

05;09;12

©1993

ГИГАНТСКИЙ СВЧ ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ В КИРАЛЬНЫХ ИСКУССТВЕННЫХ СРЕДАХ, НЕ ОБЛАДАЮЩИХ СТАТИЧЕСКИМИ МАГНИТНЫМИ СВОЙСТВАМИ

Ю.Н.Казанцев, Г.А.Крафтмагер

В последнее время увеличился интерес к электродинамике так называемых киральных сред, обладающих пространственной дисперсией в отсутствие центральной симметрии и проявляющих свойства оптической активности. Киральными проявляют себя сплошные полимеры, биологические объекты, например, ДНК, белки-коллагены, в молекулах которых расположение атомов имеет вид спиральных цепочек.

Существенно новым является создание искусственных композитов со спиральными включениями, пространственно подобными упомянутому молекулам и переход в СВЧ диапазон [1-3]. При этом, как правило, размеры включений $a \ll \lambda$ (λ — длина волны), но достаточные для влияния пространственной дисперсии.

Однако экспериментальные методы исследований киральных композиционных сред в СВЧ остались оптически. Они посвящены обнаружению и измерению вращения θ плоскости поляризации линейно-поляризованной волны, прошедшей через слой киральной среды аналогично [1]. На основании таких данных о θ и эллиптичности \mathcal{E} делаются оценки магнитной проницаемости киральной среды μ' и μ'' , что в оптике не имело смысла, поскольку учет отличия μ от 1 является превышением точности для большинства явлений при частотах, гораздо более низких, чем оптические [4].

Основой феноменологической теории киральных сред являются материальные уравнения, характерные для сред с пространственной дисперсией, имеющие вид [5]

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} - jk\sqrt{\varepsilon_0\mu_0} \mathbf{H}$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} + jk\sqrt{\varepsilon_0\mu_0} \mathbf{E} \quad (1)$$

где ε , μ — диэлектрическая и магнитная проницаемости среды, K — коэффициент киральности.

Если в СВЧ киральные среды, не проявляющие статических магнитных свойств, обладают магнитной проницаемостью, то возникает задача провести прямые измерения μ , используя средства и специфику СВЧ.

Взаимодействие с СВЧ связано с возникновением спиральных кольцевых токов, которые наводятся как переменным электрическим полем, так и магнитным. Поэтому тепловые потери в спиральных витках могут проявляться в некоторых ситуациях как магнитные потери, а среда с киральными включениями как магнитодиэлектрик.

Наиболее чувствительным методом разделения эффектов ε и μ на СВЧ является резонаторный метод с применением теории возмущений.

В [6] получены соотношения, связывающие параметры резонатора с параметрами киральных и биизотропных сред:

$$\Delta f = -\frac{f}{4W_0} \int_{\Delta V} \left[(\varepsilon - \varepsilon_0) \mathbf{E} \cdot \mathbf{E}_0^* + (\mu - \mu_0) \mathbf{H} \cdot \mathbf{H}_0^* + 2jk\sqrt{\mu_0\varepsilon_0} \operatorname{Im}(\mathbf{E} \cdot \mathbf{H}_0^*) \right] dV, \quad (2)$$

где ΔV — объем образца, V — объем резонатора, \mathbf{E} , \mathbf{H} — комплексные амплитуды поля внутри образца, \mathbf{E}_0 , \mathbf{H}_0 — комплексные амплитуды поля в невозмущенном резонаторе,

$$W_0 = \frac{1}{4} \int_v (\varepsilon_0 \mathbf{E}_0 \cdot \mathbf{E}_0^* + \mu_0 \mathbf{H}_0 \mathbf{H}_0^*) dV$$

— энергия поля в невозмущенном резонаторе.

Из (2) видно, что в пучности электрического (магнитного) поля сдвиг резонансной частоты зависит только от ε (μ), если поле в образце не отличается от поля в резонаторе. Это обычное условие теории возмущений, позволяющее легко разделить эффекты ε и μ .

