

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2023-89-4-45-49>

ИССЛЕДОВАНИЕ СВЯЗИ СОБСТВЕННОЙ ДОБРОТНОСТИ ОБЪЕМНОГО ВОЛНОВОГО РЕЗОНАТОРА С ПОГРЕШНОСТЬЮ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ МАТЕРИАЛА

© **Виталий Петрович Крылов**

ОНПП «Технология» имени А. Г. Ромашина, Россия, 249031, Калужская обл., г. Обнинск, Киевское ш., д. 15;
e-mail: info@technologiya.ru

*Статья поступила 9 августа 2022 г. Поступила после доработки 3 сентября 2022 г.
Принята к публикации 21 ноября 2022 г.*

Для достижения высокой точности определения диэлектрических свойств материалов с использованием объемных волноводных резонаторов измерения проводят на резонансных колебаниях с высокой добротностью. При нахождении диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь материала погрешность определения резонансной частоты считается априорно заданной. При этом зависимость погрешности диэлектрических измерений от величины добротности резонансных колебаний не рассматривается. В работе представлены результаты исследования связи погрешности определения резонансной частоты с добротностью и коэффициентом передачи резонатора. На основе анализа модели вида резонансной кривой как частотной зависимости коэффициента передачи установлена связь погрешности определения резонансной частоты с добротностью типа колебаний, на которых проводятся измерения диэлектрических свойств материала. Это особенно важно при измерениях температурных зависимостей диэлектрической проницаемости материалов при нагреве на сверхвысоких частотах, когда с ростом температуры уменьшается проводимость стенок резонатора и снижается добротность резонансных колебаний. Показано, что повышение точности измерения коэффициента передачи — условие для достижения необходимой точности измерений диэлектрических свойств материалов при более низкой добротности резонатора. Полученные результаты могут быть использованы в исследованиях высокотемпературных резонаторных установок для измерения диэлектрических свойств материалов на сверхвысоких частотах.

Ключевые слова: диэлектрическая проницаемость; резонаторный метод измерения; коэффициент передачи резонатора; добротность резонатора; векторный анализатор цепей.

STUDY OF THE RELATIONSHIP BETWEEN THE INTRINSIC Q-FACTOR OF A VOLUMETRIC WAVE RESONATOR AND THE ERROR IN DETERMINING THE DIELECTRIC CONSTANT OF A MATERIAL

© **Vitaliy P. Krylov**

A. G. Romashin ONPP “Technology”, 15, Kievskoe sh., Obninsk, Kaluga obl., 249031, Russia; e-mail: info@technologiya.ru

Received August 9, 2022. Revised September 3, 2022. Accepted November 21, 2022.

To achieve high accuracy in determining the dielectric properties of materials using guide cavity, measurements are performed using resonant oscillation with high Q -factor. The error in determination of the resonant frequency is considered given a priori in calculations of the dielectric permittivity and the dielectric loss tangent, whereas the dependence of the error of dielectric measurements on the resonance oscillation Q -factor is out of scope. We present the results of studying the relationship between the resonance frequency, Q -factor and resonating cavity transmission factor. Proceeding from the analysis of the shape of the resonance curve as a frequency dependence of the transmission factor, we determined a relationship between the error of the resonant frequency and Q -factor of the oscillations used for measuring the dielectric properties of the material. This is especially important when measuring the temperature dependences of the dielectric permittivity of materials under their heating at super high frequencies (SHF), when the conductivity of resonator walls and the Q -factor of resonant oscillations decrease as the temperature goes up. It was demonstrated that enhancing of the accuracy of measuring the transition factor is a provision for achieving the required accuracy of measuring the dielectric properties of materials at a lower values of the resonator Q -factor. The results obtained can be used in studying high-temperature resonator devices intended for measuring the dielectric properties of materials in SHF range.

Keywords: dielectric permittivity; cavity method of measurements; transmission coefficient; resonator Q -factor; vector network analyzer.

Введение

Метод измерения диэлектрических свойств материалов в объемном волноводном резонаторе характеризуется высокой чувствительностью и точностью [1 – 9]. При этом считается, что при его применении необходимо использовать резонансные типы колебаний с высокой добротностью [9]. Это может быть реализовано при использовании высокопроводящих внутренних металлических поверхностей резонаторов при нормальных температурах. Однако при проведении температурных измерений, когда с ростом температуры падает проводимость внутренней поверхности резонатора, добротность собственных колебаний снижается из-за потерь энергии электромагнитной волны в стенках, что не способствует обеспечению высокоточных измерений.

