

УДК 53.083.2, 53.088.4, 519.222

Г.Е. КУЛЕШОВ, В.И. СУСЛЯЕВ

РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПО ИЗМЕРЕННЫМ ИЗМЕНЕНИЯМ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕРЕГУЛЯРНОГО МИКРОПОЛОСКОВОГО РЕЗОНАТОРА¹

Приводятся результаты моделирования резонансных кривых нерегулярного микрополоскового резонатора. На их основе разработана методика расчета магнитной и диэлектрической проницаемости по измеренным изменениям амплитудно-частотных характеристик нерегулярного микрополоскового резонатора в многомодовом режиме.

Ключевые слова: нерегулярный микрополосковый резонатор, СВЧ-измерения, магнитная и диэлектрическая проницаемость, метод моментов, резонансные кривые.

Несмотря на активное развитие измерительных средств, диапазон 0,1–2 ГГц все еще остается «неудобным» для измерений, так как находится на стыке принципиально различающихся методов с распределенными и сосредоточенными параметрами. Применение здесь хорошо зарекомендовавшего себя нерегулярного микрополоскового резонатора (НМПР) наталкивается на определенные трудности при исследовании материалов с большими магнитными потерями [1]. При внесении материала происходит исчезновение второго максимума на совместной амплитудно-частотной характеристике четных и нечетных мод. Таким образом, ранее используемый нами метод расчета [2] комплексной магнитной и диэлектрической проницаемости, хорошо зарекомендовавший себя в случае с явно выраженными модами колебаний (т.е. можно определить местоположение максимума соответственно четной и нечетной модам), перестает работать. Для решения возникшей проблемы в работе [3] было предложено использовать метод статистических моментов. Из литературы известно, что примерно 90 % информации о форме кривой содержат первые четыре статистических момента. Поэтому для описания резонансных кривых, соответствующих случаю больших магнитных потерь, и нахождения комплексной магнитной проницаемости можно использовать «метод моментов».

Если для использования ранее разработанной методики [2] достаточно было точного совпадения максимумов расчетных и экспериментальных АЧХ НМПР, то теперь требуется полное совпадение расчетных и экспериментальных АЧХ резонансных кривых на определенном частотном участке. Таким образом, необходимо выполнение более жестких требований к характеристикам нерегулярного микрополоскового резонатора.

Точность описания формы кривой с помощью статистических моментов существенно зависит от ширины выбранного интервала, по которому производится вычисление моментов. Для НМПР частотная область АЧХ исследуемых мод ограничена областями попадания низкочастотных и высокочастотных соседних мод. Для оценки влияния ширины полосы частот на рассчитанные значения первых четырех моментов проведено соответствующее моделирование. Значения второго и четвертого моментов при изменении интервала частот заметно меняются. Поэтому интервал частот, в котором происходит расчет моментов, фиксируется для экспериментальных и теоретических резонансных кривых. Однако установлен предел интервала частот – 300 МГц, при котором значения первого и третьего моментов практически не меняются (рис. 1). Дальнейшее увеличение интервала приводит к

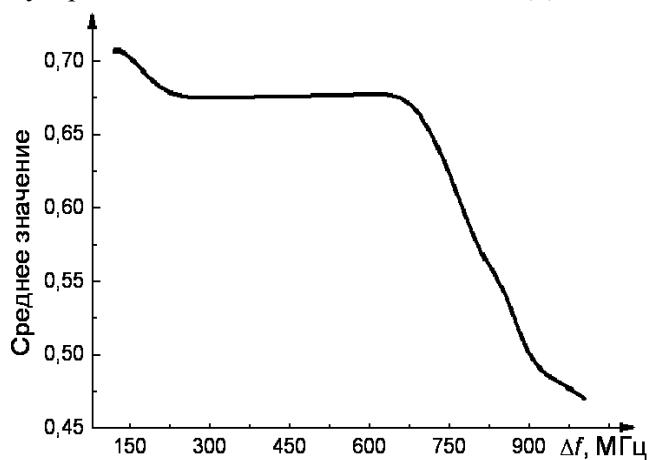


Рис. 1. Влияние изменения частотного интервала на первый момент

¹ Работа выполнена в рамках проекта МИНОБРНАУКИ, шифр 2.4305.2011

погрешности за счет попадания в область АЧХ соседних мод. Для уменьшения избыточного объема обрабатываемых при расчете моментов данных фиксированный частотный интервал ограничивается диапазоном частот, при котором происходит стабилизация значений первого и третьего моментов.