Поэтому задача прямых измерений ε^* и μ^* киральных сред сводится к созданию образцов, удовлетворяющих требованиям применимости резонаторного метода на основе теории возмущений.

В данной работе были созданы и измерены образцы, представляющие собой полые цилиндры с боковыми стенками из многозаходных ориентированных изолированных спиральных витков (в 1.5 оборота), помещенных между двумя диэлектрическими пленками (рис. 1). Диаметр цилиндров 2.3 мм, длина $L = 80 \div 20$ мм, диаметр провода 0.015 мм, длина спирали $l = a / \sin \alpha$; шаг спирали $\Delta = a \operatorname{ctg} \alpha$, где $a = 8$ мм, α — угол накрутки спирали. Концентрация — 40 витков на длине 1 см, что соответствует 0.2% объемных металла.

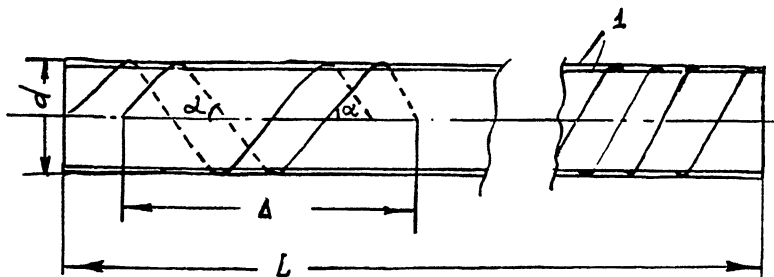


Рис. 1. Образец с многозаходными ориентированными спиральными витками. 1 — диэлектрические пленки.

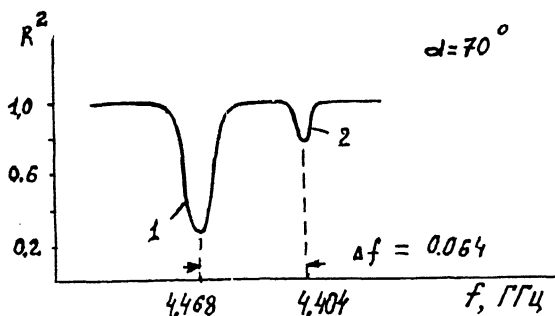


Рис. 2. Измеряемые параметры: резонансная частота и коэффициент отражения от резонатора. 1 — невозмущенный резонатор, 2 — резонатор с образцом.

Исследовались разные образцы одного и того же диаметра, отличающиеся величиной α , т.е. шагом и длиной спирального витка.

Измерения проводились в полуволновых прямоугольных резонаторах с применением панорамных измерителей КСВ в диапазоне 3–5 ГГц аналогично [7,8] при параллельной и перпендикулярной ориентации электрического и магнитного СВЧ полей относительно оси цилиндров (ось Z).

На рис. 2 представлены типичные зависимости измеряемых параметров, дающие представление о величине эффек-

