ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО

ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**ГОСТ Р МЭК 62562— 2012**

# ГОСУДАРСТВЕННАЯ СИСТЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

## Комплексная диэлектрическая проницаемость диэлектрических пластин с малыми потерями

## Метод измерений в объемном резонаторе

**IEC 62562:2010**
**Cavity resonator method to measure the complex permittivity of low-loss dielectric plates**
**(IDT)**

**Издание официальное**

Москва
Стандартинформ
2014

gost.e-ecolog.ru

## Предисловие

1 ПОДГОТОВЛЕН Восточно-Сибирским филиалом Федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений» (Восточно-Сибирский филиал ФГУП «ВНИИФТРИ») на основе собственного аутентичного перевода на русский язык международного стандарта, указанного в пункте 4

2 ВНЕСЕН Управлением метрологии Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии, ТК 206

3 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 27 ноября 2012 г. № 1243-ст

4 Настоящий стандарт идентичен международному стандарту МЭК 62562:2010 «Метод измерения комплексной диэлектрической проницаемости пластин из диэлектрика с малыми потерями с использованием объемного резонатора» (IEC 62562:2010 «Cavity resonator method to measure the complex permittivity of low-loss dielectric plates»)

Наименование настоящего стандарта изменено относительно наименования указанного международного стандарта для приведения в соответствие с ГОСТ Р 1.5–2004 (подраздел 3.5)

Раздел «Содержание» настоящего стандарта изменен относительно содержания международного стандарта для приведения в соответствие с ГОСТ Р 1.5–2004 (подраздел 3.4)

5 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

*Правила применения настоящего стандарта установлены в ГОСТ Р 1.0—2012 (раздел 8). Информация об изменениях к настоящему стандарту публикуется в ежегодном (по состоянию на 1 января текущего года) информационном указателе «Национальные стандарты», а официальный текст изменений и поправок – в ежемесячном информационном указателе «Национальные стандарты». В случае пересмотра (замены) или отмены настоящего стандарта соответствующее уведомление будет опубликовано в ближайшем выпуске информационного указателя «Национальные стандарты». Соответствующая информация, уведомление и тексты размещаются также в информационной системе общего пользования – на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет (gost.ru)*

© Стандартинформ, 2014

Настоящий стандарт не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен в качестве официального издания без разрешения Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии

## Предисловие к международному стандарту МЭК 62562:2010

В международном стандарте приведен метод измерений комплексной диэлектрической проницаемости диэлектрических пластин с малыми потерями в объемном резонаторе на частотах микроволнового диапазона. Этот метод был создан для разработки новых материалов и конструирования активных и пассивных устройств, для которых все более важной становится стандартизация методов измерения свойств материалов.

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**ГОСУДАРСТВЕННАЯ СИСТЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЙ**

# Комплексная диэлектрическая проницаемость диэлектрических пластин с малыми потерями

# Метод измерений в объемном резонаторе

State system for ensuring the uniformity of measurements.
Cavity resonator method to measure the complex permittivity
of low-loss dielectric plates

**Дата введения —2014—07—01**

## 1 Область применения

Настоящий стандарт устанавливает метод измерений комплексной диэлектрической проницаемости диэлектрических пластин с малыми потерями в объемном резонаторе (далее – резонатор) на частотах микроволнового диапазона [1] – [3].

Метод имеет следующие характеристики:

- относительная диэлектрическая проницаемость $\varepsilon'$ и тангенс угла диэлектрических потерь $\mathrm{tg}\delta$ образца диэлектрической пластины могут быть измерены точно и без разрушения образца [4], [5];
- может быть измерена температурная зависимость комплексной диэлектрической проницаемости;
- неопределенность измерения не более 0,3 % для относительной диэлектрической проницаемости $\varepsilon'$ и не более $5 \cdot 10^{-6}$ для тангенса угла диэлектрических потерь $\mathrm{tg}\delta$;
- краевой эффект учитывается применением коррекционных номограмм, рассчитанных на основании строгих анализов.

Метод применим для измерений в следующих условиях:

| | |
|---|---|
| частота | 2 ГГц < $f$ < 40 ГГц; |
| относительная диэлектрическая проницаемость | 2 < $\varepsilon'$ < 100; |
| тангенс угла диэлектрических потерь | $10^{-6} < \mathrm{tg}\delta < 10^{-2}$. |

## 2 Измеряемые параметры

Измеряемые параметры определяют следующим образом:

$$\varepsilon_r = \varepsilon' - j\varepsilon'' = D/(\varepsilon_0 E) \quad (1)$$

$$\mathrm{tg}\delta = \varepsilon''/\varepsilon' \quad (2)$$

$$TK\varepsilon = \frac{1}{\varepsilon_{ref}} \cdot \frac{\varepsilon_T - \varepsilon_{ref}}{T - T_{ref}} \cdot 10^6 \quad (1 \cdot 10^{-6}/K), \quad (3)$$

где $D$ – индукция электрического поля;

$E$ – напряженность электрического поля;

$\varepsilon_0$ – диэлектрическая постоянная вакуума;

$\varepsilon', \varepsilon''$ – действительная и мнимая составляющие комплексной относительной диэлектрической проницаемости $\varepsilon_r$;

$TK\varepsilon$ – температурный коэффициент относительной диэлектрической проницаемости;

**Издание официальное**

$\varepsilon_T$, $\varepsilon_{ref}$ – действительные части комплексной диэлектрической проницаемости при температуре $T$ и опорной температуре $T_{ref}$ в пределах 20 °С $\leq T_{ref} \leq$ 25 °С соответственно.