Существующие исследования погрешности метода при измерении диэлектрической проницаемости материала и тангенса угла диэлектрических потерь на сверхвысоких частотах при нормальных условиях и высокотемпературном нагреве, включая влияние остаточного зазора, не учитывают связь погрешности с добротностью резонансных колебаний, на которых проводятся измерения [10 – 15].

Цель работы — исследование связи величины собственной добротности резонатора с погрешностью измерения диэлектрической проницаемости материала.

Методика

Предположили, что погрешность определения резонансной частоты, на которую настроен резонатор, связана с добротностью типа колебаний, на которых проводятся измерения.

Добротность собственных колебаний резонатора одного типа определяется формулой

$$Q_c = f_p / \Delta f, \quad (1)$$

где Q_c — собственная добротность выбранного типа колебаний в резонаторе; $f_p = (f_1 + f_2)/2$ — резонансная частота, на которую настроен резонатор; $\Delta f = f_2 - f_1$ — ширина полосы пропускания резонатора для резонансной кривой на отметке – 3 дБ (f_1, f_2 — частоты на склонах резонансной кривой, отстоящие от резонансной частоты по амплитуде на – 3 дБ).

Из (1) следует, что погрешность определения добротности

$$dQ_c = (2Q_c/f_p)df_1. \quad (2)$$

Поскольку добротность определяется из анализа измеряемой резонансной кривой, рассмотрим резонансную характеристику резонатора как

функцию зависимости мощности от частот $A(f)$, смоделированную в виде:

$$A(f) = \frac{|A_0|}{\sqrt{1 + \left(\frac{2Q_c(f - f_p)}{f_p} \right)^2}}, \quad (3)$$

где f — текущая частота; A_0 — коэффициент передачи резонатора на резонансной частоте; $\xi = 2Q_c(f - f_p)/f_p$ — обобщенная расстройка, соответствующая частоте, сдвинутой относительно резонансной частоты до снижения амплитуды на – 3 дБ.

На рис. 1 приведена частотная зависимость коэффициента передачи резонатора.

Из (3) и рис. 1 следует

$$df_1 = \Delta A/s_1; \quad df_2 = \Delta A/s_2, \quad (4)$$

где ΔA — погрешность определения коэффициента передачи по мощности; s_1, s_2 — значения крутизны частотной зависимости коэффициента передачи резонатора в точках слева и справа от резонансной частоты.

Тогда

$$dQ_c = \frac{2Q_c \Delta A}{f_p} \left(\frac{f_2}{s_1} - \frac{f_1}{s_2} \right). \quad (5)$$

Для нахождения крутизны резонансной кривой определим ее производную для частотных точек f_1 и f_2 , относительно которых определяем добротность:

$$(A(f))' = |A_0| \frac{Q_c}{\sqrt{2}f_p}. \quad (6)$$

Считая, что, $s_2 = -s_1$, получаем

$$dQ_c = \frac{\sqrt{2}f_p}{|A_0|} \Delta A. \quad (7)$$

Подставляя (7) в (2), получаем

$$df_1 = \frac{\sqrt{2}f_p^2}{Q_c |A_0|} \Delta A. \quad (8)$$

Обсуждение результатов

На рис. 2 представлены результаты расчетов зависимостей добротности от коэффициента передачи резонатора для различных значений погрешности измерения коэффициента передачи ΔA (погрешности определения резонансной частоты и диэлектрической проницаемости — 10 кГц и 1 % соответственно, ГОСТ Р 8.623–2015).

