

УДК 620.179

А.А. Беляев¹, Е.Е. Беспалова¹, С.М. Паярель¹**ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК С ПОМОЩЬЮ ЩЕЛЕВОГО РЕЗОНАТОРА**

DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-9-8-8

В авиационной и космической технике широкое применение находят материалы, обеспечивающие поглощение или прохождение электромагнитной энергии – радиопоглощающие (РПМ) и радиопрозрачные материалы. При проектировании РПМ – особенно многослойных и широкополосных – очень важным моментом является определение экспериментальным путем коэффициента отражения (КО), диэлектрических и магнитных характеристик отдельных слоев материалов в заданном диапазоне частот – от дециметровых до миллиметровых длин волн. Одним из наиболее простых методов измерения диэлектрических и магнитных свойств материалов является волноводный метод. Однако измерениям проницаемостей в измерительных волноводах присущи большие погрешности, связанные с неточностью изготовления образцов. Кроме того, на частотах >10 ГГц размеры сечения волновода становятся меньше неоднородностей гетерогенных материалов, что не позволяет проводить измерения на этих частотах. Измерения проводятся только в отдельных точках диапазона и чрезвычайно трудоемки. Резонаторные методы обеспечивают бóльшую точность измерения диэлектрической проницаемости. В данной статье описаны метод и особенности измерения диэлектрических характеристик неметаллических материалов с помощью щелевого резонатора. Приводятся результаты измерений стеклопластиков и проведено их сравнение с результатами измерений волноводным методом.

Ключевые слова: диэлектрическая проницаемость, резонатор, волновод, вектор напряженности электрического поля, анализатор цепей.

In aviation and space technology are widely used materials to ensure absorption or passage of electromagnetic energy – radioabsorbing (RAM) and radio-transparent materials. When designing RPM, especially multi-layer broadband and very important point is determined experimentally of the reflection coefficient (RC) dielectric and magnetic properties of the individual layers of material in a given frequency range (from UHF to millimeter wavelengths). One of the simplest methods for measuring dielectric and magnetic properties of materials is a waveguide method. However, measurements of permeability measurement in waveguides are inherent in large errors due to the inaccuracy of sample preparation. In addition, at frequencies above 10 GHz waveguide section dimensions become smaller inhomogeneously stey heterogeneous materials, which does not allow for measurement at these frequencies. The measurements were carried out only at certain points range and extremely time-consuming. Resonator methods provide a more accurate measurement of the dielectric constant. This article describes the method of measuring the dielectric characteristics and the characteristics of non-metallic materials by means of a slot resonator. We give the results of measurements of GRP and compared with the results of measurements of the waveguide method.

Keywords: dielectric constant, resonator, waveguide, vector-tense of the electric field, network analyzer.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

В соответствии со стратегическими направлениями развития материалов и технологии их переработки на ближайшие 20 лет большое внимание в работах ФГУП «ВИАМ» уделено композиционным и функциональным материалам и их применению в авиа- и ракетостроении [1–8]. В частности, в последнее время находят широкое применение материалы, обеспечивающие поглощение электромагнитной энергии, – радиопоглощающие материалы (РПМ) [9–15]. При проектировании РПМ – особенно многослойных и широкополосных – очень важным моментом является определение экспериментальным путем коэффициента отражения (КО), диэлектрических и магнитных характеристик отдельных слоев материалов [6–18].

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 15.3. «Материалы и покрытия для защиты от ЭМИ, ударных, вибрационных, акустических и электрических воздействий» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

Материалы и методы

Электрические и магнитные свойства веществ характеризуются комплексными значениями электрической и магнитной проницаемостей (зависимость от времени предполагается в виде $e^{-i\omega t}$):

$$\varepsilon = \varepsilon' + i\varepsilon'' = |\varepsilon| \exp(i\delta_\varepsilon); \quad (1)$$

$$\operatorname{tg}\delta_\varepsilon = \varepsilon''/\varepsilon'; \quad (2)$$

$$\mu = \mu' + i\mu'' = |\mu| \exp(i\delta_\mu); \quad (3)$$

$$\operatorname{tg}\delta_\mu = \mu''/\mu', \quad (4)$$

где ε – диэлектрическая проницаемость; ε' – действительная часть диэлектрической проницаемости; ε'' – мнимая часть диэлектрической проницаемости; $\operatorname{tg}\delta_\varepsilon$ – тангенс угла диэлектрических потерь; μ – магнитная проницаемость; μ' – действительная часть магнитной проницаемости; μ'' – мнимая часть магнитной проницаемости; $\operatorname{tg}\delta_\mu$ – тангенс угла магнитных потерь.