## 3 Теория и расчетные соотношения

### 3.1 Относительная диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь

Схематическое изображение резонатора для измерений комплексной диэлектрической проницаемости приведено на рисунке 1. Резонатор, имеющий диаметр $D$ и длину $H = 2M$, разделен на две половины. Образец диэлектрической пластины, имеющий $\varepsilon'$, $\mathrm{tg}\delta$ и толщину $t$, помещен между ними.

Для измерения используется мода $TE_{011}$, имеющая только касательную к плоскости образца составляющую электрического поля, поэтому воздушные зазоры между поверхностями резонатора и пластины диэлектрика не влияют на электромагнитное поле. Параметры $\varepsilon'$ и $\mathrm{tg}\delta$ определяют из измеренных значений резонансной частоты $f_0$ и собственной добротности $Q_u$ резонатора с образцом, учитывая краевое поле в области образца за пределами внутреннего диаметра резонатора [6] путем строгого решения краевой задачи методом «сшивания полей» [7]. Эти численные расчеты довольно громоздки, поэтому сначала определяют приближенные значения $\varepsilon'_a$ и $\mathrm{tg}\delta_a$ из величин $f_0$ и $Q_u$ с использованием простых формул для модели резонатора, показанной на рисунке 1(б), в которой не учитывается краевой эффект модели резонатора, показанной на рисунке 1(а). Затем точные значения $\varepsilon'$ и $\mathrm{tg}\delta$ из $\varepsilon'_a$ и $\mathrm{tg}\delta_a$ получают с использованием номограмм, рассчитанных путем строгого решения.

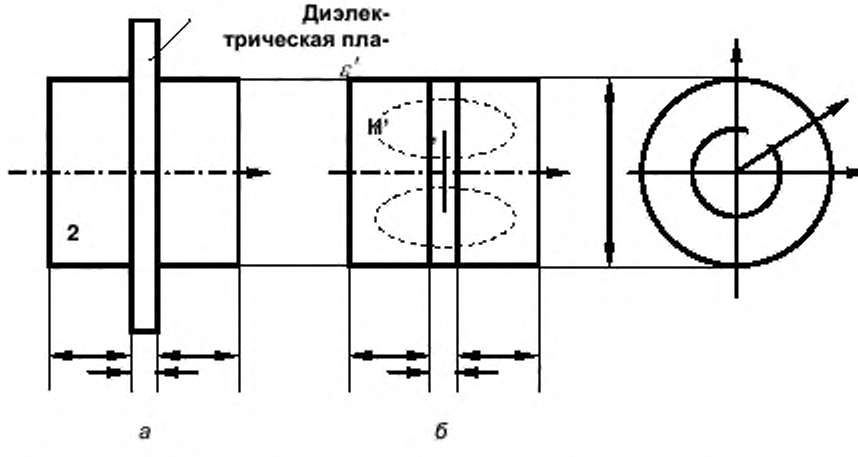



Рисунок 1 – Схематическое изображение резонатора с образцом (*а*) и модель резонатора для расчета $\varepsilon'_a$ и $\mathrm{tg}\delta_a$ (*б*)

Значение $\varepsilon'_a$ определяют по формуле

$$\varepsilon'_a = \left(\frac{c}{\pi f_0}\right)^2 \cdot \left\{X^2 - Y^2\left(\frac{t}{2M}\right)^2\right\} + 1 \qquad (4)$$

где $c$ = 2,99792458·10$^{11}$ мм/с – скорость света в вакууме;

$f_0$ – резонансная частота, Гц;

$t$ – толщина пластины, мм;

$X$ – первый корень уравнения:

$$X \cdot \mathrm{tg}X = \frac{t}{2M} Y \cdot \mathrm{ctg}Y, \quad (5)$$

где $2M$ – длина резонатора, мм;

$Y$ находят из выражения

$$Y = M\sqrt{k_0^2 - k_r^2} = jY', \quad (6)$$

где $k_0 = \frac{2\pi f_0}{c}$, $k_r = \frac{\nu'_{01}}{R}$;

$\nu'_{01}$ = 3,83173 для моды $TE_{011}$ ($\nu'_{01}$ – корень уравнения $J'_0(x) = 0$;

$J'_{01}(x)$ – производная функции Бесселя $J_0(x)$);

$R$ – радиус резонатора, мм.

Когда $k_0 - k_r < 0$, $Y$ заменяют на $jY'$.

Значение $\mathrm{tg}\delta_a$ определяют по формуле

$$\mathrm{tg}\delta_a = \frac{A}{Q_u} - R_S B, \quad (7)$$

где $R_S$ – поверхностное сопротивление стенок резонатора

$$R_S = \sqrt{\frac{\pi f_0 \mu}{\sigma}} \text{ Ом}, \quad \sigma = \sigma_0 \sigma_r \text{ См·м}^{-1}, \quad (8)$$

где $\mu$, $\sigma$ – магнитная проницаемость и проводимость стенок резонатора;

$\sigma_r$ – относительная проводимость;

$\sigma_0$ =5,8·10$^7$ См·м$^{-1}$ – проводимость стандартной меди.

Постоянные $A$ и $B$ определяют по формулам:

$$A = 1 + \frac{W_2^e}{W_1^e}, \quad (9)$$

$$B = \frac{P_{cy1} + P_{cy2} + P_{end}}{\omega R_s W_1^e}, \quad (10)$$

где $W_1^e$ и $W_2^e$ – энергия электрического поля, запасенная в пластине диэлектрического образца (область 1) и в воздухе (область 2), как показано на рисунке 1(*a*);

$P_{cy1}$, $P_{cy2}$ и $P_{end}$ – потери в проводниках в областях 1, 2 и на торцевой стенке;

$\omega = 2\pi f_0$ – круговая частота.

