

Keysight Technologies

Основы измерения диэлектрических свойств материалов

Рекомендации по применению



Введение

Специалисты во многих отраслях промышленности хотят лучше понимать свойства материалов, с которыми им приходится работать, поскольку это позволяет сократить циклы проектирования, улучшить входной контроль, мониторинг технологических процессов и контроль качества. Каждый материал обладает уникальным набором электрических параметров, которые зависят от его диэлектрических свойств. Точное измерение этих параметров может дать учёным и инженерам ценную информацию, позволяющую наиболее оптимальным образом использовать эти материалы в разрабатываемых устройствах или контролировать процессы изготовления, обеспечивая более высокое качество.

Измерение характеристик диэлектрических материалов может дать очень важную информацию для многих электронных приложений. Например, потери в изоляции кабеля, сопротивление подложки или частота диэлектрического резонатора непосредственно связаны с диэлектрическими свойствами. Также эта информация полезна для улучшения свойств ферритов, поглотителей излучения и конструкций корпусов. В новейших приложениях в аэрокосмической, автомобильной, пищевой и медицинской промышленности также можно использовать преимущества знания диэлектрических свойств.

Компания Keysight Technologies предлагает разнообразные измерительные приборы, тестовую оснастку и программное обеспечение для измерения диэлектрических свойств материалов. Измерительные приборы Keysight, такие как анализаторы цепей, анализаторы импеданса и измерители иммитанса, работают в диапазоне частот до 1,1 ТГц. Выпускается тестовая оснастка для исследуемых материалов (ИМ), использующая методы коаксиального пробника, параллельных пластин коаксиальных/волноводных линий передачи, свободного пространства и объёмных резонаторов. В приведённой ниже таблице даны примеры изделий, которые можно измерять с помощью решений Keysight для тестирования материалов.

Таблица 1. Примеры приложений для измерения параметров материалов

Отрасль	Приложения/изделия
Электроника	Конденсаторы, подложки, печатные платы, печатные антенны, ферриты, магнитные записывающие головки, поглотители излучения, маскирующие материалы, датчики
Аэрокосмическая/оборонная промышленность	Радиопоглощающие покрытия, материалы, поглощающие излучение, антенные обтекатели
Промышленные материалы	Керамика и композитные материалы: корпуса ИС, аэрокосмические и автомобильные компоненты, цемент, покрытия, биоимплантаты
	Полимеры и пластики: оптическое волокно, подложки, плёнки, изоляционные материалы
	Гидрогель: одноразовые впитывающие пелёнки, мягкие контактные линзы
	Жидкие кристаллы: дисплеи
	Резина, полупроводники и сверхпроводники
Прочие изделия, содержащие такие материалы: шины, краски, клеи и т.п.	
Пищевая промышленность и сельское хозяйство	Исследование хранения (порчи) продуктов питания, разработка продуктов питания для микроволновых цепей, упаковка, измерение влажности
Лесоводство и горное дело	Измерение влажности дерева или бумаги, анализ содержания масла
Фармацевтика и медицина	Исследование и производство лекарственных препаратов, биоимплантаты, измерение параметров человеческих тканей, биомасса, концентрация химических веществ, ферментация

Содержание

Введение	2
Теория диэлектриков	4
Диэлектрическая проницаемость	4
Магнитная проницаемость	7
Распространение электромагнитных волн	8
Механизмы поляризации диэлектриков	10
Ориентационная (дипольная) поляризация	11
Электронная и атомарная поляризация	11
Время релаксации	12
Уравнение Дебая	12
Диаграмма Коул-Коула	13
Ионная проводимость	13
Граничная или объёмная поляризация	14
Измерительные системы	15
Анализаторы цепей	15
Анализаторы импеданса и измерители иммитанса	16
Тестовая оснастка	16
Программное обеспечение	16
Методы измерения	17
Коаксиальный пробник	17
Линия передачи	20
Свободное пространство	23
Объёмный резонатор	26
Параллельные пластины	29
Метод измерения индуктивности	30
Сравнение методов	31
Решения Keysight	32
Литература	33
Ресурсы интернета	34

Теория диэлектриков

В этой главе мы рассмотрим диэлектрическую и магнитную проницаемость. Ещё одним важным параметром является удельное сопротивление материала, но его мы обсуждать не будем. Информацию об удельном сопротивлении и его измерении можно найти в рекомендациях по применению 1369-1¹. Важно отметить, что диэлектрическая и магнитная проницаемость не являются константами. Они могут изменяться в зависимости от частоты, температуры, ориентации, давления, состава и молекулярной структуры материала.

Диэлектрическая проницаемость

Материал классифицируется как «диэлектрик», если он способен запастись энергией при приложении внешнего электрического поля. Если к конденсатору, состоящему из двух параллельных пластин, подключить источник постоянного напряжения, то конденсатор запасёт больше энергии, если между его пластинами поместить диэлектрический материал (по сравнению с вакуумом). Диэлектрический материал повышает ёмкость конденсатора, компенсируя заряды электродов, которые в общем случае давали бы вклад во внешнее поле. Ёмкость с диэлектрическим материалом зависит от его диэлектрической проницаемости. Если к конденсатору, состоящему из двух параллельных пластин, подключить источник постоянного напряжения V (рис. 1), то конденсатор запасёт больше энергии, если между его пластинами поместить диэлектрический материал (по сравнению с вакуумом).

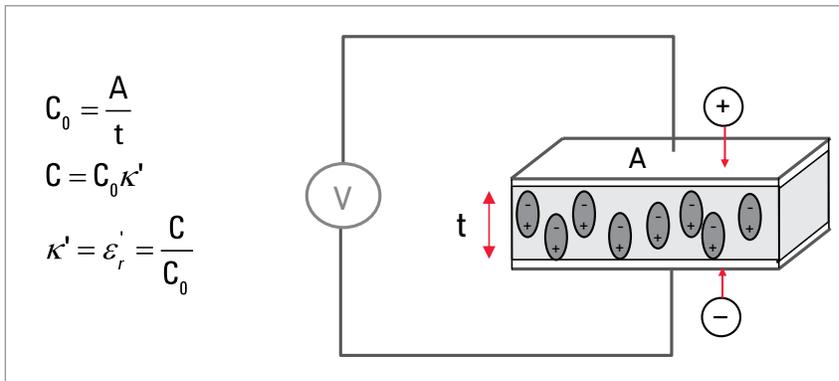


Рис. 1. Конденсатор из параллельных пластин, постоянное напряжение

Здесь C и C_0 – это ёмкость с диэлектриком и без него, $\kappa' = \epsilon'_r$ – действительная диэлектрическая постоянная или диэлектрическая проницаемость, A и t – это площадь пластин конденсатора и расстояние между ними (рис. 1). Диэлектрический материал повышает ёмкость конденсатора, нейтрализуя заряды электродов, которые в общем случае давали бы вклад во внешнее поле. Ёмкость диэлектрического материала связана с диэлектрической проницаемостью через приведённые выше уравнения. Если к тому же конденсатору подключить источник переменного напряжения V (рис. 2), то результирующий ток будет складываться из тока перезаряда I_c и тока потерь I_p , который связан с диэлектрической проницаемостью. Потери в материале можно представить в виде проводимости (G), включённой параллельно конденсатору (C).

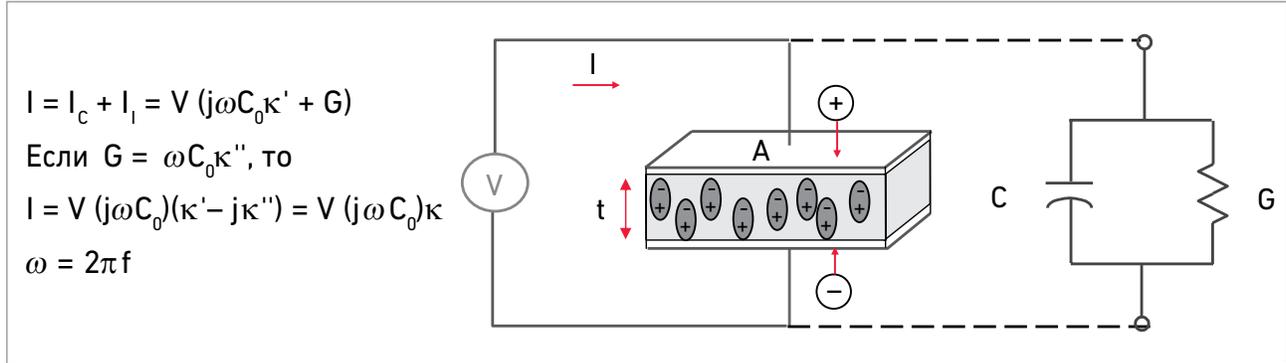


Рис. 2. Конденсатор из параллельных пластин, переменное напряжение

Комплексная диэлектрическая проницаемость κ состоит из действительной части κ' , которая представляет запас энергии, и мнимой части κ'' , которая представляет потери. Для вычисления комплексной диэлектрической проницаемости используется следующее выражение:

$$\kappa = \kappa^* = \epsilon_r = \epsilon_r^*$$

С точки зрения электромагнитной теории, электрическая индукция (плотность пространственного заряда) D_f определяется следующим образом:

$$D_f = \epsilon E,$$

где $\epsilon = \epsilon^* = \epsilon_0 \epsilon_r$ – абсолютная диэлектрическая проницаемость, ϵ_r – относительная диэлектрическая проницаемость, $\epsilon_0 \approx \frac{1}{36\pi} \times 10^{-9}$ Ф/м – диэлектрическая проницаемость вакуума, E – напряжённость электрического поля.