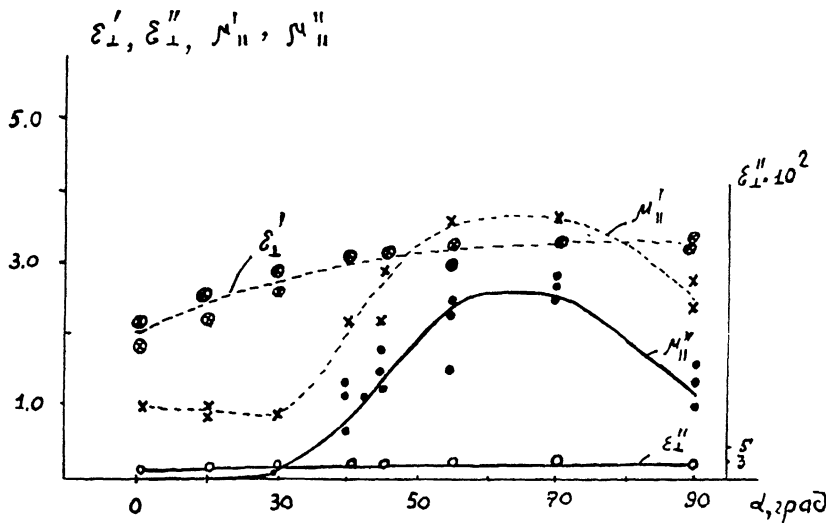


Рис. 3. Зависимость действительной и мнимой частей ϵ'_{\perp} , ϵ''_{\perp} диэлектрической (магнитной μ'_{\parallel} , μ''_{\parallel}) проницаемостей при $E \perp Z$ ($H \parallel Z$) от угла накрутки спирали α .

та. Все последующие зависимости ϵ и μ являются результатом вычислений и обработки кривых типа рис. 2. Так, на рис. 3 приведены зависимости действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости E'_{\perp} , E''_{\perp} ($E \perp$ оси образцов Z) и соответственно магнитной проницаемости μ'_{\parallel} , μ''_{\parallel} ($H \parallel$ оси образцов Z) от α на частоте 4.4 ГГц. Из рис. 3 видно:

1. Имеется зависимость μ'_{\parallel} и μ''_{\parallel} от α . При малых α (от нуля до 20 градусов), соответствующих сильно вытянутым виткам, практически не наблюдается отличие μ'_{\parallel} от 1, μ''_{\parallel} от 0.

2. При увеличении α наблюдается увеличение μ'_{\parallel} и μ''_{\parallel} с максимальными значениями в интервале $\alpha = 50-70^{\circ}$; $\mu'_{\parallel} - 1 \gg 0$ (парамагнитный эффект) и $\mu''_{\parallel} \gg 0$ (магнитные потери), при этом $\mu'_{\parallel} \simeq \mu''_{\parallel}$. В [9] реализован искусственный диамагнетик на основе замкнутых кольцевых токов, в котором обнаружены на СВЧ магнитные потери. Однако отличие μ' от 1 не наблюдалось.

3. Наблюдается слабая зависимость ϵ'_{\perp} и ϵ''_{\perp} от α . С ростом α (уменьшением шага спирали) незначительно увеличивается ϵ'_{\perp} и ϵ''_{\perp} .

