

Научная статья

УДК 678.8:538.956

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-2-116-128

СТАНДАРТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТВЕРДЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ НИЗКИХ ЧАСТОТАХ КОНТАКТНЫМ И БЕСКОНТАКТНЫМ МЕТОДАМИ

В.А. Акзигитов¹, А.А. Беляев¹, А.О. Курносов¹, С.М. Паярель¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Рассмотрены особенности измерения диэлектрических свойств (диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь) твердых неметаллических материалов с использованием параллельных пластин (конденсатора) при низких частотах. Описаны основные методики (контактная и бесконтактная), приборы, оснастка и программное обеспечение, применяемые для измерения диэлектрических свойств твердых неметаллических материалов. Приведены соответствующие диапазоны частот, при которых можно измерять диэлектрические свойства твердых неметаллических материалов конденсаторным методом.

Ключевые слова: диэлектрические свойства, диэлектрическая проницаемость, тангенс угла диэлектрических потерь, конденсатор

Для цитирования: Акзигитов В.А., Беляев А.А., Курносов А.О., Паярель С.М. Стандартные измерения диэлектрических свойств твердых композиционных материалов при низких частотах контактным и бесконтактным методами // Труды ВИАМ. 2024. № 2 (132). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-2-116-128.

Scientific article

STANDARD MEASUREMENTS OF DIELECTRIC PROPERTIES OF SOLID COMPOSITE MATERIALS AT LOW FREQUENCIES BY CONTACT AND NON-CONTACT METHODS

V.A. Akzigitov¹, A.A. Belyaev¹, A.O. Kurnosov¹, S.M. Payarel¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. The article is devoted to the issues in the field of measuring the dielectric properties (permittivity and the tangent of the dielectric loss angle) of solid non-metallic materials using parallel plates (capacitor) at low frequencies. Two main methods (contact and non-contact), devices, equipment and software for measuring the permittivity and the tangent of the dielectric loss angle of solid non-metallic materials are described. The corresponding frequency ranges in which it is possible to measure the dielectric properties of solid non-metallic materials by the capacitor method are given.

Keywords: dielectric properties, permittivity, dielectric loss angle tangent, capacitor

For citation: Akzigitov V.A., Belyaev A.A., Kurnosov A.O., Payarel S.M. Standard measurements of dielectric properties of solid composite materials at low frequencies by contact and non-contact methods. *Trudy VIAM*, 2024, no. 2 (132), paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-2-116-128.

Введение

Диэлектрическая проницаемость описывает взаимодействие материала с электрическим полем. Диэлектрическая константа (k) является эквивалентом комплексной относительной диэлектрической проницаемости (ϵ_r) или комплексной диэлектрической проницаемости (ϵ) относительно диэлектрической проницаемости свободного пространства (ϵ_0). Действительная часть комплексной диэлектрической проницаемости (ϵ'_r) является мерой энергии внешнего поля, содержащейся в материале. Для большинства твердых тел и жидкостей $\epsilon'_r > 1$. Мнимая часть комплексной диэлектрической проницаемости (ϵ''_r) называется фактором потерь и является мерой того, насколько материал рассеивает или поглощает энергию из внешнего поля. Для любого материала $\epsilon''_r > 0$ и обычно значительно меньше ϵ'_r . Фактор потерь содержит эффекты как диэлектрических потерь, так и проводимости.

Когда комплексная диэлектрическая проницаемость изображается как простая векторная диаграмма, как показано на рис. 1, действительная и мнимая компоненты отличаются по фазе на 90 градусов. Векторная сумма образует угол δ с осью действительной части (ϵ'_r). Тангенс этого угла ($\text{tg}\delta$) обычно используют для выражения относительного уровня диэлектрических потерь материала. В научно-технической литературе термин «диэлектрическая константа» часто используют для обозначения диэлектрической проницаемости. В данной статье (application note) под термином «диэлектрическая проницаемость» подразумеваются диэлектрическая константа и комплексная относительная диэлектрическая проницаемость [1–5].

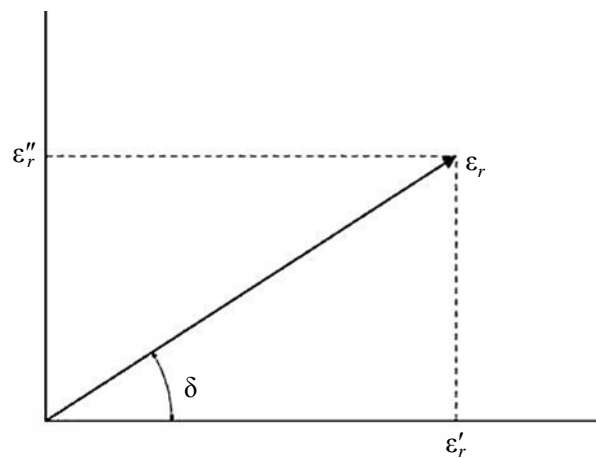


Рис. 1. Определение комплексной относительной диэлектрической проницаемости (ϵ_r), исходя из действительной (ϵ'_r) и мнимой (ϵ''_r) компонент

Диэлектрические свойства рассчитывают по формулам

$$k = \epsilon_r = \epsilon / \epsilon_0 = \epsilon'_r - j\epsilon''_r = \epsilon'_r / \epsilon_0 - j\epsilon''_r / \epsilon_0,$$

$$\text{tg}\delta = \frac{\epsilon''_r}{\epsilon'_r},$$

$$\text{tg}\delta = D,$$

где k – диэлектрическая константа; ϵ_r – комплексная относительная диэлектрическая проницаемость; ϵ – комплексная диэлектрическая проницаемость, Ф/м; ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость свободного пространства, равная $8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; ϵ'_r – действительная часть ϵ_r ; ϵ''_r – мнимая часть ϵ_r ; ϵ' – действительная часть ϵ ; ϵ'' – мнимая часть ϵ ; $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь; j – мнимая единица.