Диэлектрическая проницаемость описывает взаимодействие материала с электрическим полем E и является комплексной величиной.

$$\kappa = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \epsilon_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r''$$

Диэлектрическая постоянная (κ) эквивалентна относительной диэлектрической проницаемости (ϵ_r) или отношению абсолютной диэлектрической проницаемости (ϵ) к диэлектрической проницаемости вакуума (ϵ_0). Действительная часть диэлектрической проницаемости (ϵ_r') показывает, сколько энергии внешнего электрического поля сохранено в материале. Мнимая часть диэлектрической проницаемости (ϵ_r'') называется коэффициентом потерь и показывает уровень рассеяния или потерь внешнего электрического поля в материале. Мнимая часть диэлектрической проницаемости (ϵ_r'') всегда больше нуля и обычно гораздо меньше, чем ϵ_r' . На коэффициент потерь оказывают влияние диэлектрические потери и проводимость.

Если комплексную диэлектрическую проницаемость представить в виде простой векторной диаграммы (рис. 3), то действительная и мнимая компоненты будут сдвинуты по фазе не 90° . Суммарный вектор повернут на угол δ относительно действительной оси (ϵ_r'). Относительные потери материала определяются отношением потерянной энергии к запасённой.

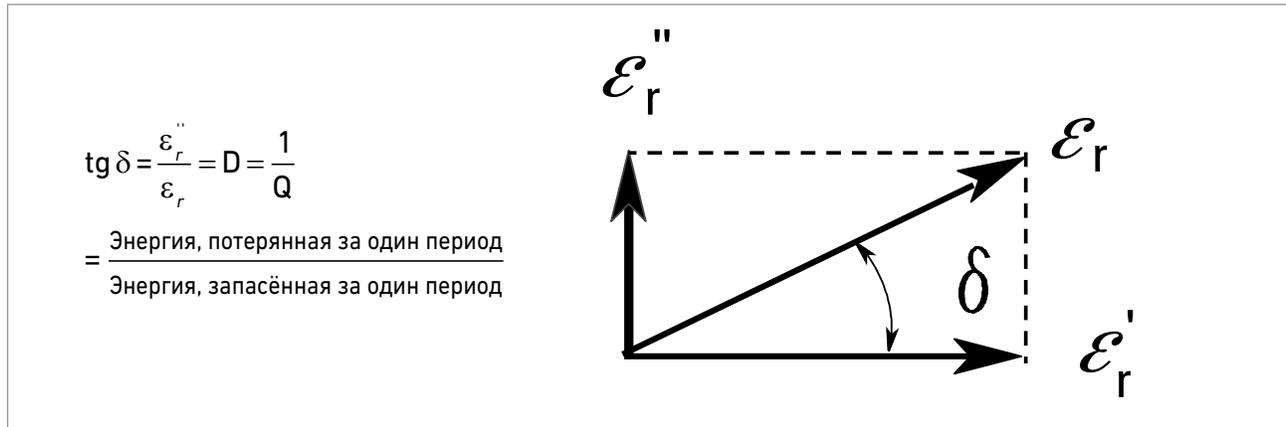


Рис. 3. Тангенс угла потерь

Тангенс угла потерь или $\operatorname{tg} \delta$ определяется как отношение мнимой части диэлектрической проницаемости к действительной. D обозначает коэффициент потерь, а Q называется добротностью. Тангенс угла потерь или $\operatorname{tg} \delta$ называют тангенсом дельта, тангенсом угла потерь или коэффициентом потерь. Иногда к материалам, используемым в СВЧ электронных приборах, применяют термин «добротность», который является обратной величиной от тангенса угла потерь. Для материалов с очень малыми потерями (поскольку $\operatorname{tg} \delta \approx \delta$), тангенс угла потерь можно заменить самими углом, выраженным в миллирадианах или микрорадианах.

Магнитная проницаемость

Магнитная проницаемость (μ) описывает взаимодействие материала с магнитным полем. Магнитные свойства материала можно представить в виде катушки индуктивности с последовательным сопротивлением, представляющим потери в магнитном материале сердечника (рис. 4). Если к индуктивности подключить источник постоянного тока, то индуктивность с сердечником можно выразить через магнитную проницаемость.

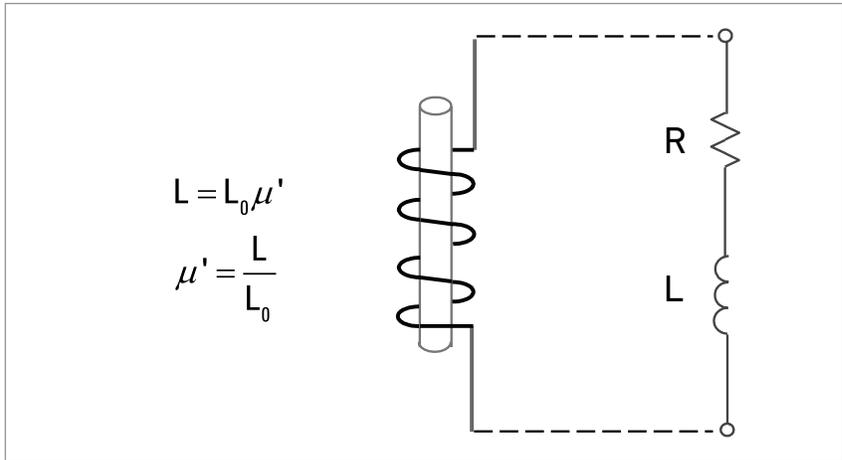


Рис. 4. Индуктивность

В приведённых уравнениях L – это индуктивность материала, L_0 – индуктивность обмотки в вакууме и μ' – действительная магнитная проницаемость. Если к той же индуктивности подключить источник переменного синусоидального тока, то результирующее напряжение будет состоять из индуцированного напряжения и напряжения потерь, которое связано с магнитной проницаемостью. Потери в сердечнике можно представить сопротивлением (R), включённым последовательно с индуктивностью (L). Комплексная магнитная проницаемость (μ^* или μ) состоит из действительной части (μ'), представляющей запасённую энергию, и мнимой части (μ''), представляющей потерянную энергию. Относительной магнитной проницаемостью μ_r называют отношение магнитной проницаемости вещества к магнитной проницаемости вакуума:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} = \mu_r' - j\mu_r''$$

$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ Гн/м – магнитная проницаемость вакуума

Некоторые материалы, такие как железо (феррит), кобальт, никель и их сплавы имеют приемлемые магнитные свойства. Однако многие материалы являются немагнитными, что делает их магнитную проницаемость очень близкой к магнитной проницаемости вакуума ($\mu_r = 1$). С другой стороны, все материалы обладают диэлектрическими свойствами, поэтому в этой публикации мы сфокусируемся именно на измерении диэлектрической проницаемости.

Распространение электромагнитных волн

В случае переменного напряжения (например, синусоидального), электрическое и магнитное поля присутствуют одновременно. Такая электромагнитная волна распространяется в вакууме со скоростью света ($c = 3 \times 10^8$ м/с) или с меньшей скоростью в материалах. Существуют электромагнитные волны с разной длиной волны. Длина волны сигнала λ обратно пропорциональна его частоте f ($\lambda = c/f$), поэтому с ростом частоты длина волны уменьшается. Например, сигнал частотой 10 МГц в вакууме имеет длину волны 30 м, а 10 ГГц – всего 3 см. Многие аспекты распространения волны зависят от диэлектрической и магнитной проницаемости материала. Давайте рассмотрим поведение диэлектрика с «оптической точки зрения». Допустим, в вакууме находится плоская прямоугольная пластина из исследуемого материала (ИМ), и на её поверхность падает поперечная электромагнитная волна (рис. 5). В этом случае мы будем наблюдать падающую, отражённую и прошедшую волны. Поскольку волновое сопротивление материала Z отличается (меньше) от волнового сопротивления вакуума η (или Z_0), будет наблюдаться рассогласование импеданса, создающее отражённую волну. Тем не менее, часть энергии проникает в образец. Внутри пластины скорость волны v меньше скорости света в вакууме c . Согласно приведённому ниже уравнению, длина волны в пластине λ_d меньше длины волны в вакууме λ_0 . Поскольку материал всегда имеет некоторые потери, мы будем наблюдать затухание или вносимые потери. Для упрощения рассуждения рассогласование на противоположной стороне пластины не учитывается.

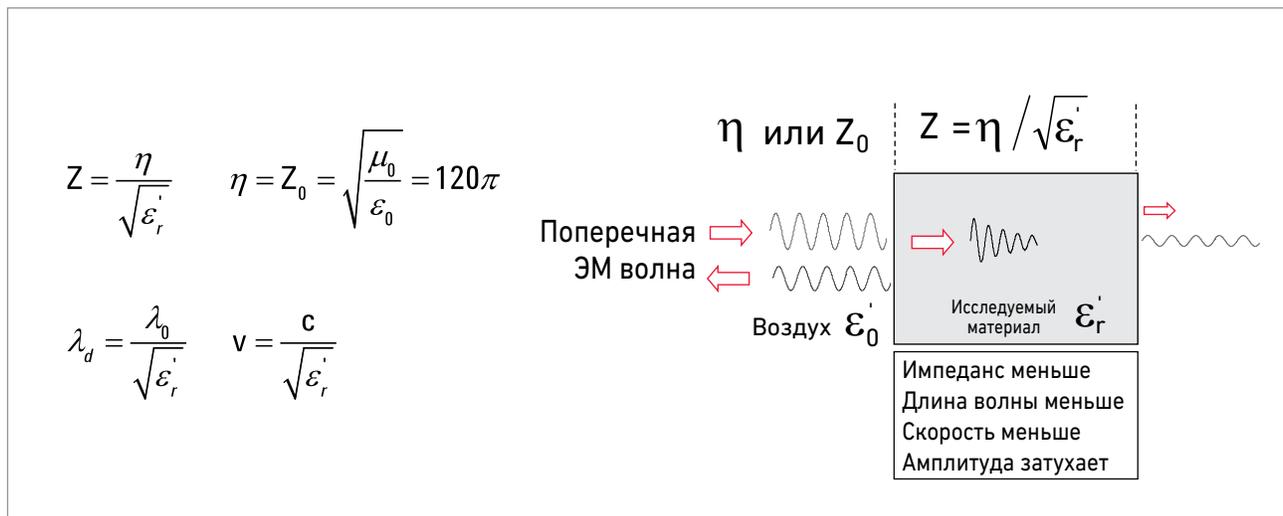


Рис. 5. Отражённый и переданный сигналы.

