

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по НР и инновациям



А.Г. Лоцилов



« 24 » декабря 2019 г.

Методика измерения относительной диэлектрической постоянной и тангенса угла диэлектрических потерь для фольгированных ламинатов в СВЧ диапазоне с помощью диэлектрического резонатора с разделенным стержнем

Согласовано

Руководитель ЦКП «Импульс»

 Н.Д. Малютин

« 24 » декабря 2019 г.

Томск 2019

1 Методика измерения относительной диэлектрической постоянной и тангенса угла диэлектрических потерь для фольгированных ламинатов в СВЧ диапазоне с помощью диэлектрического резонатора с разделенным стержнем

1.1 Введение

В настоящей методике описывается метод определения относительной диэлектрической проницаемости (ϵ_r) и тангенса угла диэлектрических потерь ($\tan\delta$) (в англоязычных источниках применяется терминология dielectric constant (Dk) и dissipation factor (Df) соответственно) для фольгированного ламината в СВЧ диапазоне (1,1 ГГц – 20 ГГц) при помощи диэлектрического резонатора с разделенным стержнем (ДРРС).

Данная методика применима к фольгированным ламинатам, керамическим подложкам и другим диэлектрическим материалам, применяемым в радиоэлектронной промышленности.

1.2 Требования к исследуемым образцам

1.2.1 Размер образца

Размер исследуемого образца должен быть больше, чем внутренний диаметр D металлического корпуса ДРРС, максимальная толщина образца не должна превышать толщины щели в металлическом корпусе h_g (см. рис. 1).

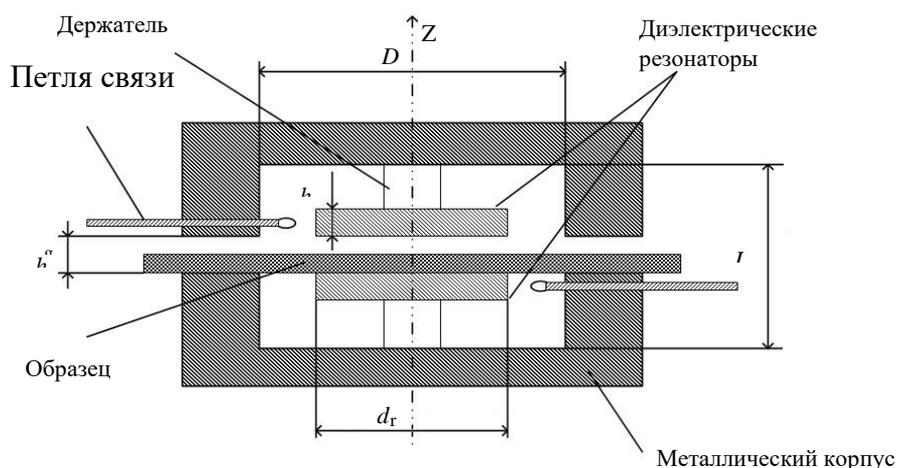


Рисунок 1 – Схема измерительной оснастки ДРРС

где

h_g – расстояние между металлическим корпусом и оснасткой;

D – внутренний диаметр металлического корпуса;

L – внутренняя высота металлического корпуса;

d_r – диаметр диэлектрического резонатора;

h_r – толщина диэлектрического резонатора.

Под каждый вид ДРПС требуется не менее трех образцов для проведения измерений при комнатной температуре и один образец для измерений в диапазоне температур. В таблице 1 представлены размеры образцов для имеющихся резонаторов

Таблица 1 – Размеры образцов

Рабочая частота ДРПС, ГГц	Рекомендуемые размеры образца, мм	Максимальная толщина образца, мм
1,1	150 × 150	6,0
3	80 × 80	3,0
5 - 6	80 × 80	2,0
9 - 10	80 × 80	0,9
13 - 16	50 × 35	0,6
18 - 20	15 × 15	0,5

Также возможно использование образцов с размерами, отличными от приведенных в таблице 1 (размер исследуемого образца должен быть больше чем внутренний диаметр D , см. табл. 2). Например, образец размером 130×130 мм может использоваться для ДРПС с частотой 1,1 ГГц.

1.2.2 Подготовка исследуемых образцов

Для исследуемых образцов из фольгированных ламинатов все медные покрытия должны быть удалены путем травления. Поверхность должна быть тщательно очищена.

1.2.3 Маркировка исследуемых образцов

Каждый образец может быть промаркирован в верхнем левом углу с помощью карандаша или любым другим способом, не нарушающим целостность исследуемого материала.

1.2.4 Толщина исследуемых образцов

В пределах ограничений конкретной измерительной оснастки при выборе образцов с большей толщиной можно получить меньшую погрешность измерений. Тонкие образцы могут быть сложены стопкой (друг на друга) для достижения минимальной толщины в 0,4 мм, необходимой для хорошей точности измерений.

Примечание: Воздушный промежуток между измеряемым образцом и оснасткой не влияет на результат измерений.

1.3 Требования к измерительному оборудованию

1.3.1 Общие сведения

На рисунке 2 показаны схемы измерительных стендов для проведения исследований.