Как правило, изучение диэлектрических свойств композиционных материалов базируется на исследовании распространения электромагнитной волны в материале или на границах раздела «материал–свободное пространство (среда)». Обычно для измерений используют плоские пластины или диски, имеющие две плоскопараллельные границы [6].

В настоящее время применяют следующие основные методы измерения диэлектрических свойств твердых материалов:

- резонаторные, основанные на определении изменения резонансной частоты и добротности резонатора при внесении образца материала [7–12];
- основанные на использовании линий передачи (волноводных или коаксиальных) с образцом материала путем измерения S -параметров [10–22];
- квазиоптические, базирующиеся на измерении коэффициентов отражения и прохождения электромагнитной волны от плоского образца материала в свободном пространстве [10–12, 23];
- метод параллельных пластин, заключающийся в размещении плоского образца материала между двумя проводящими пластинами, в результате чего образуется конденсатор, емкость которого используется для расчета диэлектрических свойств [24–28].

Необходимо отметить, что разработаны также не прямые методы оценки диэлектрической проницаемости, например, по результатам сравнения коэффициентов отражения и/или прохождения исследуемого образца и образца из материалов с известной (или измеренной) диэлектрической проницаемостью [29].

Метод параллельных пластин

Чаще всего диэлектрические свойства неметаллических твердых материалов измеряют методом параллельных пластин при частоте 1 МГц, что вызвано следующими причинами:

- сложность проведения исследований как при очень низких (например, 50 Гц), так и при более высоких (например, 10 ГГц) частотах;
- отсутствие строгих требований к точности изготовления образцов, в отличие от измерений при высоких частотах (>30 МГц);
- высокая точность для практических целей и стабильность измерений;
- наличие действующего ГОСТ 22372–77.

Обычно для определения диэлектрической проницаемости используют приборы, измеряющие импеданс методом параллельных пластин (E4990A, E4980A, 4285A и аналогичные), в соответствии с ГОСТ 6433–71, ГОСТ 22372–77 и ASTM D150.

На плоские (круглые, квадратные) и трубчатые образцы твердых электроизоляционных материалов распространяется ГОСТ 6433.4–71 «Материалы электроизоляционные твердые. Методы определения тангенса угла диэлектрических потерь и диэлектрической проницаемости при частоте 50 Гц» [30–33]; на круглые,

квадратные пластины и цилиндрические трубки из диэлектрических материалов, кроме пленок толщиной $<0,015$ см, – ГОСТ 22372–77 «Материалы диэлектрические. Методы определения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь в диапазоне частот от 100 до $5 \cdot 10^6$ Гц». Стандарт ASTM D150 регламентирует методы испытаний диэлектрической проницаемости и потерь при переменном токе (диэлектрической постоянной) твердой электрической изоляции.

Схема, прибор и измерительная ячейка, применяемые для исследований методом параллельных пластин, представлены на рис. 2 и 3.

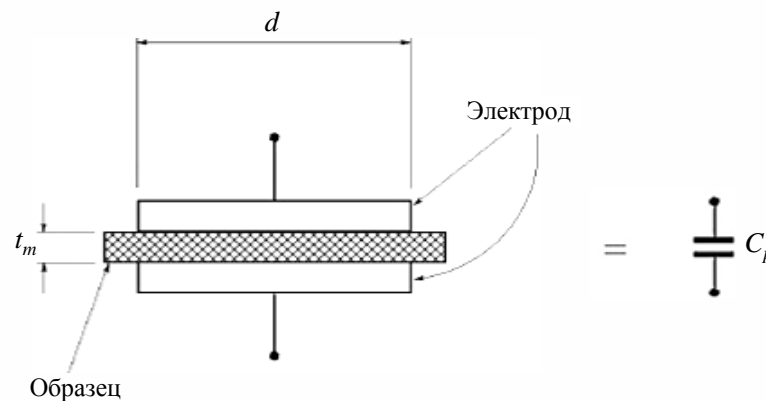


Рис. 2. Схема метода параллельных пластин: d – диаметр электрода; t_m – толщина образца; C_p – емкость образца

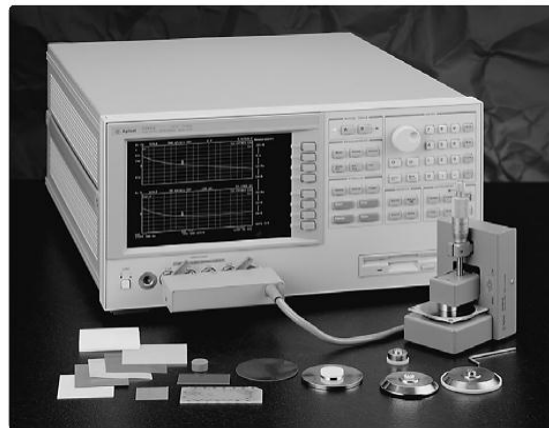


Рис. 3. Анализатор и измерительная ячейка для определения емкости методом параллельных пластин

Метод параллельных пластин (называемый также трехэлектродным методом, согласно ASTM D150) заключается в размещении тонкого листа материала или жидкости между двумя электродами, образующими конденсатор. В реальных испытательных установках два электрода объединены в испытательную ячейку, в которой размещается диэлектрический материал. Анализатор измеряет векторные компоненты емкости и рассеивания, а программа измерительного прибора рассчитывает диэлектрическую проницаемость и фактор потерь.

