

05.2;09;12

©1995

## СТРУКТУРЫ КИРАЛЬНАЯ СРЕДА-ФЕРРИТ: КИРАЛЬНЫЙ-ФЕРРОМАГНИТНЫЙ РЕЗОНАНС

*Ю.Н.Казанцев, Г.А.Крафтмазер*

В [1] сообщалось об исследовании на СВЧ нового композиционного материала — киральной среды на основе ориентированных немагнитных спиральных проводящих витков, обладающих микроволновой магнитной проницаемостью  $\mu'$  и  $\mu''$ , существенно превышающей по величине магнитную проницаемость традиционных композитов магнитного типа при аналогичной концентрации включений. Обнаруживаемая прямыми измерительными СВЧ-методами магнитная проницаемость в немагнитной среде является проявлением свойств наведенных круговых СВЧ-токов и магнитоэлектрических взаимодействий.

Исследуемые среды относятся к классу биизотропных и бианизотропных сред, издавна известных как оптически активные. В настоящее время интерес к таким средам растет в связи с переходом исследований в СВЧ-диапазон благодаря созданию новых композиционных материалов [2-4].

В данной работе показано, что в области резонанса магнитная проницаемость может достигать значений, близких к магнитной проницаемости магнитных металлов и ферромагнетиков, и может управляться внешним магнитным полем в структуре киральная среда-феррит благодаря взаимовлиянию кирального и ферромагнитного резонансов.

Исследовались цилиндрические образцы киральной среды  $ch$ , аналогичные описанным в [1], представляющие собой полые цилиндры с боковыми стенками из немагнитных, ориентированных проводящих спиралей в 1.5 оборота (диаметр цилиндров и длины проводников много меньше длины волны  $\lambda$ , диаметр проводников 15 мкм, расстояние между витками 200 мкм), помещенных между двумя диэлектрическими пленками (рис. 1,а).

Исследовались также структуры киральная среда-феррит  $chF$ , в которых ферритовый стержень был помещен в полость кирального цилиндра (рис. 1,б), и структуры  $ch + F$ , в которых ферритовый стержень находится вне полости цилиндра, рядом с ним (рис. 1,в).

Измерялись коэффициент отражения  $R$  и сдвиг резонансной частоты резонатора  $\Delta f$  в диапазоне частот при помещении образцов в пучность СВЧ магнитного поля  $h$  и зависимости  $R$  и  $\Delta f$  от угла накрутки спирали  $\alpha$  и от величины внешнего постоянного магнитного поля  $H_0$ .

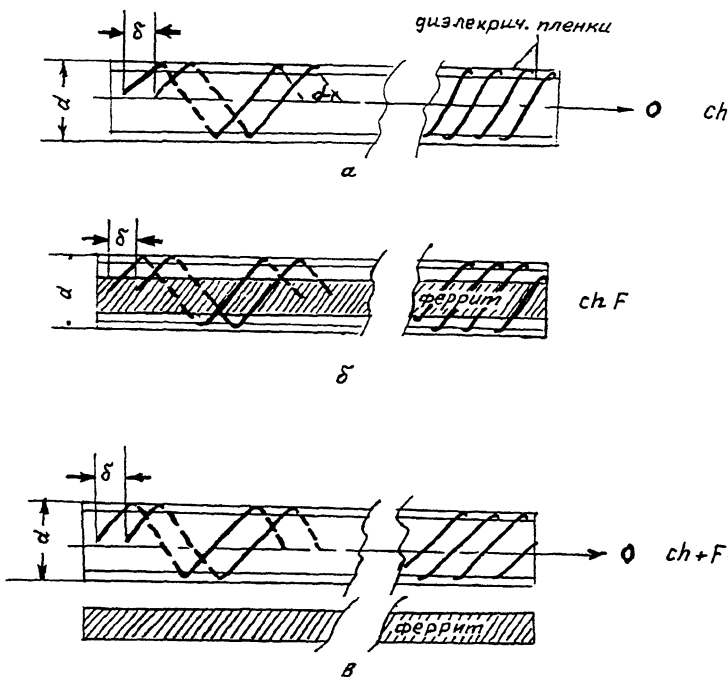


Рис. 1. Исследуемые образцы:

*a* — образец из ориентированных проводящих спиральных витков в 1.5 оборота — киральный цилиндр *ch*,  $\alpha$  — угол накрутки спирали,  $\delta = 200$  мкм,  $d = 2.5$  мм; *б* — структура *chF*: феррит в полости кирального цилиндра; *в* — структура *ch + F*: феррит вне кирального цилиндра.

