

Неразрушающий метод измерения параметров диэлектриков в СВЧ диапазоне

Ю. Г. Макеев, А. П. Моторненко

*Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины,
Украина, 61085, г. Харьков, ул. Ак. Проскуры, 12
e-mail: briz@ire.kharkov.ua*

Статья поступила в редакцию 18 июня 2002 г.

Рассмотрен неразрушающий метод локального измерения диэлектрических проницаемостей материалов, основанный на резонансных особенностях собственных поляризационно вырожденных электромагнитных колебаний *HE*-типа в структуре, представляющей собой ортогональное пересечение цилиндрического и радиального запердельных волноводов. Приведены значения диэлектрических проницаемостей нескольких изотропных и анизотропных образцов диэлектриков, измеренные данным методом в двух произвольных точках частотного диапазона $10 \div 70$ ГГц. Показана возможность определения тангенса угла потерь некоторых диэлектрических материалов.

Розглянуто неруйнівний метод локального вимірювання діелектричних проникностей матеріалів, заснований на резонансних особливостях власних поляризаційно вироджених електромагнітних коливань *HE*-типу в структурі, що являє собою ортогональний перетин циліндричного і радіального поза межних хвилеводів. Наведено значення діелектричних проникностей кількох ізотропних і анізотропних зразків діелектриків, виміряні за допомогою даного методу в двох довільних точках частотного діапазону $10 \div 70$ ГГц. Показано можливість визначення тангенса кута втрат деяких діелектричних матеріалів.

Введение

Широкое применение разнообразных диэлектрических материалов в СВЧ технике и повышение требований к их свойствам стимулирует поиск новых методов локального измерения электрических параметров этих материалов. Разрабатываемые методы должны быть простыми, надежными, а также должны обеспечивать высокую точность и оперативность измерений. К тому же, поскольку ряд диэлектрических материалов обладает анизотропными свойствами, желательно, чтобы методы измерения были неразрушающими и позволяли измерять электрические параметры как изотропных, так и анизотропных диэлектриков.

В ряде работ [1-5] описаны методы, пригодные для измерения анизотропных материалов с малыми диэлектрическими потерями. Известны несколько методов неразрушающих измерений параметров диэлектрических образцов, основанные на применении металлических и диэлектрических резонаторов [6-9]. Методы, описанные в работах [7-9] и использующие диэлектрические резонаторы, в том числе резонаторы типа шепчущей галереи, применяются для определения параметров диэлектриков с малыми потерями.

Наибольшее практическое применение получил метод с использованием СВЧ резонатора с аксиально-симметричными объемными колебаниями H_{011} [6], позволяющий измерять с высокой точностью диэлектрическую прони-

цаемость ϵ и тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \Delta$ листовых материалов малой толщины. К сожалению, из-за сравнительно большого пятна зондирующего поля в этом случае для проведения измерений требуются образцы больших размеров (особенно при измерениях в дециметровом и сантиметровом диапазонах длин волн), а локальные измерения параметров материалов невозможны.

В настоящей работе описан метод неразрушающих измерений электрических параметров листовых изотропных и анизотропных диэлектриков. Он разработан на основе результатов исследований, опубликованных ранее [1, 2, 4].

Измерительный резонатор представлял собой ортогональное пересечение круглого и радиального запердельных волноводов. Такая структура позволила существенно уменьшить размеры зондирующего пятна электромагнитного поля, а также устранить излучение энергии из резонансного объема, что обеспечило возможность перемещения образцов относительно пятна поля. В работе описана экспериментальная установка и приведены полученные с помощью разработанного метода результаты измерения диэлектрических проницаемостей тефлона, плавяного кварца, а также монокристаллических образцов кварца и лейкосапфира в сантиметровом и миллиметровом диапазонах радиоволн. Показана возможность определения тангенса угла потерь некоторых диэлектрических материалов.

Методика исследований

Рассматриваемый метод определения электрических параметров изотропных и анизотропных диэлектриков в СВЧ диапазоне относится к резонансным методам. Он основан на использовании собственных поляризационно вырожденных электромагнитных колебаний HE -типа в резонаторе, схематически показанном на рис. 1. Резонатор образован ортогональным пересечением цилиндрического 1, 1' и радиального 2, 2' запердельных волноводов. Исследуемый диэлектрический элемент 3 в виде пластины произвольных размеров и конфигурации располагается в радиальном вол-

новоде в области пересечения. После возбуждения в такой резонансной структуре, например, собственного $HE_{11\delta}$ колебания происходит снятие вырождения и, в случае однородного изотропного диэлектрика, возникает резонирующее электромагнитное колебание на частоте, зависящей от размеров резонатора и диэлектрической проницаемости образца [1, 10]. Если исследуемый диэлектрик является неоднородным или анизотропным, то возникают два собственных ортогональных колебания типа $HE_{11\delta}^c$ и $HE_{11\delta}^s$, причем их плоскости поляризации ориентированы в направлениях наибольшего и наименьшего значений диэлектрической проницаемости образца [1, 4]. Спектр собственных $HE_{mn\delta}$ электромагнитных колебаний в таком резонаторе достаточно подробно изучен [10].