Эти параметры определяют по следующим формулам:

$$W_1^e = \frac{\pi}{8} \varepsilon_0 \varepsilon'_a \mu_0^2 \omega^2 \nu'^2_{01} J_0^2(\nu'_{01}) t \left(1 + \frac{\sin 2X}{2X}\right); \quad (11)$$

$$W_2^e = \frac{\pi}{4} \varepsilon_0 \mu_0^2 \omega^2 \nu'^2_{01} J_0^2(\nu'_{01}) M \left(1 - \frac{\sin 2Y}{2Y}\right) \frac{\cos^2 X}{\sin^2 Y}, \quad (12)$$

$$P_{cyl} = \frac{\pi}{4} R_s J_0^2(\nu'_{01}) \pi R k_r^4 \left(1 + \frac{sin2X}{2X}\right), \quad (13)$$

$$P_{cy2} = \frac{\pi}{2} R_s J_0^2(\nu'_{01}) MR k_r^4 \left(1 - \frac{\sin 2Y}{2Y}\right) \frac{\cos^2 X}{\sin^2 Y}; \quad (14)$$

$$P_{end} = \frac{\pi}{2} R_s \nu'^2_{01} J_0^2(\nu'_{01}) \left(\frac{Y}{M}\right)^2 \frac{\cos^2 X}{\sin^2 Y}, \quad (15)$$

Точные значения $\varepsilon'$ и $\mathrm{tg}\delta$ определяют по формулам:

$$\varepsilon' = \varepsilon'_a \left(1 - \frac{\Delta\varepsilon'}{\varepsilon'_a}\right), \quad (16)$$

$$\mathrm{tg}\delta = \frac{A}{Q_u}\left(1 + \frac{\Delta A}{A}\right) - R_s B\left(1 + \frac{\Delta B}{B}\right), \quad (17)$$

где $\Delta\varepsilon'/\varepsilon'_a$, $\Delta A/A$, $\Delta B/B$ – поправочные коэффициенты, учитывающие краевой эффект, численно рассчитанные путем строгого решения краевой задачи «сшиванием полей» с использованием метода Ритца – Галеркина (рис. 2 и 3). Они найдены для диэлектрической пластины диаметром $d$ так, что $f_0$ сходится к постоянному значению при соотношении $d/D$ >1,2.

Поправочные коэффициенты, показанные на рисунках 2 и 3, рассчитаны для $d/D$ >1,5 и применимы к диэлектрическим образцам любой формы, если $d/D$ > 1,2.

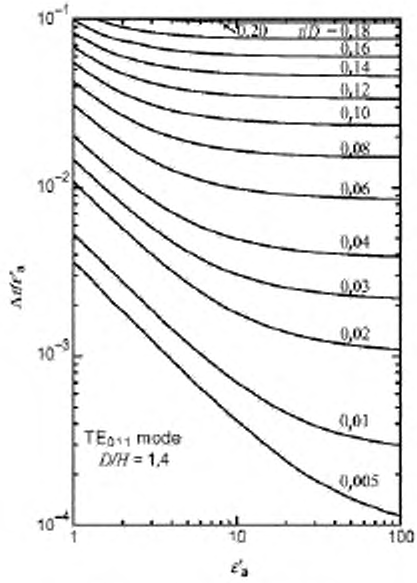



Рисунок 2 – Поправочный коэффициент $\Delta\varepsilon'/\varepsilon'_a$

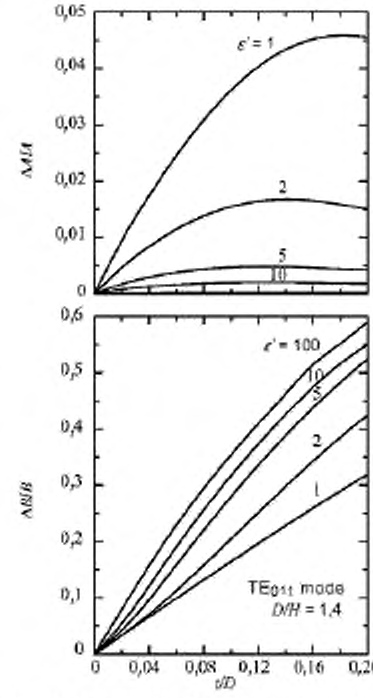



Рисунок 3 – Поправочные коэффициенты $\Delta A/A$ и $\Delta B/B$

Неопределенности $\Delta\varepsilon'$ и $\Delta\mathrm{tg}\delta$ измерения $\varepsilon'$ и $\mathrm{tg}\delta$ оценивают как среднеквадратические отклонения и получают соответственно по формулам:

$$(\Delta\varepsilon')^2 = (\Delta\varepsilon'_f)^2 + (\Delta\varepsilon'_t)^2 + (\Delta\varepsilon'_D)^2 + (\Delta\varepsilon'_H)^2, \quad (18)$$

$$(\Delta\mathrm{tg}\delta)^2 = (\Delta\mathrm{tg}\delta_Q)^2 + (\Delta\mathrm{tg}\delta_\sigma)^2, \quad (19)$$

где $\Delta\varepsilon'_f$, $\Delta\varepsilon'_t$, $\Delta\varepsilon'_D$, $\Delta\varepsilon'_H$ – неопределенности $\varepsilon'$ из-за стандартных отклонений $f_0$, $t$, $D$, $H$ соответственно;

$\Delta\mathrm{tg}\delta_Q$, $\Delta\mathrm{tg}\delta_\sigma$ – неопределенности $\mathrm{tg}\delta$ из-за стандартных отклонений $Q_u$ и $\sigma_r$ соответственно.

### 3.2 Температурная зависимость $\varepsilon'$ и $\mathrm{tg}\delta$

С использованием этого метода может быть также определена температурная зависимость $\varepsilon'$ и $\mathrm{tg}\delta$. Температурный коэффициент относительной диэлектрической проницаемости $TK\varepsilon$ рассчитывают по формуле (3).