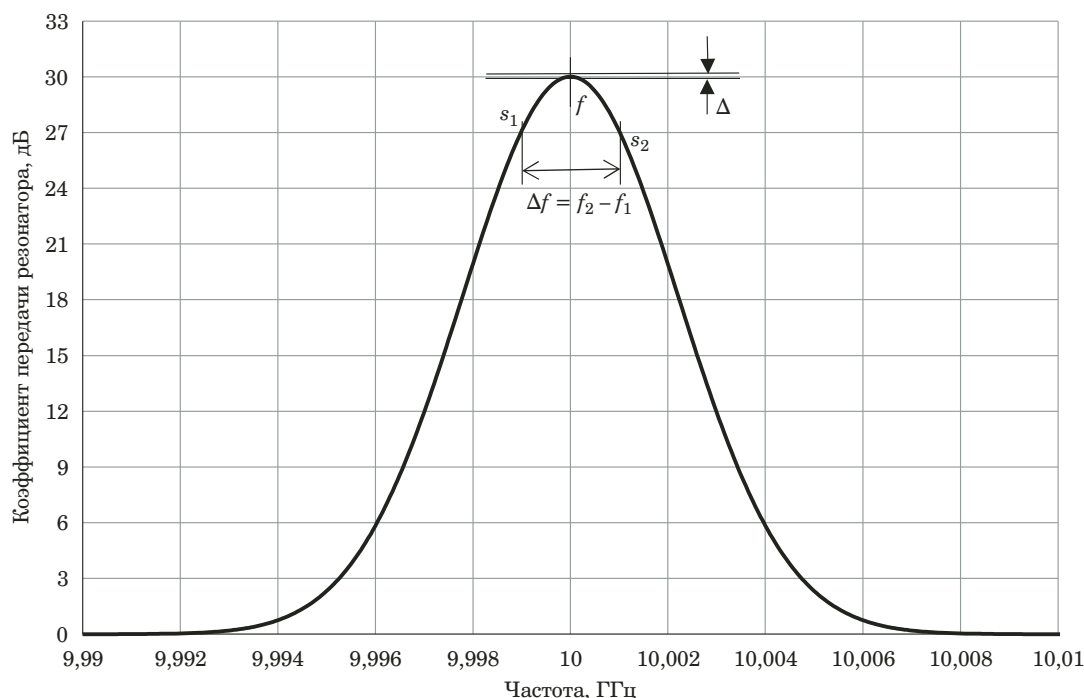


Рис. 1. Частотная зависимость коэффициента передачи резонатора

Fig. 1. Frequency dependence of the resonator transmission coefficient

Видно, что с повышением точности определения коэффициента передачи погрешность определения резонансной частоты с заданной точностью выполняется даже для относительно невысоких значений добротности. Так, при $\Delta A = 0,01$ дБ и коэффициенте передачи $|A_0| = 30$ дБ погрешность определения резонансной частоты в 10 кГц реализуется в резонаторе с добротностью $Q_c = 5000$.

Предложенная методика позволяет установить связь добротности объемного волноводного резонатора с погрешностями определений резонансной частоты (на нее настроен резонатор с образцом испытуемого материала) и диэлектрической проницаемости диэлектрических материалов в резонаторе, которая ранее не учитывалась [11, 12].

Уменьшение погрешности измерения диэлектрической проницаемости при высокотемпературном нагреве возможно при изготовлении резонаторов из материалов с низкими коэффициентами термического расширения [9, 16 – 18]. Но даже в этом случае нельзя исключить снижения добротности колебаний волны в резонаторе при нагреве из-за падения проводимости материала стенок.

Выполнение условия достижения заданной погрешности определения резонансной частоты при меньшей величине собственной добротности резонатора существенно облегчает проектирование высокоточных установок для измерения ди-

электрической проницаемости материалов при нагреве.

Заметим, что с повышением температуры значительно падает проводимость стенок резонатора. Это приводит к уменьшению собственной добротности резонансных колебаний, на которых проводятся измерения.

Требуемая точность измерения коэффициента передачи ($\Delta A = 0,01$ дБ) в радиоизмерительной схеме может быть достигнута при использовании высокоточных векторных анализаторов цепей и блока электронной калибровки, которая выше, чем в случае скалярных анализаторов [19, 20]. Отметим, что для рекомендуемых (ГОСТ Р 8.623–2015) скалярных анализаторов цепей ($\Delta A = 0,2$ дБ) погрешность определения резонансной частоты в 10 кГц при коэффициенте передачи $|A_0| = 30$ дБ реализуется в резонаторе с добротностью не хуже $Q_c = 30\,000$.

Закключение

Таким образом, использование векторных анализаторов цепей для измерения амплитудно-частотных характеристик резонансных зависимостей в радиоизмерительных схемах с объемными волноводными резонаторами для измерения диэлектрической проницаемости материалов позволяет снизить технические требования к качеству изготовления резонатора. Кроме того, применение резонаторного метода для высокотемпературных измерений повышает точность