На рис. 6 показана взаимосвязь между диэлектрической проницаемостью исследуемого материала (ИМ) и коэффициентом отражения $|\Gamma|$ для бесконечно длинного образца (отражение от противоположного конца не учитывается). Для малых значений диэлектрической проницаемости (примерно меньше 20) коэффициент отражения сильно меняется при небольшом изменении диэлектрической проницаемости. В этом диапазоне измерение диэлектрической проницаемости по коэффициенту отражения будет более чувствительным, а значит и более точным. И, наоборот, для больших диэлектрических проницаемостей (например, от 70 до 90) наблюдается слабая зависимость коэффициента отражения, и измерение будет давать большую погрешность.

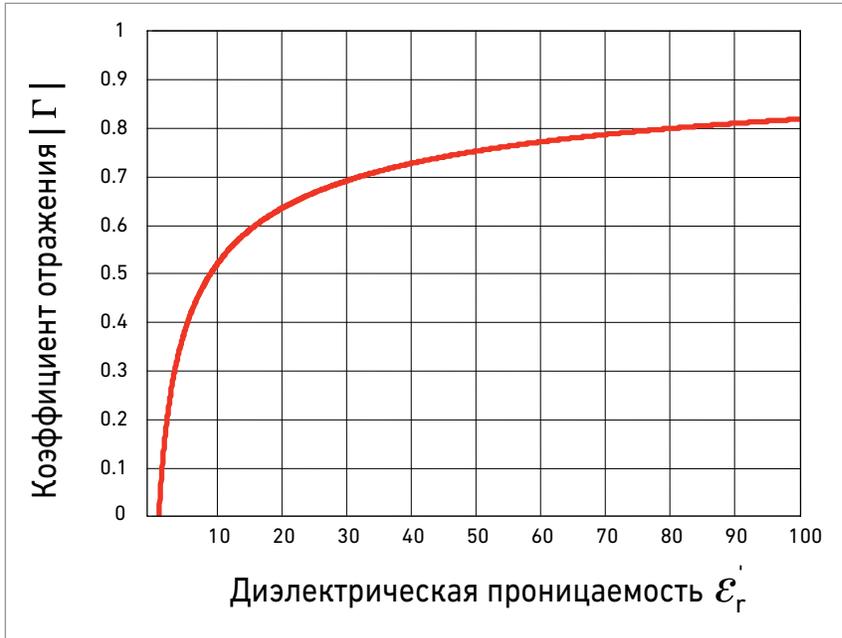


Рис. 6. Зависимость коэффициента отражения от диэлектрической проницаемости

Механизмы поляризации диэлектриков

Диэлектрический материал может иметь несколько механизмов или эффектов поляризации, дающих вклад в общую диэлектрическую проницаемость (рис. 7). Диэлектрический материал содержит расположенные некоторым образом носители электрических зарядов, которые могут смещаться электрическим полем. Заряды ориентируются, стремясь скомпенсировать электрическое поле таким образом, чтобы положительные и отрицательные заряды двигались в противоположных направлениях.

На микроскопическом уровне несколько диэлектрических механизмов могут вносить вклад в поведение диэлектрика. Ориентация диполей и ионная проводимость сильно взаимодействуют на сверхвысоких частотах. Например, молекулы воды являются стабильными диполями, которые поворачиваются вслед за переменным электрическим полем. Эти механизмы порождают заметные потери – именно поэтому пицца нагревается в микроволновых печах. Атомарные и электронные механизмы поляризации относительно слабее и обычно не зависят от частоты в СВЧ диапазоне. Каждый механизм поляризации характеризуется «частотой среза». С ростом частоты влияние медленных механизмов спадает, а быстрые механизмы начинают давать всё больший вклад в ϵ' . Коэффициент потерь (ϵ'') будет иметь соответствующий пик на каждой характерной частоте. Амплитуда и «частота среза» каждого механизма уникальны для разных материалов. Вода обладает сильным дипольным эффектом на низких частотах, но её диэлектрическая проницаемость резко спадает примерно на 22 ГГц. С другой стороны, политетрафторэтилен (фторопласт-4) не имеет дипольного механизма, и его диэлектрическая проницаемость остаётся практически постоянной до миллиметрового диапазона.

Резонансные эффекты связаны обычно с электронной или атомарной поляризацией. Эффект релаксации обычно связан с ориентационной поляризацией.

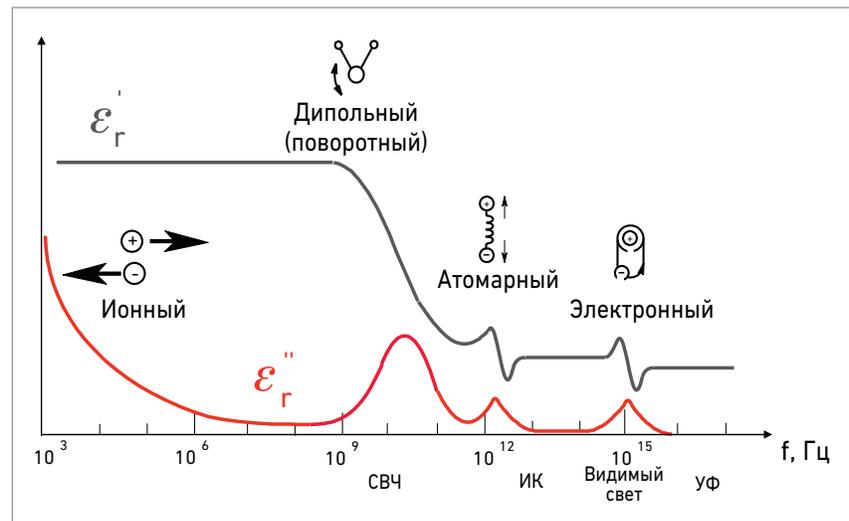


Рис. 7. Механизмы поляризации в диэлектриках в зависимости от частоты.

Ориентационная (дипольная) поляризация

Молекула состоит из нескольких атомов с обобщёнными электронами. Такое перераспределение электронов может породить разбаланс распределения заряда, создающий постоянный дипольный момент. В отсутствие электрического поля моменты диполей ориентированы случайным образом, и поляризация не наблюдается. Электрическое поле E создаёт вращающий момент T на электрическом диполе, и диполь начинает поворачиваться, чтобы сориентироваться вдоль электрического поля, что порождает ориентационную поляризацию (рис. 8). Если поле меняет направление, то меняется и вращающий момент.

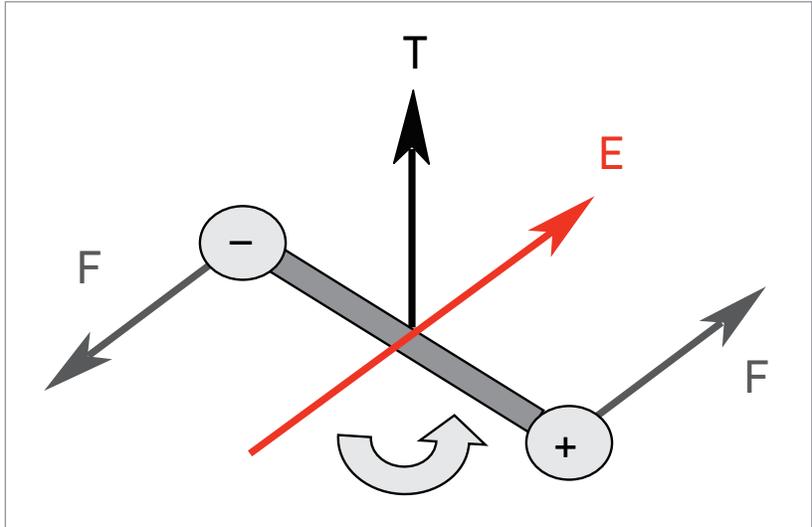


Рис. 8. Поворот диполя в электрическом поле

Трение, сопровождающее поворот диполя, даёт вклад в диэлектрические потери. Поворот диполя порождает колебания ϵ_r' и ϵ_r'' с частотой релаксации, которая обычно лежит в СВЧ диапазоне. Как уже говорилось, примером вещества, демонстрирующего сильную ориентационную поляризацию, является вода.

Электронная и атомарная поляризация

Электронная поляризация появляется в нейтральных атомах, когда электрическое поле смещает ядро по отношению к окружающим его электронам. Атомарная поляризация появляется, когда соседние положительные и отрицательные ионы «растягиваются» под действием приложенного электрического поля. Для многих сухих твёрдых веществ эти механизмы поляризации являются доминирующими в СВЧ диапазоне, хотя явный резонанс появляется на значительно более высоких частотах. В области инфракрасного и видимого света нужно учитывать инерцию орбитального движения электронов. Можно смоделировать атомы в виде осцилляторов с затуханием, подобно механической пружине и системе масс (рис. 7). Амплитуда колебаний будет малой для всех частот, отличных от частоты резонанса. Значительно ниже резонансной частоты электронный и атомарный механизмы дают лишь малый и постоянный вклад в ϵ_r' , и практически не создают потерь. Резонансная частота идентифицируется резонансной характеристикой ϵ_r' и пиком максимального поглощения ϵ_r'' . Выше резонанса вклад этих механизмов исчезает.

Время релаксации

Время релаксации – это мера подвижности молекул (диполей) материала. Это время, которое необходимо системе, находящейся под воздействием электрического поля, для возврата на величину $1/e$ от её случайного равновесного значения (или время, необходимое диполям для ориентации в электрическом поле). Молекулы жидкостей и твёрдых веществ сгруппированы относительно плотно и имеют малую свободу движения при приложении электрического поля. Постоянные столкновения вызывают внутреннее трение, поэтому молекулы поворачиваются медленно и экспоненциально подходят к конечному положению при поляризации с постоянной времени релаксации τ .