В данной работе описано измерение комплексной диэлектрической проницаемости образцов из стеклопластика, изготовленного прессовым методом формования из препрега на основе эпоксидного связующего и стеклоткани Т-10 с содержанием связующего от 33 до 35%.

Обычно измерение электрических и магнитных параметров материалов на сверхвысоких частотах (СВЧ) основано на исследовании распространения электромагнитных волн в материале или на границе раздела «материал–среда». При этом образцы материалов, как правило, имеют две плоскопараллельные границы. Используются следующие основные методы измерения параметров материалов:

- квазиоптические методы измерения, основанные на измерении коэффициентов отражения от слоя материала и прохождения через него электромагнитной волны;
- волноводные методы, основанные на измерении полного входного сопротивления отрезка волновода с образцом материала;
- резонаторные методы, основанные на измерении изменения резонансной частоты и добротности резонатора при внесении в резонатор образца материала.

Одним из наиболее простых методов измерения диэлектрических и магнитных свойств материалов является волноводный метод [19–24]. При этом непосредственно в

волноводе измеряют распределение величины электрического поля при наличии измеряемого плоскопараллельного образца с двумя нагрузками (с разными значениями) и без образца. По измеренным данным вычисляют комплексный КО (или импеданс $Z_{вх}$) на входной поверхности образца и приравнивают ему известное теоретическое выражение [19, С. 193], содержащее величину диэлектрической и магнитной проницаемости. Полученные уравнения решают относительно диэлектрической и магнитной (если материал магнитный) проницаемостей.

Однако резонаторные методы обеспечивают бóльшую точность измерения диэлектрической проницаемости.

Результаты

Исследования диэлектрических характеристик стеклопластиков в данном случае проводили с использованием установки (рис. 1) на базе СВЧ векторного анализатора цепей R&S ZVA50, неинвазивных резонаторов Damaskos с 4–5 резонансными частотами (для измерения тонких диэлектрических материалов) и программного обеспечения Cavity. Образцы стеклопластика помещали в резонаторы Damaskos моделей 08 (рабочий диапазон частот – от 0,82 до 4,0 ГГц, размер плоских образцов – не менее 23×6 см) и 015 (рабочий диапазон частот – от 4,4 до 20,0 ГГц, размер плоских образцов – не менее 6×3 см). Реальная верхняя граница частотного диапазона обычно ограничена 9 ГГц из-за достаточно большой толщины образцов стеклопластика (~2 мм), что приводит к получению недостоверных результатов в диапазоне частот от 9 до 20 ГГц. Однако, учитывая малую зависимость диэлектрических характеристик чистых стеклопластиков в указанном диапазоне частот, можно ограничиться измерениями диэлектрических характеристик на частотах до 9 ГГц, особенно с учетом того, что измерения коэффициентов отражения обычно проводят во всем диапазоне частот.