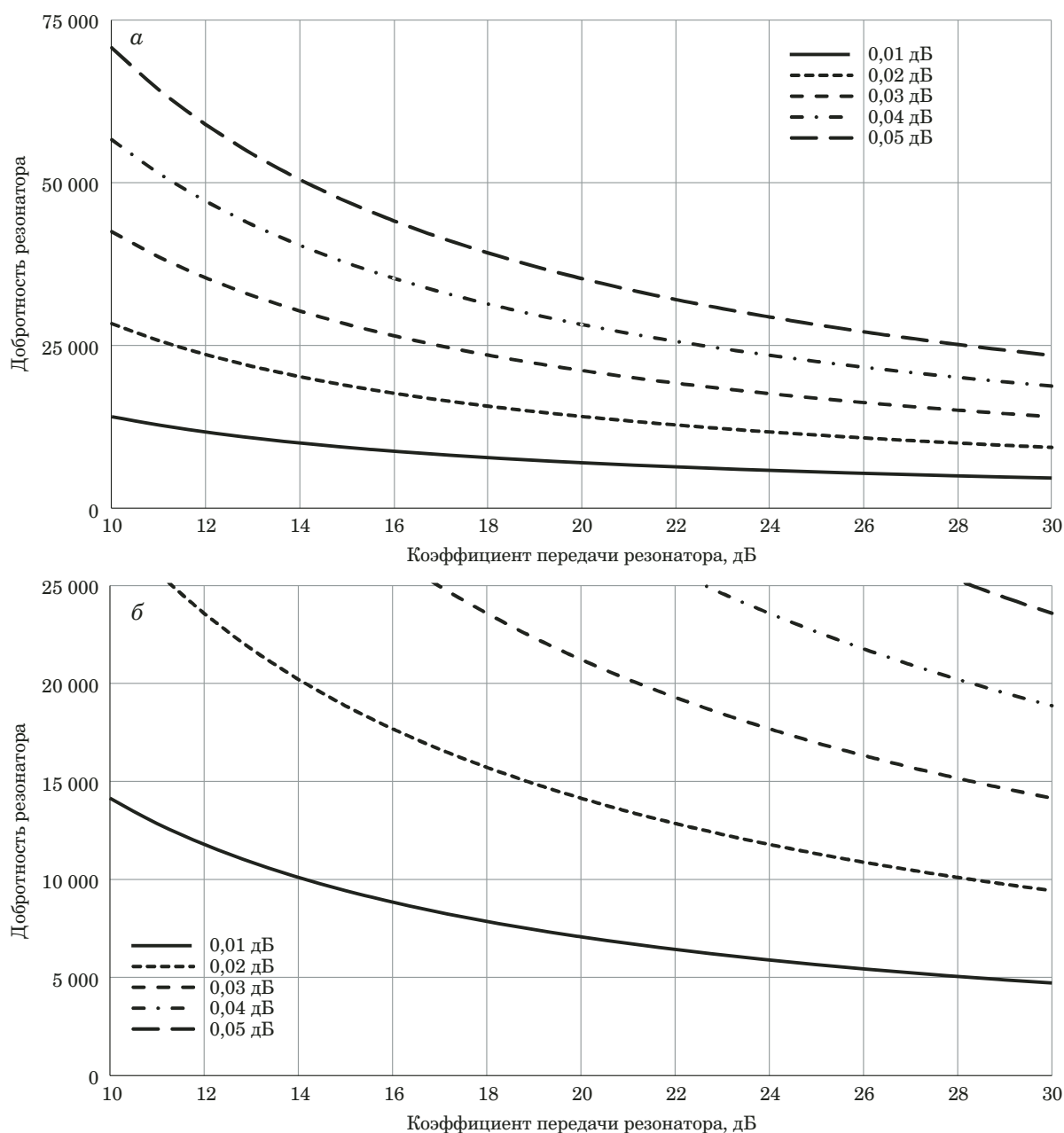


Рис. 2. Зависимости добротности от коэффициента передачи резонатора для различных значений погрешности измерения коэффициента: *а, б* — диапазон изменения добротности 0 – 75 000 и 0 – 25 000

Fig. 2. Dependences of Q -factor on the resonator transmission coefficient for different values of the measurement error: *а, б* — Q -factor within a range of 0 – 75,000 and 0 – 25,000

определения диэлектрических свойств материалов до сравнимого уровня точности, реализуемого при нормальных условиях. Учет связи погрешности определения диэлектрической проницаемости с добротностью резонатора дает возможность обосновать технические требования для реализации методики измерения материалов на сверхвысоких частотах при нагреве от 20 до 1200 °C и распространить ее для регистрации в качестве первичной референтной методики (свидетельство об аттестации методики (метода) измерения № 1194-RA.RU 311753–2022) [9].