Поток электрического поля при реальном измерении показан на рис. 4. Если измерять емкость между двумя электродами с диэлектрическим материалом, то на концах электродов образуется дополнительная рассеянная, или краевая, емкость.

Следовательно, измеренное значение емкости будет больше, чем емкость конденсатора, заполненного диэлектрическим материалом. Краевая емкость вызывает ошибку измерения, так как ток течет не только через диэлектрический материал, но и по краям конденсатора.

Для уменьшения измерительной ошибки, вызванной краевой емкостью, используется охраняемый электрод, который поглощает электрическое поле на конце основных электродов. Благодаря этому емкость между электродами создается в основном током, текущим через диэлектрический материал, что позволяет получить более точные измерения. Основной электрод, применяемый совместно с охраняемым электродом, называется охраняемым.

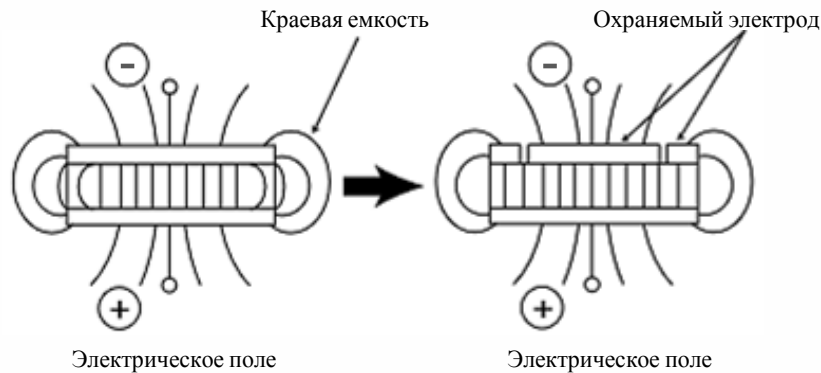


Рис. 4. Поток электрического поля при измерении емкости конденсатора

Для метода параллельных пластин существуют две методики определения емкости конденсатора, заполненного материалом: с использованием контактирующего (тонкопленочного) и бесконтактного (метод воздушного зазора) электродов.

Система измерения диэлектрической проницаемости

Для метода параллельных пластин используют две системы измерений, содержащие ячейки тестирования диэлектриков 16451В (до 30 МГц) и 16453А (до 1 ГГц). В данной статье описана система с использованием ячейки тестирования диэлектриков 16451В, основными преимуществами которой являются:

- точные измерения в диапазоне частот до 30 МГц;
- широкий спектр электродов (от А до D) для обеспечения контактного и бесконтактного методов исследования образцов различных размеров (рис. 5);
- наличие охранного электрода для устранения эффектов краевой емкости;
- возможность использования с любым измеряющим импеданс прибором с конфигурацией четырехвыводных (четырёхтерминальных) пар.

Применяемый диэлектрический материал представляет собой гладкий твердый лист, имеющий одинаковую толщину от одного края до другого. Размеры образца зависят от используемого метода измерения диэлектрических свойств и типа электродов. Для контактного метода применяют электроды А и В без изготовления тонкопленочных электродов, С и D – с их изготовлением. Для бесконтактного метода используются электроды А и В, при этом рекомендуется изготавливать диэлектрический материал толщиной ≤ 10 мм.

Электроды А и С в отличие от электродов В и D приспособлены для образцов больших размеров (табл. 1).

