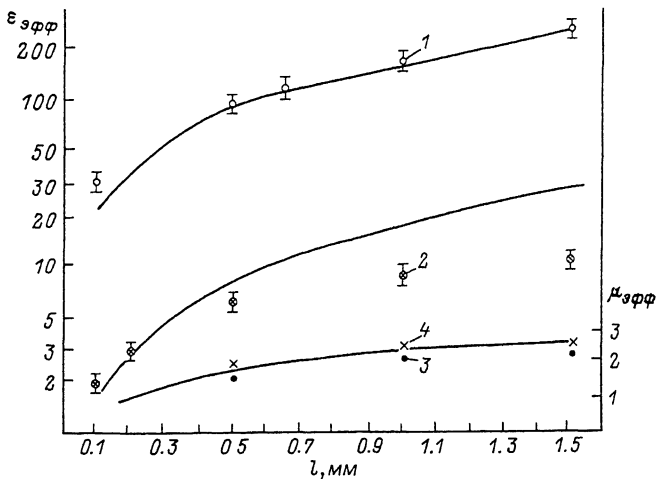


Рис. 2. Зависимость эффективных диэлектрической и магнитной проницаемостей многослойной композиционной структуры на основе проводящих квадратов из магнитного аморфного сплава $Fe_5Co_{69}Si_{15}B_{11}$ ($d \approx 1 \text{ мкм} \gg d_{ск}$). 1 - $\epsilon'_{эфф}$, 2 - $\epsilon''_{эфф}$, 3 - $\mu'_{эфф}$, 4 - $\mu''_{эфф}$. Сплошные кривые - теоретический расчет.

В то же время для композиционных структур с включениями $d \gg d_{ск}$ наблюдаются две существенные особенности. Первая из них заключается в том, что $\epsilon''_{эфф}$ оказывается существенно меньше (на несколько порядков) ϵ'' проводящей пленки.

$$\epsilon''_{эфф} \ll \epsilon'' F. \quad (6)$$

Вторая особенность заключается в том, что уменьшение поперечного размера включений l приводит к уменьшению $\epsilon'_{эфф}$ и $\epsilon''_{эфф}$.

Так, на рис. 2 представлены результаты измерений $\epsilon'_{эфф}$ и $\epsilon''_{эфф}$, $\mu'_{эфф}$ и $\mu''_{эфф}$ на частоте $f = 3.6 \text{ ГГц}$ композиционных структур ($d \gg d_{ск}$) при различных l изолированных квадратов (объемная концентрация металла составляет 5%).

Теоретические оценки проводились для модельной структуры, представляющей собой сплюснутые эллипсоиды вращения, расположенные в среде с проницаемостями ϵ_m и μ_m . Расчет $\epsilon_{эфф}$ и $\mu_{эфф}$ проводился по формуле Онзагера-Ахиезера [4-6].

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_{эфф} \\ \mu_{эфф} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \epsilon_m \\ \mu_m \end{Bmatrix} \left[1 + \frac{3}{4} \left(4\pi\chi - 1 + \sqrt{1 + \frac{8\pi}{3}\chi + 16\pi^2\chi^2} \right) \right], \quad (7)$$

где $\chi = N\chi_0$ - комплексная восприимчивость единицы объема в предположении отсутствия взаимодействий между элементами структуры (малые концентрации); N - концентрация, равная числу элементов в единице объема; χ_0 имеет смысл восприимчивости одного элемента структуры и определяется из выражения для дипольного момента сплюснутого эллипсоида [7-8].

Численный расчет зависимостей $\epsilon'_{эфф}$ и $M_{эфф}$ модельной структуры представлен сплошными кривыми на рис. 2, где под размером включений l подразумевается величина большой оси эллипсоида, малая ось которого равна толщине пленки, используемой в эксперименте. Параметры пленок многослойной структуры для расчетов были взяты из [3, 9].

Из рис. 2 видно, что величины $\epsilon'_{эфф}$ и $\epsilon''_{эфф}$ падают с уменьшением l , в то время как $M'_{эфф}$ и $M''_{эфф}$ практически не зависят от l . С увеличением длины волны $\epsilon'_{эфф}$ и $M_{эфф}$ таких структур сближаются, поскольку μ магнитных металлов растет (соответственно и $M_{эфф}$), а $\epsilon'_{эфф}$ не меняется.

Таким образом, можно создать композиционные материалы с высокими для столь малой концентрации значениями эффективной магнитной проницаемости $\mu_{эфф}$ ($|M_{эфф}| \approx 2$) при умеренных значениях эффективной диэлектрической проницаемости $\epsilon'_{эфф}$ ($\epsilon'_{эфф} \approx 30$, $\epsilon''_{эфф} \approx 2$).

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Антонов А.С., Панина Л.В., Сарычев А.К. // ЖТФ. 1989. Т. 59. В. 6. С. 88-94.
- [2] Казанцев Ю.Н., Крафтмахер Г.А. // ФММ. 1989. Т. 67. В. 5. С. 902-908.
- [3] Казанцев Ю.Н., Крафтмахер Г.А., Глазер А.А., Потапов А.П., Тагиров Р.И. // ФММ. 1991. № 3. С. 116-121.
- [4] Ахизер А.И. Общая физика: электрические и магнитные явления. Справочное пособие. Киев: Наук. думка, 1981. 471 с.
- [5] Костин М.В., Шевченко В.В. Искусственный магнетик на основе кольцевых токов. // РЭ. 1988. Т. 33. № 7. С. 1526-1531.
- [6] Костин М.В. // РЭ. 1990. Т. 35. № 2. С. 424-426.
- [7] Борен К., Хафмен Д. Поглощение и рассеяние света малыми частицами. М.: Мир, 1986. 660 с.
- [8] Ландау Л.Д., Лифшиц И.М. Электродинамика сплошных сред. М.: Наука, 1982. 620 с.

[9] Костин М.В., Казанцев Ю.Н., Крафт-
махер Г.А., Шевченко В.В. // Письма в
ЖТФ. 1990. Т. 16. В. 13. С. 22-25.

Институт
радиотехники
и электроники
АН СССР,
Фрязинская часть

Поступило в Редакцию
28 октября 1991 г.