Когда поле отключается, всё происходит в обратном порядке, и случайное распределение восстанавливается с той же постоянной времени. Частота релаксации f_c является обратной величиной от времени релаксации:

$$\tau = \frac{1}{\omega_c} = \frac{1}{2\pi f_c}$$

На частотах ниже частоты релаксации переменное электрическое поле становится достаточно медленным, чтобы диполи успевали за изменениями поля. Поскольку поляризация может реализоваться полностью, потери (ϵ_r'') прямо пропорциональны частоте (рис. 9). С ростом частоты ϵ_r'' продолжает нарастать, а запас энергии (ϵ_r') начинает снижаться из-за сдвига фазы между ориентацией диполя и электрическим полем. Выше частоты релаксации и ϵ_r'' , и ϵ_r' уменьшаются, поскольку электрическое поле изменяется слишком быстро, чтобы влиять на поворот диполя, и ориентационная поляризация исчезает.

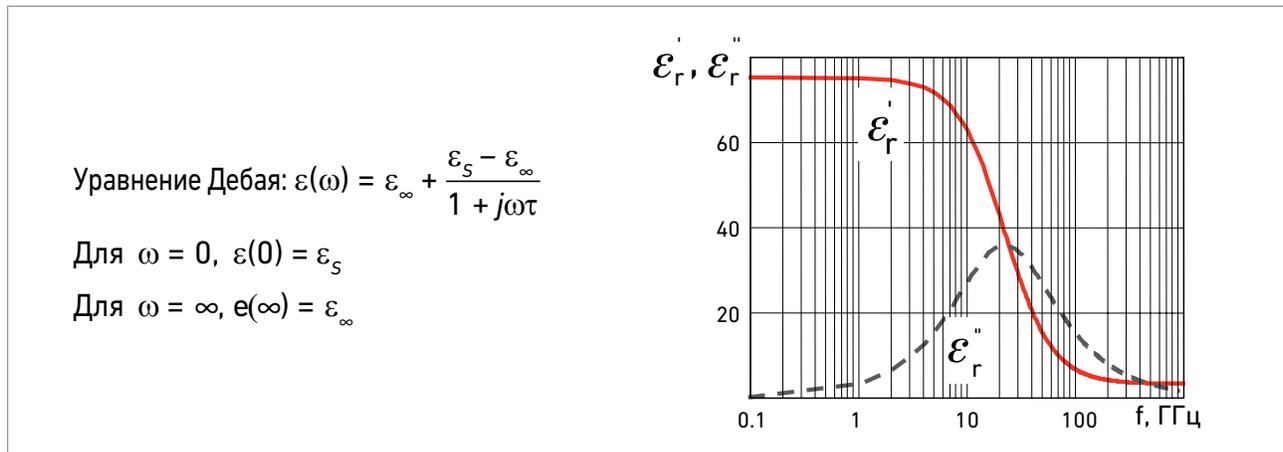


Рис. 9. Дебаевская релаксация воды при температуре 30°C.

Уравнение Дебая

Материалы, имеющие только одну постоянную времени релаксации, можно смоделировать уравнением Дебая, которое выглядит как зависимость диэлектрической проницаемости от частоты (рис. 9). ϵ_r' не изменяется выше и ниже частоты релаксации и имеет перепад вблизи этой частоты (22 ГГц). Кроме того, значение ϵ_r'' мало выше и ниже частоты релаксации и достигает максимума в области перехода на частоте релаксации.

При расчёте приведённых выше кривых использовалось статическое значение диэлектрической проницаемости (пост. ток) равное $\epsilon_s = 76,47$, оптическое значение (бесконечная частота) диэлектрической проницаемости $\epsilon_\infty = 4,9$ и время релаксации $\tau = 7,2$ пс.

Диаграмма Коул-Коула

Комплексную диэлектрическую проницаемость также можно показать на диаграмме Коул-Коула, отложив по вертикальной оси мнимую часть (ϵ_r''), а по горизонтальной оси действительную часть (ϵ_r'), и используя частоту в качестве независимого параметра (рис. 10). Диаграмма Коул-Коула до некоторой степени подобна диаграмме Смита. Материал, имеющий одну частоту релаксации в соответствии с уравнением Дебая, будет представлен полуокружностью с центром на горизонтальной оси $\epsilon_r''=0$ и пиком коэффициента потерь на частоте $1/\tau$. Материал с несколькими частотами релаксации будет представляться полуокружностью (симметричное распределение), или дугой (несимметричное распределение) с центром ниже горизонтальной оси $\epsilon_r''=0$.

Кривая на рис. 10 представляет собой полуокружность с центром на оси X и радиусом $\frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{2}$.

Максимальное значение мнимой части диэлектрической проницаемости $\epsilon_r''_{\max}$ будет равно радиусу. Увеличение частоты соответствует движению по кривой против часовой стрелки.

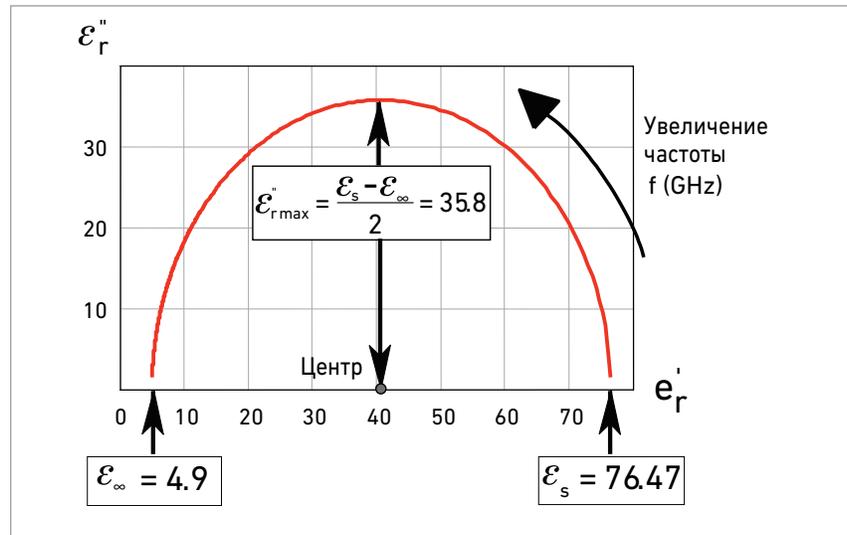


Рис. 10. Диаграмма Коул-Коула для рис. 9

Ионная проводимость

Измеренные потери в материале можно выразить в виде зависимости диэлектрических потерь (ϵ_{rd}'') и проводимости (σ).

$$\epsilon_r'' = \epsilon_{rd}'' + \frac{\sigma}{\omega\epsilon_0}$$

На низких частотах полная проводимость может складываться из нескольких различных механизмов проводимости, но в большинстве материалов преобладает ионная проводимость. Доминирующее влияние на ϵ_r'' оказывает проводимость электролита, обусловленная существующими в растворе (обычно водном) свободными ионами. Ионная проводимость просто вносит потери в материал. На низких частотах влияние ионной проводимости обратно пропорционально частоте и проявляется в виде спада кривой ϵ_r'' со скоростью $1/f$.

Граничная или объёмная поляризация

Электронная, атомарная и ориентационная поляризация появляются, когда заряды локально привязаны к атомам, молекулам или структурам жидких или твёрдых веществ. Кроме того, существуют носители заряда, способные мигрировать через материал в присутствии низкочастотного электрического поля. Граничная или объёмная поляризация заряда появляется, когда движение этих мигрирующих зарядов затруднено. Заряд может оказаться захваченным на границе раздела фаз материала. Кроме того, движение может быть затруднено, когда заряды не могут свободно разряжаться или замещаться на электродах. Искажение поля, вызванное накоплением этих зарядов, повышает общую ёмкость материала, что проявляется как рост ϵ_r' .

Смеси материалов с электропроводными областями, которые не контактируют друг с другом (разделены непроводящими областями), демонстрируют на низких частотах эффект Максвелла-Вагнера. Если заряженные слои тонки и значительно меньше размера частиц, то заряды реагируют независимо от зарядов соседних частиц. На низких частотах заряды имеют достаточно времени, чтобы скопиться у границ проводящих областей, что вызывает рост ϵ_r' . На высоких частотах у зарядов нет времени на накопление, и поляризация не наступает, поскольку смещение заряда мало по сравнению с размерами проводящей области. С ростом частоты ϵ_r' уменьшается, и потери демонстрируют тот же спад со скоростью $1/f$, как и в случае нормальной ионной проводимости.

В области низких частот могут проявляться и многие другие механизмы поляризации, вызывая большой разброс диэлектрической проницаемости. Например, коллоидные суспензии возникают, если толщина заряженного слоя имеет тот же порядок или превышает размеры частиц. Эффект Максвелла-Вагнера становится неприменимым, поскольку на характеристику теперь влияет распределение заряда соседних частиц.

Измерительные системы

Анализаторы цепей

Измерение отражения волны от материала или прохождения через него, помимо сведений о его физических размерах, даёт информацию, позволяющую охарактеризовать диэлектрическую и магнитную проницаемость материала. Векторные анализаторы цепей, такие как анализаторы семейства PNA, серии ENA и FieldFox, выполняют свипирующие измерения на высокой частоте в диапазоне от 9 кГц до 1,1 ТГц (рис. 12). Векторный анализатор цепей состоит из источника сигналов, приёмника и дисплея (рис. 11). Источник подаёт на исследуемый материал одночастотный сигнал. Приёмник настраивается на эту частоту и определяет отражённый и прошедший сигналы. Измеренная характеристика показывает значения амплитуды и фазы на этой частоте. Затем источник перестраивается на следующую частоту, и измерение повторяется, строя зависимость отражённого и прямого сигналов от частоты. Дополнительная информация о работе и архитектуре анализаторов цепей приведена в рекомендациях по применению 1287-1² и 1287-2³.

Простые компоненты и соединительные провода, хорошо работающие на низких частотах, на высоких частотах ведут себя по-другому. В диапазоне СВЧ длина волны становится соизмеримой с физическими размерами устройств, поэтому две расположенных близко точки могут иметь значительную разность фаз. Для анализа устройств на высоких частотах, вместо методов анализа цепей с сосредоточенными параметрами приходится использовать теорию линий передач. Дополнительные высокочастотные эффекты, такие как потери на излучение, диэлектрические потери и ёмкостная связь, делают СВЧ цепи более сложными и дорогими. Разработка идеального анализатора СВЧ цепей требует много времени и затрат.