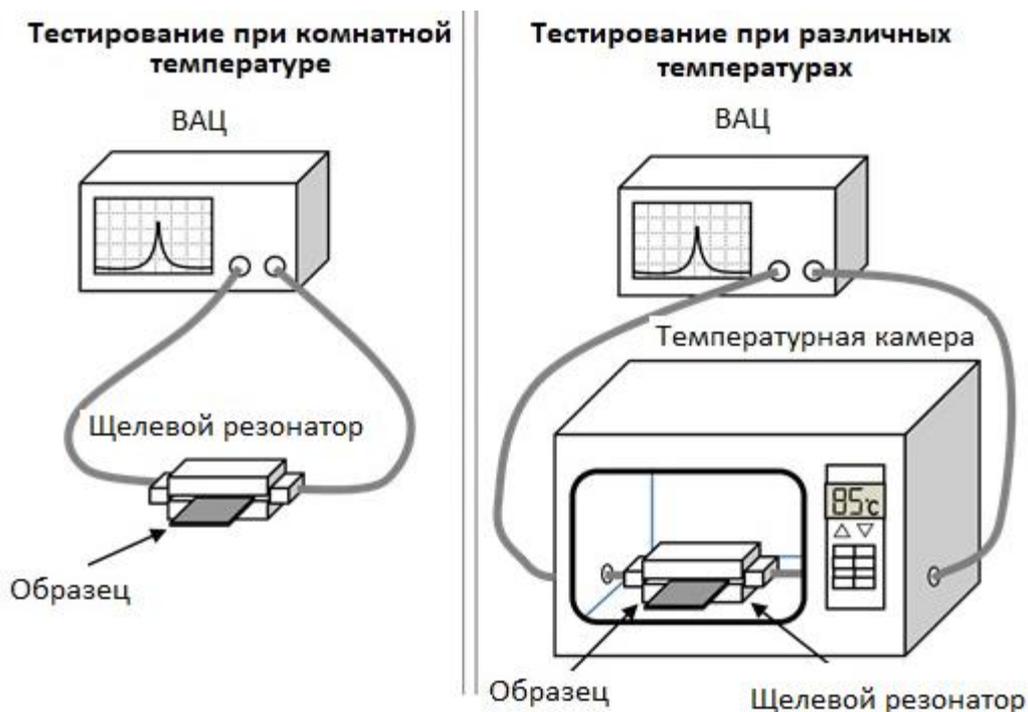


Рисунок 2 – Схема измерительных стендов

1.3.2 Требования к векторному анализатору цепей

Векторный анализатор цепей (ВАЦ) должен обладать следующими параметрами:

- Частотный диапазон ВАЦ: от 500 МГц до 20 ГГц.
- Динамический диапазон ВАЦ должен быть более 60 дБ.

1.3.3 Описание измерительной оснастки ДРПС

Схема измерительной оснастки ДРПС приведена на рис. 1. В таблице 2 приведены соотношения между номинальной частотой и параметрами ДРПС h_g и D .

Для проведения исследований на различных рабочих частотах необходимо использовать ДРПС с соответствующей рабочей частотой.

Таблица 2 – Параметры измерительной оснастки ДРПС

Рабочая частота ДРПС, ГГц	D , мм	h_g , мм
1,1	120	6,0
3	50	3,0
5 до 6	30	2,0
9 до 10	22	0,9
13 до 16	15	0,6
18 до 20	10	0,5

1.3.4 Процедура верификации

Для проведения верификации необходимы следующие компоненты:

- а) Стандартный образец (эталон), например, монокристаллический кварц или эквивалентный образец.
- б) Поверенный ВАЦ.

1.3.5 Требования к микрометру

Разрешение микрометра, используемого для измерения толщины образцов, должно составлять 0,001 мм или меньше.

1.3.6 Требования к циркуляционной печи

Циркуляционная печь с возможностью поддержания фиксированной температуры 105^{+5}_{-2} °С.

1.3.7 Требования к климатической камере

Для проведения исследований образцов в диапазоне температур климатическая камера должна обладать следующими характеристиками:

- а) Температурный диапазон: -125 °С до $+110$ °С, другой температурный диапазон согласовывается между пользователем и поставщиком климатической камеры.
- б) Точность установки температуры: ± 1 °С.

1.4 Проведение измерений

1.4.1 Подготовка к измерениям

Все образцы должны быть выдержаны при температуре $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ и относительной влажности $(50 \pm 5) \%$ не менее 24 часов до начала измерений. Однако, если образец недавно был подвергнут травлению или чрезмерному воздействию влаги, то его следует высушить в сушильном шкафу с циркуляцией воздуха в течение 2 часов при температуре $105^{+5}_{-2} ^\circ\text{C}$, затем выдержать в условиях, упомянутых выше.

1.4.2 Измерение относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь при комнатной температуре

1.4.2.1 Условия проведения измерений

Температура для проведения измерений при комнатной температуре должна быть в пределах $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$. Перепад температур в ходе проведения измерений не должен превышать $1 ^\circ\text{C}$.

1.4.2.2 Подготовка к измерениям

Необходимо прогреть ВАЦ в течении 30 мин для стабилизации внутренних процессов.

1.4.2.3 Подготовка измерительной оснастки

Необходимо выбрать нужный ДРРС в соответствии с требуемой частотой для измерений. Размеры и толщина образца должны удовлетворять требованиям, приведенным в таблице 1. Например, если частота для проведения измерений 10 ГГц, то измерительная оснастка ДРРС должна быть выбрана с рабочей частотой 10 ГГц. Рекомендуемый размер образца для данного ДРРС 80 мм × 80 мм, при этом максимальная толщина образца не должна превышать 0,9 мм.

1.4.2.4 Подключение ВАЦ

Подключите измерительную оснастку ДРРС к ВАЦ. При этом положение измерительной оснастки должно быть горизонтальным.

1.4.2.5 Установка параметров ВАЦ

Установите настройки ВАЦ в соответствии с инструкцией производителя и рабочей частотой ДРРС.

1.4.2.6 Измерение резонансной частоты и собственной добротности резонатора

Провести измерение значения резонансной частоты (f_0) и собственной добротности резонатора без образца (Q_0).

Уровень резонансного пика должен находиться между -40 dB и -45 dB; выполнения данного условия можно добиться, регулируя положение петель связи, они должны располагаться симметрично.

При измерении добротности частотный диапазон ВАЦ должен быть выставлен таким образом, чтобы он составлял 110-200% от полной ширины резонансной кривой на уровне половины максимума.

1.4.2.7 Измерение толщины образца

Провести измерение толщины образца при помощи микрометра, занести результаты измерений в протокол в графу для величины h .

1.4.2.8 Установка исследуемого образца

Установить исследуемый образец в измерительную оснастку. Сторона образца с маркировкой должна быть обращена вверх, край этой стороны должен быть выровнен с краем крепления измерительной оснастки.

1.4.2.9 Измерение частоты и добротности с образцом

Провести измерение резонансной частоты (f_s) и добротности резонатора (Q_s) вместе с образцом.

1.4.2.10 Сравнение результатов

На рисунке 3 представлен примерный вид графиков измерения резонансной частоты с образцом и без образца.