В частности, когда температурная зависимость $\varepsilon'$ линейна, $\varepsilon'(T)$ определяют по формуле

$$\varepsilon'(T) = \varepsilon'(T_0)[1 + TK\varepsilon(T - T_0)], \quad (20)$$

где $T$ и $T_0$ – температура при измерении и опорная температура соответственно. В этом случае $TK\varepsilon$ можно определить по методу наименьших квадратов для большого количества измеряемых точек по $T$.

При определении $TK\varepsilon$ следует учитывать температурный коэффициент линейного расширения диэлектрической пластины $\alpha$, а также температурный коэффициент объемного расширения резонатора $\alpha_c$. При измерении температурной зависимости $\mathrm{tg}\delta$ следует учитывать температурный коэффициент сопротивления $TK\rho$. Используя эти параметры, значения $t(T)$, $D(T)$, $H(T)$ и $\rho(T)$ рассчитывают по формулам:

$$t(T) = t(T_0)[1 + \alpha(T - T_0)]; \quad (21)$$

$$t(T) = t(T_0)[1 + \alpha(T - T_0)]; \quad (22)$$

$$H(T) = H(T_0)[1 + \alpha_c(T - T_0)]; \quad (23)$$

$$\rho(T) = \frac{1}{\sigma(T)} = \rho(T_0)[1 + TK\rho(T - T_0)]. \quad (24)$$

### 3.3 Параметры резонатора

Перед измерением диэлектрической проницаемости определяют параметры резонатора $D$, $H = 2M$, $\alpha_c$, $\sigma_r$ и $TK\rho$.

Значения $D$ и $H$ определяют по двум резонансным частотам пустого резонатора $f_1$ для моды $TE_{011}$ и $f_2$ для моды $TE_{012}$ по формулам:

$$D = \frac{cv'_{01}}{\pi}\sqrt{\frac{3}{4f_1^2 - f_2^2}} \quad (25)$$

$$H = \frac{c}{2}\sqrt{\frac{3}{f_2^2 - f_1^2}} \tag{26}$$

Приведенные формулы получены из резонансных условий резонатора.

Значение $\alpha_c$ определяют, используя результаты измерения температурной зависимости $f_1$, из выражения

$$\alpha_c = -\frac{1}{f_1}\frac{\Delta f_1}{\Delta T} \tag{27}$$

Значение $\sigma_r$ определяют из измеренных значений $D$, $H$, $f_1$ и $Q_{uc}$ – собственной добротности пустого резонатора для моды $TE_{011}$

$$\sigma_r = \frac{4\pi f_1 Q_{uc}^2 \left\{ v_{01}'^2 + 2\pi^2 \left( \frac{D}{2H} \right)^3 \right\}^2}{\sigma_0 \mu_0 c^2 \left\{ v_{01}'^2 + \left( \frac{\pi D}{2H} \right)^2 \right\}^3} \tag{28}$$

Наконец, $TK\rho$ определяют, используя результаты измерения температурной зависимости $\rho_r = \sigma_0 / \sigma$, из выражения

$$TK\rho = \frac{1}{\rho_r}\frac{\Delta \rho_r}{\Delta T} \tag{29}$$

## 4 Измерительное оборудование и аппаратура

### 4.1 Измерительное оборудование

На рисунке 4 приведены два вида структурной схемы установки для измерения на миллиметровых волнах. Для измерения диэлектрических свойств необходима только информация об амплитуде передаваемой мощности, информация о фазе передаваемой мощности не требуется. Для таких измерений может быть использован скалярный анализатор цепей, как показано на рисунке 4(а). Однако векторный анализатор цепей на рисунке 4(б) имеет более высокую точность измерений.

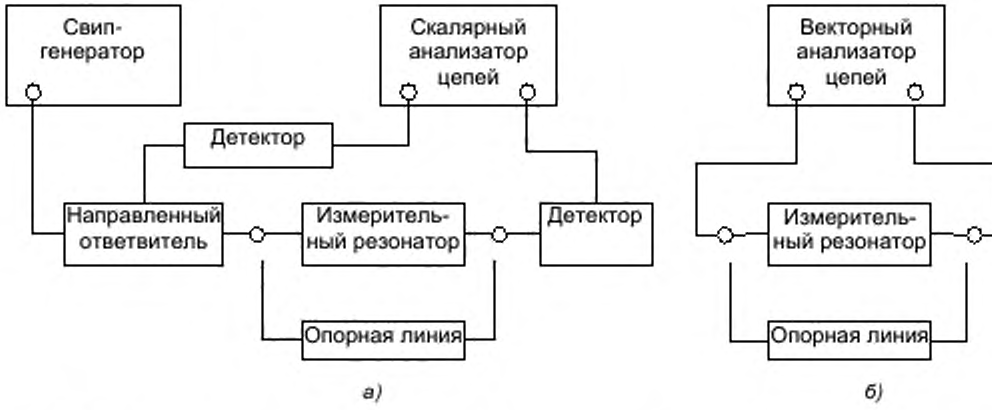



Рисунок 4 – Структурная схема измерительной установки со скалярным анализатором цепей (*а*) и с векторным анализатором цепей (*б*)

**4.2 Аппаратура для измерения комплексной диэлектрической проницаемости**

Структура резонатора для измерений комплексной диэлектрической проницаемости приведена на рисунке 5.

Резонатор состоит из двух одинаковых частей, изготовленных из меди. Для измерений в области 10 ГГц резонатор имеет диаметр $D$ = 35 мм, высоту $H$ = 25 мм и диаметр фланцев $D_f > 1{,}5D$.