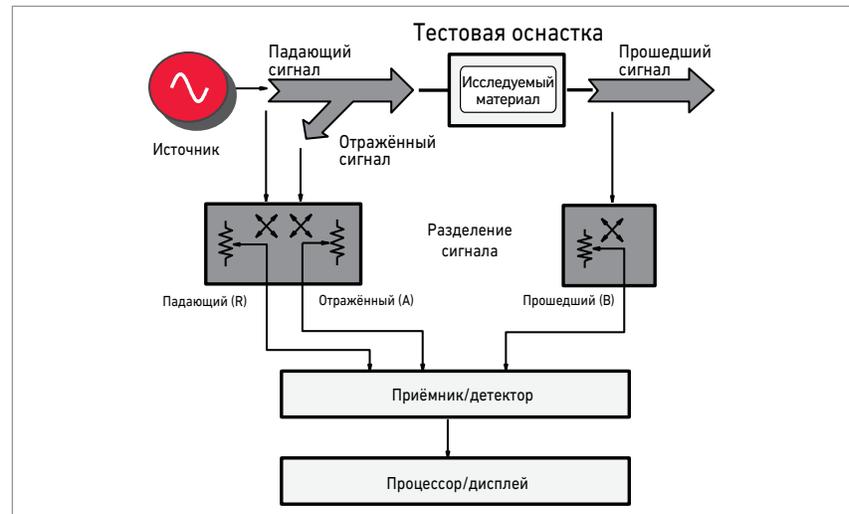


Рис. 11. Анализатор цепей

Поэтому для устранения систематических (стабильных и повторяющихся) погрешностей, вызванных несовершенством системы, используется калибровка. Ошибки случайного характера, вызванные шумом, дрейфом или климатическими условиями (температура, влажность, давление), с помощью калибровки устранить нельзя. Таким образом, измерения в диапазоне СВЧ подвержены погрешностям, связанным с небольшими изменениями измерительной системы. Эти погрешности можно минимизировать, используя соответствующие приёмы, такие как визуальный осмотр всех разъёмов на наличие загрязнения или повреждений, и минимизируя физические перемещения измерительных кабелей после калибровки. Дополнительная информация о калибровке анализаторов цепей приведена в рекомендациях по применению 1287-3⁴.

Анализаторы импеданса и измерители иммитанса

Анализаторы импеданса и измерители иммитанса, такие как показаны на рис. 12, используются для измерения свойств материалов на низких частотах. На материал подаётся воздействующий сигнал от источника переменного напряжения, при этом контролируется напряжение на материале. Параметры материала рассчитываются по его габаритам и измеренным значениям его ёмкости и коэффициента затухания.

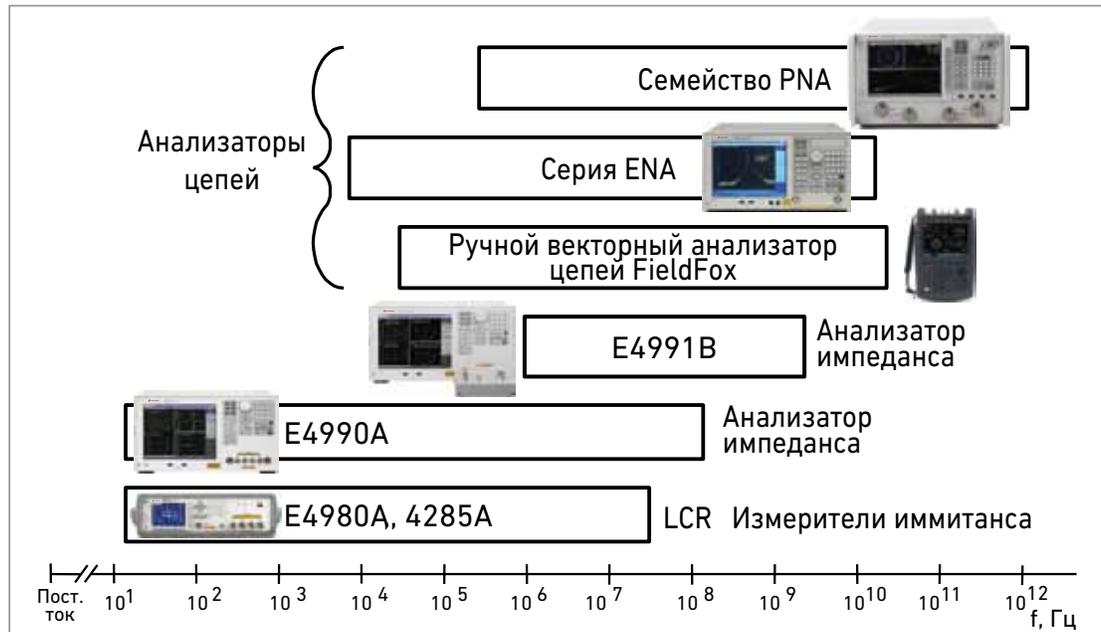


Рис. 12. Частотный диапазон приборов Keysight, используемых для измерения параметров диэлектриков

Тестовая оснастка

Перед измерением диэлектрических свойств материала с помощью анализатора цепей, анализатора импеданса или измерителя иммитанса, нужно закрепить материал в тестовой оснастке, которая определённым способом подавала бы на него электромагнитные поля и обеспечивала подключение к измерительным приборам. Тип необходимой тестовой оснастки зависит от выбранного метода измерения и от физических свойств материала (твёрдое тело, жидкость, порошок, газ).

Программное обеспечение

Полученные от прибора результаты измерений не всегда представлены в удобных единицах или нужном формате. В этом случае для преобразования полученных данных в диэлектрическую или магнитную проницаемость нужно использовать специальное программное обеспечение. Кроме того, ПО может потребоваться для моделирования взаимодействия между тестовой оснасткой и исследуемым материалом, чтобы извлечь свойства материала.

Методы измерения

Коаксиальный пробник

Особенности метода

- Широкая полоса
- Простота и удобство (неразрушающий анализ)
- Ограниченные точность измерения ϵ_r и разрешение тангенса угла потерь
- Пригодность для измерения характеристик жидких и порошкообразных веществ

Предполагаемые характеристики материала

- «Полубесконечная» толщина
- Немагнитный материал
- Изотропность и однородность
- Плоская поверхность
- Отсутствие воздушных зазоров

Ненагруженный коаксиальный пробник представляет собой линию передачи со срезом на одном конце. Параметры материала измеряются путём погружения пробника в жидкость или путём прикосновения им к плоской поверхности твёрдого или порошкообразного материала. Поля, создаваемые на конце пробника, проникают в материал и изменяются вследствие контакта с исследуемым материалом (рис. 13). Отражённый сигнал⁵ (S_{11}) можно измерить и соотнести с величиной ϵ_r^* .

Типовая измерительная система, использующая метод коаксиального пробника, состоит из анализатора цепей или анализатора импеданса, программного обеспечения для расчёта диэлектрической проницаемости и коаксиального пробника, держателя пробника и кабеля. Коаксиальный пробник, держатель пробника и кабель входят в комплект поставки диэлектрического пробника 85070E. ПО входит в состав пакета для измерения характеристик материалов N1500A. ПО можно установить на внешний ПК, подключенный в зависимости от используемого анализатора через GPIB, LAN или USB. При использовании анализаторов цепей серии ENA или PNA ПО можно установить прямо на анализатор и обойтись без внешнего компьютера.

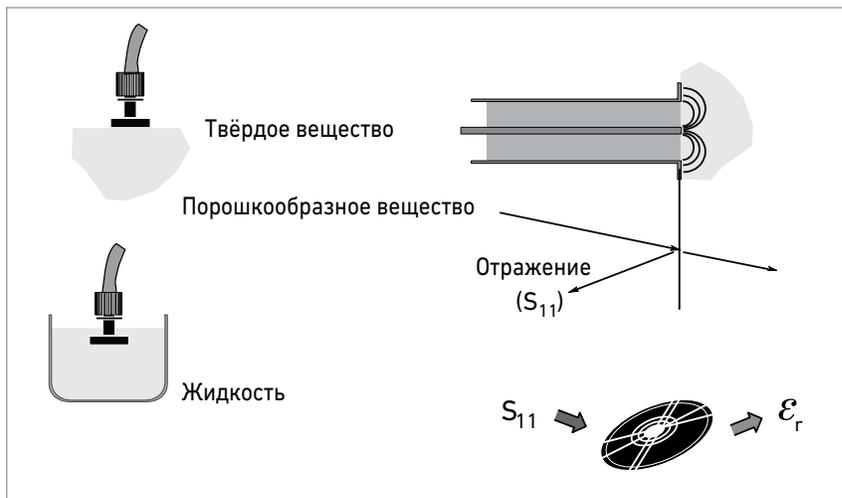


Рис. 13. Метод коаксиального пробника

На рис. 14 показаны три пробника, входящие в состав комплекта 85070E: высокотемпературный пробник (а), тонкий пробник (б) и высококачественный пробник (в). Высокотемпературный пробник (а) показан с расположенным справа шунтирующим блоком. Три тонких пробника показаны в нижней части рисунка (б), сверху расположен шунт и другие принадлежности. Высококачественный пробник (в) также представлен с шунтирующим блоком.