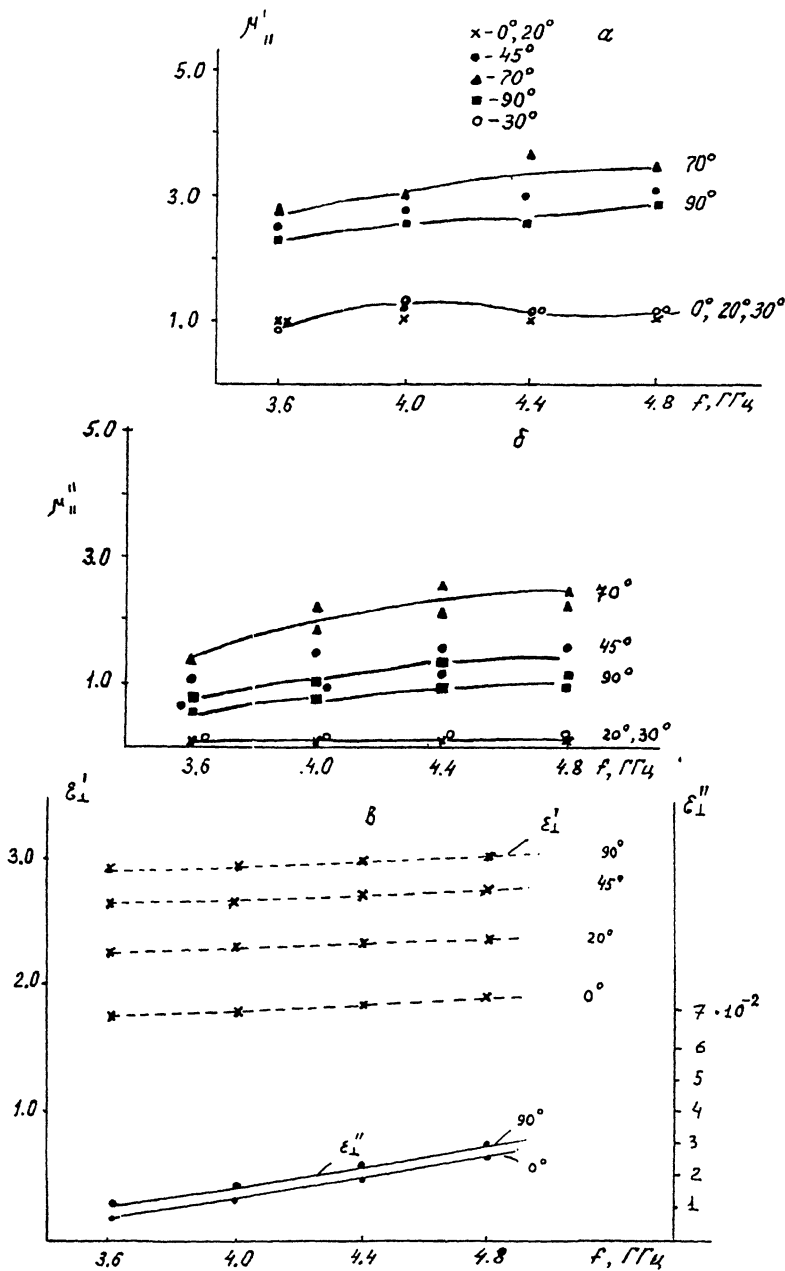


Рис. 4. Частотные зависимости диэлектрической и магнитной проницаемостей для разных образцов, отличающихся углом накрутки α : а, б — μ_{\parallel}' и μ_{\parallel}'' , в — ϵ_{\perp}' и ϵ_{\perp}'' .

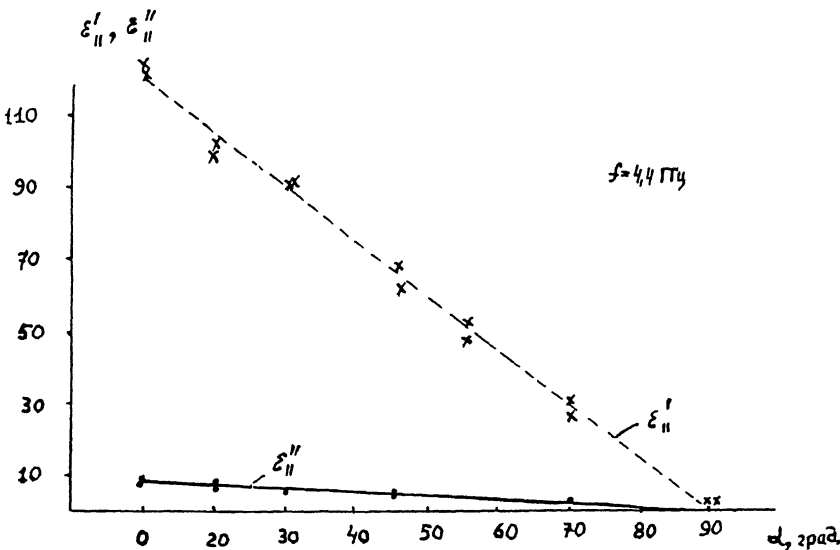


Рис. 5. Зависимость действительной ϵ'_{\parallel} и мнимой ϵ''_{\parallel} частей диэлектрической проницаемости от угла накрутки спирали α при $E \parallel Z$.

4. Имеется область значений $\alpha \simeq (50 - 70^\circ)$ с высокими значениями магнитной проницаемости μ'_{\parallel} , близкими к диэлектрической ϵ'_{\perp} , $\mu'_{\parallel} \approx \epsilon'_{\perp}$. Отметим, что в типичных композитах на основе шариков железа ϵ' превышает μ' в 15–20 раз, и $|\mu|$ достигает аналогичных значений при концентрации металла 60% объемных.