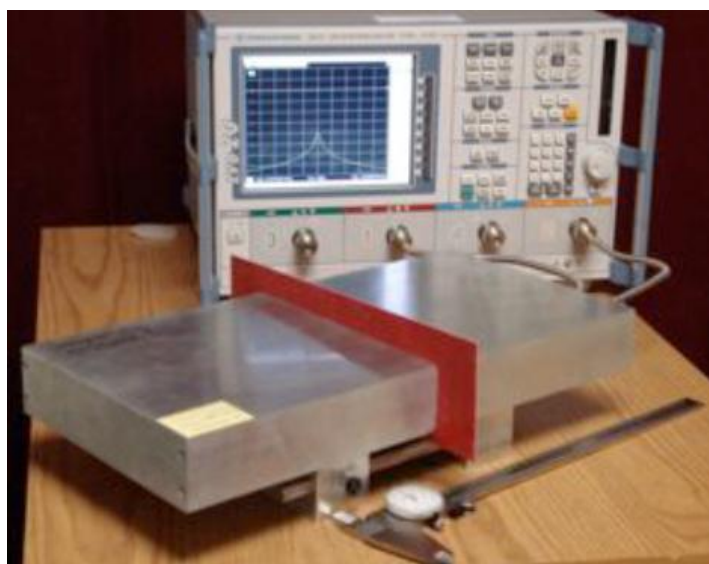


Рис. 1. Установка для исследования диэлектрических характеристик

Программное обеспечение Cavity обеспечивает сканирование частоты при поиске резонансных откликов последовательно в двух режимах – грубое и высокое разрешение сканирования, затем определяют резонансную частоту и добротность резонатора

с образцом и без него. По измеренным значениям резонансных частот и добротности рассчитывают диэлектрические характеристики (диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь) на резонансных частотах.

В процессе измерения на экран анализатора цепей выводится графическое изображение резонансных кривых. Наблюдая резонансные кривые в процессе измерения, можно предварительно оценить достоверность измерений. Приведенные графики (рис. 2) схематично показывают три основных варианта резонансных кривых.

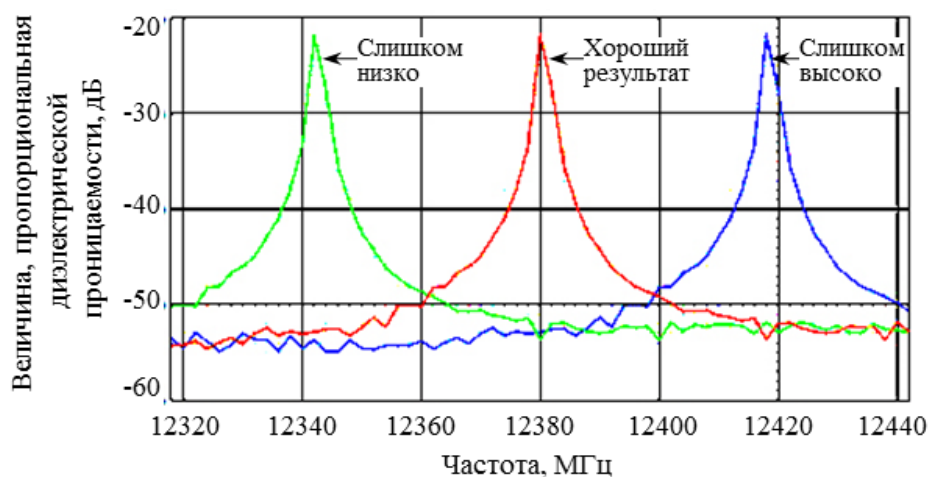


Рис. 2. Возможные варианты резонансных кривых

Красная кривая показывает идеальный график, на котором пик резонанса находится в центре экрана, что свидетельствует о хорошей оценке диэлектрических характеристик. Если резонансный пик появляется в левой (зеленая кривая) или в правой стороне экрана (синяя кривая), то измерение можно завершить и перезапустить процесс — для лучшей оценки диэлектрических характеристик. Однако обычно, если смещение пика резонанса находится в пределах экрана и хорошо прорисовано, нет необходимости принимать дополнительные меры.

Следует также отметить, что при необходимости проведения повторного измерения целесообразно использовать второй резонанс из-за низкого уровня первого.

Проводили испытания 12 образцов размером 250×100 мм и толщиной 2,1±0,2 мм прослоек из стеклоткани (плит) на основе эпоксидного связующего. Результаты измерения радиофизических характеристик (диэлектрической проницаемости ϵ' и тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$) в щелевых резонаторах приведены в табл. 1. При этом плиты формовали в прессе по три штуки (с антиадгезионными прокладками), причем плиты 5 и 7 находились при формовании в середине формуемого пакета.

Результаты измерения радиофизических характеристик (диэлектрической проницаемости ϵ' и тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$) в стандартной волноводной линии сечением 23×10 мм на частоте 9,375 ГГц приведены в табл. 2. Для волноводной линии из плит вырезаны образцы размером 23×10 мм.

