

УДК 551.521.3; 551.593

В.И. Сусляев, В.А. Журавлев, Е.Ю. Коровин, Ю.П. Землянухин

Рупорный метод измерения электромагнитного отклика от плоских образцов в диапазоне частот 26–37,5 ГГц с улучшенными метрологическими характеристиками

Дано описание квазиоптического метода для исследования частотных зависимостей электромагнитного отклика и диэлектрической проницаемости в полосе частот 26–37,5 ГГц. Введение дополнительных квазиоптических элементов повышает достоверность получаемых экспериментальных результатов без потери чувствительности установки. Усреднением результатов измерения электромагнитного отклика во всей рабочей полосе частот анализатора цепей достигается повышение точности измерений, снижение временных затрат и трудоемкости. Предложенная методика обработки результатов эксперимента существенно повышает точность измерений электромагнитного отклика и диэлектрической проницаемости листовых материалов квазиоптическим методом при использовании аналоговых скалярных анализаторов цепей.

Ключевые слова: квазиоптический метод, электромагнитный отклик, диэлектрическая проницаемость, точность измерений.

Квазиоптический метод обладает неоспоримыми достоинствами при исследовании электромагнитного отклика и измерения магнитной и диэлектрической проницаемости образцов в виде дисков, пластин, ленты или полотна. Наличие открытого пространства между рупорными преобразователями или зеркалами открытых резонаторов позволяет осуществлять неразрушающий контроль качества (однородность, толщина, влажность и др.) произведенной продукции непосредственно во время технологического процесса. Этот метод применяется для измерения магнитной и диэлектрической проницаемостей больших по размеру образцов [1], а также для исследования зависимостей этих характеристик от температуры, магнитных и электрических полей и других воздействий. Квазиоптический метод основан на связи измеряемых в опыте комплексных коэффициентов отражения (R) и прохождения (T) с электромагнитными и геометрическими параметрами исследуемого образца. Величины модулей и фаз коэффициентов зависят от толщины слоя магнитодиэлектрика (d) и значений комплексных диэлектрической $\varepsilon = \varepsilon' - i\varepsilon''$ и магнитной $\mu = \mu' - i\mu''$ проницаемостей. Здесь ε' , μ' – действительные, ε'' , μ'' – мнимые части проницаемостей; i – мнимая единица. В зависимости от типа аппаратуры измеряются либо модули $|R|$, $|T|$ этих величин (с помощью скалярных анализаторов цепей), либо модули $|R|$, $|T|$ и фазы φ_R , φ_T (с помощью векторных анализаторов цепей). Соответственно скалярные анализаторы цепей дают возможность определять из эксперимента на одном образце только две величины: или значения μ' , μ'' при известных ε' , ε'' , или наоборот. Векторные анализаторы позволяют вычислить все составляющие диэлектрической и магнитной проницаемостей. Для плоской электромагнитной волны, падающей на плоский слой магнитодиэлектрика (материала, обладающего как диэлектрическими, так и магнитными свойствами, например, феррита) под прямым углом, выражения для коэффициентов отражения и прохождения могут быть записаны в виде

$$R = \frac{\rho(1 - e^{-2i\gamma d})}{1 - \rho^2 e^{-2i\gamma d}}; \quad T = \frac{\{1 - \rho^2\} e^{-i\gamma d}}{1 - \rho^2 e^{-2i\gamma d}}, \quad (1)$$

где $\rho = (Z - 1)/(Z + 1)$ – коэффициент отражения от передней грани магнитодиэлектрика; $Z = \sqrt{\mu/\varepsilon}$ – волновое сопротивление, $\gamma = k_0 \sqrt{\mu\varepsilon}$ – постоянная распространения электромагнитной волны в слое магнитодиэлектрика; $k_0 = \omega/c$ – волновое число свободного пространства; $\omega = 2\pi f$ – круговая частота электромагнитного процесса.