Образец диаметром $d > 1{,}2D$ помещают между фланцами резонатора и фиксируют с помощью зажимов. Резонатор возбуждается двумя полужесткими коаксиальными кабелями, каждый из которых имеет маленькую петлю на конце. Данный резонатор является резонатором проходного типа и имеет одинаковые коэффициенты связи входной и выходной петель, устанавливаемые по равенству входного $S_{11}$ и выходного $S_{22}$ коэффициентов отражения $S_{11} = S_{22}$. Фото резонатора приведено на рисунке 6.

Резонансную частоту резонатора с образцом $f_0$, полосу пропускания на уровне половинной мощности $f_{BW}$ и вносимое ослабление $IA_0$ (дБ) на частоте $f_0$ измеряют с использованием анализатора цепей в режиме сканирования по частоте. Значение собственной добротности резонатора с образцом $Q_u$ определяют по формуле

$$Q_u = \frac{Q_L}{1 - 10^{-IA_0(\text{дБ})/20}}, \quad Q_L = \frac{f_0}{f_{BW}}. \tag{30}$$

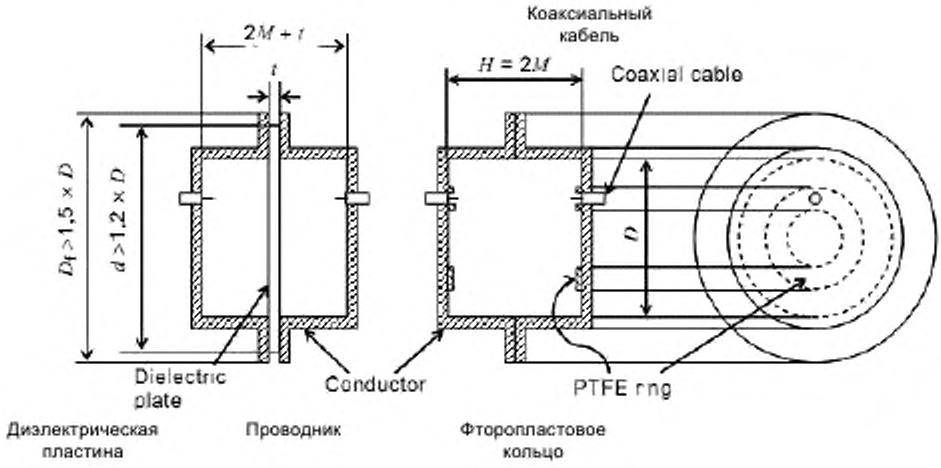



Рисунок 5 – Резонатор с диэлектрическим образцом (*а*) и без образца (*б*)

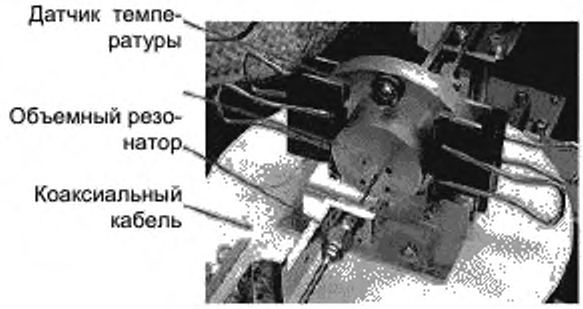



Рисунок 6 – Фото резонатора для измерений в области 10 ГГц

## 5 Выполнение измерений

### 5.1 Подготовка измерительной аппаратуры

Резонатор и диэлектрический образец хранят в чистом и сухом состоянии, так как высокая влажность ухудшает добротность резонатора. Относительная влажность не должна превышать 60 %.

Собирают измерительную установку согласно структурной схеме (рисунок 4).

### 5.2 Измерение опорного уровня

Сначала измеряют опорный уровень – уровень полной передачи мощности. Включают опорную линию в измерительный тракт и измеряют полный уровень передачи мощности во всем диапазоне измеряемых частот.

### 5.3 Измерение параметров объемного резонатора: $D$, $H$, $\sigma_r$, $\alpha_c$, $TK\rho$

Приближенные значения $f_1$ резонансной моды $TE_{011}$ и $f_2$ резонансной моды $TE_{012}$ можно определить из номограммы мод, приведенной на рисунке 7. Спектр резонансных частот резонатора при $D$ = 35 мм и $H$ = 25 мм приведен на рисунке 8.