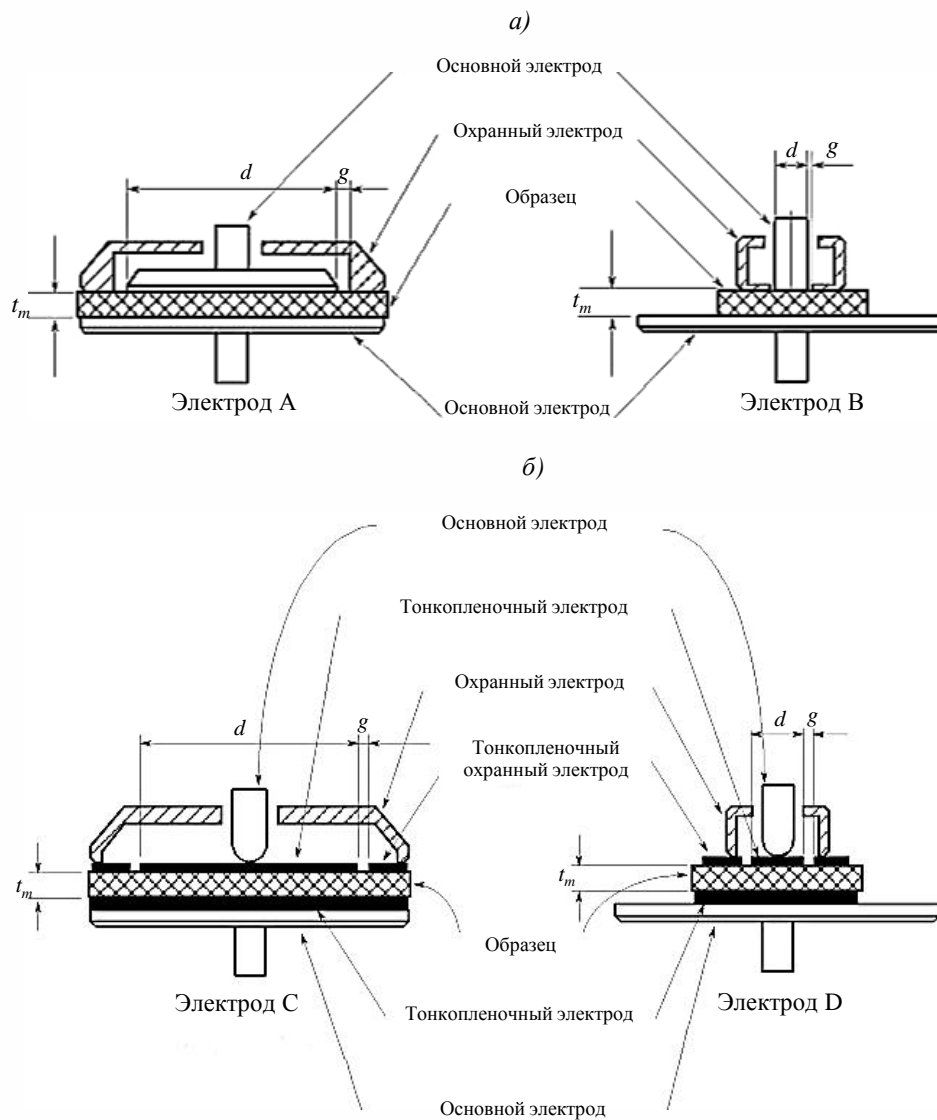


Рис. 5. Схема электродов А и В (а), С и D (б): d – диаметр электрода; t_m – толщина образца; g – зазор между основным и охранным (тонкопленочным) электродом

Таблица 1

**Размеры образцов диэлектрических материалов
в зависимости от типа применяемого электрода**

Тип электрода	Диаметр электрода, мм	Диаметр образца материала, мм
А	38	40–56
В	5	10–56
С	5–50	56
Д	5–14	20–56

Основные параметры измерительной ячейки 16451В согласно спецификации:

Частота, МГц	≤30
Максимальное напряжение, В	±42
Рабочая температура, °С	0–55
Конфигурация терминалов (выходов)	Четырехтерминальные пары, BNC
Длина кабеля, м	1
Компенсация	Открытая/замкнутая (open/short)

Контактным методом определяют диэлектрическую проницаемость путем измерения емкости непосредственно контактирующих электродов (рис. 6).

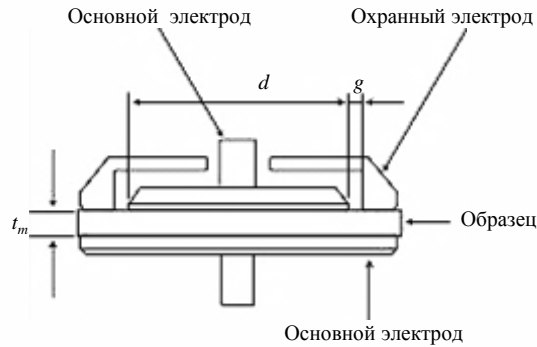


Рис. 6. Схема контактного метода измерения диэлектрических свойств: d – диаметр электрода; t_m – толщина образца; g – зазор между основным и охранным электродом

Диэлектрическую проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь рассчитывают по формулам

$$\varepsilon = \frac{t_m C_p}{A \varepsilon_0} = \frac{t_m C_p}{\pi(d/2)^2 \varepsilon_0},$$

$$\operatorname{tg} \delta = D,$$

где ε – диэлектрическая проницаемость; C_p – измеренная емкость образца, Ф; D – измеренный коэффициент рассеивания; t_m – толщина образца, м; A – площадь поверхности охранного электрода, м²; d – диаметр охранного электрода, м; ε_0 – диэлектрическая проницаемость свободного пространства, равная $8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

Контактный метод прост в исполнении и не требует подготовки образца, поэтому наиболее широко распространен. Однако может возникнуть значительная ошибка измерения, если не принять во внимание воздушный зазор и его эффекты.

Какими бы плоскими и параллельными не изготавливали обе стороны образца, при непосредственном контакте с электродами образуется воздушный зазор. Он является причиной ошибки, так как измеренное значение представляет собой емкость последовательно соединенных диэлектрического материала и воздушного зазора (рис. 7).

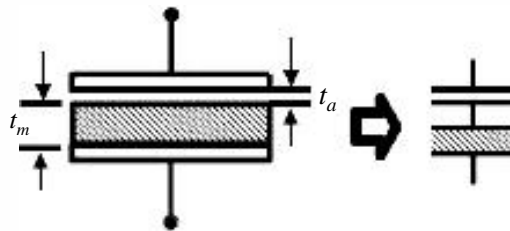


Рис. 7. Эффект воздушного зазора: t_m – толщина образца; t_a – толщина воздушного зазора

Ошибка измерения является функцией действительной части относительной диэлектрической проницаемости (ε'_r) и толщины образца (t_m), а также толщины воздушного зазора (t_a).

Емкость воздушного зазора:

$$C_0 = \varepsilon_0 A / t_a.$$

Емкость диэлектрического материала:

$$C_x = \varepsilon\varepsilon_0 A/t_m,$$

где ε – диэлектрическая проницаемость материала.

Измеренная емкость:

$$C = \frac{1}{1/C_0 - 1/C_x} = \varepsilon_a \varepsilon_0 \frac{A}{d + t_m + t_a},$$

где ε_a – диэлектрическая проницаемость воздуха, равная 1,000059.

Ошибка измерения, возникающая вследствие наличия воздушного зазора:

$$1 - \frac{\varepsilon_a}{\varepsilon} = \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + d/(t_m + t_a)}.$$

Примеры ошибок измерения диэлектрической проницаемости ε представлены в табл. 2. Следует отметить, что уровень ошибок измерений для тонких материалов и материалов с высоким значением диэлектрической константы k выше.