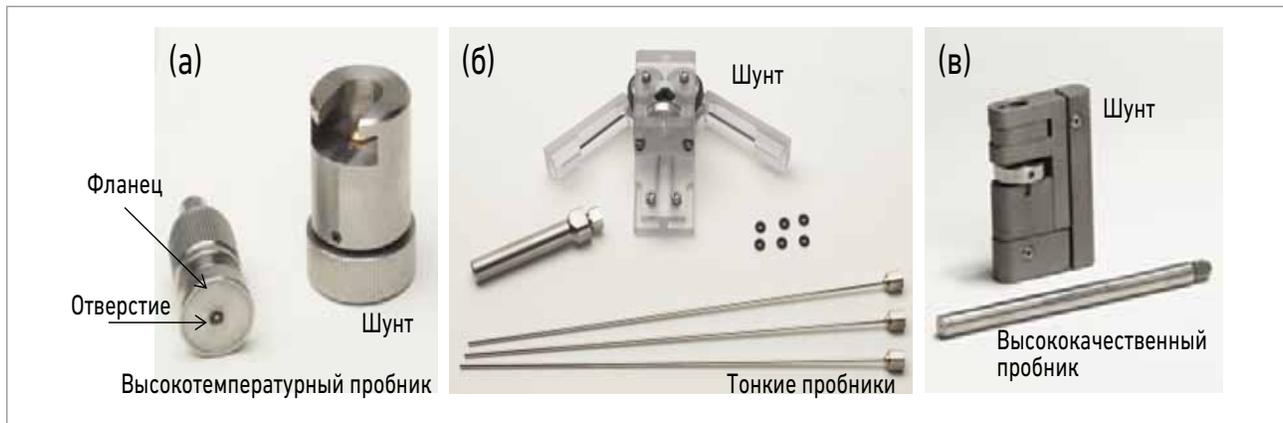


Рис. 14. Три типа диэлектрических пробников

Обладая прочной конструкцией, высокотемпературный пробник (а) оснащен герметичным металлоглазным уплотнением, что делает его стойким к коррозии и абразивным материалам. Пробник выдерживает широкий диапазон температур от -40 до $+200$ °С, что позволяет измерять зависимости от частоты и температуры. Широкий фланец позволяет исследовать не только жидкие и порошкообразные вещества, но и твёрдые материалы с плоской поверхностью. Тонкий пробник (б) легко устанавливается в бродильные ёмкости, камеры для химических реакций и другие установки с малыми отверстиями. Кроме того, тонкая конструкция позволяет использовать его с образцами небольшого размера. Этот пробник лучше всего подходит для измерения характеристик жидких и мелкодисперсных порошкообразных веществ. Пробник не столь дорог, поэтому при исследовании литых образцов его можно заливать материалом и оставлять в отливке. Поскольку эти пробники являются расходным материалом, они поставляются наборами по три штуки. В комплект поставки тонких пробников входит герметичный тонкий держатель, который обеспечивает переход с внешнего диаметра 2,2 мм на внутренний диаметр 10 мм, а также стандартные адаптеры и втулки среднего размера. Высококачественный пробник (в) обладает прочной тонкой конструкцией, выдерживает высокие температуры и может работать на высоких частотах, что делает его идеальным решением для самых требовательных приложений. Пробник герметизирован как со стороны наконечника, так и со стороны разъёма, что делает его самым устойчивым к внешним воздействиям по сравнению с другими пробниками. Он работает в широком диапазоне температур от -40 до $+200$ °С, что позволяет измерять зависимости от частоты и температуры. Пробник допускает автоклавирующую стерилизацию, что позволяет использовать его в пищевой, медицинской и химической промышленности, где необходимым условием является стерилизация. Тонкая конструкция позволяет легко устанавливать его в бродильные ёмкости, камеры для химических реакций и другие установки с малыми отверстиями. Он пригоден для измерения свойств жидких, порошкообразных и твёрдых материалов с плоской поверхностью. Более подробная информация приведена в техническом обзоре диэлектрических пробников⁶ и в онлайн-справочной системе⁷.

Диэлектрические пробники совместимы с анализаторами цепей Keysight и анализатором импеданса E4991B. С анализатором импеданса параметры высокотемпературного пробника гарантируются начиная с частоты 10 МГц.

Перед измерением нужно выполнить калибровку на наконечнике пробника. Трёх-этапная калибровка компенсирует погрешности направленности, слежения и согласования источника, которые могут присутствовать в измерениях отраженного сигнала. Чтобы устранить эти три составляющие погрешности, выполняется измерение трёх известных калибровочных мер. Для компенсации систематической (повторяющейся) погрешности измерения используется разность между предсказанными и реальными значениями. Тремя известными калибровочными мерами являются воздух, короткозамкнутая цепь (КЗ) и дистиллированная деионизированная вода. Но даже после калибровки пробника дополнительные источники погрешностей могут влиять на точность измерения. Существуют три основных источника погрешности:

- Нестабильность характеристик кабеля
- Воздушные зазоры
- Толщина образца

Перед измерением важно дать кабелю, соединяющему пробник с анализатором цепей, достаточно времени на стабилизацию и проследить за тем, чтобы он не менял своего положения (не изгибался и не перемещался) после калибровки и до завершения измерения. Автоматическая функция обновления электронной калибровки в считанные секунды выполняет перекалибровку системы перед каждым измерением. Это практически устраняет нестабильность характеристик кабеля и погрешности дрейфа.

Для твёрдых материалов, если не обработать поверхность материала так, чтобы она была столь же гладкой, как и поверхность пробника, важным источником погрешности может быть воздушный зазор между пробником и образцом. Для жидких образцов аналогичное влияние могут оказывать пузырьки воздуха на наконечнике пробника.

Кроме того, образец должен быть достаточно толстым, чтобы пробник воспринимал его как «бесконечный». Имеется простое уравнение⁶ для расчёта примерной толщины образца для высокотемпературного пробника и предполагаемой толщины образца для тонкого пробника. Простой способ проверки заключается в том, чтобы поставить за образцом шунт и посмотреть, влияет ли он на результаты измерения.

На рис. 15 сравниваются измерения диэлектрической проницаемости и коэффициента потерь метанола при комнатной температуре (+25 °С), полученные с использованием высокотемпературного пробника, с теоретическими расчётами, выполненными с помощью модели Коул-Коула. В расчётах Коул-Коула использовались следующие параметры:

$$\varepsilon_s = 33.7, \quad \varepsilon_\infty = 4.45, \quad \tau = 4.95 \times 10^{-11}, \quad \alpha = 0.036$$

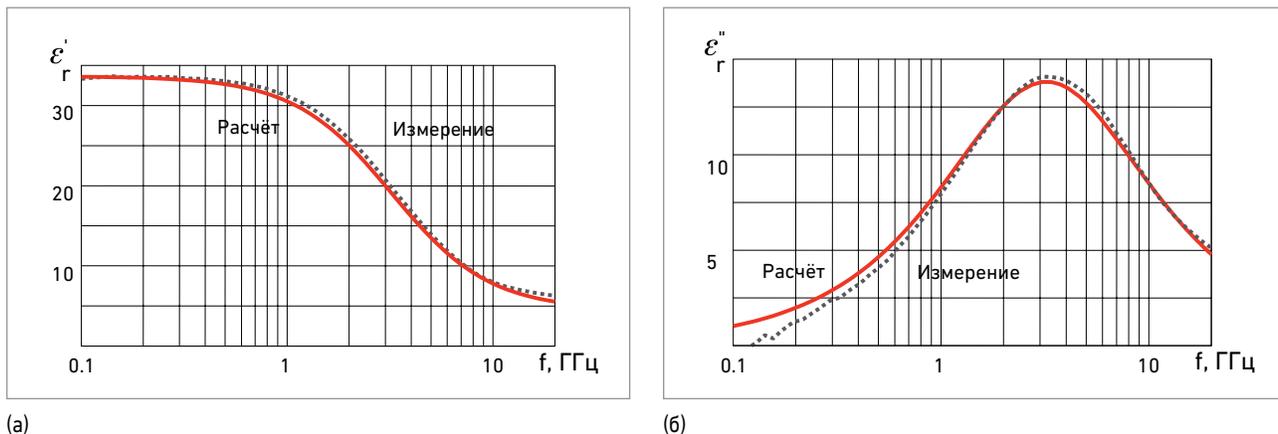


Рис.15. Сравнение измеренных диэлектрической проницаемости (а) и коэффициента потерь (б) метанола при +25 °С с моделью Коул-Коула.

Недостатком метода коаксиального пробника является ограниченная точность в некоторых условиях по сравнению с методами линии передачи, свободного пространства или объёмного резонатора.

Линия передачи

Методы линии передачи предполагают размещение материала внутри отрезка закрытой линии передачи. В качестве линии передачи обычно используется секция прямоугольного волновода или коаксиальная воздушная линия (рис. 16). ϵ_r^* и μ_r^* вычисляются по результатам измерений отражённого сигнала (S_{11}) и переданного сигнала (S_{21}).

Предполагаемые свойства исследуемого материала

- Образец заполняет поперечное сечение тестовой оснастки
- Отсутствие зазоров между материалом и стенками тестовой оснастки
- Гладкие, плоские поверхности, перпендикулярные продольной оси
- Однородность

Особенности метода

- Широкая полоса – с нижней стороны ограничена длиной образца
- Ограниченное разрешение для малых потерь (зависит от длины образца)
- Возможность измерения магнитных материалов
- Возможность измерения анизотропных материалов в волноводе