Таблица 1

Результаты измерений в щелевых резонаторах

Модель резонатора	Толщина образца, мм	Частота, ГГц	ε'	$\text{tg}\delta$	Среднее значение (для каждого резонатора)	
					ε'	$\text{tg}\delta$
Образец 1-1						
08	2,06	1,021	4,379	0,0126	4,336	0,0129
		1,257	4,350	0,0123		
		1,858	4,335	0,0126		
		2,556	4,324	0,0129		
		3,164	4,316	0,0132		
		3,833	4,312	0,0136		
015		3,979	4,323	0,0248	4,300	0,0234
		6,303	4,301	0,0240		
		9,349	4,276	0,0213		
Образец 1-2						
08	2,06	1,021	4,393	0,0121	4,352	0,0121
		1,257	4,364	0,0119		
		1,858	4,351	0,0119		
		2,556	4,341	0,0120		
		3,164	4,334	0,0122		
		3,833	4,330	0,0125		
015		3,979	4,294	0,0127	4,286	0,0132
		6,303	4,288	0,0131		
		9,349	4,277	0,0138		
Образец 3-1						
08	2,14	1,021	4,354	0,0166	4,299	0,0158
		1,257	4,316	0,0163		
		1,858	4,296	0,0160		
		2,556	4,283	0,0155		
		3,164	4,274	0,0152		
		3,833	4,269	0,0151		
015		3,979	4,247	0,0121	4,243	0,0125
		6,303	4,244	0,0128		
		9,349	4,237	0,0126		
Образец 3-2						
08	2,00	1,021	4,403	0,0380	4,363	0,0103
		1,257	4,377	0,0057		
		1,858	4,362	0,0031		
		2,556	4,352	0,0019		
		3,164	4,344	0,0032		
		3,833	4,340	0,0097		
015		3,979	4,319	0,0127	4,312	0,0133
		6,303	4,312	0,0132		
		9,349	4,305	0,0139		
Образец 4-1						
08	2,18	1,021	4,497	0,0118	4,457	0,0118
		1,257	4,470	0,0116		
		1,858	4,456	0,0117		
		2,556	4,445	0,0118		
		3,164	4,438	0,0120		
		3,833	4,434	0,0122		
015		3,979	4,258	0,0133	4,258	0,0140
		6,303	4,254	0,0146		
		9,349	4,262	0,0141		

Продолжение

Модель резонатора	Толщина образца, мм	Частота, ГГц	ε'	$\operatorname{tg}\delta$	Среднее значение (для каждого резонатора)	
					ε'	$\operatorname{tg}\delta$
Образец 4-2						
08	2,24	1,021	4,442	0,0122	4,402	0,0119
		1,257	4,414	0,0116		
		1,858	4,399	0,0117		
		2,556	4,392	0,0118		
		3,164	4,385	0,0120		
		3,833	4,381	0,0122		
015		3,979	4,188	0,0129	4,186	0,0144
		6,303	4,180	0,0160		
		9,349	4,188	0,0145		
Образец 5-1						
08	2,30	1,021	4,361	0,0125	4,323	0,0126
		1,257	4,337	0,0120		
		1,858	4,322	0,0123		
		2,556	4,312	0,0126		
		3,164	4,304	0,0129		
		3,833	4,300	0,0131		
015		3,979	4,223	0,0150	4,221	0,0148
		6,303	4,219	0,0147		
		9,349	4,221	0,0148		
Образец 5-2						
08	2,27	1,021	4,224	0,0130	4,190	0,0121
		1,257	4,201	0,0116		
		1,858	4,187	0,0118		
		2,556	4,181	0,0119		
		3,164	4,176	0,0120		
		3,833	4,173	0,0123		
015		3,979	4,204	0,0120	4,206	0,0123
		6,303	4,205	0,0121		
		9,349	4,210	0,0127		
Образец 7-1						
08	2,30	1,021	4,385	0,0122	4,348	0,0119
		1,257	4,361	0,0116		
		1,858	4,345	0,0117		
		2,556	4,337	0,0120		
		3,164	4,331	0,0119		
		3,833	4,327	0,0121		
015		3,979	4,164	0,0129	4,163	0,0138
		6,303	4,162	0,0144		
		9,349	4,163	0,0140		
Образец 7-2						
08	2,25	1,021	4,393	0,0127	4,350	0,0133
		1,257	4,366	0,0129		
		1,858	4,349	0,0133		
		2,556	4,338	0,0136		
		3,164	4,329	0,0137		
		3,833	4,324	0,0138		
015		3,979	4,057	0,0140	4,061	0,0157
		6,303	4,075	0,0144		
		9,349	4,050	0,0187		