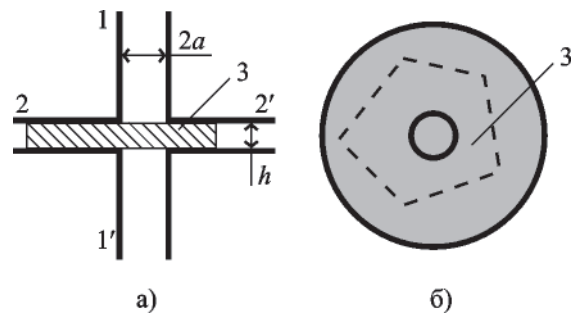


Рис. 1. Схематическое изображение измерительного резонатора: а) — продольный разрез резонатора; б) — вид сверху; 1' — круглый волновод; 2' — радиальный волновод, 3 — диэлектрический образец ($2a$ — диаметр круглого волновода, h — толщина образца)

Покажем возможности описываемого метода на примере использования низшего типа колебания $HE_{11\delta}$. На рис. 2 приведены расчетные зависимости резонансной частоты f , нормированной на критическую частоту f_{cr} волны H_{11} пустого цилиндрического волновода произвольного внутреннего радиуса a , от относительной толщины исследуемого диэлектрического образца h/a , где h — толщина образца (см. рис. 1). В качестве параметра выбрана величина его диэлектрической проницаемости $\epsilon = 1.5; 2; 3; 4; 5; 6; 8; 10; 12; 15; 20$ (кривые 1÷12 соответственно).

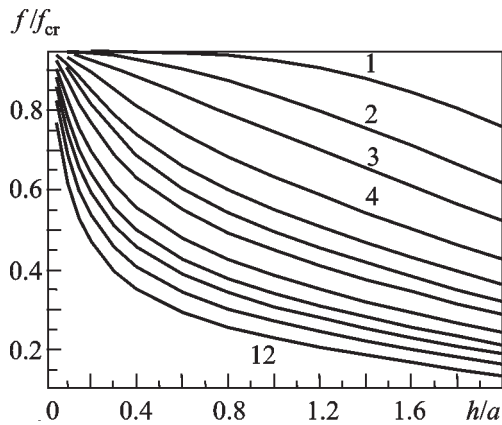


Рис. 2. Расчетные зависимости нормированной резонансной частоты от относительной толщины диэлектрического образца для различных значений ϵ . Кривые 1...12 соответствуют $\epsilon = 1; 1.5; 2; 3; 4; 5; 6; 8; 10; 12; 15$ и 20

Последовательность определения диэлектрической проницаемости тонкой пластины анизотропного диэлектрического материала следующая. По зависимостям, представленным на рис. 2, заданному частотному диапазону и предполагаемой величине диэлектрической проницаемости определяются размеры измерительного резонатора. Выбранный резонатор присоединяется к волноводному тракту с возможностью вращения относительно элемента возбуждения колебаний, который расположен в одном из отрезков запердельного цилиндрического волновода. Затем с помощью СВЧ генератора качающейся частоты (например, генератора, входящего в состав измерителя КСВН и ослабления) в измерительном резонаторе с исследуемым диэлектриком возбуждаются собственные колебания HE_{118} . При произвольном положении резонатора относительно элемента возбуждения на экране индикаторного устройства появляются две резонансные кривые. Максимальная амплитуда одного из выбранных колебаний при одновременном подавлении второго колебания достигается вращением резонатора относительно элемента возбуждения. При полном подавлении одного из двух колебаний положение выбранной кристаллографической оси в диэлектрическом образце устанавливается по направле-

нию вектора электрического поля наблюдаемого резонирующего колебания HE_{118} в плоскости образца. В этих условиях измеряется значение резонансной частоты первого колебания. Аналогично определяется второе направление кристаллографической оси и значение резонансной частоты второго колебания. Далее, по измеренным значениям резонансных частот и известным размерам резонатора с помощью дисперсионного соотношения, приведенного в [10], определяются обе компоненты диэлектрической проницаемости исследуемого вещества. Очевидно, что в случае изотропного диэлектрика нет необходимости вращать резонатор и величина ϵ определяется по измеренному значению резонансной частоты.