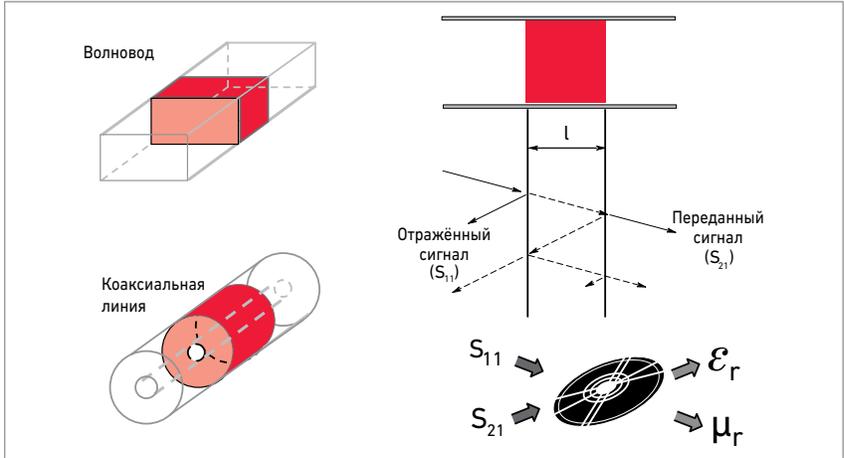
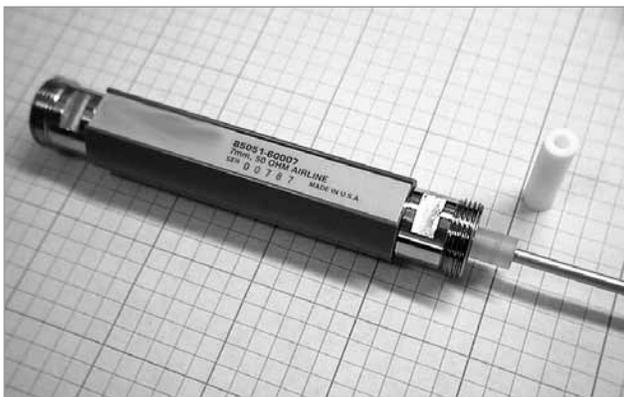
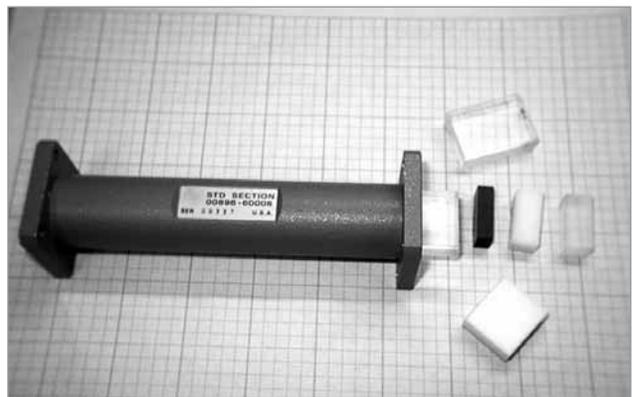


Рис. 16. Метод линии передачи; волновод и коаксиальная линия

Коаксиальные линии передачи охватывают широкий диапазон частот, но для них нужны тороидальные образцы, которые сложны в изготовлении (рис. 17а). Диапазон частот волноводной тестовой оснастки простирается до миллиметровых волн, образцы изготавливать проще, но их частотный диапазон носит полосовой характер (рис. 17б). Типовая измерительная система, использующая метод линии передачи, состоит из векторного анализатора цепей, коаксиальной или волноводной линии передачи и программного обеспечения для расчёта диэлектрической или магнитной проницаемости. Это ПО входит в состав пакета для измерения характеристик материалов N1500A. Его можно установить на внешний ПК, подключенный через GPIB, LAN или USB в зависимости от используемого анализатора. При использовании анализаторов цепей серии ENA или PNA ПО можно установить прямо на анализатор и обойтись без внешнего компьютера. Дополнительная информация о пакете программ для измерения характеристик материалов N1500A приведена в техническом обзоре⁸ и онлайн-справочной системе⁹.



(а)



(б)

Рис.17. Воздушная коаксиальная линия диаметром 7 мм с образцами (а) и прямая секция волновода X-диапазона с образцами (б).

В качестве держателя коаксиальных образцов рекомендуется использовать воздушную линию сопротивлением 50 Ом из испытательных комплектов компании Keysight (рис. 17а). Каждый комплект для калибровки волновода семейства 11644A содержит прецизионную секцию волновода (рис. 7б), которую рекомендуется использовать в качестве держателя волноводных образцов.

На рис. 18 показаны результаты измерения диэлектрической проницаемости (а) и тангенса угла потерь (б) для двух образцов из плексигласа длиной 25 мм и 31 мм в волноводе X-диапазона. В качестве держателя образца использовалась прецизионная секция волновода длиной 140 мм, входящая в комплект для калибровки X11644A (рис. 176). В качестве анализатора цепей использовался анализатор PNA, тип калибровки – TRL с использованием прецизионного алгоритма NIST[®]. На двух приведённых ниже графиках показаны две пары кривых для двух разных измерений одних и тех же образцов. Два верхних измерения в каждой группе выполнены для случая, когда держатель образца не откалиброван.

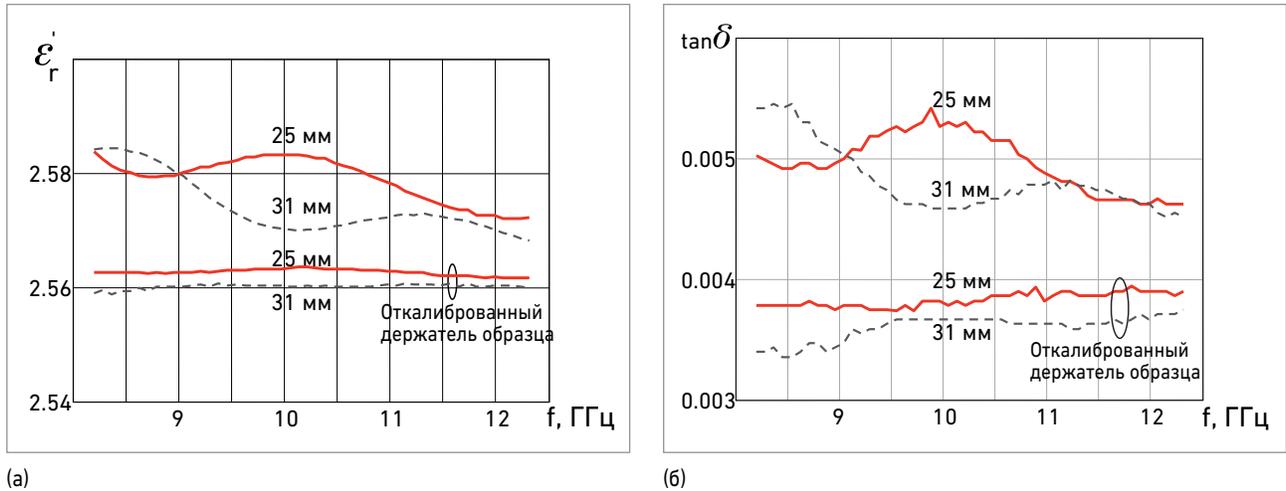


Рис. 18. Измерения двух образцов из плексигласа длиной 25 мм и 31 мм в волноводе X-диапазона

В этом случае, учитывая длину образца и длину держателя образца, пакет программ для измерения характеристик материалов N1500A корректно повернёт плоскость калибровки к лицевой стороне образца, но не скомпенсирует потери в волноводе. Две нижних линии на графике отображают результаты измерений тех же образцов, но в случае, когда держатель образца был учтен в ходе калибровки («откалиброван»), что позволило скомпенсировать потери и набег фаз. Как и ожидалось, кривые тангенса угла потерь (б) демонстрируют меньшие значения, когда держатель образца откалиброван, к тому же они меньше меняются с частотой. Это связано с тем, что потери в волноводе больше не добавляются к потерям в образце. Если образец невозможно зафиксировать без дополнительных приспособлений, например, потому что он очень тонкий или не является твёрдым телом, его можно подпереть с одной или с обеих сторон диэлектрическим материалом с известной диэлектрической проницаемостью и толщиной. В этом случае можно использовать методику устранения влияния диэлектрического держателя на результаты измерения.

Свободное пространство

Допущения о свойствах материала

- Большие плоские образцы с параллельными гранями
- Однородность

Особенности метода

- Бесконтактный, неразрушающий
- Высокочастотный – нижняя частота ограничивается максимально возможными размерами образца, рупорной антенны и помещения
- Пригоден при высоких температурах
- Для анизотропных материалов можно изменять поляризацию антенны
- Возможность измерения свойств магнитных материалов

Метод свободного пространства использует направленные антенны для фокусировки энергии на бруске или листе материала или для пропускания энергии через него (рис. 19). Этот метод является бесконтактным и может применяться к материалам, которые необходимо исследовать при высоких температурах и в агрессивных средах. На рис. 19 показаны две типовые схемы измерения: конфигурация для измерения S-параметров передачи в свободном пространстве (вверху) и конфигурация для измерения отражения по методу NRL arch (внизу). Типовая система состоит из векторного анализатора цепей, соответствующей тестовой оснастки для свободного пространства и программного обеспечения для расчёта диэлектрической или магнитной проницаемости. Это ПО входит в состав пакета для измерения характеристик материалов N1500A. Его можно установить на внешний ПК, подключенный через GPIB, LAN или USB в зависимости от используемого анализатора. При использовании анализаторов цепей серии ENA или PNA ПО можно установить прямо на анализатор и обойтись без внешнего компьютера.

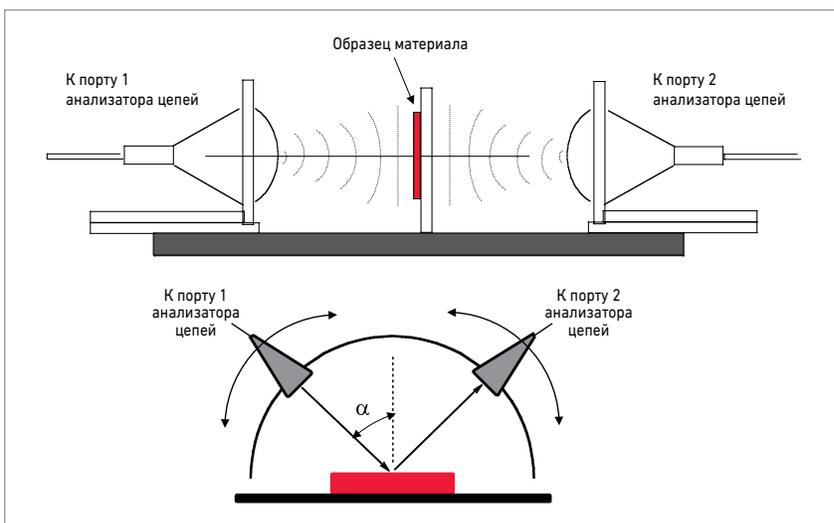


Рис. 19. Схема измерения в свободном пространстве

В свободном пространстве легко выполняются высокотемпературные измерения, поскольку образец ни к чему не прикасается (рис.20). Образец можно нагреть, поместив его в печь с «окном» из изолирующего материала, прозрачного для СВЧ излучения. Печи, необходимые для такого рода измерений, компания Keysight не поставляет. Базовая схема такого измерения показана на рис. 20.

