

Семенов А.С., Семенов М.Г., Мясников А.В., Налогин А.Г.
АО «НПП «Исток» им. Шокина»

Метрологическое обеспечение разработок ферритовых материалов для сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн

Представлены разработанные АО «НПП «Исток» им. Шокина» методики для определения электромагнитных параметров ферритовых материалов. Особенностью данных методик является возможность оперативного измерения электромагнитных параметров выпускаемой продукции, не разрушая при этом исследуемые ферритовые пластины и заготовки. Приведены измеренные с помощью методик электромагнитные параметры ряда ферритов, выпускаемых АО «НПП «Исток» им. Шокина».

Ключевые слова: метрологическое обеспечение, ферритовые материалы, измерение электромагнитных параметров, ферромагнитный резонанс.

Введение.

В настоящее время определение электромагнитных параметров ферритов в сантиметровом и миллиметровом диапазонах длин волн проводят преимущественно с помощью уникальной измерительной аппаратуры и, как правило, методики измерения электромагнитных параметров достаточно трудоёмки [1]. В процессе производства материалов всегда играет большую роль возможность измерения параметров на выпускаемой продукции, то есть использование в процессе производства методов неразрушающего контроля. Для успешного решения указанных задач в АО «НПП «Исток» им. Шокина» был разработан и успешно применяется ряд методик, для оперативного контроля электромагнитных параметров ферритовых материалов в процессе их серийного производства. Основным преимуществом методик является использование для их реализации стандартной измерительной аппаратуры и оснастки, простота использования и меньшая трудоёмкость по сравнению с имеющимися аналогами.

1. Методика измерения эффективной диэлектрической проницаемости и тангенса угла суммарных потерь магнитодиэлектриков в диапазоне миллиметровых волн.

Преимуществом данной методики по сравнению с аналогичными является возможность оперативного контроля электромагнитных параметров ($\epsilon_{\text{эфф}}$, $\text{tg}\delta_{\Sigma}$) ферритовых материалов ещё на этапе заготовок, толщиной (1 ÷ 10) мм. Методика основана на частотной зависимости коэффициента отражения $|R^2|$ плоской электромагнитной волны от плоскопараллельного слоя магнитодиэлектрика в свободном пространстве [1]. В качестве аппаратуры используется панорамный измеритель КСВН и ослабления (78-118 ГГц) и измерительная ячейка в виде плавного волноводно – рупорного перехода, с выходным сечением которого контактирует поверхность измеряемого образца.

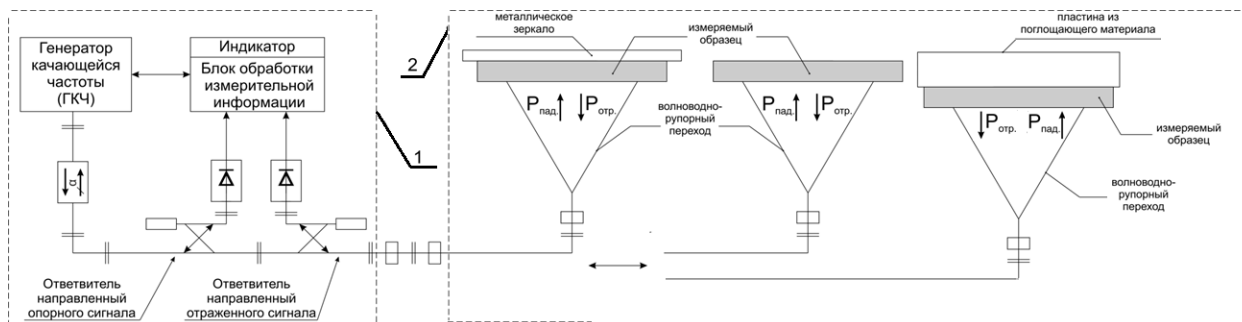


Рис. 1. Блок-схема стенда для измерения $\epsilon_{\text{эфф}}$ и $\text{tg}\delta_{\Sigma}$ в мм-диапазоне длин волн, 1 - панорамный измеритель КСВН и ослабления, 2 - измерительный модуль.

В первом варианте определения эффективного показателя преломления среды (n), образец прижат к рупору, производится измерение разности частот ($\Delta f = f_1 - f_2$), соответствующих положению крайних минимумов квадрата модуля отражения ($|R^2|$) ферритового слоя в рабочем диапазоне панорамного измерителя. Вычисляется n :

$$n = \frac{cp}{2d\Delta f} \quad (1)$$

где d – толщина измеренного образца, p – число интервалов между минимумами, $c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ – скорость света.