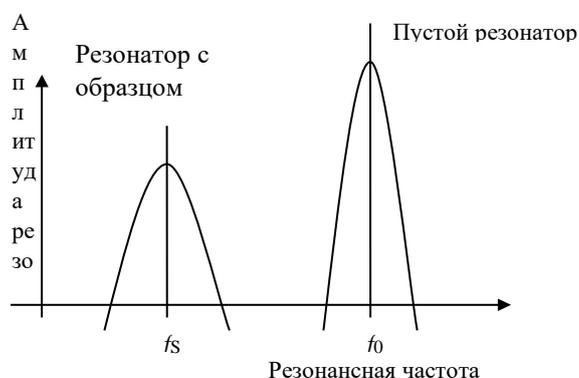


Рисунок 3 – Графики измерения резонансной частоты с образцом и без

1.4.2.11 Расчет значений

Для вычисления относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь при комнатной температуре рекомендуется использовать программное обеспечение, предоставляемое поставщиком оборудования.

Относительная диэлектрическая проницаемость.

Относительная диэлектрическая проницаемость (ϵ_r) вычисляется согласно уравнению (1).

$$\epsilon_r = 1 + \frac{f_0 - f_s}{hf_0 K_\epsilon(\epsilon_r, h)}, \quad (1)$$

где

- ϵ_r – относительная диэлектрическая проницаемость;
- h – толщина исследуемого образца в мм;
- f_0 – резонансная частота пустого резонатора;
- f_s – резонансная частота резонатора с диэлектрическим образцом;
- $K_\epsilon(\epsilon_r, h)$ – функция переменных ϵ_r и h . Для ее определения необходимо знать физические параметры каждого резонатора (размер, диэлектрическая проницаемость ϵ_r). $K_\epsilon(\epsilon_r, h)$ предварительно вычисляется и заносится в таблицу с помощью метода электромагнитного моделирования Релея-Ритца. В формулу 1 необходимо подставить резонансную частоту пустого резонатора (f_0), резонансную частоту резонатора с образцом (f_s) и толщину образца (h). Подставьте произвольное значение относительной диэлектрической проницаемости образца, далее воспользуйтесь аппроксимационным алгоритмом. После нескольких итераций завершите вычисление, когда относительная погрешность двух последних измеренных относительных диэлектрических проницаемостей не будет превышать 0,1 %. Последнее значение диэлектрической проницаемости, полученное после итераций и будет диэлектрической проницаемостью образца. Дополнительная информация представлена в Приложении В.

Тангенс угла диэлектрических потерь.

Тангенс угла диэлектрических потерь вычисляется согласно формуле (2).

$$\tan\delta = \frac{(Q_s^{-1} - Q_{DR}^{-1} - Q_C^{-1})}{p_{es}}, \quad (2)$$

где

- $\tan\delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь;
- Q_s – ненагруженная добротность резонатора вместе с образцом;

- Q_c – добротность резонатора с образцом обусловленная потерями в металле;
- Q_{DR} – добротность резонатора с образцом, обусловленная диэлектрическими потерями;
- p_{es} Коэффициент заполнения электромагнитной энергии образца. После определения физических параметров резонатора коэффициент заполнения электромагнитной энергии p_{es} может быть определен ЭМ моделированием. Для фиксированного объемного резонатора, p_{es} является постоянной величиной. Дополнительная информация представлена в Приложении В.

1.4.2.12 Смена образцов

Провести измерение двух оставшихся образца, повторяя пункты 1.4.2.6 – 1.4.2.11 настоящей методики.

1.4.2.13 Изменение рабочей частоты проведения исследований

Если выбрана другая рабочая частота, то необходимо заменить резонатор в соответствии с требуемой частотой. Затем повторить пункты 1.4.2.3 – 1.4.2.12 настоящей методики.

1.4.3 Измерение относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь в диапазоне температур

1.4.3.1 Условия проведения измерений

Температура окружающей среды должны быть (23 ± 2) °С. Перепад температур в ходе проведения измерений не должен превышать 1 °С.

1.4.3.2 Подготовка к измерениям

Необходимо прогреть ВАЦ в течении 30 мин для стабилизации внутренних процессов.

1.4.3.3 Подготовка измерительной оснастки

Необходимо выбрать нужный ДРРС в соответствии с требуемой рабочей частотой. Размеры и толщина образца должны удовлетворять требованиям, приведенным в таблице 1. Например, если частота для проведения измерений 10 ГГц, то измерительная оснастка ДРРС должна быть выбрана с рабочей частотой 10 ГГц. Рекомендуемый размер образца для данного ДРРС 80 мм × 80 мм, при этом максимальная толщина образца не должна превышать 0,9 мм.

1.4.3.4 Подключение ВАЦ

Подключите измерительную оснастку ДРРС к ВАЦ. При этом положение измерительной оснастки должно быть горизонтальным.

1.4.3.5 Установка параметров ВАЦ

Установите настройки ВАЦ в соответствии с инструкцией производителя и рабочей частотой ДРРС.

1.4.3.6 Настройка климатической камеры

Установите рабочую температуру в климатической камере. Удерживайте заданную температуру по меньшей мере 15 мин после достижения заданного значения (T).

1.4.3.7 Измерение резонансной частоты и собственной добротности резонатора

Измерьте резонансную частоту $f_0(T)$ и добротность $Q_0(T)$ резонатора без образца.

Уровень резонансного пика должен находиться между -40 dB и -45 dB; данного условия можно добиться, регулируя положение петель связи, они должны располагаться симметрично.

При измерении добротности частотный диапазон ВАЦ должен быть отрегулирован таким образом, чтобы он составлял 110-200% от полной ширины на половине максимума резонансной кривой.

1.4.3.8 Измерение толщины образца

Провести измерение толщины образца при помощи микрометра, занести результаты измерений в протокол в графу для величины h .

1.4.3.9 Установка исследуемого образца

Климатическая камера должна быть настроена на комнатную температуру. Вставьте измеряемый образец в измерительную оснастку. Сторона образца с маркировкой должна быть обращена вверх, край верхней стороны должен быть выровнен с краем крепления испытательной установки.

1.4.3.10 Измерение частоты и добротности с образцом

Выполнить пункт 1.4.3.6. Измерить резонансную частоту $f_s(T)$ и добротность $Q_s(T)$ резонатора с образцом при температуре T .

При измерении добротности частотный диапазон ВАЦ должен быть отрегулирован таким образом, чтобы он составлял 110-200% от полной ширины на половине максимума резонансной кривой.

1.4.3.11 Расчет значений

Вычислите относительную диэлектрическую проницаемость $Dk(T)$ и тангенса угла потерь $Df(T)$ при температуре T согласно пункту 1.4.2.11.