Точность определения четырех основных моментов расчетных и экспериментальных кривых также зависит от числа точек на выбранном частотном интервале. Показано, что в зависимости от числа точек в АЧХ программа расчета моментов выдает различные значения. Но если для первых двух моментов отклонение при расчете не превышает соответственно 0,1 и 0,15 %, то для третьего и четвертого моментов оно достигает 1,5 и 2,5 % соответственно. При количестве используемых точек более 750 наступает стабилизация рассчитываемых значений и отклонение от них не превышает 0,05 %.

Для оценки измерительных возможностей «метода моментов» проведено сравнение результатов моделирования нагруженного резонатора и экспериментальных данных для образца гексаферрита $\text{Ba}_2\text{Zn}_2\text{Fe}_{12}\text{O}_{22}$ (рис. 2). При этом значения ϵ' и ϵ'' определялись по результатам измерений на второй моде методом максимумов, а μ' и μ'' – из анализа рассчитанных значений моментов резонансной кривой. Сравнение моментов экспериментальных и расчетных резонансных кривых для известных материалов, показало, что отклонение значений для первых двух моментов экспериментальных и расчетных кривых не превышает 1 %, а для третьего и четвертого – 0,05 %.

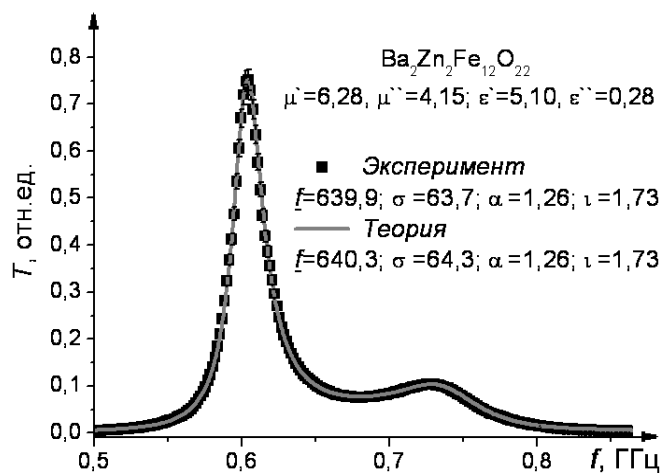


Рис. 2. Сравнение моментов экспериментальной и теоретической совместной АЧХ второй-третьей мод нагруженного нерегулярного микрополоскового резонатора

Однако, как показали наши исследования [4], подтвержденные литературными данными [5], у гексаферритов в диапазоне частот от 0,1 до 1,5 ГГц комплексная диэлектрическая проницаемость считалась неизменной для данного материала. Однако, как показали наши исследования [4], подтвержденные литературными данными [5], у гексаферритов в диапазоне частот от 0,1 до 1,5 ГГц комплексная диэлектрическая проницаемость с изменением частоты и температуры материала (в интервале ± 70 °С) может существенно меняться. Поэтому было проведено соответствующее моделирование влияния изменения диэлектрической проницаемости на измеряемые моменты резонансных кривых второй-третьей мод.

Поэтому было проведено соответствующее моделирование влияния изменения диэлектрической проницаемости на измеряемые моменты резонансных кривых второй-третьей мод.

На зависимости второго – четвертого моментов от μ' изменение ϵ' оказывает слабое влияние. Лишь для первого момента в случае значительных отклонений диэлектрической проницаемости изменения становятся заметны. При этом неточность определения μ' составляет порядка 6 %. При использовании для расчета μ' других моментов изменение ϵ' практически не будет оказывать влияния (отклонение не превышает 1 %) на точность определения действительной части комплексной магнитной проницаемости. Влияние ϵ'' на зависимости моментов от μ' более существенно. В этом случае для определения действительной части комплексной магнитной проницаемости лучше использовать второй и третий моменты, при этом отклонение от действительных значений не превышает 5 %. Таким образом, для уменьшения влияния изменения комплексной диэлектрической проницаемости на значения μ' , найденные с использованием «метода моментов», необходимо при расчетах воспользоваться значениями третьего и второго моментов. На зависимости первых четырех моментов от μ'' изменение ϵ' оказывает слабое влияние. Причем для четвертого момента оно практически полностью отсутствует, что делает его оптимальным для измерения мнимой части комплексной диэлектрической проницаемости. Влияние ϵ'' на зависимости моментов от μ'' является более существенным. В случае материалов с малыми диэлектрическими потерями для расчетов можно воспользоваться любым из моментов. Однако, если $\epsilon'' > 1$, то меньшие отклонения μ'' будут при использовании первого момента. Таким образом, для уменьшения влияния изменения комплексной диэлектрической проницаемости на значения μ'' , найденные с использованием «метода моментов», для расчета необходимо воспользоваться четвертым и первым моментами.