Далее определяется эффективная диэлектрическая проницаемость феррита ($\epsilon_{\text{эфф}}$):

$$\epsilon_{\text{эфф}} = n^2 \quad (2)$$

Во втором варианте определения n , используется метод «бесконечной толщины», $|R_{\infty}|^2 = r^2$ [1]. В этом случае n определяется по формуле:

$$n = \frac{1 + \sqrt{|R_{\infty}|^2}}{1 - \sqrt{|R_{\infty}|^2}} = \frac{1 + \bar{r}}{1 - \bar{r}} = \bar{K}_{\text{стУ}} \quad (3)$$

При определении тангенса угла суммарных потерь ($\text{tg}\delta_{\Sigma}$), образец расположен на металле и прижат к рупору. Проводится измерение значения КСВН (K) в одном из минимумов $|R_0|$ и соответствующей ему частоты. Далее вычисляется $\text{tg}\delta_{\Sigma}$:

$$\text{tg}\delta_{\Sigma} = \frac{1}{nk d} \left(\ln \frac{nK+1}{nK-1} - \chi_d \right), \quad (4)$$

где $\chi_d = \frac{\lambda_0 \cdot d}{na^2}$ – поправка на дифракционные потери, a – размер стороны раскрыва измерительного волноводно-рупорного перехода, k – волновое число [1]. С помощью данной методики обеспечиваются разработки и производство ферритовых материалов. В таблице 1 приведены примеры измеренных параметров ферритов на частоте $f = 100$ ГГц.

Таблица 1.

| Материал | Эфф. показ-ль преломления среды, n | Намагниченность насыщения M_s | Эфф. диэл-ая проницаемость, $\epsilon_{\text{эфф}}$ | Тангенс угла суммарных потерь, $\text{tg}\delta_{\Sigma}$ |
|-------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|---|---|
| Никель-цинковая шпинель (НЦВ) | $3,75 \pm 2 \%$ | 380 кА/м | $13,5 \pm 4 \%$ | $5 \cdot 10^{-4} \pm 3,7 \cdot 10^{-4}$ |
| Феррогранат (ФГ-140) | $3,89 \pm 2 \%$ | 140 кА/м | $15,13 \pm 4 \%$ | $1 \cdot 10^{-4} \pm 3,7 \cdot 10^{-4}$ |
| Литиевая шпинель (ЛТ-215) | $3,94 \pm 2 \%$ | 215 кА/м | $15,54 \pm 4 \%$ | $1 \cdot 10^{-4} \pm 3,7 \cdot 10^{-4}$ |

2. Метод измерения эффективного поля анизотропии и ширины полосы ферромагнитного резонанса магнитно-одноосных ферритов.

Этот метод основан на зависимости резонансной частоты ферромагнитного резонанса (ФМР) (f_p) ферритов с гексагональной структурой от величины эффективного поля анизотропии вещества (H_a). Данный метод позволяет существенно снизить трудоёмкость процесса измерения и приготовления образцов (пластин) по сравнению с измерениями на образцах в форме сфер. В данном методе используется панорамный измеритель КСВН и ослабления Р2-124М «Elmika» (78 ГГц÷118 ГГц) (рис. 2).



Рис. 2. Стенд для измерения H_a и ΔH магнитно-одноосных ферритов (слева) и ферритовый образец помещенный в измерительную оправку (справа).

Порядок измерения:

1) Измеряемый образец феррита, помещается между двумя плавными волноводно – рупорными переходами с КСВН < 1,1, подключенными к Р2-124М.

2) В диапазоне частот от 78 ГГц до 118 ГГц осуществляется измерение частот ФМР по половинному уровню мощности (f_1 и f_2) при нормальном падении плоской электромагнитной волны на образец, направление распространения которой совпадает с направлением намагниченности и поля анизотропии в кристаллических зёрнах феррита.

3) Рассчитывается резонансная частота, эффективное поле анизотропии и ширина полосы ферромагнитного резонанса по формулам (5), (6), (7) соответственно:

$$f_p = \frac{f_1 + f_2}{2}, \quad (5)$$

$$H_a = \frac{f_p}{\gamma} - \frac{2}{3}4\pi M_s, \quad (6)$$

$$\Delta H = \frac{f_2 - f_1}{\gamma} \quad (7)$$

где $\gamma = 2,8 \frac{\text{МГц}}{\text{э}}$ - гиромагнитное отношение,

$4\pi M_s$ – намагниченность насыщения ферритового материала [2].