В качестве приемопередающих элементов квазиоптической измерительной установки достаточно часто используют рупорные антенны. Исследуемый образец устанавливается между сдвинутыми рупорами. Проведенное нами измерение диэлектрической проницаемости стандартных образцов (сертифицированных как стандартные образцы предприятия (СОП) Сибирским научно-

исследовательским институтом метрологии) в диапазоне частот 26–36 ГГц показало, что такой метод измерения дает ошибочный результат. Это может быть связано с тем, что плоский фронт еще не успевает сформироваться, и приведенные выше формулы (1) неприменимы. Изменением расстояния между рупорами при симметричном по отношению к ним расположении образца показано, что наилучшие результаты получены при расстоянии между рупорами $l \approx 50$ см. Однако при этом существенно снизился уровень фиксируемого приемным рупором сигнала. Для устранения этого недостатка нами использованы квазиоптические линзы, которые были установлены рядом с приемным и передающим рупорами. Расстояние до рупоров подбиралось экспериментально по наибольшему уровню сигнала при отсутствии образца между рупорами. Благодаря введению квазиоптических линз с фокусным расстоянием 120 мм удалось повысить уровень сигнала на 30 дБ по сравнению с прямым измерением (без линз). Для исследования СОП, диаметр которых равен 50 мм, использовалась диафрагма, изготовленная из поглощающего материала с круглым отверстием диаметром 45 мм. Для измерения электромагнитных параметров материалов с размерами менее 50 мм для устранения дифракционных эффектов использовалась другая диафрагма с отверстием диаметром 20 мм. Проведенные пробные исследования материалов с большими диэлектрическими (полимерные образцы с многостенными углеродными нанотрубками [2]) и магнитными (композиты с наноразмерным порошком гексаферрита в качестве активной фазы [3]) потерями показали, что падающей на образец мощности при такой конфигурации установки недостаточно. Для концентрации микроволновой мощности на образце нами добавлены еще две линзы с фокусным расстоянием 60 мм. Этот вариант установки может быть использован также для более детального рассмотрения электромагнитных характеристик исследуемых образцов, обладающих малыми электромагнитными потерями, с целью выявления локальных неоднородностей, которые могут проявиться в процессе изготовления или эксплуатации.

Блок-схема установки представлена на рис. 1: 1 – векторный анализатор цепей E8363B; 2 – коаксиально-волноводный переход; 3 – рупорные преобразователи; 4 – линзы с фокусным расстоянием 120 мм; 5 – линзы с фокусным расстоянием 60 мм; 6 – держатель образца с образцом.

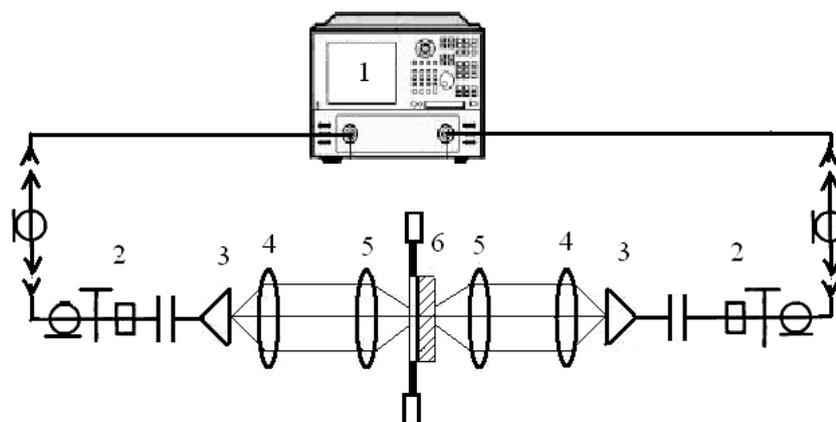


Рис. 1. Блок-схема квазиоптической установки для исследования коэффициентов прохождения и отражения (обозначения в тексте)

Достоинством рупорных антенн являются большая широкополосность, КПД, близкий к 100%, очень слабые боковые лепестки и практическое отсутствие заднего лепестка в диаграмме направленности. Использован пирамидальный рупорный преобразователь, так как такие рупоры обладают большим коэффициентом усиления.

Элементы высокочастотного тракта размещаются на оптической скамье и жестко закрепляются после проведения юстировочных и калибровочных работ.

Разработанная нами многофункциональная установка, использующая квазиоптический метод, позволяет проводить измерения коэффициентов прохождения плоских образцов: пластин, дисков, лент, пленок. Измерения могут проводиться для отдельных неподвижных образцов, для диагностики перемещающихся объектов, например ленты. Предусмотрена диагностика широким пятном для получения интегральных характеристик исследуемого объекта и суженным пятном для выявления локальных неоднородностей.

Векторный анализатор калибровался на диапазон частот 25–37,5 ГГц с разрешением 1600 точек. Измерение и получение окончательного результата занимают несколько минут.

Исследования оценки точности измерения проводились следующим образом. Экспериментально полученные данные сравнивались с результатами решения прямой задачи – вычислением частотной зависимости коэффициента прохождения в плосковолновом приближении по формуле (1) для СОП, параметры которых приведены в таблице.