Результаты экспериментальных исследований

Для иллюстрации возможностей описанного метода нами были определены значения диэлектрических проницаемостей изотропных материалов: тефлона и плавленого кварца, а также образцов, изготовленных из монокристаллических кварца и лейкосапфира. Измерения производились в диапазоне частот $10 \div 70$ ГГц, для чего были изготовлены измерительные резонаторы с внутренними диаметрами цилиндрических отрезков волноводов в интервале $2 \div 15$ мм. Образцы изотропных и анизотропных диэлектриков были изготовлены как в форме параллелепипеда, так и в форме диска. Толщина диэлектрических образцов варьировалась в пределах $0.04 \div 3.04$ мм в зависимости от выбранного диапазона частот. Размеры резонаторов соблюдались с точностью не хуже 0.01 мм, образцы тщательно шлифовались. Полученные значения диэлектрических проницаемостей приведены в таблицах 1 и 2.

В таблице 1 представлены результаты измерения значений диэлектрических проницаемостей тефлона (строки 1, 2) и плавленого кварца (строки 5, 6); здесь же приведены значения соответствующих резонансных частот и толщин диэлектрических образцов. В таблице 2 в стро-

Таблица 1

№ п/п	Материал	Частота f , ГГц	Диэлектрическая проницаемость ϵ	Толщина образца h , мм	Источник информации
1	тефлон	10.91	2.10	3.04	настоящие измерения
2		69.74	2.09	0.04	
3		$6 \cdot 10^{-8} \div 3.0$	2.1	–	[16]
4		$10.0 \div 25.0$	2.08	–	[12]
5	плавленный кварц	14.86	3.80	1.56	настоящие измерения
6		25.20	3.79	1.56	
7		10.00	3.8	–	[11]
8		$3.0 \div 25.0$	3.78	–	[13]

Таблица 2

№ п/п	Материал	Частота f , ГГц	Диэлектрическая проницаемость ϵ		Толщина образца h , мм	Источник информации
			ϵ_{\perp}	ϵ_{\parallel}		
1	кварц монокристаллический	14.75	4.46	4.63	2.52	настоящие измерения
		14.53				
61.05		4.44	4.62	1.51		
61.48						
30.00		4.430	4.633	–	[14]	
30.00						
4		–	4.450	4.60	–	[15]
		–				
5	лейкосапфир	12.61	9.3	11.3	0.96	настоящие измерения
		11.77				
35.76		9.5	11.4	0.96		
32.74						
7		9.0	9.35	11.53	–	[16]
		9.0				
8		$8.12 \div 17.61$	9.388	11.577	–	[5]

ках 1, 2 представлены результаты измерения компонент диэлектрической проницаемости ϵ_{\perp} и ϵ_{\parallel} монокристаллического кварца, а в строках 5 и 6 – лейкосапфира. В таблицах указаны

диапазоны частот, в пределах которых производились измерения, а также, для сравнения, параметры выбранных диэлектриков, взятые из широко известных работ. Как видно, наши ре-

зультаты достаточно хорошо совпадают с этими данными.

Для каждого из выбранных нами диэлектриков был выполнен расчет среднеквадратичных значений погрешности измерений. При расчетах значения внутреннего диаметра цилиндрической части измерительного резонатора и толщины исследуемого образца брались с точностью ± 0.01 мм, а измеренные частоты во всех рабочих диапазонах – с точностью ± 10 МГц. Результаты расчетов показали, что для всех условий экспериментов погрешности измерений диэлектрической проницаемости составляют $1 \div 2$ %. Заметим, что эти погрешности могут быть снижены, если повысить точность изготовления образцов и измерительных резонаторов, а также применить высокостабильные измерительные СВЧ генераторы.

Обсуждение результатов. Выводы

Предложенный метод позволяет проводить неразрушающие измерения параметров диэлектриков, выполненных в виде тонких плоских пластин произвольных размеров и формы. С помощью данного метода можно проводить локальные измерения параметров изотропных и анизотропных диэлектриков, а также обнаруживать в них различные дефекты.

Величина пятна электромагнитного поля, зондирующего диэлектрический образец, зависит от величины диэлектрической проницаемости, выбранного диапазона частот и геометрических размеров резонансной структуры. В условиях проведенных экспериментов величина пятна электромагнитного поля не превышала удвоенного диаметра цилиндрической части резонатора.

Следует заметить, что во всех исследованных нами условиях при вращении измерительного резонатора изменялись лишь амплитуды ортогональных колебаний при неизменных значениях резонансных частот, что свидетельствует об отсутствии взаимодействия между колебаниями.

С использованием данного метода нами была обнаружена некоторая анизотропия диэ-

лектрической проницаемости ($\Delta \epsilon \leq 0.6$) монокристаллических подложек алюмината лантана LaAlO_3 , вырезанных в плоскости (100), а также впервые были измерены компоненты диэлектрической проницаемости кристаллического образца β -аланина в миллиметровом диапазоне. Результаты этих исследований опубликованы в работах [17, 18].