На основании этих измерений определялись величины  $\mu'$  и  $\mu''$  по аналогии с [1,6], изучались свойства и закономерности  $\mu'$  и  $\mu''$  в диапазоне частот и в зависимости от  $H_0$ .

Для измерений использовались панорамные измерители КСВ в сочетании с набором прямоугольных полуволновых резонаторов.

Поскольку исследуемые образцы не могут занимать абсолютно локальное положение, то даже в пучности магнитного микроволнового поля они всегда подвергаются некоторому воздействию микроволнового электрического поля  $E$ . При этом если диэлектрическая проницаемость  $\epsilon \gg \mu$ , то опасность влияния электрического поля очень велика. Поэтому важно создать такие образцы киральной среды и выбрать такие методы и средства измерений, которые бы позволили изучать отдельно влияние электрического и магнитного микроволновых полей и их контролировать.

Выбранная геометрия образцов и резонаторов позволяла проводить измерения в ситуациях максимального воздействия микроволнового магнитного поля  $h$  при минимальном, практически исключенном, влиянии электрического поля  $E$ . Таким положением образца в резонаторе является пучность магнитного микроволнового поля при  $h$ , параллельном оси цилиндра, и  $E$ , перпендикулярном оси. Измеренные при такой ориентации величины  $\mu'$  близки к величинам  $\varepsilon'$ , а  $\mu'' \gg \varepsilon''$  [1].

При исследовании в этой геометрии частотных характеристик были обнаружены резонансная зависимость  $\mu''$  и дисперсионная  $\mu'$  (киральные резонансы магнитной проницаемости КР). При измерениях на частотах, близких к резонансному максимуму, обнаружена бифуркация резонансной кривой резонатора, являющаяся, по-видимому, следствием магнитоэлектрических взаимодействий, характерных для киральных сред. Так, при внесении образцов наблюдаются два резонанса с двумя парами значений  $R_1, \Delta f_1 > f_r$  и  $R_2, \Delta f_2 < f_r$  ( $f_r$  — частота резонатора без образца), которым можно поставить в соответствие две пары значений  $\mu'_1, \mu''_1$  и  $\mu'_2, \mu''_2$  [7].

На рис. 2 приведены частотные зависимости  $\mu''$  и  $\mu'$  для киральных образцов  $ch$  с углом накрутки спирали  $\alpha = 90^\circ$  (один элемент представляет собой разомкнутое кольцо с нахлестом).

Приведенные на рис. 2 кривые представляют собой две разрывные ветви, перекрывающиеся в некоторой частотной области  $\Delta F$ : диамагнитная ветвь значений  $\mu'_1, \mu''_1$  ( $\mu_1 < 1$ ) и парамагнитная ветвь  $\mu'_2, \mu''_2$  ( $\mu_2 > 1$ ). Частоту  $f_{r0}$ , на которой  $\mu'_1 = \mu''_2$ , будем называть центральной частотой кирального резонанса  $\mu$ .

Проведенные измерения свидетельствуют, что магнитная проницаемость  $\mu''$  исследуемых образцов превышает  $\mu''$  композитов магнитного типа на основе шариков железа при аналогичной концентрации (0.2% объемных) более чем на 2 порядка и достигает в резонансе величин, близких к магнитным металлам, таким как кобальт и никель, уступая железу и сплавам железа, для которых  $\mu''$  в этом диапазоне составляет 60 [6]. С повышением частоты  $\mu$  металлов резко падает и уже при  $\lambda = 1$  см магнитная проницаемость киральных сред сможет конкурировать и с железом.

Если же сравнивать волновые сопротивления  $\rho = \sqrt{\mu/\varepsilon}$ , то киральные среды, имея близкие значения  $\varepsilon$  и  $\mu$ , оставляют далеко позади магнитные металлы и на более низких частотах, поскольку диэлектрическая проницаемость металлов на порядки превышает их магнитную проницаемость.