Параметры стандартных образцов предприятия, диаметр 50 мм

Обозначение	ϵ'	$\text{tg}\delta$	Толщина, мм
СОП-1	3,813	0,00017	3,040
СОП-6	6,380	0,00750	3,000
СОП-7	9,437	0,00550	2,296

Результаты сравнения для СОП-1 приведены на рис. 2: кривая 1 – расчетные зависимости коэффициента прохождения; пунктирная линия 2 – статистически обработанные результаты измерения. Статистическая обработка экспериментальных данных проведена по всему массиву данных методом, разработанным специалистами фирмы Agilent Technologies и аппроксимацией опытных данных.

На рис. 3 показаны результаты сравнения расчетных и экспериментальных данных для СОП-7. Отклонения экспериментальных значений от расчетных находится в пределах погрешности измерений, регламентированной производителем векторного анализатора цепей.

Исследовалась также возможность повышения точности измерений при применении в качестве основного элемента установки скалярного анализатора цепей – панорамного измерителя КСВн, например типа P2-65, которые в настоящее время широко используются в России и в странах ближнего зарубежья. Известно, что панорамные измерители КСВн значительно уступают по точности зарубежным аналогам, однако они более доступны по цене и имеются в наличии во многих российских учреждениях.

В качестве примера на рис. 4 показаны результаты исследования коэффициента отражения СОП-6. Измерения проводились в отдельных точках для уменьшения динамических искажений, присущих непрерывной развертке. Кривая 1 представляет собой результаты решения прямой задачи, а точки отображают результаты эксперимента. Как видно, отличие измеренных величин по сравнению с расчетными достигает 2 дБ.

Обычно повышение точности достигается многократными измерениями коэффициентов прохождения в одной точке и последующей статистической обработкой результатов измерений. Этот способ требует значительного времени при измерении частотных зависимостей составляющих электромагнитного отклика.

Нами предлагается измерения во всем рабочем диапазоне частот прибора проводить однократно в отдельных частотных точках, а усреднение – по всей частотной зависимости. По такой методике получена кривая 2 на рис.4. Здесь использована статистическая обработка экспериментальных данных методом Савицкого–Голея по 5 частотным точкам и аппроксимацией опытных данных полиномом второй степени. Показано, что частотное усреднение снижает погрешность до 0,5 дБ и менее для всех образцов.

Достигнутое согласие расчета и эксперимента открывает возможность проведения оценки величин ϵ' и ϵ'' листовых диэлектриков по измеренным частотным зависимостям $|T|$ путем варьирования параметров ϵ' и ϵ'' расчетных кривых до максимального совпадения с экспериментом [4].

Таким образом, введение дополнительных квазиоптических элементов позволяет повысить достоверность получаемых экспериментальных результатов без потери чувствительности установки.

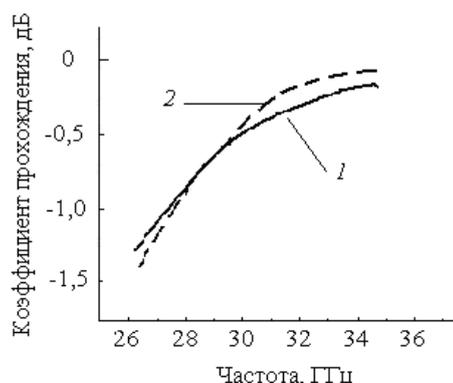


Рис. 2. Частотная зависимость коэффициента отражения СОП-1: 1 – расчетная кривая, вычисленная в плосковолновом приближении по формулам (1) и данным таблицы; 2 – кривая, полученная статистической обработкой экспериментальных данных

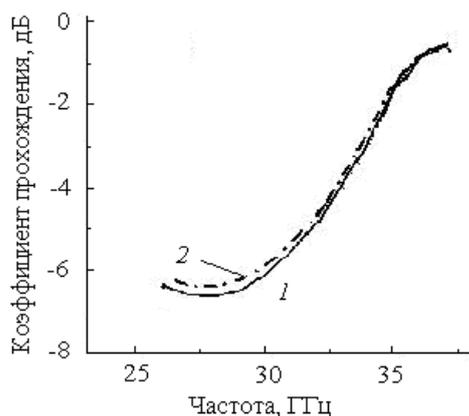


Рис. 3. Частотная зависимость коэффициента отражения СОП-7: 1 – расчетная кривая, вычисленная в плосковолновом приближении по формулам (1) и данным таблицы; 2 – кривая, полученная статистической обработкой экспериментальных данных