В заключение заметим, что в ряде случаев, кроме измерения диэлектрической проницаемости исследуемого образца, можно также оценить величину тангенса угла его диэлектрических потерь. Для этого необходимо выбрать условия, при которых потерями в стенках резонатора можно пренебречь. Согласно проведенным экспериментам, добротность Q латунного резонатора в отсутствие диэлектрика в диапазоне резонансных частот $11 \div 30$ ГГц составляет величину $1300 \div 2000$. Если в такой резонатор поместить тонкую текстолитовую пластину (например, толщиной 2.01 мм), то, согласно измерениям, на резонансной частоте ≈ 11 ГГц величина его добротности за счет больших потерь в диэлектрике снизится до 30. В этом случае можно пренебречь потерями в металлических стенках резонатора и при условии $f_r \ll f_{cr}$ можно оценить величину $\text{tg} \Delta = 1/Q = 3.3 \cdot 10^{-2}$, что хорошо согласуется с известными из литературы данными. Аналогично, в случае пластины из фарфора на резонансной частоте $f \approx 14$ ГГц была получена добротность резонатора, равная 100, которой соответствует $\text{tg} \Delta = 10^{-2}$.

При произвольных потерях в диэлектрике и в металлических стенках резонатора для определения тангенса угла потерь диэлектрика необходимо вводить представление частичных добротностей резонатора, что предполагается сделать в дальнейшем.

Литература

1. Ю. Г. Макеев, В. А. Коробкин, Н. И. Пятак, Н. М. Пивень. ПТЭ. 1978, №6, с. 104-107.
2. Ю. Г. Макеев, А. В. Стрижаченко, В. А. Коробкин, В. Г. Де-Мондерик. Электронная техника. Сер.1. Электроника СВЧ. 1988, вып. 3, с. 48-51.
3. M. Gilbert, N. Manfred.. IEEE Trans. Instrum. Meas. 1979, **28**, No. 3, pp. 198-204.

4. Yu. G. Makeev, A. P. Motornenko. MSMW'2001 Symposium Proceedings. Kharkov, Ukraine, June 4-9, 2001, pp. 838-839.
5. В. Н. Егоров, А. С. Воловиков. Изв. вузов. Радиофизика. 2001, **44**, №11, с. 960-966.
6. G. Kent. Microwave J. 1991, December, pp. 72-82.
7. Y. Kobayashi, M. Katoh. IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 1985, **MTT-33**, pp. 586-592.
8. J. Krupka, J. Baker-Jarvis, R. G. G. J. Ceremuga. Dielectric Materials Measurements and Applications. 1996, IEE, pp. 21-24.
9. J. Krupka, D. Cros, M. Aubourg, P. Guillon. IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 1994, **42**, No. 1, pp.56-61.
10. Ю. Г. Макеев, А. П. Моторненко. ЖТФ. 1994, **64**, вып. 9, с. 117-126.
11. Р. Я. Валитов, В. Н. Сретенский. Радиоизмерения на сверхвысоких частотах. Воен. изд-во МО СССР, 1958, с. 412.
12. Артур Р. Хиппель. Диэлектрики и их применение. Москва, Госэнергоизд, 1959, с. 336.
13. Е. М. Воронкова, Б. Н. Гречушников, Г. И. Дистлер, И. П. Петров. Оптические материалы для инфракрасной техники. Москва, Наука, 1995, с. 336.
14. М. Н. Афсар, К. Дж. Баттон. ТИИЭР. 1985, **73**, №1, с. 143-166.
15. Л. И. Глюкман. Пьезоэлектрические кварцевые резонаторы. Москва, Радио и связь, 1981, с. 232.
16. Ф. Розбери. Справочник по вакуумной технике и технологии. Под общей ред. проф. Р. А. Нилендера. Москва, Энергия, 1972, с. 455.
17. Ю. Г. Макеев, А. П. Моторненко, Н. Т. Черпак, И. П. Бабийчук, М. Б. Космына. Письма в ЖТФ. 2002, **28**, вып. 6, с. 12-17.
18. Ю. Г. Макеев, А. П. Моторненко, Г. П. Ермак, Г. И. Довбешко. Биофизический вестник. 2001, вып. 2 (9), с. 100-102

Nondestructive Method of Measurement of Dielectric Parameters at Microwaves

Yu. G. Makeev, A. P. Motornenko

The method of nondestructive local determination of material permittivity based on the resonance properties of degenerated by polarization electromagnetic eigen HE oscillations in the structure composed by the orthogonal crossing of evanescent cylindrical and radial waveguides is considered. The permittivities of some isotropic and anisotropic dielectrics measured by this method for the two arbitrary frequencies in the range 10 ÷ 70 GHz are given. The possibility of the determination the loss tangent of some dielectric materials is demonstrated.