Частотные зависимости типа рис. 2 наблюдаются при соответствующих частотах резонансов  $\mu''$  и  $\mu'$  для киральных образцов с другими значениями  $\alpha$ , а также для структур  $chF$  и  $ch + F$ . Для структур  $chF$  и  $ch + F$  изучалось влияние постоянного магнитного поля  $H_0$  по изменению  $R$  и  $\Delta f$  резонатора при изменении  $H_0$ .

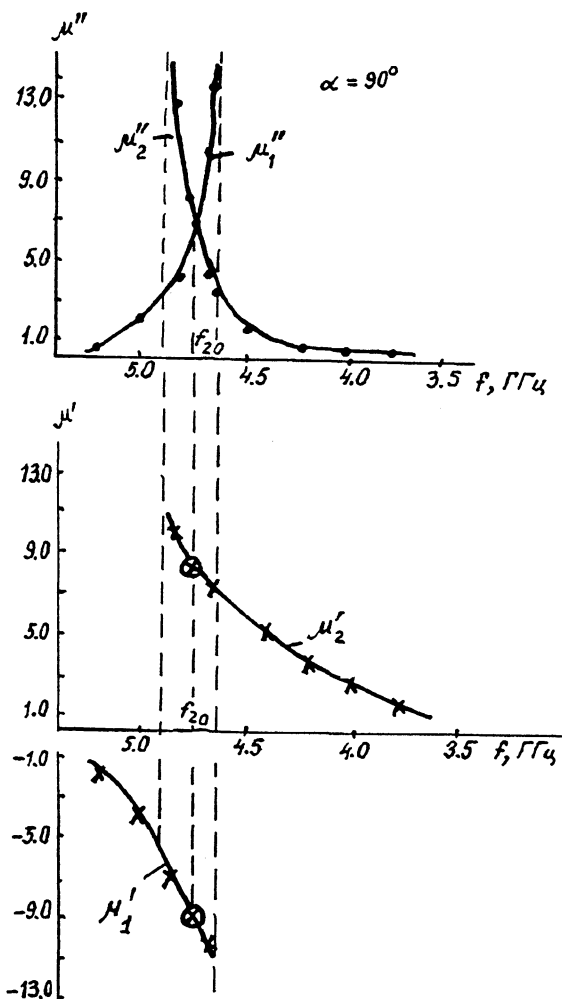


Рис. 2. Зависимость действительной  $\mu'$  и мнимой  $\mu''$  частей магнитной проницаемости от частоты для образца  $ch$  с  $\alpha = 90^\circ$ .

На рис. 3 показана наблюдаемая на индикаторе прибора картина для образцов  $ch$  с  $\alpha = 90^\circ$  в случае  $f_r < f_{r0}$  и  $H_0 \perp h$ ,  $f_{r0}$  — центральная частота, при которой  $\mu'_1 = \mu'_2$ ,  $f_r$  — частота измерительного резонатора без образца.

Из рис. 3 видно, что внесение кирального образца смещает резонансную кривую резонатора в положение  $f_{ch}$ , помещение ферритового стержня в полость кирального образца (структура  $chF$ ) приводит к смещению резонансной кривой