Проведено исследование возможности использования «метода моментов» для одновременного нахождения комплексной магнитной, и диэлектрической проницаемостей, а также его распространения на материалы с малыми потерями. Для этого было также исследовано влияние комплексной диэлектрической проницаемости на моменты резонансных кривых.

В итоге был разработан алгоритм и написана программа, позволяющая измерять на НМПР комплексную магнитную и диэлектрическую проницаемости магнитодиэлектриков «методом моментов». При этом с использованием вышеописанного способа, минимизирующего влияние ϵ^* на моменты, находилась комплексная магнитная проницаемость. Далее полученное значение μ^* использовалось для нахождения комплексной диэлектрической проницаемости по моментам наиболее чувствительным к ϵ' и ϵ'' . Рассчитанные значения подставлялись в первую часть программы, для уточнения начальных результатов. Повторяя эту процедуру несколько раз, методом итераций производится схождение к искомым значениям комплексной магнитной и диэлектрической проницаемости.

«Метод моментов» был использован для вычисления электромагнитных параметров образца гексаферрита, у которого совместная АЧХ второй и третьей мод имеет два выраженных максимума. При этом также использовался и метод «двух максимумов». Оба метода были использованы для измерения электромагнитных характеристик ряда материалов, результаты, полученные с использованием вышеописанных методик, показали хорошее совпадение между собой (рис. 3) и с литературными данными.

Это позволяет заключить, что «метод моментов» более универсален, чем традиционный метод «двух максимумов».

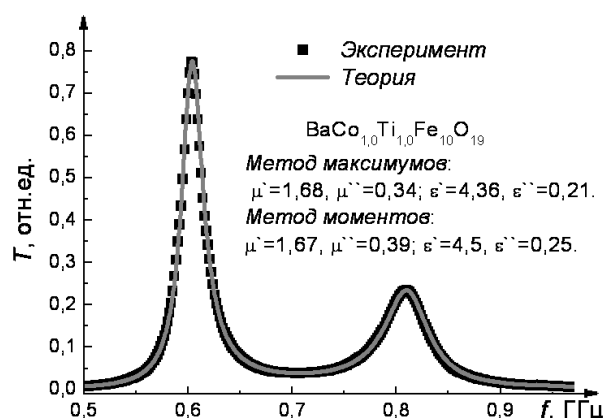


Рис. 3. Сравнение экспериментальной и теоретической совместной АЧХ второй-третьей мод нагруженного нерегулярного микрополоскового резонатора

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Доценко О.А., Кулешов Г.Е., Коровин Е.Ю., Суслев В.И. // Современные проблемы радиоэлектроники: сб. науч. трудов. – Красноярск: СФУ; Политехн. институт, 2007. – С. 233–234.
2. Суслев В.И., Журавлев В.А., Кочеткова Т.Д., Судаков С.В. // Приборы и техника эксперимента. – 2003. – № 5. – С. 1–5.
3. Доценко О.А., Кулешов Г.Е., Суслев В.И. // Изв. вузов. Физика. – 2008. – Т. 51. – № 9/2. – С. 170–171.
4. Доценко О.А., Коровин Е.Ю., Суслев В.И., Кулешов Г.Е. // Изв. вузов. Физика. – 2006. – Т. 49. – № 9. – С. 35–39.
5. Muhammad J. Iq. // JMMM. – 2011. – V. 323. – P. 2140–2144.

Национальный исследовательский Томский государственный университет,
г. Томск, Россия
E-mail: grigorij-kge@sibmail.com

Поступила в редакцию 15.07.13.

Кулешов Григорий Евгеньевич, ассистент;
Суслев Валентин Иванович, к.ф.-м.н., доцент.

G.E. KULESHOV, V.I. SUSLYAEV

CALCULATION OF ELECTROMAGNETIC PARAMETERS USING THE MEASURED VARIATIONS THE AMPLITUDE-FREQUENCY CHARACTERISTICS OF IRREGULAR MICROSTRIP RESONATOR

The paper presents the simulation results of the resonance curves of irregular microstrip resonator. Based on them the method of calculation of the magnetic and dielectric constant of the measured changes in the amplitude-frequency characteristics of irregular microstrip resonator in multimode are developed.

Keywords: irregular microstrip resonator, microwave measurements, magnetic and dielectric constant, the method of moments, the resonance curves.