Таблица 2

Ошибки измерения диэлектрической проницаемости ε при различной толщине материала

Соотношение толщин воздушного зазора и образца t_a/t_m	Ошибка измерения, %, при диэлектрической проницаемости ε					
	2	5	10	20	50	100
0,001	0,1	0,4	1	2	5	9
0,005	0,5	2	4	9	20	33
0,01	1	4	8	16	33	50
0,05	5	16	30	48	70	83
0,1	8	27	45	63	82	90

Эффект воздушного зазора можно устранить путем нанесения тонкопленочных электродов на поверхность диэлектрического материала.

Бесконтактный метод обладает преимуществами контактного метода и исключает его недостатки: эффект воздушного зазора устраняется без использования тонкопленочных электродов. Диэлектрическая проницаемость определяется по результатам двух измерений емкости, полученных с помощью испытываемого образца и без него (рис. 8).

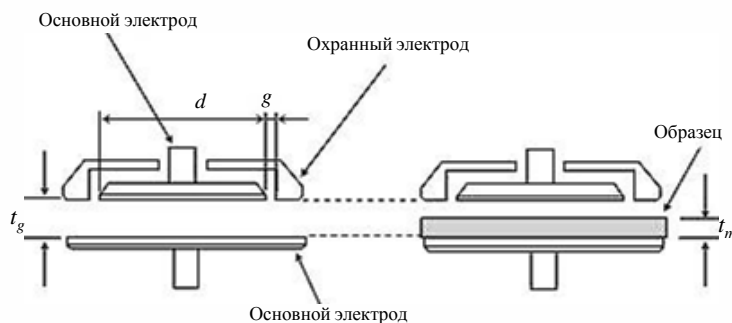


Рис. 8. Схема бесконтактного метода измерения диэлектрических свойств: d – диаметр электрода; t_m – толщина образца; t_g – толщина зазора между электродами; g – зазор между основным и охранным электродом

Теоретически толщина зазора между электродами t_g должна быть незначительно больше толщины образца t_m . Другими словами, толщина воздушного зазора ($t_g - t_m$) должна быть чрезвычайно мала по сравнению с толщиной образца t_m , чтобы измерение было выполнено надлежащим образом. Диэлектрические свойства рассчитывают по формулам

$$\varepsilon'_r = \frac{1}{1 - (1 - C_{S1} / C_{S2})(t_g / t_m)},$$

$$\operatorname{tg}\delta = D_2 + \varepsilon'_r(D_2 - D_1)(t_g / t_m - 1),$$

$$\operatorname{tg}\delta < 1,$$

где C_{S1} и C_{S2} – емкости, измеренные без и с использованием образца, Ф; D_1 и D_2 – коэффициенты рассеивания, измеренные без и с использованием образца; t_g – толщина зазора между электродами, м; t_m – толщина образца, м.

В качестве примера определены диэлектрические свойства стеклопластика на основе эпоксидного связующего толщиной ≤ 2 мм контактными и бесконтактными методами (табл. 3). Значения тангенса угла диэлектрических потерь практически совпадают. Разница результатов измерения диэлектрической проницаемости не превышает 4 %, что находится в пределах типичной погрешности 3 % для метода параллельных пластин.

Таблица 3

Диэлектрическая проницаемость ε и тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta$ стеклопластика на основе эпоксидного связующего, измеренные контактными и бесконтактными методами

Образец	Значения диэлектрических свойств, измеренные методом			
	бесконтактным		контактным	
	ε	$\operatorname{tg}\delta$	ε	$\operatorname{tg}\delta$
1	4,6302	0,017	4,5574	0,018
2	4,6231	0,018	4,5787	0,019
3	4,5384	0,017	4,4462	0,018
4	4,5520	0,017	4,4598	0,018
5	4,5167	0,017	4,4183	0,018

Заключения

НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ обладает техническим оснащением, необходимым для измерения диэлектрических характеристик материалов.

Описаны преимущества и недостатки методик измерений диэлектрических свойств. При выборе метода следует учитывать требуемую точность измерений, свойства (однородность, изотропность) и форму (жидкость, порошок, твердое вещество) материала, температуру испытания, стоимость и др.

Бесконтактный метод измерения диэлектрических характеристик материалов следует использовать для экспресс-анализа, так как он не требует больших временных затрат. Для более точного измерения диэлектрических характеристик материалов и проведения особо ответственных испытаний необходимо использовать контактный метод с применением токопроводящих электродов, что в свою очередь повышает трудозатраты и стоимость проведения исследований.

Работа выполнена при поддержке ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ».