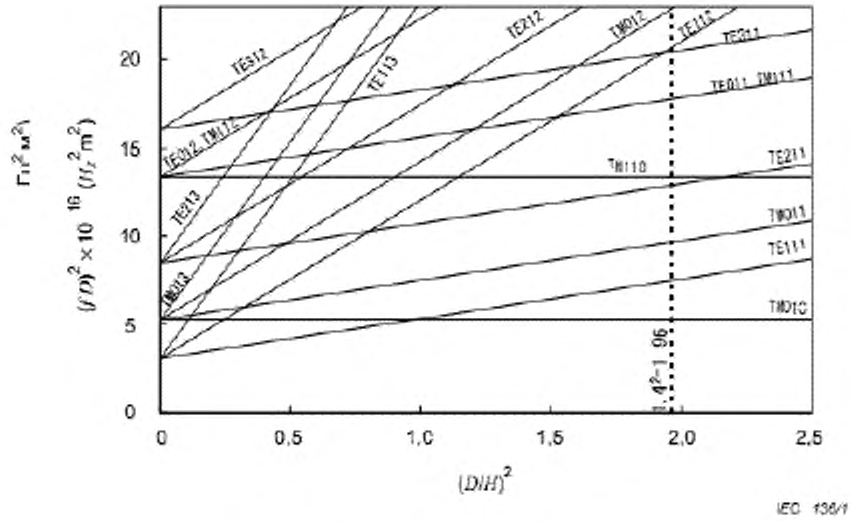



Рисунок 7 – Номограмма мод резонатора

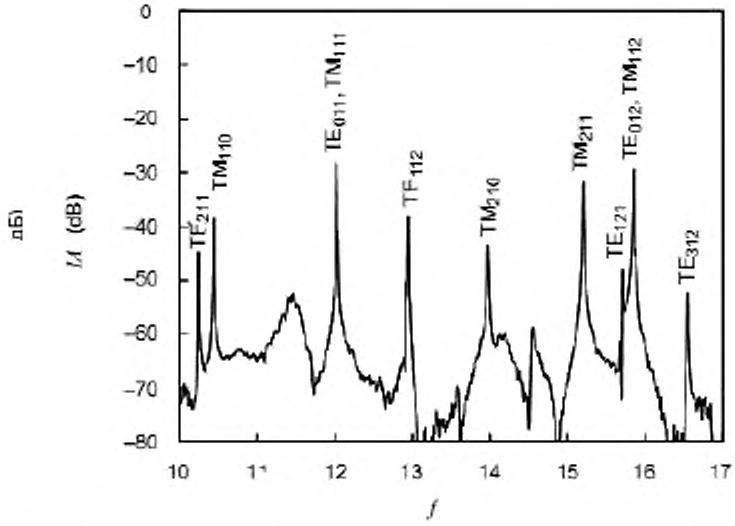
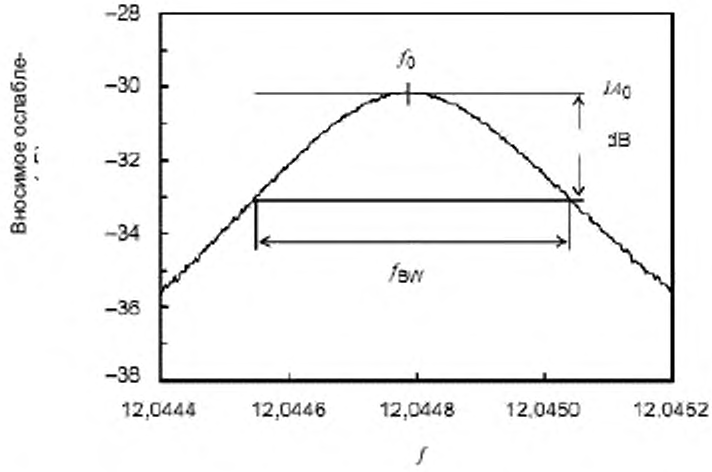



Рисунок 8 – Спектр резонансных частот резонатора

Для разделения вырожденных мод $TM_{111}$ и $TM_{112}$ от мод $TE_{011}$ и $TE_{012}$ в торцевые крышки резонатора вставляют кольца из фторопласта (PTFE), как показано на рисунке 5. Включают в тракт пустой резонатор и изменением расстояния между двумя полужесткими кабелями настраивают вносимое ослабление $IA_0$ так, чтобы оно было вблизи значения минус 30 дБ, как показано на рисунке 9.




$f_0$ – резонансная частота; $IA_0$ – вносимое ослабление; $f_{BW}$ – полоса пропускания на уровне половинной мощности

Рисунок 9 – График для определения добротности резонатора

змеряют резонансную частоту $f_1$, полосу пропускания на уровне половинной мощности $f_{BW}$ моды $TE_{011}$ и резонансную частоту $f_2$ моды $TE_{012}$. Рассчитывают собственную добротность пустого резонатора $Q_{uc}$ моды $TE_{011}$, используя выражение (30). Вычисляют размеры $D$, $H$ и значение $\sigma_r$ объемного резонатора, используя выражения (25), (26) и (28). Так как проводимость стенок объемного резонатора ухудшается из-за окисления металлической поверхности, значение $\sigma_r$ нуждается в периодическом уточнении. Далее измеряют температурную зависимость $f_1$ и $Q_{uc}$ резонатора, помещенного в термостат. Вычисляют $\alpha_c$ и $TK\rho$, используя выражения (27) и (29).

**5.4 Измерение комплексной диэлектрической проницаемости образца: $\varepsilon'$, $\mathrm{tg}\delta$**

Помещают образец между фланцами и фиксируют их с помощью зажимов, как показано на рисунке 6. Устанавливают примерное значение частоты $f_0$ моды $TE_{011}$, взятое из графика на рисунке 10. Затем измеряют значения $f_0$ и $Q_u$. Рассчитывают значения $\varepsilon'$ и $\mathrm{tg}\delta$, используя выражения с (4) по (17).

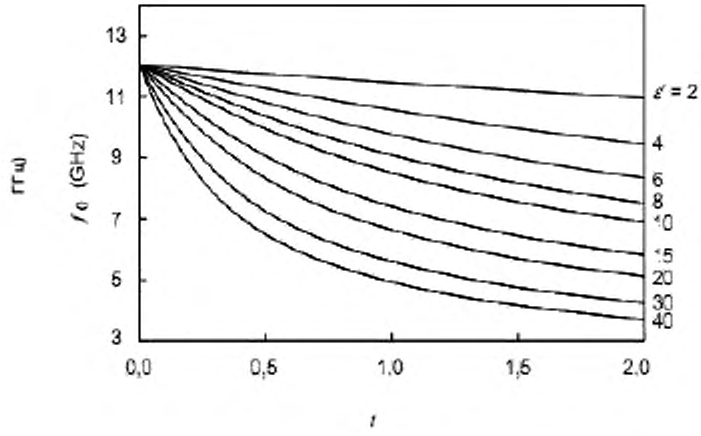



Рисунок 10 – Резонансная частота $f_0$ моды $TE_{011}$ резонатора с диэлектрической пластиной ($D$ = 35 мм, $H$ = 25 мм)

**5.5 Температурная зависимость $\varepsilon'$, $\mathrm{tg}\delta$**

Помещают резонатор с зафиксированной диэлектрической пластиной в термостат и измеряют $f_0$ и $Q_u$, как функции от температуры $T$. Рассчитывают $\varepsilon'$ и $\mathrm{tg}\delta$, как функции от $T$, учитывая $\alpha$, $\alpha_c$ и $TK\rho$. Затем вычисляют $TK\varepsilon$, используя выражение (3) или метод наименьших квадратов для большого количества измеряемых точек по $T$.