На рис. 4 приведены частотные зависимости μ'_{\parallel} , μ''_{\parallel} (а, б) и ϵ'_{\perp} и ϵ''_{\perp} (в) для образцов с разными α , свидетельствующими о распространении результатов рис. 4 на другие частоты и о слабой зависимости от частоты.

На рис. 5 приведены зависимости ϵ'_{\parallel} и ϵ''_{\parallel} ($E \parallel$ оси цилиндрических образцов Z) от α на частоте 4.4 ГГц. В этой ситуации наблюдается сильная зависимость от α . При изменении α от 0 до 90° (от сильно вытянутой спирали до кольца) ϵ'_{\parallel} падает от 120 до 1.5, а ϵ''_{\parallel} от 7 до $3 \cdot 10^{-2}$. Эти результаты повторяются и на других частотах.

Сравнивая рис. 5 и 4, в, видим, что в области значений α , близких к 90° (малый шаг спирали), $\epsilon'_{\perp} \approx \epsilon''_{\parallel}$ — практически изотропный вариант. При $\alpha \simeq 0; 20^\circ$ $\epsilon'_{\parallel} \gg \epsilon'_{\perp}$, $\epsilon''_{\parallel} \gg \epsilon''_{\perp}$ — большая диэлектрическая анизотропия. При увеличении α происходит постепенный переход от анизотропного варианта к изотропному.

Таким образом, наиболее существенными результатами данной работы нам представляются следующие:

1. Исследован новый композиционный материал — киральная среда с ориентированными многозаходными спиральными витками. Такие композиты не рассматривались ранее ни теоретически, ни экспериментально.

2. Впервые в искусственных композитах, не обладающих магнитными статическими свойствами, прямыми методами обнаружена действительная часть магнитной проницаемости μ' , ($\mu' - 1 \gg 0$) — СВЧ-парамагнитный эффект.

3. Обнаружен гигантский СВЧ-электромагнетизм — гигантские магнитные потери, наведенные СВЧ-электромагнитным полем, превышающие на два порядка магнитные потери в традиционных композитах магнитного типа при аналогичной концентрации.

(При концентрации 0.2% объемных в композитах на основе шариков железа $\mu' \simeq 1$, а $\mu'' < 0.05$).

В заключение благодарим за полезные обсуждения А.М.Сивола и С.А.Третьякова.

Список литературы

- [1] *Umari M.H., Varadan V.V., Varadan V.K.* // Radio Sci. 1991. V. 26. N 5. P. 1327-1334.
- [2] *Jaggard D.L., Liu J.C., Sun X.* // Electron. Lett. 1991. V. 27. N 1. P. 77-79.
- [3] *Viitanen A.J., Lindell J.V., Sihvola A.H., Tretyakov S.A.* // J. Opt. Soc. Am. A. 1990. V. 7. P. 683-692.
- [4] *Ландау Л.Д., Лившиц Е.М.* // Электродинамика сплошных сред. М., 1957. 320 с.
- [5] *Jaggard D.L., Mickelson A.R., Paras C.H.* // Appl. Phys. 1979. V. 18. P. 211-216.
- [6] *Tretyakov S.A., Viitanen A.J.* // Helsinki University of Technology Faculty of Electrical Engineering Electromagnetics Laboratory. Report 134. 1993.
- [7] *Казанцев Ю.Н., Крафтмагер Г.А. и др.* // ФММ. 1991. В. 3. С. 116-121.
- [8] *Казанцев Ю.Н., Костин М.В., Крафтмагер Г.А., Шевченко В.В.* // Письма в ЖТФ. 1991. Т. 17. В. 22. С. 19-23.
- [9] *Костин М.В., Казанцев Ю.Н., Крафтмагер Г.А., Шевченко В.В.* // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. В. 13. С. 22-25.

Институт радиотехники
и электроники РАН
Фрязинская часть

Поступило в Редакцию
10 августа 1993 г.