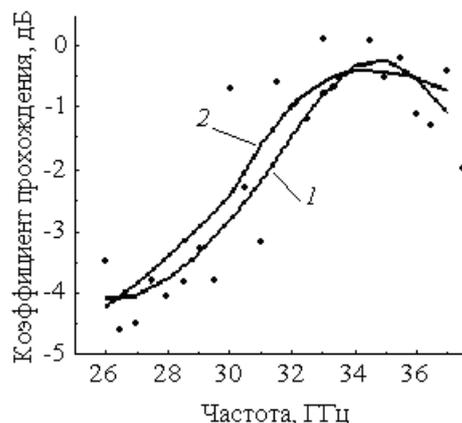


Рис. 4. Частотная зависимость коэффициента отражения СОП-6: 1 – расчетная кривая, вычисленная в плосковолновом приближении по формулам (1) и данным таблицы; 2 – кривая, полученная статистической обработкой экспериментальных данных; точки – измеренные значения

Усреднением результатов измерения электромагнитного отклика во всей рабочей полосе частот аналогового анализатора цепей достигается повышение точности измерений, снижение временных затрат и трудоемкости. Предложенная методика обработки результатов эксперимента существенно повышает точность измерений электромагнитного отклика и диэлектрической проницаемости листовых материалов квазиоптическим методом при использовании аналоговых скалярных анализаторов цепей.

Работа выполнена при частичной поддержке проектами: АВЦП № 2.1.1/13220 «Разработка физических основ создания методов и средств терагерцовой диагностики фундаментальных характеристик материалов искусственного и природного происхождения» и ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. грантом РФФИ № 11–02–90723 моб. ст.

Литература

1. Брандт А.А. Измерения параметров диэлектриков на сверхвысоких частотах / А.А. Брандт. – М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1963. – 403 с.
2. Electrophysical and electromagnetic properties of pure MWNTs and MWNT/PMMA composite materials depending on their structure / I.N. Mazov, V.L. Kuznetsov, S.I. Moseenkov et al. // Fullerenes, nanotubes and carbon nanostructures. – 2010. – Vol. 18. – P. 505–515.
3. Журавлев В.А. Динамические магнитные характеристики композиционного полимерного материала на основе карбонильного железа / В.А. Журавлев, В.И. Суслиев, Е.Ю. Коровин // Изв. вузов. Физика. – 2010. – Т. 53, № 5. – С. 97–98.
4. Журавлев В.А. Повышение чувствительности и точности квазиоптических методов измерения электромагнитного отклика в миллиметровом диапазоне длин волн / В.А. Журавлев, В.И. Суслиев, Ю.П. Землянухин // Изв. вузов. Физика. – 2011. – Т. 54, № 7. – С. 92–93.

Суслиев Валентин Иванович

Канд. физ.-мат. наук, доцент каф радиоэлектроники
 Национального исследовательского Томского государственного университета (НИТГУ)
 Тел.: (3822) 41-39-89
 Эл. почта: susl@mail.tsu.ru

Журавлев Виктор Алексеевич

Канд. физ.-мат. наук, доцент каф. радиоэлектроники НИТГУ

Тел.: (382-2) 41-39-89

Эл. почта: ptica@mail.tsu.ru

Коровин Евгений Юрьевич

Канд. физ.-мат. наук, доцент каф. радиоэлектроники НИТГУ

Тел.: (382-2) 41-39-89

Эл. почта: korovin_ey@mail.tsu.ru

Землянухин Юрий Петрович

Аспирант каф. радиоэлектроники НИТГУ

Тел.: (382-2) 41-39-89

Эл. почта: ypz@mf.tsu.ru

Suslyayev V.I., Zhuravlev V.A., Korovin E.Yu., Zemlyanukhin Yu.P.

Horn method of measurement of the electromagnetic response from flat samples in 26-37,5 GHz range with improved metrological characteristics

The article describes a quasi-optical method for research of frequency dependences of the electromagnetic response and permittivity in a frequency band of 26–37.5 GHz. The usage of additional quasioptical elements raises reliability of received experimental results without loss of sensitivity of an experimental unit. By means of averaging of measurement results of the electromagnetic response in all working frequency band of the network analyzer, we can increase the accuracy of measurements and decrease operating time and labour inputs. The offered technique for result processing essentially raises the measurement accuracy of the electromagnetic response and the permittivity of sheet materials by the quasi-optical method when the analogue scalar network analyzer is used.

Keywords: Quasi-optical method, electromagnetic response, permittivity, measurement accuracy.