**Приложение А**
**(справочное)**

## Пример результата измерений и неопределенность

### А.1 Параметры резонатора

В таблице А.1 приведены результаты измерений параметров резонатора. Как показано в таблице, диаметр $D$ и высота $H$ резонатора могут быть определены с точностью до микрона при использовании расчета по частотам $f_1$ и $f_2$. Значение $\sigma_r$ зависит от качества поверхности и окисления материала внутренней стенки резонатора, поэтому желательно сохранять значение $\sigma_r$ выше 80% для достижения высокой точности при измерении $\mathrm{tg}\delta$.

Таблица А.1 – Результаты измерения параметров резонатора

| $f_1$, ГГц для $TE_{011}$ | $f_2$, ГГц для $TE_{012}$ | $Q_{uc}$ для $TE_{011}$ | $D$, мм | $H$, мм | $\alpha_c$, ppm/K | $\sigma_r$, % | $TK\rho$, 1/K |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 12,0456 ± 0,0002 | 15,936 ± 0,001 | 24256 ± 145 | 35,053 ± 0,001 | 24,884 ± 0,002 | 15,5 ± 0,3 | 84,4 ± 1,0 | 0,0034 ±0,0003 |

Измеренные результаты температурной зависимости $f_1$ и $Q_{uc}$ для пустого резонатора показаны на рисунке А.1. Значение $\alpha_c$ в таблице А.1 было определено из температурной зависимости $f_1$ с использованием выражения (27). Значение $TK\rho$ было определено из температурной зависимости $Q_{uc}$ с использованием выражения (29). В этих вычислениях $\Delta f_1/\Delta T$ и $\Delta\rho_r/\Delta T$ были определены по методу наименьших квадратов. Значения $\alpha_c$ близки к номинальному значению 16,5 ppm/K меди. Значения $TK\rho$ близки к номинальному значению $TK\rho$ =0,0039 1/K меди на постоянном токе.

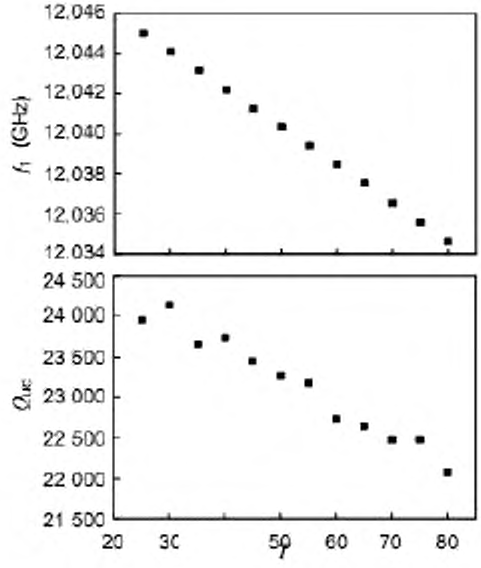



Рисунок А.1 –Температурная зависимость $f_1$ и $Q_{uc}$

### А.2 Относительная диэлектрическая проницаемость $\varepsilon'$ и $\mathrm{tg}\delta$

На рисунке А.2 показан спектр резонансных частот в резонаторе с зафиксированной сапфировой пластиной. В таблице А.2 приведены результаты измерений $\varepsilon'$ и $\mathrm{tg}\delta$ для сапфировой пластины толщиной $t$ = (0,958±0,002) мм при комнатной температуре. Значения $\varepsilon'$ – это перпендикулярная составляющая относительной диэлектрической проницаемости относительно оси С. Значения ошибки измерения $\Delta\varepsilon'$ и $\Delta\mathrm{tg}\delta$ рассчитаны по формулам (18) и (19). Главная составляющая $\Delta\varepsilon'$ – это неравномерность толщины образца.

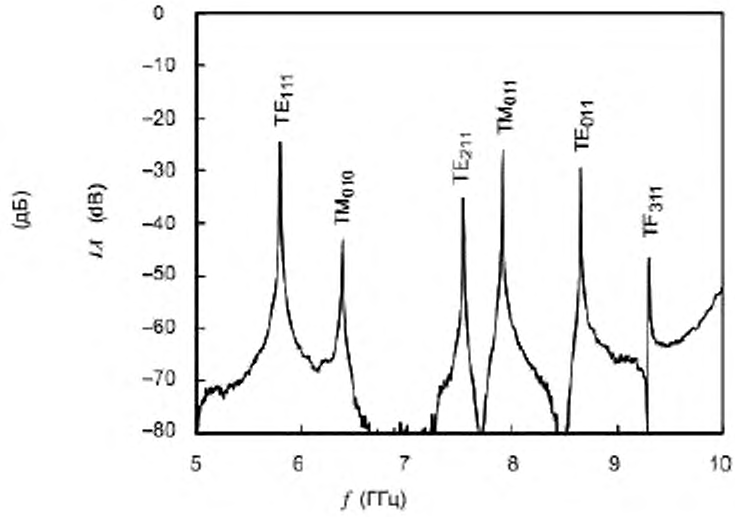



Рисунок А.2 – Спектр резонансных частот резонатора с сапфировой пластиной

Таблица А.2 – Результаты измерения $\varepsilon'$ и $\mathrm{tg}\delta$ сапфировой пластины

| $f_0$, ГГц | $Q_u$ | $\varepsilon'$ | $\mathrm{tg}\delta \cdot 10^5$ | $\sigma_r$, % |
|---|---|---|---|---|
| 8,7546 ± 0,0001 | 24043 ± 165 | 9,404 ± 0,017 | 0,91 ± 0,06 | 84,4 ± 1,0 |

На рисунке А.3 приведены результаты измерения температурной зависимости $f_0$, $Q_u$, $\varepsilon'$ и $\mathrm{tg}\delta$ для сапфировой пластины. Значение $\varepsilon'$ линейно увеличивается, значение $\mathrm{tg}\delta$ почти линейно увеличивается с повышением $T$. Из температурной зависимости $\varepsilon'$ от $T$ с использованием метода наименьших квадратов получено значение $TK\varepsilon$ =92 ppm/K.