Список источников

1. Гетьман А.А. Основные направления развития материаловедения для создания новой техники // Арматуростроение. 2021. № 4 (133). С. 48–51.
2. Тарасов Ф.И., Орлова Н.Ю. Полимерные материалы. Современное состояние, применение и перспективы развития // Научная сессия НИЯУ МИФИ–2020 по направлению «Инновационные ядерные технологии»: сб. науч. тр. всероссийской конф. М.: НИЯУ МИФИ, 2020. С. 75–77.
3. Каблов Е.Н. Роль фундаментальных исследований при создании материалов нового поколения // Тез. докл. XXI Менделеевского съезда по общей и прикладной химии: в 6 т. СПб., 2019. Т. 4. С. 24.
4. Каблов Е.Н. Композиты: сегодня и завтра // Металлы Евразии. 2015. № 1. С. 36–39.
5. Каблов Е.Н. Основные итоги и направления развития материалов для перспективной авиационной техники // 75 лет. Авиационные материалы. М.: ВИАМ, 2007. С. 20–26.
6. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: учеб. пособие для вузов: в 10 т. М.: Физматлит, 2005. Т. VIII: Электродинамика сплошных сред. 370 с.
7. Никольский В.В., Никольская Т.И. Электродинамика и распространение радиоволн: учеб. пособие для вузов. Изд. 3-е. М.: Наука, 1989. 544 с.
8. Дьяконов В. Анализаторы цепей Keysight PNA – прорыв в области СВЧ и микроволн // Компоненты и технологии. 2015. № 2 (163). С. 103–112.
9. Коренев А.В., Гошин Г.Г. Измерение эффективной диэлектрической проницаемости опорных шайб коаксиальных соединителей // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. 2021. № 3. С. 332–333.
10. Коренев А.В., Гошин Г.Г. Учет паразитных эффектов при измерении эффективной диэлектрической проницаемости методом четвертьволнового резонатора // Ural Radio Engineering Journal. 2021. Т. 5. № 3. С. 272–283. DOI: 10.15826/urej.2021.5.3.005.
11. Бежко М. Изменение параметров материалов в СВЧ-диапазоне с помощью ПО для анализа параметров материалов Keysight N1500A // Технологии в электронной промышленности. 2015. № 8 (84). С. 64–68.
12. Бежко М. Измерение параметров материалов в СВЧ-диапазоне с помощью Keysight N1500A // Проблемы СВЧ-электроники: сб. тр. II Всероссийской объединенной науч. конф. М., 2015. С. 6–8.
13. Иноземцев М.А. Обзор методов измерения диэлектрической проницаемости горных пород // Электронные средства и системы управления: мат. докл. Междунар. науч.-прак. конф. М., 2020. № 1–1. С. 279–281.
14. Донченко А.В., Заргано Г.Ф., Земляков В.В., Клещенков А.Б. Измерение комплексной диэлектрической проницаемости материалов на основе гребневого волновода // Радиотехника и электроника. 2020. Т. 65. № 5. С. 427–433. DOI: 10.31857/S0033849420050022.
15. Иванов В.А., Шеримов Д., Токарев И.А., Репин В.А. Методика измерения диэлектрических свойств материалов на частоте 2,45 ГГц // Электроника и микроэлектроника СВЧ. 2021. Т. 1. С. 595–599.
16. Клепикова А.С., Чарикова Т.Б., Попов М.Р. и др. Анизотропия магнитных свойств и диэлектрическая проницаемость монокристалла $Nd_{1,9}Ce_{0,1}CuO_{4+\delta}$ // Физика металлов и материаловедение. 2021. Т. 122. № 5. С. 520–526. DOI: 10.31857/S0015323021050065.
17. Пархоменко М.П., Каленов Д.С., Еремин И.С. и др. Повышение точности измерений комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей в сверхвысокочастотном диапазоне волноводным методом // Радиотехника и электроника. 2020. Т. 65. № 8. С. 764–768. DOI: 10.31857/S0033849420080112.
18. Певнева Н.А., Кондрашов Д.А., Гурский А.Л., Гусинский А.В. Определение S-параметров и диэлектрической проницаемости образцов кварцевой керамики в миллиметровом диапазоне длин волн // Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. 2021. Т. 19. № 7. С. 65–71. DOI: 10.35596/1729-7648-2021-19-7-65-71.
19. Певнева Н.А., Гурский А.Л. Неопределенность результатов измерений диэлектрической проницаемости материалов по методу Николсона–Росса–Вейра // Метрология и приборостроение. 2021. № 4 (95). С. 25–29.