ЛИТЕРАТУРА

1. Фомин Д. Г., Дударев Н. В., Даровских С. Н. Анализ методов измерения диэлектрических свойств материалов в СВЧ-диапазоне длин волн / Журнал радиоэлектроники. 2021. № 6. С. 1 – 12. DOI: 10.30898/1684-1719.20216.6
2. Сарафанов В. И. К вопросу об измерении комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей магнитодиэлектриков на сантиметровых волнах / Радиотехника и электроника. 1956. Т. 1. № 3. С. 320 – 328.
3. Зальцман Е. Б. Измерение $\tan \delta$ диэлектриков методом передачи через резонатор / Приборы и техника эксперимента. 1965. № 6. С. 101 – 104.
4. Зальцман Е. Б. Еще раз об оптимальной толщине образца диэлектрика при измерении резонаторным методом / Измерительная техника. 1988. № 8. С. 37 – 39.

5. Батура В. Г., Гладышев Г. И., Дударенко В. С. и др. Комплект аппаратуры «Кварц» для измерения параметров диэлектриков / Электронная промышленность. 1973. № 8. С. 8 – 9.
6. Бреховских С. М., Демьянов В. В., Зальцман Е. Б., Литовченко А. В., Смирнов Г. А. Установка для измерения параметров диэлектриков в высокочастотном диапазоне при температурах до 2300 К / Приборы и техника эксперимента. 1985. № 4. С. 141 – 143.
7. Li E., Nie Z., Guo G., Zhaoh Q. Broadband measurements of dielectric properties of low-loss materials at high temperatures using circular cavity method / Progress in Electromagnetics Research, PIER 92. 2009. P. 103 – 120.
8. Егоров В. Н. Установка для измерения диэлектрических параметров материалов при нагреве до 1800 °С / Изв. вузов. 2013. Т. 56. № 8/2. С. 347 – 349.
9. Крылов В. П. Измерение диэлектрических свойств диоксида кремния на частоте 10¹⁰ ГГц при нагреве до 1200 °С в цилиндрическом волноводном резонаторе / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2007. Т. 73. № 9. С. 47 – 49.
10. Егоров В. Н. Резонансные методы исследования диэлектриков на СВЧ / Приборы и техника эксперимента. 2007. № 2. С. 5 – 38.
11. Литовченко А. В., Игнатенко Г. К. Некоторые аспекты метрологического обеспечения измерения диэлектрических свойств материалов на сверхвысокой частоте в интервале температур 20 – 1200 °С / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2010. Т. 76. № 8. С. 66 – 69.
12. Крылов В. П. Учет погрешностей определения диэлектрической проницаемости методом волноводного резонатора / Метрология. 1994. № 5. С. 33 – 36.
13. Егоров В. Н., Кащенко М. В., Онхонов Р. Р. Точность диэлектрических измерений в объемном цилиндрическом H_{01p}-резонаторе / Измерительная техника. 2003. № 10. С. 41 – 45.
14. Литовченко А. В. Особенности методики обработки результатов точных измерений ϵ и $\tan \delta$ на СВЧ при нагреве образца / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2004. Т. 70. № 4. С. 31 – 36.
15. Литовченко А. В. Высокоточный СВЧ-измеритель ϵ и $\tan \delta$ нагреваемых образцов. / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2002. Т. 68. № 10. С. 35 – 38.
16. Литовченко А. В., Игнатенко Г. К. Влияние остаточного электрического зазора между образцом и поршнем резонатора при измерении диэлектрических характеристик материалов / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2012. Т. 78. № 11. С. 36 – 40.
17. Крылов В. П., Скряuchenков Л. М. Резонаторная ячейка для измерения температурных зависимостей диэлектрической проницаемости на сверхвысоких частотах до 1200 °С / Приборы и техника эксперимента. 1996. № 2. С. 81 – 82.
18. Суворов А. В., Русинов А. В., Фищев В. Н., Алексеева Н. В. Высокотемпературные материалы с низким интегральным коэффициентом термического расширения / Огнеупоры и техническая керамика. 2008. № 2. С. 9 – 16.
19. Певнева Н. А., Гурский А. Л., Кострикин А. М. Метод свободного пространства с использованием векторного анализатора цепей для определения диэлектрической проницаемости материалов на сверхвысоких частотах / Доклады ВГУИР. 2019. № 4. С. 32 – 39.
20. Дьяконова О. А., Казанцев Ю. Н., Каленов Д. С. Измерительный комплекс для определения электромагнитных характеристик материалов резонансным методом с помощью скалярных анализаторов цепей / Журнал радиоэлектроники. 2017. № 7.
21. электрон. 2021. N 6. P. 1 – 12.
DOI: 10.30898/1684-1719.20216.6