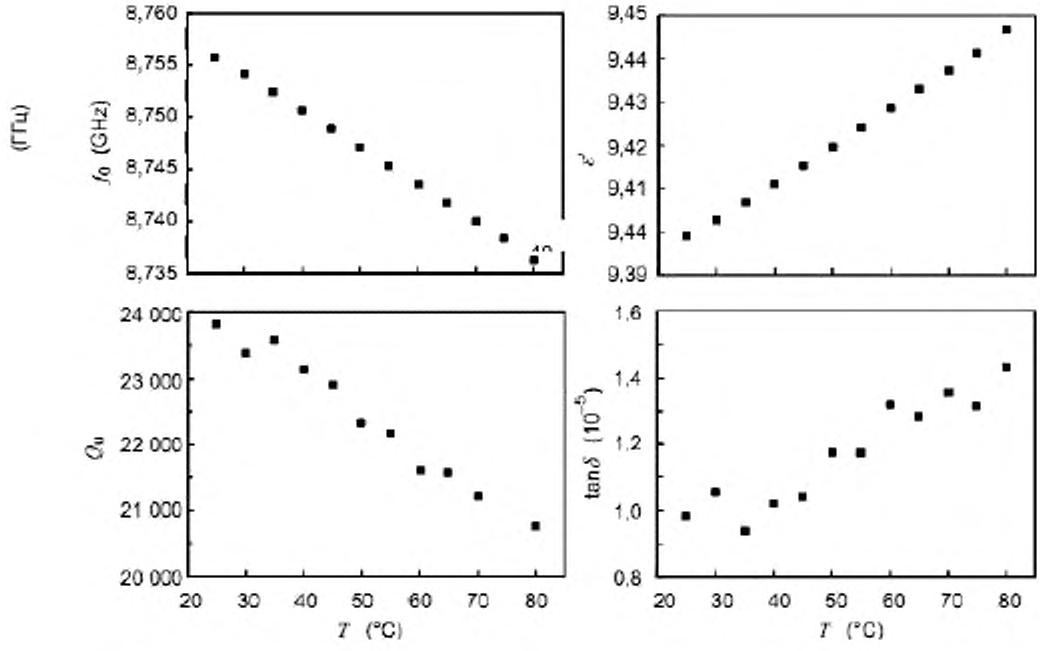



Рисунок А.3 – Температурная зависимость $f_0$, $Q_u$, $\varepsilon'$ и $\mathrm{tg}\delta$ сапфировой пластины

**А.3 Неопределенность измерений**

В [3] приведена неопределенность измерений для метода объемного резонатора 0,3 % для $\varepsilon'$, 4 % для $\mathrm{tg}\delta$ порядка $10^{-4}$ и 20 % для $\mathrm{tg}\delta$ порядка $10^{-5}$. Разрешение по $TK\varepsilon$ составляет 1 ppm/K для $TK\varepsilon$ порядка 10 ppm/K и 3 ppm/K для $TK\varepsilon$ порядка 90 ppm/K. Такие высокие точность измерений и разрешение приемлемы в большинстве практических применений для микроволновых печатных схем.

## Библиография

[1] *Kobayashi Y., Sato J.* Complex permittivity measurement of dielectric plates by a cavity resonance method. IEICE Technical Report, MW88-40, pp.43–50, Nov. 1988.

[2] *Kobayashi Y., Sato J.* Improved cavity resonance method for nondestructive measurement of complex permittivity of dielectric plate. Conf. of Precision. Electromagnetic Measurements. Digest, pp. 147–148, June 1988.

[3] *Kobayashi Y., Nakayama A.* Round Robin Test on a Cavity Resonance Method to Measure Complex Permittivity of Dielectric Plates at Microwave Frequency. IEEE Trans. Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 13, pp. 751–759, August 2006.

[4] *Kent G.* An evanescent-mode tester for ceramic dielectric substrates. IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 36, pp. 1451–1454, Oct. 1988.

[5] *Kent G.* Non destructive permittivity measurement of substrates. IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 45, pp. 102–106, Feb. 1996.

[6] *Kent G., Bell S.* The gap correction for the resonant-mode dielectrometer. IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 45, pp. 98–101, Feb. 1996.

[7] *Shimizu T., Kobayashi Y.* Cut-off circular waveguide method for dielectric substrate measurement in millimeter wave range. IEICE Trans., Electron, vol. E87-C, no. 5, May 2004.

УДК 339.14[083.96]:006.354 ОКС 17.220.20 Т86.8

Ключевые слова: диэлектрическая пластина, объемный резонатор, комплексная диэлектрическая проницаемость, относительная диэлектрическая проницаемость, тангенс угла диэлектрических потерь

Подписано в печать 01.09.2014. Формат 60x84 1/8.
Усл. печ. л. 2,33. Тираж 36 экз. Зак. 3216

Подготовлено на основе электронной версии, предоставленной разработчиком стандарта

ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ»
123995 Москва, Гранатный пер., 4.
www.gostinfo.ru gost.e-ecolog.ru

gost.e-ecolog.ru