1.4.3.12 Дополнения

При анализе образцов при другой температуре повторите шаги 1.4.3.6 – 1.4.3.11.

1.4.3.13 Расчет температурного коэффициента

Температурный коэффициент относительной диэлектрической проницаемости и температурный коэффициент тангенса угла диэлектрических потерь.

Относительная диэлектрическая проницаемость.

Температурный коэффициент относительной диэлектрической проницаемости ϵ_r ($TC\epsilon_r$) отображает скорость изменения относительной диэлектрической проницаемости при изменении температуры. $TC\epsilon_r$ измеряется в $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. Как правило, относительная диэлектрическая проницаемость при комнатной (основной) температуре T_{ref} в 23°C используется в качестве основного значения относительной диэлектрической проницаемости $Dk(T_{\text{ref}})$. Для температуры T , $TC\epsilon_r$ должна быть вычислена согласно уравнению (3).

$$TC\epsilon_r = \frac{Dk(T) - Dk(T_{\text{ref}})}{(T - T_{\text{ref}}) * Dk(T_{\text{ref}})}, \quad (3)$$

где

$TC\epsilon_r$ Температурный коэффициент ϵ_r , $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$;

T Заданная температура, в $^{\circ}\text{C}$;

T_{ref} Комнатная температура (основная), в $^{\circ}\text{C}$;

$Dk(T)$ Относительная диэлектрическая проницаемость при температуре T

$Dk(T_{\text{ref}})$ Относительная диэлектрическая проницаемость при температуре T_{ref} .

Тангенс угла диэлектрических потерь

Температурный коэффициент тангенса угла диэлектрических потерь ($TC \tan\delta$) описывает скорость изменения тангенса угла диэлектрических потерь в зависимости от температуры (с увеличением или уменьшением на 1°C). $TC \tan\delta$ измеряется в $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. Как правило, тангенс угла диэлектрических потерь образца при комнатной (основной)

температуре $T_{ref} = 23 \text{ }^\circ\text{C}$ используется в качестве основного значения тангенса угла диэлектрических потерь $Df(T_{ref})$. При температуре T , $TC \tan\delta$ вычисляется по формуле (4).

$$TC \tan\delta = \frac{Df(T) - Df(T_{ref})}{(T - T_{ref}) * Df(T_{ref})}, \quad (4)$$

где

$TC \tan\delta$ – Температурный коэффициент тангенса угла диэлектрических потерь, ppm/ $^\circ\text{C}$;

T – Заданная температура, $^\circ\text{C}$;

T_{ref} – Комнатная (основная) температура, $^\circ\text{C}$;

$Df(T)$ – Тангенс угла диэлектрических потерь при температуре T ;

$Df(T_{ref})$ – Тангенс угла диэлектрических потерь при температуре T_{ref} .

1.4.3.14 Изменение рабочей частоты проведения исследований

Если требуется провести измерения на другой рабочей частоте, то необходимо заменить резонатор в соответствии с требуемой частотой. Повторить пункты 1.4.3.3 – 1.4.3.13.

1.5 Составление протоколов испытаний

1.5.1 При проведении измерений для комнатной температуры

В протоколе испытаний при проведении измерений при комнатной температуре необходимо привести следующую информацию:

- а) Указать соответствующие условия окружающей среды при которых проводятся измерения (температура, влажность);
- б) Указать частоту, при которой проводились измерения;
- в) Привести средние значения относительной диэлектрической проницаемости и тангенса диэлектрических потерь на тестируемой частоте;
- г) Описать подготовку образцов к эксперименту;
- д) Указать возможные отклонение от нормы при проведении измерений.

1.5.2 При проведении измерений в диапазоне температур

В протоколе испытаний при проведении измерений необходимо отразить следующую информацию:

- а) Указать рабочую и комнатную (основную) температуры (T), (T_{ref});
- б) Указать рабочую частоту;

- в) Значения $Dk(T)$ и $Df(T)$ при рабочей температуре (T);
- г) Указать значения величин TC_{ϵ_r} и $TC \tan\delta$;
- д) Указать значения $Dk(T_{ref})$ и $Df(T_{ref})$;
- е) Если необходимо провести эксперимент при более чем одной рабочей температуре, то необходимо получить диаграмму кривых для относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь в соответствии с изменением температуры;
- ж) Описать подготовку образцов к эксперименту;
- з) Отметить возможные отклонения от нормы при проведении измерений.

1.6 Дополнительная информация

1.6.1 Анализ погрешностей

Погрешность измерения диэлектрических параметров образца толщиной h может быть определена из следующих соотношений:

Погрешность измерения относительной диэлектрической проницаемости: $\Delta\epsilon/\epsilon = \pm(0,0015 + \Delta h/h)$.

Погрешность измерения тангенса удельных потерь: $\Delta \tan\delta = \pm 2 \times 10^{-5}$ или $\pm 0,03 \tan\delta$.

1.6.2 Техническое обслуживание

Необходимо регулярно очищать от грязи и пыли разъемы, тестируемые образцы и измерительный стенд.

1.6.3 Дополнительные рекомендации

Для предотвращения повреждений измерительной оснастки при проведении экспериментов в диапазоне температур необходимо регулярно верифицировать измерительный стенд при помощи стандартного образца. В качестве стандартного образца может быть использован монокристалл кварца толщиной 0,4 мм.

Отклонение между измеренным значением относительной диэлектрической проницаемости испытуемого образца и номинальным значением для стандартного образца должно быть в пределах $\pm 0,7 \%$, значение для отклонения тангенса угла диэлектрических потерь должно быть в пределах $\pm 2 \times 10^{-5}$.

1.6.4 Измерительная оснастка и полученные результаты. Дополнительная информация

Примеры измерительной оснастки и получаемых результатов измерений приведены в Приложении А.

1.6.5 $K_{\varepsilon}(\varepsilon, h)$ и p_{es} . Дополнительная информация

Дополнительная информация о величинах $K_{\varepsilon}(\varepsilon, h)$ и p_{es} представлена в Приложении Б.

Приложение А (информационное). Примеры измерительной оснастки и результатов измерений

А.1 Пример измерительной оснастки

На рисунке А.1 представлен внешний вид измерительной оснастки ДРРС для частоты 5 ГГц. Для соединения коаксиального кабеля ВАЦ и измерительной оснастки резонатора используется переходник типа female-to-female 3,5 мм.