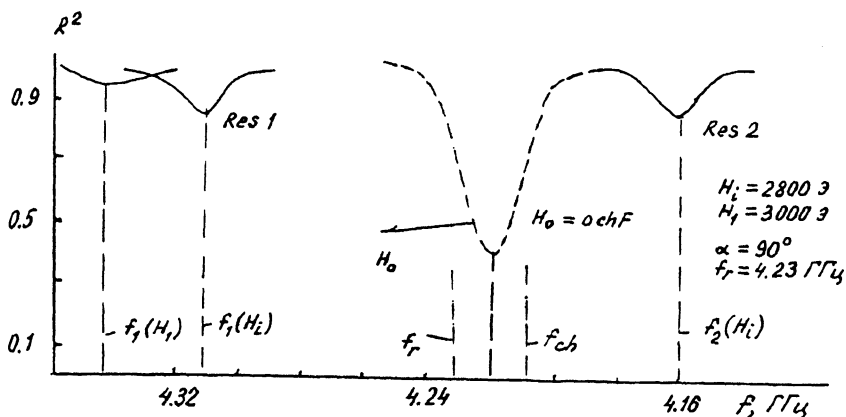


Рис. 3. Динамика наблюдаемых на индикаторе прибора резонансных кривых измерительного резонатора для образцов ch, chF в отсутствие и при наложении внешнего магнитного поля  $H_0$ ,  $f_r$  — положение резонансной кривой резонатора в отсутствие образца,  $f_{ch}$  — положение резонансной кривой резонатора с образцом ch,  $H = 0$ , chF — резонансная кривая резонатора для структуры chF в отсутствие поля  $H_0$ ,  $f_1(H_i)$  и  $f_2(H_i)$  — бифуркация резонансной кривой резонатора в поле  $H_i$ ; два резонанса с одинаковыми значениями  $R$  и разными частотами  $f_1$  и  $f_2$ .

в положение  $H = 0$  chF. Наложение внешнего магнитного поля  $H_0$  уменьшает интенсивность резонанса chF и смещает его влево, в область более высоких частот ( $\Delta f < 0$ ), это диамагнитная ветвь. При  $H_0$ , близких к  $H_i$ , появляется второй резонанс резонатора с  $\Delta f > 0$ , это парамагнитная ветвь. Интенсивность второго резонанса с увеличением  $H_0$  растет. При  $H_0 = H_i$  интенсивности Res1 и Res2 выравниваются, затем с ростом  $H_0$  относительно  $H_i$  Res1 затухает, а Res2 усиливается. Таким образом, имеются два ряда значений  $R_1$ ,  $\Delta f_1$  и  $R_2$ ,  $\Delta f_2$ , которые при изменении  $H_0$  меняются.

Результатом обработки зависимостей рис. 3 и соответственно измерений  $R$  и  $\Delta f$  являются зависимости  $\mu'$  и  $\mu''$  от величины  $H_0$ , приведенные на рис. 4. Это резонансные зависимости магнитной проницаемости, которые представляют собой две разрывные ветви: диамагнитная ветвь значений  $\mu_1''$  и  $\mu_1'$  (определяемых параметрами Res1) и парамагнитная ветвь значений  $\mu_2''$  и  $\mu_2'$  (определяемых параметрами Res2). Из рис. 4 видно, что при некотором поле  $H_0 = H_i$  ветви мнимой части магнитной проницаемости пересекаются:

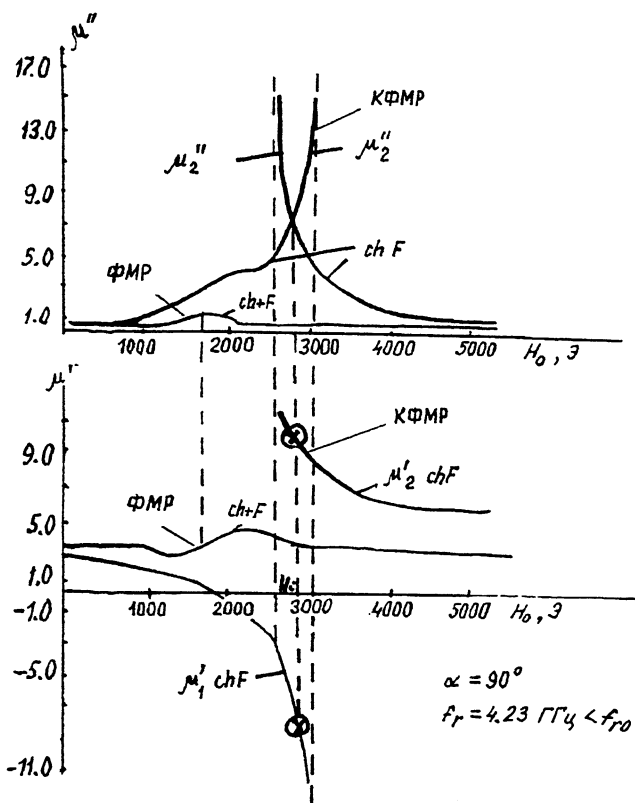


Рис. 4. Зависимость действительной  $\mu'$  и мнимой  $\mu''$  частей магнитной проницаемости от внешнего магнитного поля  $H_0 \perp 0 (\perp h)$  для структур  $chF$  и  $ch+F$  на фиксированной частоте.