20. Соннов Н.В., Леухин С.А. Исследование диэлектрических свойств конструкционных радиопоглощающих материалов // *Электроника и микроэлектроника СВЧ*. 2021. Т. 1. С. 347–350.
21. Усанов Д.А., Никитов С.А., Скрипаль А.В. и др. Использование сверхвысокочастотной коаксиальной брэгговской структуры для измерения параметров диэлектриков // *Радиотехника и электроника*. 2020. Т. 65. № 5. С. 495–503. DOI: 10.31857/S0033849420040099.
22. Харалгин С.В., Войтович М.И. Исследование диэлектрических характеристик материалов, изготавливаемых с применением аддитивных технологий // *Российский технологический журнал*. 2021. Т. 9. № 2 (40). С. 57–65. DOI: 10.32362/2500-316X-2021-9-2-57-65.
23. Чухланов В.Ю., Смирнова Н.Н., Смирнов К.В. Диэлектрические характеристики эпоксидной смолы, модифицированной тетраэтоксисиланом, в миллиметровом диапазоне // *Бутлеровские сообщения*. 2020. Т. 62. № 4. С. 77–80. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/20-62-4-77.
24. Панферов С.Ю. К вопросу измерения влажности тонких слоев материала при помощи отражательного СВЧ-метода // *АПК России*. 2017. Т. 24. № 2. С. 498–502.
25. Атамасов В.В., Маленков Г.И. Измерение диэлектрической проницаемости материалов конденсаторным методом с помощью программно-аппаратного комплекса Ni ELVIS II+ и Labview // *Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР*. Томск: ТУСУР, 2019. № 1–1. С. 96–98.
26. Жуков А.А., Журавлев В.А., Атамасов В.В., Маленко Г.И. Программно-аппаратный комплекс на платформе Agilent E4285A-LabVIEW для измерения диэлектрической проницаемости материалов конденсаторным методом // *Актуальные проблемы радиофизики АПР-2021: сб. тр. IX Междунар. науч.-практ. конф.* Томск: НИ ТГУ, 2021. С. 254–256.
27. Иваница М.Г., Тестов И.О. Разработка и создание измерительных ячеек для исследования диэлектрической проницаемости // *Наука настоящего и будущего*. 2019. Т. 3. С. 87–90.
28. Короткова Т.Н., Коротков Л.Н., Панкова М.А. Диэлектрические свойства фуллеритов с60–с70 и возможности применения материалов в радиоэлектронных компонентах // *Вестник Воронежского института МВД России*. 2021. № 1. С. 169–174.
29. Шакирзянов Р.И., Костишин В.Г., Морченко А.Т. и др. Синтез и изучение свойств пленок радиопоглощающих композитов, состоящих из включений $Mn_{0.5792}Zn_{0.2597}Fe_{2.1612}O_4$ и полимерной матрицы $-(CH_2-CH_2)_m-(CF_2-CF_2)_n)_k-$ // *Журнал неорганической химии*. 2020. Т. 65. № 6. С. 758–763. DOI: 10.31857/S0044457X20060197.
30. Семенова С.Н., Чайкун А.М., Сулейманов Р.Р. Этиленпропилендиеновый каучук и его применение в резинотехнических материалах специального назначения (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. № 3 (56). С. 23–30. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-23-30.
31. Мишуров К.С., Курносоев А.О., Паярель С.М. Расчет и экспериментальное определение диэлектрических характеристик стеклопластика на основе фталонитрильной матрицы // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 2 (71). Ст. 07. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 01.06.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-85-93.
32. Ткачук А.И., Терехов И.В., Гуревич Я.М., Кудрявцева А.Н. Применение бисмалеимидного связующего марки ВСТ-57 для получения теплостойких размеростабильных оснасток из полимерных композиционных материалов // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 2 (59). С. 32–40. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-32-40.
33. Сердцелюбова А.С., Меркулова Ю.И., Загора А.Г., Куршев Е.В. Исследование параметров отверждения и защитной способности системы покрытия типа «база/лак» для окраски внешней поверхности авиационной техники // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 1 (70). Ст. 07. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 18.08.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-93-104.

References

1. Getman A.A. Main directions of development of materials science for the creation of new technology. *Armaturostroenie*, 2021, no. 4 (133), pp. 48–51.
2. Tarasov F.I., Orlova N.Yu. Polymer materials. Current state, application and development prospects. *Scientific session of NRNU MEPhI-2020 in the direction of «Innovative nuclear technologies»: reports All-Russian Conf.* Moscow: NRNU MEPhI, 2020, pp. 75–77.

3. Kablov E.N. The role of fundamental research in the creation of new generation materials. *Report XXI Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry*: in 6 vol. St. Petersburg, 2019, vol. 4, p. 24.
4. Kablov E.N. Composites: today and tomorrow. *Metally Evrazii*, 2015, no. 1, pp. 36–39.
5. Kablov E.N. Main results and directions of development of materials for advanced aviation technology. *75 years. Aviation materials*. Moscow: VIAM, 2007, pp. 20–26.
6. Landau L.D., Lifshits E.M. *Theoretical physics*: textbook for univ.: in 10 vols. Moscow: Fizmatlit, 2005, vol. VIII: Electrodynamics of continuous media, 370 p.
7. Nikolsky V.V., Nikolskaya T.I. *Electrodynamics and propagation of radio waves*: textbook for univ. 3rd. ed. Moscow: Nauka, 1989, 544 p.
8. Dyakonov V. Keysight PNA circuit analyzers – a breakthrough in the field of microwaves and millimeter waves. *Komponenty i tekhnologii*, 2015, no. 2 (163), pp. 103–112.
9. Korenev A.V., Goshin G.G. Measurement of the effective dielectric constant of support washers of coaxial connectors. *SVCH-tekhnika i telekommunikatsionnyye tekhnologii*, 2021, no. 3, pp. 332–333.
10. Korenev A.V., Goshin G.G. Taking into account parasitic effects when measuring the effective dielectric constant using the quarter-wave resonator method. *Ural Radio Engineering Journal*, 2021, vol. 5, no. 3, pp. 272–283. DOI: 10.15826/urej.2021.5.3.005.
11. Bezhko M. Changing the parameters of materials in the microwave range using software for analyzing the parameters of materials Keysight N1500A. *Tekhnologii v elektronnoy promyshlennosti*, 2015, no. 8 (84), pp. 64–68.
12. Bezhko M. Measuring parameters of materials in the microwave range using Keysight N1500A. *Problems of microwave electronics*: reports II All-Rus. United Scientific. conf. Moscow, 2015, pp. 6–8.
13. Inozemtsev M.A. Review of methods for measuring the dielectric constant of rocks. *Electronic means and control systems*: reports Intl. scientific-practical conf. Moscow, 2020, no. 1–1, pp. 279–281.
14. Donchenko A.V., Zargano G.F., Zemlyakov V.V., Kleshchenkov A.B. Measurement of the complex dielectric constant of materials based on a ridge waveguide. *Radiotekhnika i elektronika*, 2020, vol. 65, no. 5, pp. 427–433. DOI: 10.31857/S0033849420050022.
15. Ivanov V.A., Sherimov D., Tokarev I.A., Repin V.A. Methodology for measuring the dielectric properties of materials at a frequency of 2.45 GHz. *Elektronika i mikroelektronika SVCH*, 2021, vol. 1, pp. 595–599.
16. Klepikova A.S., Charikova T.B., Popov M.R. et al. Anisotropy of magnetic properties and dielectric constant of Nd_{1.9}Ce_{0.1}CuO_{4+δ} single crystal. *Fizika metallov i metallovedenie*, 2021, vol. 122, no. 5, pp. 520–526. DOI: 10.31857/S0015323021050065.
17. Parkhomenko M.P., Kalenov D.S., Eremin I.S. et al. Improving the accuracy of measurements of complex dielectric and magnetic permeabilities in the microwave range using the waveguide method. *Radiotekhnika i elektronika*, 2020, vol. 65, no. 8, pp. 764–768. DOI: 10.31857/S0033849420080112.
18. Pevneva N.A., Kondrashov D.A., Gursky A.L., Gusinsky A.V. Determination of S-parameters and dielectric constant of quartz ceramic samples in the millimeter wavelength range. *Doklady Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta informatiki i radioelektroniki*, 2021, vol. 19, no. 7, pp. 65–71. DOI: 10.35596/1729-7648-2021-19-7-65-71.
19. Pevneva N.A., Gursky A.L. Uncertainty of the results of measurements of the dielectric constant of materials using the Nicholson–Ross–Weir method. *Metrologiya i priborostroyeniye*, 2021, no. 4 (95), pp. 25–29.
20. Sonnov N.V., Leukhin S.A. Study of dielectric properties of structural radio-absorbing materials. *Elektronika i mikroelektronika SVCH*, 2021, vol. 1, pp. 347–350.
21. Usanov D.A., Nikitov S.A., Skripal A.V. et al. Using a microwave coaxial Bragg structure to measure the parameters of dielectrics. *Radiotekhnika i elektronika*, 2020, vol. 65, no. 5, pp. 495–503. DOI: 10.31857/S0033849420040099.
22. Kharalgin S.V., Voitovich M.I. Study of dielectric characteristics of materials manufactured using additive technologies. *Rossiyskiy tekhnologicheskii zhurnal*, 2021, vol. 9, no. 2 (40), pp. 57–65. DOI: 10.32362/2500-316X-2021-9-2-57-65.
23. Chukhlanov V.Yu., Smirnova N.N., Smirnov K.V. Dielectric characteristics of epoxy resin modified with tetraethoxysilane in the millimeter range. *Butlerovskiy soobshcheniya*, 2020, vol. 62, no. 4, pp. 77–80. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/20-62-4-77.