Окончание

Модель резонатора	Толщина образца, мм	Частота, ГГц	ε'	$\text{tg}\delta$	Среднее значение (для каждого резонатора)	
					ε'	$\text{tg}\delta$
Образец 8-1						
08	2,20	1,021	4,491	0,0119	4,451	0,0118
		1,257	4,464	0,0116		
		1,858	4,450	0,0117		
		2,556	4,440	0,0118		
		3,164	4,433	0,0119		
		3,833	4,428	0,0121		
015		3,979	4,290	0,0231	4,283	0,0208
		6,303	4,279	0,0203		
		9,349	4,279	0,0189		
Образец 8-2						
08	2,20	1,021	4,496	0,0146	4,454	0,0125
		1,257	4,468	0,0118		
		1,858	4,453	0,0119		
		2,556	4,443	0,0121		
		3,164	4,435	0,0122		
		3,833	4,430	0,0124		
015		3,979	4,338	0,0140	4,331	0,0149
		6,303	4,328	0,0158		
		9,349	4,328	0,0151		

Таблица 2

Результаты измерений в волноводной линии

Условный номер образца	Толщина, мм	ε'	$\text{tg}\delta$
1-1	2,06	4,2	0,04
1-2	2,06	4,2	0,03
3-1	2,14	4,1	0,03
3-2	2,00	4,2	0,02
4-1	2,18	4,1	0,03
4-2	2,24	4,1	0,03
5-1	2,30	4,1	0,03
5-2	2,27	4,1	0,02
7-1	2,30	4,1	0,03
7-2	2,25	3,9	0,03
8-1	2,20	4,2	0,04
8-2	2,20	4,2	0,03

Обсуждение и заключения

По результатам исследования видно, что средняя диэлектрическая проницаемость исследованных образцов стеклопластика составляет 4,29, что соответствует диэлектрической проницаемости нормально отвержденного стеклопластика.

Видно также, что измерения с помощью щелевого резонатора обеспечивают большую точность (по сравнению с волноводным методом) и при измерениях значительно (в 2–3 раза) снижается продолжительность проведения исследований благодаря автоматизации процесса измерений. Несколько меньшие (на ~0,1) значения диэлектрической проницаемости при измерениях в волноводной линии, по-видимому, объясняются наличием зазоров между исследуемыми образцами и стенками измерительной

линии, что связано с конечной точностью изготовления образцов, а также приводит к снижению точности измерений.