Пример результатов измерений H_a и ΔH ферритов с гексагональной структурой (стронциевого феррита - 03СЧА2 и бариевого феррита - ГБ-13) приведён в таблице 2.

Таблица 2.

| Материал | f_1 [ГГц] | f_2 [ГГц] | f_p [ГГц] | $4\pi M_s$ [Гс] | H_a [кЭ] | ΔH [кЭ] |
|----------|-------------|-------------|-------------|-----------------|--------------|-----------------|
| 03СЧА2 | 88,78 | 98,45 | 93,61 | $1500 \pm 5\%$ | $32 \pm 5\%$ | $3,4 \pm 5\%$ |
| ГБ-13 | 89 | 97,4 | 93,2 | $1550 \pm 5\%$ | $32 \pm 5\%$ | $3 \pm 5\%$ |

3. Метод измерения намагниченности насыщения ферритовых материалов.

Данный метод предназначен для оперативного измерения намагниченности насыщения ферритовых образцов в форме пластин толщиной (0,5÷2) мм.

Значения намагниченности насыщения (M_s) вычисляются по результатам измерений изменения потокосцепления поля ($\Delta\Psi$) намагниченных образцов с индукционным преобразователем, выполненным в виде катушек Гельмгольца (рис. 3).



Рис. 3. Внешний вид (слева) и блок схема (справа) установки для измерения M_s .

Порядок измерения: 1) Измеряемый образец вставляют в оправку и помещают ее в зазор катушек Гельмгольца. 2) Переключают тумблер микроамперметра в положение измерение и резко удаляют оправку с образцом из зазора катушек. 3) Снимают показания индикатора микроамперметра ($\Delta\Psi$). 4) Вычисляют объем образца (V) по измеренным геометрическим размерам. 5) Вычисляют значение намагниченности насыщения:

$$M_s = \frac{\Delta\Psi}{kV}, \quad (8)$$

где $k = 2,25 \cdot 10^{-3}$ (Тл/А)- постоянная катушек Гельмгольца [3].

Таблица 3. Пример результатов измерений намагниченности ферритовых образцов.

| Материал образца | Размеры образца $a \times b \times h$ [мм] | Объем образца V [мм ³] | Измеренное потокосцепление $\Delta\Psi$ [мкВб] | Намагниченность насыщения M_s [$\frac{kA}{m}$] |
|------------------|--|--------------------------------------|--|--|
| НЦВ | 29,86x47,85x 1,17 | 1671,7 | 1450 | 385,5±4% |
| ЛТ - 215 | 29,85x47,84x 0,76 | 1085,3 | 500 | 204,75±4% |
| ФГ - 140 | 29,85x47,85x1 | 1428,3 | 450 | 140±4% |

4. Методика измерений электромагнитных параметров СВЧ ферритов с малыми потерями на образцах в форме пластин в интервале частот (9,8 ÷ 10,1) ГГц.

Данная методика предназначена для оперативного контроля электромагнитных параметров (действительной части диэлектрической (ϵ') и магнитной (μ') проницаемости, тангенса угла диэлектрических ($\text{tg}\delta_\epsilon$) и магнитных ($\text{tg}\delta_\mu$) потерь наиболее востребованных СВЧ ферритовых подложек толщиной $1 \pm 0,015$ мм при их серийном производстве с использованием контрольных образцов. При измерении параметров резонаторов с ферритовыми образцами используется два независимых канала, в каждом - сигнал от анализатора цепей (1) через КВП (2) и волноводный переключатель (3) поступает на один из резонаторов (4, 6), затем через КВП (5, 7) на анализатор цепей (рис.4).