24. Panferov S.Yu. On the issue of measuring the humidity of thin layers of material using the reflective microwave method. *APK Russii*, 2017, vol. 24, no. 2, pp. 498–502.
25. Atamasov V.V., Malenkov G.I. Measuring the dielectric constant of materials by the capacitor method using the Ni ELVIS II+ and Labview hardware and software complex. *Sbornik izbrannykh statey nauchnoy sessii TUSUR*. Tomsk: TUSUR, 2019, no. 1–1, pp. 96–98.
26. Zhukov A.A., Zhuravlev V.A., Atamasov V.V., Malenkov G.I. Hardware and software complex on the Agilent E4285A-LabVIEW platform for measuring the dielectric constant of materials using the capacitor method. *Current problems of radiophysics APR-2021: reports IX Int. scientific-practical conf.* Tomsk: NI TSU, 2021, pp. 254–256.
27. Ivanitsa M.G., Testov I.O. Development and creation of measuring cells for studying dielectric constant. *Nauka nastoyashchego i budushchego*, 2019, vol. 3, pp. 87–90.
28. Korotkova T.N., Korotkov L.N., Pankova M.A. Dielectric properties of fullerites c60–c70 and the possibility of using materials in radio-electronic components. *Vestnik Voronezhskogo instituta MVD Rossii*, 2021, no. 1, pp. 169–174.
29. Shakirzyanov R.I., Kostishin V.G., Morchenko A.T. et al. Synthesis and study of the properties of radio-absorbing composite films consisting of $Mn_{0.5792}Zn_{0.2597}Fe_{2.1612}O_4$ inclusions and a polymer matrix $-(CH_2-CH_2)_m-(CF_2-CF_2)_n)_k-$. *Zhurnal neorganicheskoy khimii*, 2020, vol. 65, no. 6, pp. 758–763. DOI: 10.31857/S0044457X20060197.
30. Semenova S.N., Chaykun A.M., Suleymanov R.R. Ethylene-propylene-diene rubber and its use in rubber materials for special purposes (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 3 (56), pp. 23–30. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-23-30.
31. Mishurov K.S., Kurnosov A.O., Payarel S.M. Calculation and experimental determination of dielectric characteristics of fiberglass based on a phthalonitrile matrix. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 2 (71), paper no. 07. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: June 01, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-85-93.
32. Tkachuk A.I., Terekhov I.V., Gurevich Ya.M., Kudryavtseva A.N. Application of bismaleimide VST-57 binder for obtaining heat-resistant dimensionally stable molds from polymer composite materials. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 2 (59), pp. 32–40. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-32-40.
33. Serdtselyubova A.S., Merkulova Yu.I., Zagora A.G., Kurshev E.V. Research of film-forming parameters and protective properties of basecoat/clearcoat system. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 1 (70), paper no. 07. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: August 18, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-93-104.

Информация об авторах

Акзигитов Вадим Азаматович, инженер 2 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Беляев Алексей Алексеевич, ведущий инженер-конструктор, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Курносков Артем Олегович, начальник лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Паярель Сергей Михайлович, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Vadim A. Akzigitov, Second Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Alexey A. Belyaev, Leading Design Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Artem O. Kurnosov, Head of Laboratory, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Sergey M. Payarel, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 28.12.2023; одобрена и принята к публикации после рецензирования 09.01.2024.

The article was submitted 28.12.2023; approved and accepted for publication after reviewing 09.01.2024.