Для регулировки значения коэффициента связи измерительная оснастка ДРРС оснащена двумя петлями связи. Максимальная толщина образца в данном эксперименте составляет 2 мм.

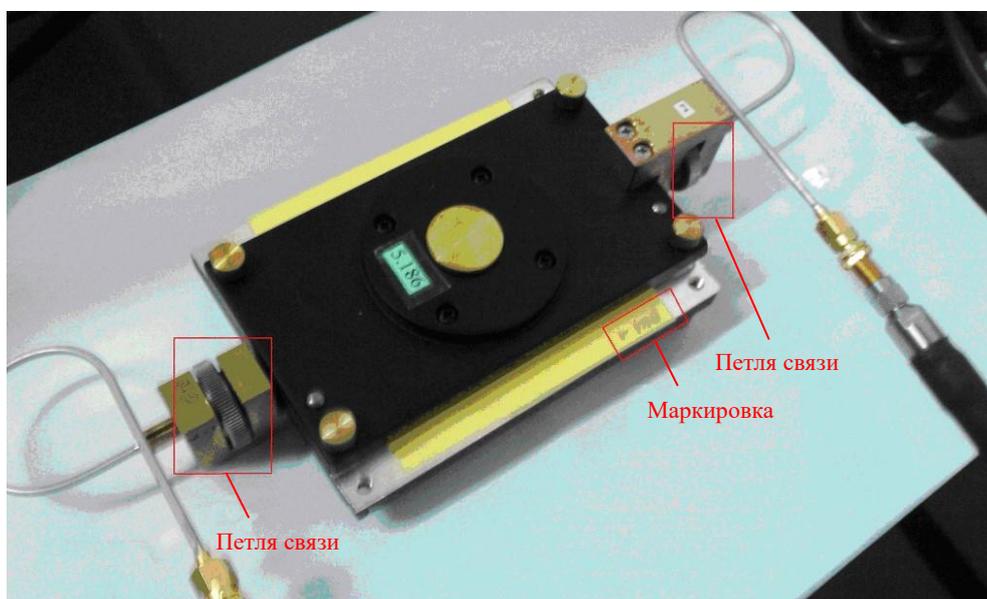


Рисунок А.1 – Измерительная оснастка

А.2 Результаты измерений. Пример

На рисунках А.2 – А.3 представлены типовые результаты измерения относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь в СВЧ диапазоне (от 1,1 ГГц до 19 ГГц) для фольгированного СВЧ ламината со значением относительной диэлектрической проницаемости $\epsilon_r = 3,8$. На рисунке А.4 приведены графики значений относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь при различных температурах ($-125\text{ }^\circ\text{C}$ – $110\text{ }^\circ\text{C}$) для данного материала.

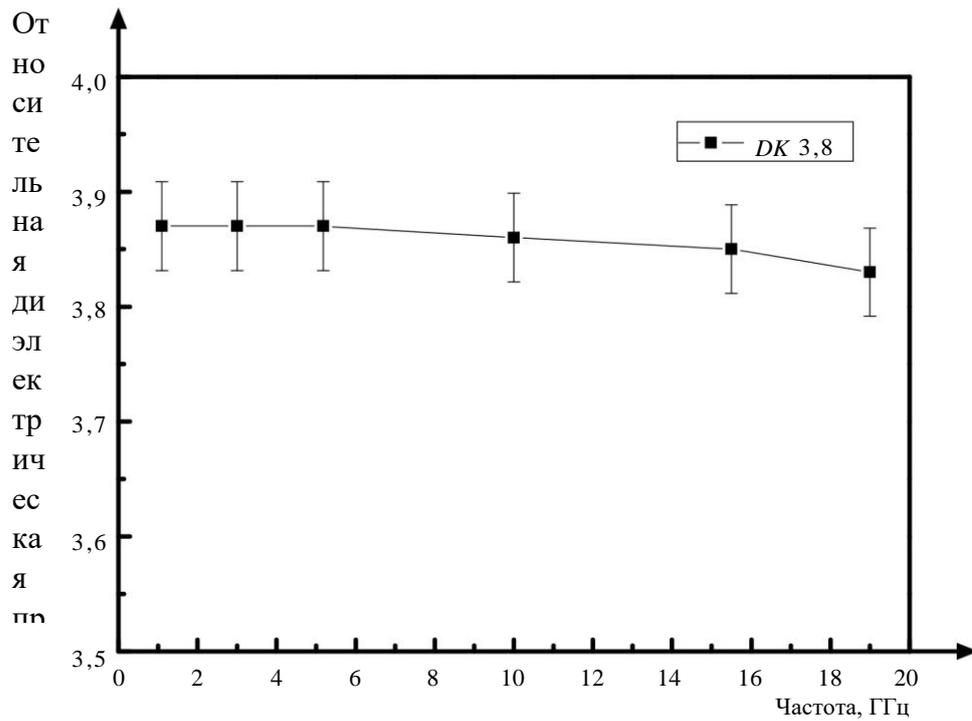


Рисунок А.2 – Зависимость относительной диэлектрической проницаемости от частоты (ламинат, D_k 3,8 и толщиной 0,51 мм)