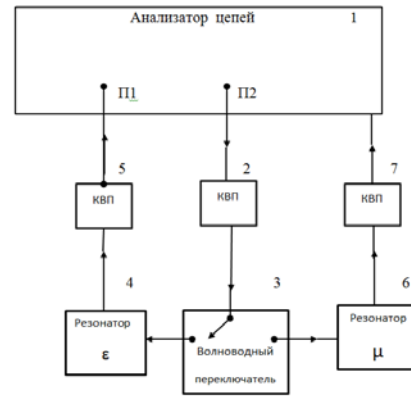
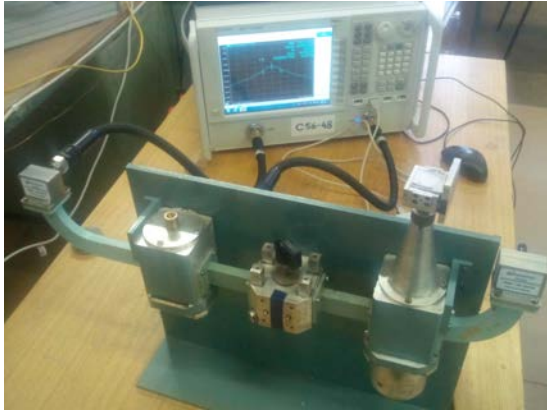


Рис. 4. Внешний вид (слева) и блок – схема (справа) стенда для измерения электромагнитных параметров ферритов с малыми потерями на образцах в форме пластин

Автоматически происходит измерение и индикация резонансных частот $f_{\text{ек}}$, $f_{\text{ε}}$, $f_{\text{μк}}$, $f_{\text{μ}}$ и ширины резонансной кривой по уровню 3 дБ $\Delta f_{\text{ек}}$, $\Delta f_{\text{ε}}$, $\Delta f_{\text{μк}}$, $\Delta f_{\text{μ}}$ контрольной и измеряемой пластин, помещенных в резонаторы ϵ и μ соответственно. Далее происходит расчет ϵ' , $\text{tg}\delta_{\epsilon}$, μ' и $\text{tg}\delta_{\mu}$ по формулам, полученным на основе уравнения для комплексных собственных частот резонатора [4,5]. Результаты измерений приведены в таблице 4.

Таблица 4.

| Тип ферритовой пластины | Электромагнитные параметры пластины | | | |
|---|-------------------------------------|-------------------------------|-------------------|-------------------------------|
| | $\epsilon'_{\text{к}}$ | $\text{tg}\delta_{\text{ек}}$ | $\mu'_{\text{к}}$ | $\text{tg}\delta_{\text{μк}}$ |
| Контрольная пластина | 14,98 | $9,49 \cdot 10^{-5}$ | 0,87 | $1,4 \cdot 10^{-4}$ |
| Пластина ФГ-140 (феррогранат 140 кА/м) | ϵ' | $\text{tg}\delta_{\epsilon}$ | μ' | $\text{tg}\delta_{\mu}$ |
| | 15,186 | $7,57 \cdot 10^{-5}$ | 0,847 | $7,133 \cdot 10^{-4}$ |
| Пластина НТ – 200 (никелевая шпинель 200 кА/м) | ϵ' | $\text{tg}\delta_{\epsilon}$ | μ' | $\text{tg}\delta_{\mu}$ |
| | 14,24 | $9,72 \cdot 10^{-4}$ | 0,745 | $7,653 \cdot 10^{-3}$ |

Заключение

Разработанные методики позволяют комплексно решать вопросы измерения с высокой точностью электромагнитных параметров разнообразных материалов, применяемых в СВЧ электронике: сильно- и слабопоглощающих, изотропных и анизотропных, с различными значениями диэлектрической и магнитной проницаемости, в сантиметровом и миллиметровом диапазонах длин волн.

Библиографический список

1. «Методика измерения эффективной диэлектрической проницаемости и тангенса угла суммарных потерь магнитоэлектриков в диапазоне миллиметровых волн» (рег. № 0.012.991-017, 1986 г., АО «НПП «Исток» им. Шокина»).
2. «Метод измерения эффективного поля анизотропии и ширины полосы ферромагнитного резонанса магнитно – одноосных ферритов в рабочем диапазоне температур» (рег. № 012.991-023, 1986 г., АО «НПП «Исток» им. Шокина»).
3. «Метод измерения намагниченности насыщения ферритовых материалов и их температурной зависимости» (рег. № 0.012.991-022, 1986 г., АО «НПП «Исток» им. Шокина»).
4. «Методика измерения электромагнитных параметров СВЧ ферритов с малыми потерями на образцах в форме пластин в интервале частот (9,8...10,1) ГГц, ВНИИФТРИ, НПО «Исток». 1978 г.
5. Соколов В.М., Иващенко П.А. «Способ вычисления добротности волноводных резонаторов со слоисто-однородным заполнением». Труды ВНИИФТРИ. Методы и средства радиотехнических измерений, выпуск 17 (47), 1974 г.