2. Surafanov B. I. To a question of measurement of complex dielectric and magnetic properties of magnetodielectrics on centimetric waves / Radiotekh. Elektronika. 1956. Vol. 1. N 3. P. 320 – 328 [in Russian].
3. Zaltsman E. B. Measurement of $\tan \delta$ of dielectrics by a transfer method via the resonator / Prib. Tekhn. Éksp. 1965. N 6. P. 101 – 104 [in Russian].
4. Zaltsman E. B. Once again about the optimum thickness of a sample of dielectric at measurement by a resonator method / Izv. Tekhn. 1988. N 8. P. 37 – 39 [in Russian].
5. Batura V. G., Gladyshev G. I., Dudarenko V. S., et al. A set of the Quartz equipment for measurement of parameters of dielectrics / Elektron. Prom. 1973. N 8. P. 8 – 9 [in Russian].
6. Brekhovskiy S. M., Demyanov V. V., Zaltsman E. B., Litovchenko A. V., Smirnov G. A. Installation for measurement of parameters of dielectrics in the high-frequency range at a temperature up to 2300 K / Prib. Tekhn. Éksp. 1985. N 4. P. 141 – 143 [in Russian].
7. Li E., Nie Z., Guo G., Zhaoh Q. Broadband measurements of dielectric properties of low-loss materials at high temperatures using circular cavity method / Progress in Electromagnetics Research, PIER 92. 2009. P. 103 – 120.
8. Egorov V. N. Installation for measurement of dielectric parameters of materials when heating till 1800 °С / Izv. vuzov. 2013. Vol. 56. N 8/2. P. 347 – 349 [in Russian].
9. Krylov V. P. Measurement of dielectric properties of dioxide of silicon at a frequency of 10¹⁰ GHz when heating to 1200 °С in the cylindrical waveguide resonator / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2007. Vol. 73. N 9. P. 47 – 49 [in Russian].
10. Egorov V. N. Resonant methods of a research of dielectrics on SVCh / Prib. Tekhn. Éksp. 2007. N 2. P. 5 – 38 [in Russian].
11. Litovchenko A. V., Ignatenko G. K. Some aspects of metrological support of measurement of dielectric properties of materials at an ultrahigh frequency in the range of temperatures 20 – 1200 °С / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2010. Vol. 76. N 8. P. 66 – 69 [in Russian].
12. Krylov V. P. Accounting of errors of definition of dielectric permeability by method of the waveguide resonator / Metrologiya. 1994. N 5. P. 33 – 36 [in Russian].
13. Egorov V. N., Kashchenko M. V., Onkhonov R. R. Accuracy of dielectric measurements in volume cylindrical H_{01p}-resonator / Izv. Tekhn. 2003. N 10. P. 41 – 45 [in Russian].
14. Litovchenko A. V. Features of a technique of processing of results of exact measurements ϵ and $\tan \delta$ on the microwave oven when heating a sample / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2004. Vol. 70. N 4. P. 31 – 36 [in Russian].
15. Litovchenko A. V. The high-precision microwave measuring instrument ϵ and $\tan \delta$ of the heated samples / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2002. Vol. 68. N 10. P. 35 – 38 [in Russian].
16. Litovchenko A. V., Ignatenko G. K. Influence of a residual electric gap between a sample and the piston of the resonator at measurement of dielectric characteristics of materials / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2012. Vol. 78. N 11. P. 36 – 40 [in Russian].
17. Krylov V. P., Skryuchenkov L. M. Resonator cell for measurement of temperature dependences of dielectric permeability at ultrahigh frequencies to 1200 °С / Prib. Tekhn. Éksp. 1996. N 2. P. 81 – 82 [in Russian].
18. Suvorov A. V., Rusinov A. V., Fishchev V. N., Alekseeva N. V. High-temperature materials with low integrated coefficient of thermal expansion / Ogneupory Tekhn. Keram. 2008. N 2. P. 9 – 16 [in Russian].
19. Pevneva N. A., Gursky A. L., Kostrikin A. M. Method of free space with use of the vector analyzer of chains for definition of dielectric permeability of materials at ultrahigh frequencies / Dokl. BGUIR. 2019. N 4. P. 32 – 39 [in Russian].
20. Dyakonova O. A., Kazantsev Yu. N., Kalenov D. S. A measuring complex for definition of electromagnetic characteristics of materials by a resonant method by means of scalar analyzers of chains / Zh. Radioelektron. 2017. N 7.

REFERENCES