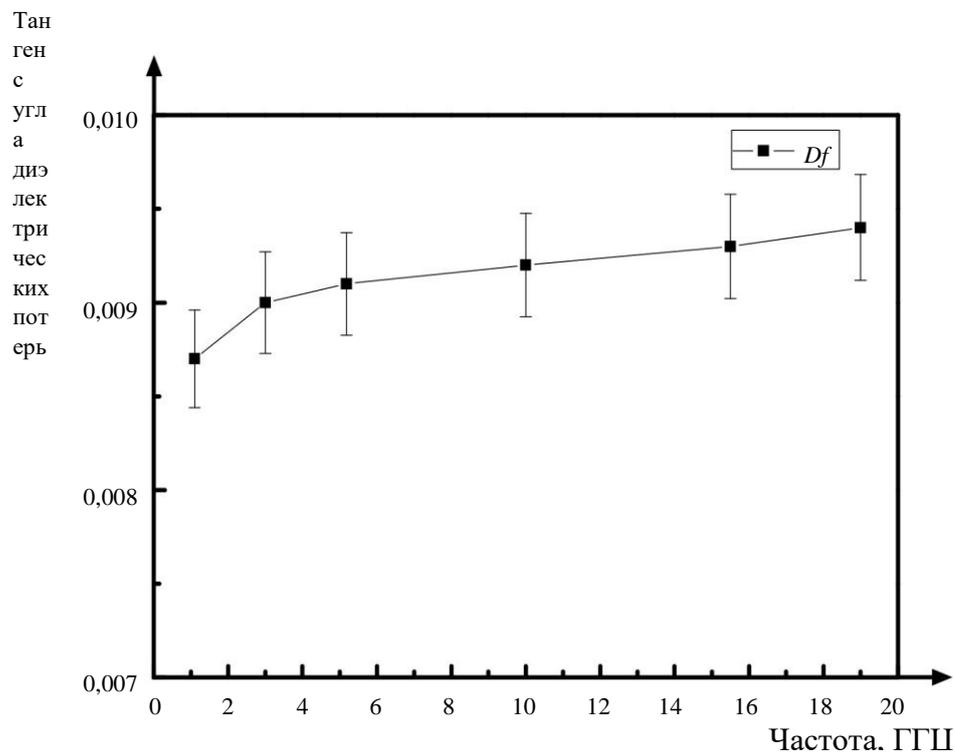


Рисунок А.3 – Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь в зависимости от частоты (Ламинат, D_k 3,8 с толщиной 0,51 мм)

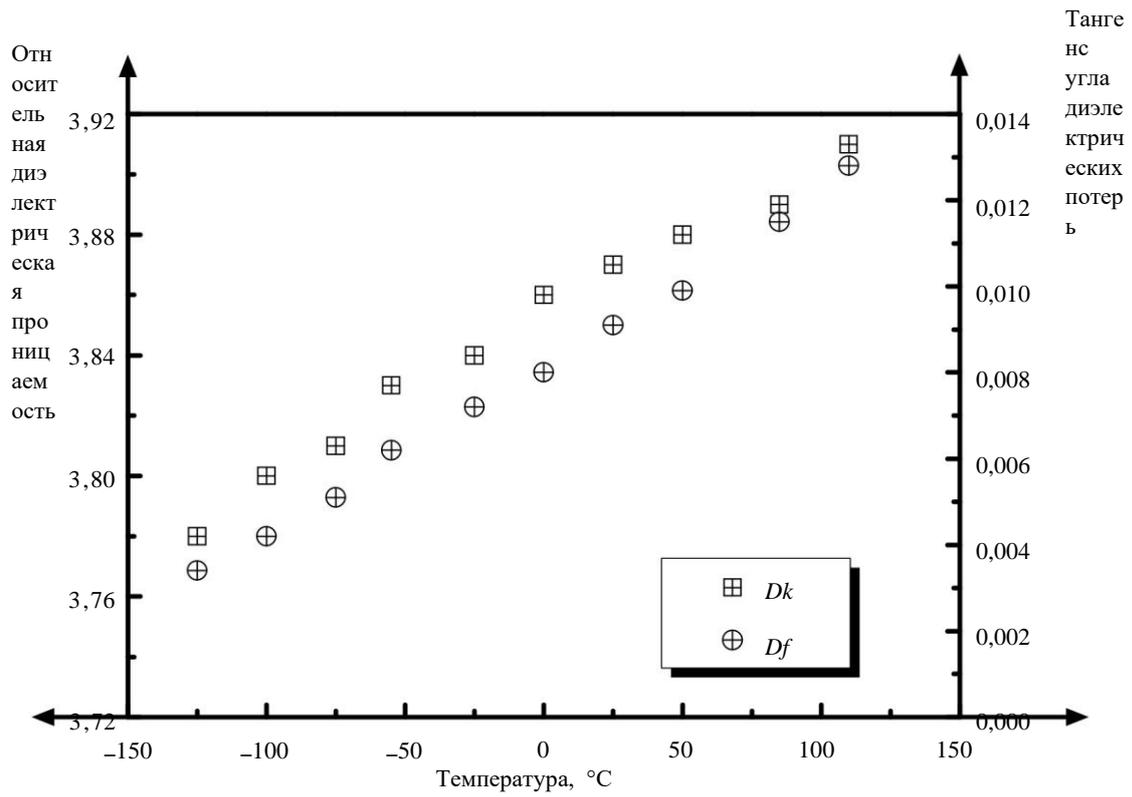


Рисунок А.4 – Зависимость относительной диэлектрической постоянной и тангенса угла диэлектрических потерь от температуры (Ламинат, D_k 3,8 с толщиной 0,51 мм)

Приложение Б (информационное). Дополнительные сведения о параметрах $K_\epsilon(\epsilon_r, h)$ и p_{es}

Значение $K_\epsilon(\epsilon_r, h)$ для измерительной оснастки с заданными значениями ϵ_r и h определяется согласно формуле В1.

$$K_\epsilon(\epsilon_r, h) = \frac{f_0 - f_s}{(\epsilon_r - 1)hf_0}, \quad (\text{Б. 1})$$

Значение функции $K_\epsilon(\epsilon_r, h)$ вычисляется отдельно для каждой конкретной измерительной оснастки ДРРС. Точные резонансные частоты и результирующие значения $K_\epsilon(\epsilon_r, h)$ вычисляются согласно значениям ϵ_r и h и заносятся в таблицу. Для других значений ϵ_r и h , значение $K_\epsilon(\epsilon_r, h)$ может быть получено интерполяционным методом. Начальное значение $K_\epsilon(\epsilon_r, h)$ может быть выведено из уравнения 1 для заданных значений h и $\epsilon_r = 1$. Значения $K_\epsilon(\epsilon_r, h)$ соответствующие последующим значениям ϵ_r могут быть найдены путем итерационной процедуры. Т.к. $K_\epsilon(\epsilon_r, h)$ – медленно изменяющаяся функция переменных ϵ_r и h , итерации, использующие уравнение (1) имеют быструю сходимость. Значения $K_\epsilon(\epsilon_r, h)$ в зависимости от ϵ_r и h для 10 ГГц представлены на рисунке Б.1.