Однако необходимо отметить, что с помощью щелевого резонатора возможно проведение измерений только на фиксированных частотах, определяющихся размерами резонатора, образца и свойствами исследуемого материала, в то время как волноводным методом можно исследовать материал в любой точке частотного диапазона волновода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №5. С. 7–17.
2. Каблов Е.Н. Химия в авиационном материаловедении // *Российский химический журнал*. 2010. Т. LIV. №1. С. 3–4.
3. Каблов Е.Н. Авиационное материаловедение: итоги и перспективы // *Вестник Российской академии наук*. 2002. Т. 72. №1. С. 3–12.
4. Каблов Е.Н. Контроль качества материалов – гарантия безопасности эксплуатации авиационной техники // *Авиационные материалы и технологии*. 2001. №1. С. 3–8.
5. Каблов Е.Н. Конструкционные и функциональные материалы – основа экономического и научно-технического развития России // *Вопросы материаловедения*. 2006. №1. С. 64–67.
6. Беляев А.А., Кондрашов С.В., Лепешкин В.В., Романов А.М. Радиопоглощающие материалы // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №5. С. 348–352.
7. Беляев А.А., Беспалова Е.Е., Романов А.М. Пожаробезопасные радиопоглощающие материалы для безэховых камер // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. №1. С. 53–55.
8. Агафонова А.С., Беляев А.А., Кондрашов Э.К., Романов А.М. Особенности формирования монолитных конструкционных радиопоглощающих материалов на основе композитов, наполненных резистивным волокном // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. №3. С. 56–59.
9. Лушина М.В., Паршин С.Г., Ржевский А.А. Современные экранирующие и радиопоглощающие материалы // *Системы управления и обработка информации*. 2011. №22. С. 208–223.
10. Бибиков С.Б., Титов А.Н., Черепанов А.К. Синтез материала с заданным коэффициентом отражения в широком диапазоне частот и углов падения // *Сб. докл. XV Междунар. науч.-технич. конф. «Радиолокация. Навигация. Связь»*. Воронеж, 2009. С. 1578–1584.
11. Мищенко С.В., Малков Н.А. Проектирование радиоволновых (СВЧ) приборов неразрушающего контроля материалов: учеб. пособие. Тамбов: Изд-во ТГУ, 2003. 128 с.
12. Банный В.А., Царенко И.В. Радиопоглощающие материалы на основе наполненного полиэтилена // *Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого*. 2009. №4. С. 3–8.
13. Суляев В.И., Доценко О.А., Кузнецов В.Л., Мазов И.Н., Кочеткова О.А. Электромагнитные характеристики композиционных радиоматериалов на основе наноразмерных наноструктурных наполнителей // *Доклады ТУСУРа*. 2011. №2 (24). Ч. 2. С. 59–63.
14. Доценко О.А., Суляев В.И., Кузнецов В.Л., Мазов И.Н., Кочеткова О.А. Микроволновые характеристики композиционных радиоматериалов на основе полимера и углеродных структур // *Доклады ТУСУРа*. 2011. №2 (24). Ч. 2. С. 36–40.
15. Гарин Б.М., Дьяконова О.А., Казанцев Ю.Н. Физические свойства резистивных нитей и структур на их основе в СВЧ диапазоне // *Журнал технической физики*. 1999. Т. 69. Вып. 1. С. 104–108.
16. Фальковский О.И. *Техническая электродинамика*. СПб.: Лань, 2009. 244 с.
17. Никольский В.В., Никольская Т.И. *Электродинамика и распространение радиоволн*. М.: URSS, 2012. С. 44–164.
18. Беспалова Е.Е., Беляев А.А., Романов А.М., Широков В.В. Исследование диэлектрических характеристик слоев многослойного радиопоглощающего материала для безэховых камер на основе вспененного асбеста, наполненного науглероженным волокном // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2014. №8. Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.07.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-8-12-12.

-
19. Брандт Л.А. Исследования диэлектриков на сверхвысоких частотах. М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1963. С. 191–201.
 20. Широков В.В., Романов А.М. Исследование диэлектрических характеристик стеклосотопласта волноводным методом // Авиационные материалы и технологии. 2013. №4. С. 62–68.
 21. Беляев А.А., Романов А.М., Широков В.В., Шульдешов Е.М. Измерение диэлектрической проницаемости стеклосотопласта в свободном пространстве // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2014. №5. Ст. 06 (дата обращения: 19.07.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-5-6-6.
 22. Романов А.М., Беляев А.А., Беспалова Е.Е. Недостатки волноводных методов измерения характеристик радиопоглощающих материалов // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2015. №3. Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 19.07.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-3-11-11.
 23. Колосов Ю.А., Левков Ф.Е. Точностные характеристики волноводного метода определения электрических параметров диэлектриков // Вопросы радиоэлектроники. Сер.: Общие вопросы радиоэлектроники. 1985. №12. С. 18–33.
 24. Колосов Ю.А., Левков Ф.Е. О волноводном методе определения электрических параметров диэлектриков // Вопросы радиоэлектроники. Сер.: Общие вопросы радиоэлектроники. 1986. №1. С. 41–45.