$\mu'_1 = \mu'_2$ . При увеличении  $H_0$  относительно  $H_i$  диамагнитная ветвь затухает ( $\mu''_1$  растет и  $|\mu'_1|$  растет при отрицательном значении  $\mu'_1$ ). При уменьшении величины  $H_0$  относительно  $H_i$  затухает парамагнитная ветвь (растет  $\mu''_2$  и  $\mu'_2$ ). В области полей  $\Delta H$  по обе стороны от  $H_i$  наблюдается сосуществование двух ветвей: бифуркация действительной и мнимой частей магнитной проницаемости с  $\mu''_1 = \mu''_2$  при  $f = f_r$  и  $H_0 = H_i$ , подобная описанной выше в киральных образцах без феррита в области частот  $\Delta F$  при  $H_0 = 0$  и  $\mu''_1 = \mu''_2$  при  $f = f_{r0}$ .

В отличие от структуры  $chF$  структура  $ch+F$  проявляет аддитивность магнитных проницаемостей, зависимости  $\mu$  от  $H_0$  для нее повторяют ФМР феррита относительно точки отсчета  $H_0 = 0$ , соответствующей киральному образцу  $ch$ .

Из рис. 4 видно, как небольшие изменения  $\mu$  феррита при ФМР, наблюдаемые в структуре  $ch + F$ , соответствуют сильным изменениям  $\mu$  в структуре  $chF$ , которые можно рассматривать как результат взаимовлияния кирального и ферромагнитного резонансов — киральный ферромагнитный резонанс КФМР, КФМР превосходит по интенсивности ФМР более чем на порядок.

Таким образом, наиболее существенными нам представляются следующие результаты данной работы.

1. В киральных образцах из ориентированных немагнитных проводящих спиралей обнаружен резонанс высокочастотной магнитной проницаемости с характерными особенностями резонансных зависимостей  $\mu''$  и  $\mu'$ , проявляющимися в бифуркации резонансной кривой резонатора.

2. В резонансе СВЧ-магнитная проницаемость киральных образцов достигает величин, близких к магнитным металлам.

3. В структуре киральная среда-феррит обнаружено взаимовлияние кирального и ферромагнитного резонансов, результатом чего является киральный — ферромагнитный резонанс, превосходящий по интенсивности ФМР более чем на порядок. Показана возможность управления магнитной проницаемостью с помощью внешнего магнитного поля.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (код проекта 95-02-06070).

#### Список литературы

- [1] Казанцев Ю.Н., Крафтмакер Г.А. // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. В. 20. С. 74-80.
- [2] Третьяков С.А. // РиЭ. 1994. Т. 39. В. 10. С. 1457-1470.
- [3] de Daran F., Vigneras-Lefebvre V., Parneix J.P., Mariotte F., Garat J. // Proceeding of "Chiral' 94". Perigueux. France. May 18-20. 1994.
- [4] Jaggard D.L., Mickelson A.R., Papas C.H. // Appl. Phys. 1979. V. 18. P. 211-216.
- [5] Varadan V.K., Varadan V.V., Ma Y., Lakhtakia A. // Proc. SPIE. 1988. V. 927. P. 213.
- [6] Казанцев Ю.Н., Крафтмакер Г.А. // ФММ. 1989. Т. 67. В. 5. С. 903-908.
- [7] Kazantsev Yu.N. // Proceedings of "Chiral' 94". Perigueux. France. May 18-20. 1994. P. 215-222.
- [8] Казанцев Ю.Н., Крафтмакер Г.А., Глазер А.А., Потанов А.П., Тагиров Р.И. // ФММ. 1991. В. 3. С. 116-121.
- [9] Kazantsev Yu.N., Kraftmakher G.A. // Proceeding of "Chiral' 94". Perigueux. France. May 18-20. 1994. P. 347-357.

Институт радиофизики  
и электроники РАН  
Фрязино

Поступило в Редакцию  
1 июня 1995 г.