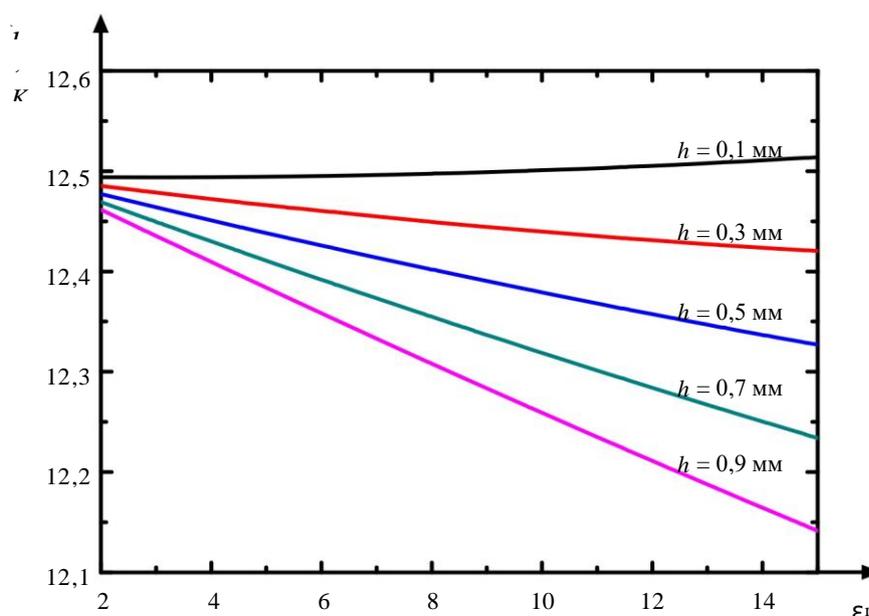


Рисунок Б.1 – Значения $K_\epsilon(\epsilon_r, h)$ в зависимости от относительной диэлектрической проницаемости и толщины образца

Для заданной резонансной структуры значение p_{es} для фиксированных величин ϵ'_r и h может быть вычислено по формуле (Б.2):

$$p_{es} = h\epsilon'_r * K_1(\epsilon'_r, h), \quad (\text{Б. 2})$$

где

ϵ'_r – относительная диэлектрическая проницаемость;

h – толщина образца, мм;

$K_1(\epsilon'_r, h)$ – функция переменных ϵ'_r и h .

Метод Рэлея-Ритца позволяет вычислить значение p_{es} для заданной резонансной структуры. Множество значений p_{es} может быть вычислено для ряда значений h и ϵ'_r .

На рисунках Б2-Б3 показано распределение E- компоненты ЭМ поля для 10 ГГц пустого (без образца) ДРРС с параметрами $D = 16,5$ мм, $L = 9$ мм, $d_r = 8$ мм, $h_r = 1$ мм, $h_g = 1$ мм и относительной диэлектрической проницаемостью = 3.8.

На рисунке Б.4 приведены значения p_{es} в зависимости от значений относительной диэлектрической проницаемости для образцов разной толщины.

В таблице Б.1. приведены параметры 10 ГГц ДРРС с различными образцами.

Таблица Б.1 – Результаты измерений характеристик различных материалов, полученные при использовании 10 ГГц ДРРС

Dk	Df	Толщина, мм	p_{es}	$K_\epsilon (\epsilon_r, h)$	Q_c	Q_{DR}	Материал
2,05	0,0003	0,3	$8,3 \times 10^{-4}$	12,477	$> 10^5$	16 000	PTFE
3,0	0,0030	0,3	$1,2 \times 10^{-3}$	12,412	$> 10^5$	16 000	Low-Dk FR4
3,8	0,0090	0,3	3×10^{-3}	12,364	$> 10^5$	16 000	Low-loss FR4
4,5	0,0150	0,3	$4,2 \times 10^{-3}$	12,332	$> 10^5$	16 000	Halogen-free FR4

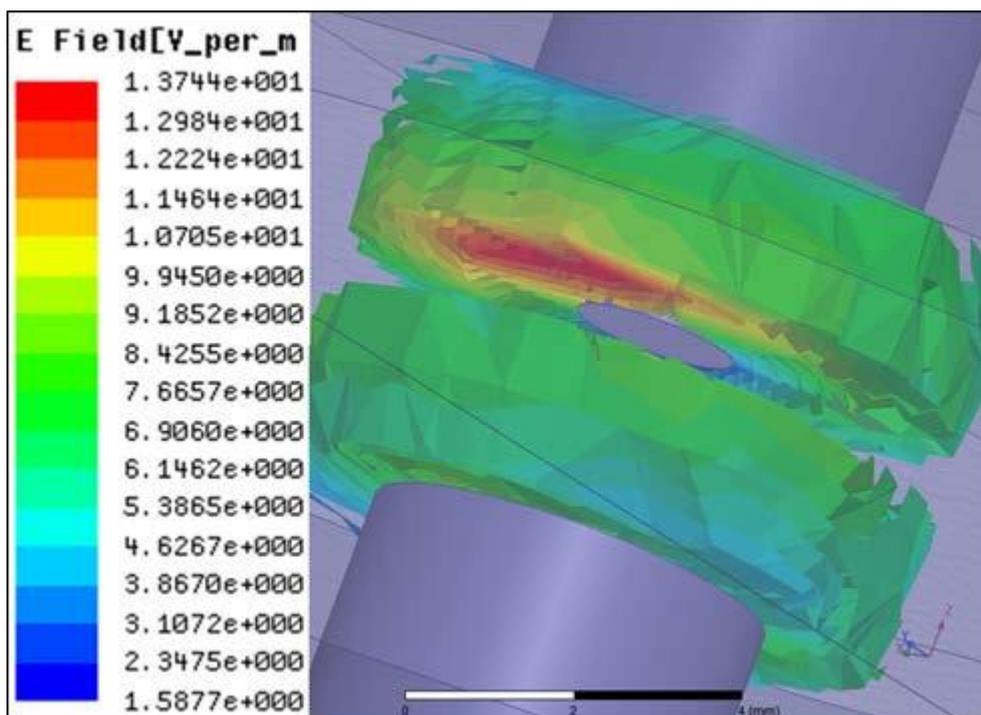


Рисунок Б.2 – Распределение электрического поля в ДРРС (вид сбоку)

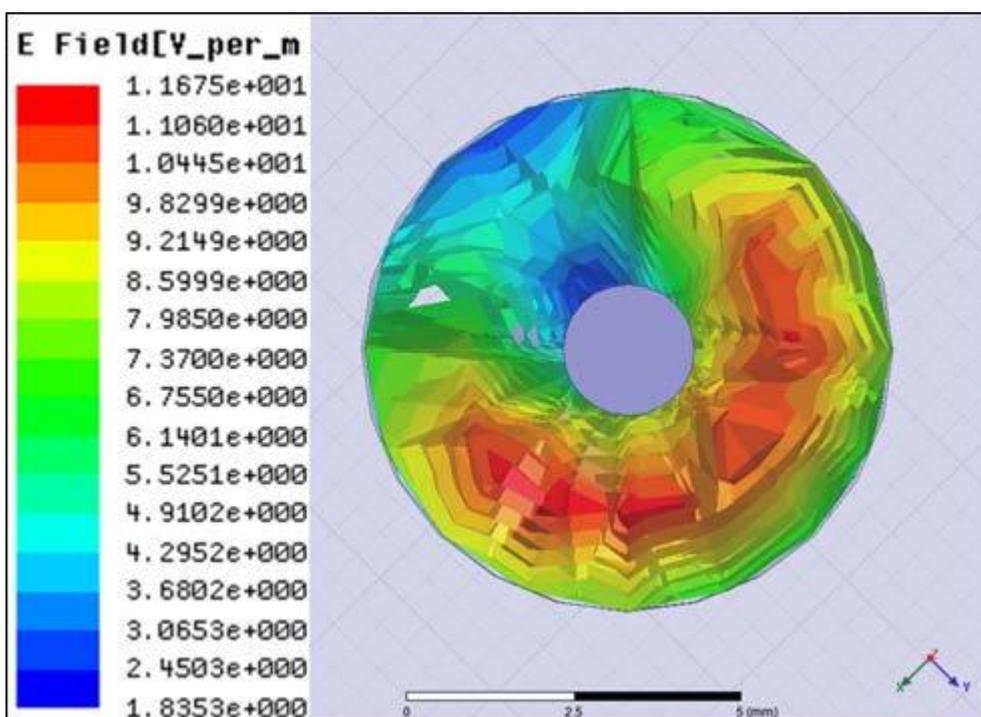


Рисунок Б.3 – Распределение электрического поля в ДРРС (вид сверху)

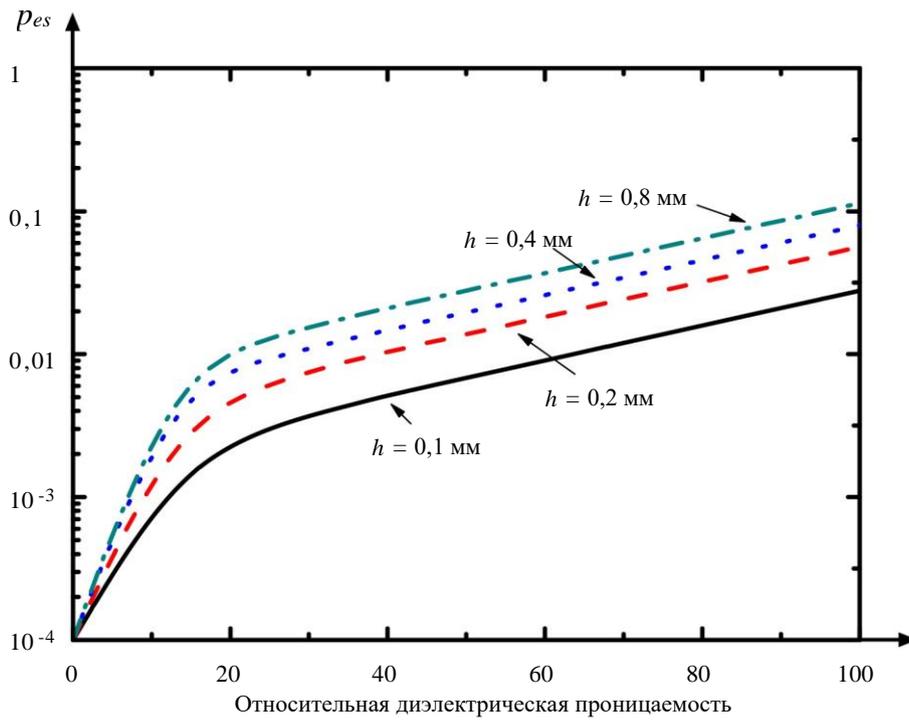


Рисунок Б.4 – Зависимость ρ_{es} от относительной диэлектрической проницаемости для образцов разной толщины

Список литературы

- [1] Nishikawa, T.; Wakino, K.; Tanaka, H.; Ishikawa, Y., *"Dielectric Resonator Method for Nondestructive Measurement of Complex Permittivity of Microwave Dielectric Substrates,"* Microwave Conference, 1990. 20th European, vol.1, pp.501-506, 1990
- [2] Mazierska, J.; Krupka, J.; Jacob, M.V.; Ledenyov, D., *"Complex permittivity measurements at variable temperatures of low loss dielectric substrates employing split post and single post dielectric resonators,"* Microwave Symposium Digest, 2004 IEEE MTT-S International, vol.3, pp.1825-1828, 2004
- [3] Mazierska, J.; Jacob, Mohan V.; Harring, A.; Krupka, J.; Barnwell, P.; Sims, T., *"Measurements of loss tangent and relative permittivity of LTCC ceramics at varying temperatures and frequencies,"* Journal of the European Ceramic Society, vol. 23, issue 14, pp.2611–2615, 2003
- [4] Krupka, J.; Clarke, R.N.; Rochard, O.C.; Gregory, A.P., *"Split post dielectric resonator technique for precise measurements of laminar dielectric specimens-measurement uncertainties,"* Microwaves, Radar and Wireless Communications, 2000. MIKON-2000. 13th International Conference, vol.1, pp.305-308, 2000
- [5] Krupka, J.; Gregory, A.P.; Rochard, O.C.; Clarke, R.N.; Riddle, B.; Baker-Jarvis, J., *"Uncertainty of complex permittivity measurements by split-post dielectric resonator technique,"* Journal of the European Ceramic Society, vol. 21, issue 15, pp.2673-2676, 2001
- [6] Krupka, J.; Geyer, R. G.; Baker-Jarvis, J.; Ceremuga, J., *"Measurements of the complex permittivity of microwave circuit board substrates using split dielectric resonator and reentrant cavity techniques,"* Seventh International Conference on Dielectric Materials, Measurements and Applications, (Conf. Publ. No. 430), pp. 21-24, 1996