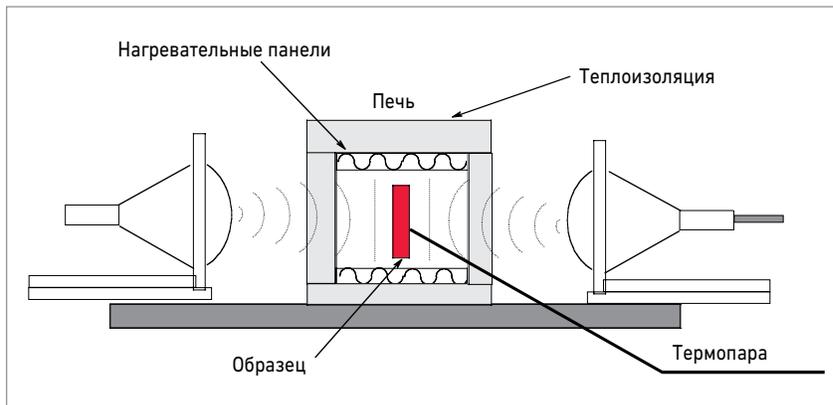


Рис. 20. Высокотемпературное измерение в свободном пространстве

Калибровка анализатора цепей для измерения в свободном пространстве достаточно сложна, поскольку калибровочные меры, используемые для этого метода, не имеют разъёмов. В зависимости от необходимого удобства и точности, калибровка может выполняться не сложнее, чем калибровка АЧХ, или достигать сложности полной двухпортовой калибровки.

Пакет программ для измерения характеристик материалов N1500A предлагает метод калибровки для измерения в свободном пространстве, который называется GRL (стробируемое согласование, отражение, линия). Эта калибровочная процедура упрощает работу и сокращает затраты по сравнению с некоторыми другими методами калибровки, такими как TRM (сквозное соединение, отражение, согласование) и TRL (сквозное соединение, отражение, линия). Для применения этой процедуры нужен анализатор цепей с опцией анализа во временной области, соответствующая тестовая оснастка для свободного пространства и металлическая калибровочная пластина. Кроме того, эта процедура включает стробируемую калибровку изоляции/отклика, которая снижает погрешности, вызванные дифракцией на краях образца и множественными остаточными отражениями между антеннами. Пакет программ для измерения характеристик материалов N1500A автоматически настраивает все процедуры калибровки в свободном пространстве и параметры анализатора цепей, сберегая время инженера. Мастер калибровки по шагам проводит пользователя через весь процесс калибровки.

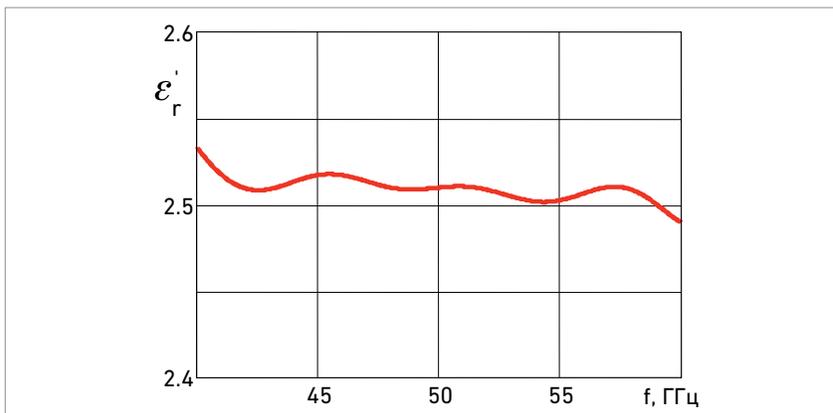


Рис. 21. Измерение образца из рексолита в U-диапазоне (40 – 60 ГГц)

На рис. 21 показаны результаты измерения образца из рексолита в U-диапазоне (40 – 60 ГГц) с калибровкой GRL, полученные с помощью анализатора цепей PNA и пакета для измерения характеристик материалов N1500A. Тестовая оснастка была выполнена из рупорных антенн со стандартным усилением и оказавшейся под рукой подходящей полки, чтобы показать, что при использовании калибровки GRL даже в простейшей схеме можно выполнить достоверные измерения. Для выполнения точных измерений рекомендуется использовать более жёсткие тестовую оснастку и сфокусированные рупорные антенны.



Рис. 22. Квазиоптический стол Thomas Keating Ltd. с диапазоном частот 330-500 ГГц, рупорные антенны с гауссовской диаграммой направленности, фокусирующие зеркала и держатель образца.

В миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах для измерения идеально подходят квазиоптические столы. Их можно приобрести у компании Thomas Keating Ltd или через отдел специального проектирования компании Keysight. Номера моделей по каталогу Keysight:

от 60 до 90 ГГц	Квазиоптический стол	85071E E02
от 75 до 110 ГГц	Квазиоптический стол	85071E E01
от 90 до 140 ГГц	Дополнительный набор рупорных антенн	85071E E22
от 140 до 220 ГГц	Дополнительный набор рупорных антенн	85071E E23
от 220 до 325 ГГц	Дополнительный набор рупорных антенн	85071E E18
от 325 до 500 ГГц	Дополнительный набор рупорных антенн	85071E E24

По запросу поставляется оборудование на другие частоты, а также столы, охватывающие несколько частотных диапазонов.

Объёмный резонатор

Сравнение резонансных и широкополосных методов

Резонансные методы

- Высокоимпедансная среда
- Возможность выполнения достоверных измерений на малых образцах
- Измерения только на одной или на нескольких частотах
- Пригодны для материалов с малыми потерями

Широкополосные методы

- Среда с малым импедансом
- Для выполнения достоверных измерений необходимы образцы большего размера
- Измерения на «любой» частоте

Объёмные резонаторы обладают высокой добротностью и резонируют на определённых частотах. Помещённый в полость резонатора образец влияет на частоту резонанса (f) и добротность (Q) резонатора. По этим параметрам можно рассчитать комплексную диэлектрическую проницаемость материала на одной частоте. Типовая измерительная система состоит из анализатора цепей, тестовой оснастки с объёмным резонатором и программного обеспечения для расчётов.

Существует много разных методов измерения и типов тестовой оснастки. Пакет программ для измерения характеристик материалов Keysight N1500A поддерживает три метода: метод разделённого цилиндра, метод диэлектрического резонатора с разделённым стержнем и метод возмущения ёмкости ASTM D252010. Для управления анализатором цепей можно использовать внешний ПК, подключённый через GPIB, LAN или USB в зависимости от используемого анализатора. При использовании анализаторов цепей серии ENA или PNA ПО можно установить прямо на анализатор и обойтись без внешнего компьютера. Кроме того, Keysight предлагает тестовые оснастки с объёмным резонатором с высоким Q для методов разделённого цилиндра¹³ и разделённого стержня¹⁴.

Резонатор с разделённым цилиндром

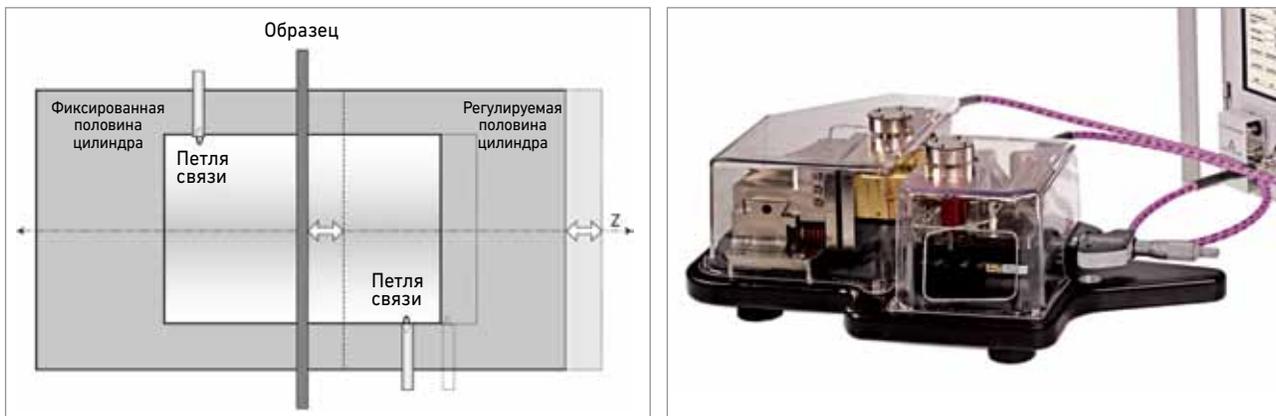


Рис. 23. Резонатор с разделённым цилиндром Keysight 85072A на частоту 10 ГГц

Резонатор с разделённым цилиндром представляет собой цилиндрический объёмный резонатор, разделённый на две половины. Образец помещается в зазор между двумя половинами цилиндра. Одна половина цилиндра зафиксирована, а другая регулируется, позволяя менять зазор в соответствии с толщиной образца. Действительная часть диэлектрической проницаемости ϵ' и тангенс угла потерь или тангенс дельта ($\text{tg}\delta$) рассчитываются по толщине образца, длине цилиндра и измеренным S-параметрам резонатора с разделённым цилиндром – пустого и с образцом. С помощью модели согласования мод, разработанной в NIST в Боулдер-Сити, штат Колорадо¹⁴, можно рассчитать тангенс угла потерь на моде 10 ГГц TE_{011} . Можно также выполнить измерение на модах TE_{0np} более высокого порядка², где отсутствуют мешающие моды. Этот метод используется IPC в качестве метода испытаний в стандарте TM-650 2.5.5.13¹⁵.

Резонатор с разделённым стержнем

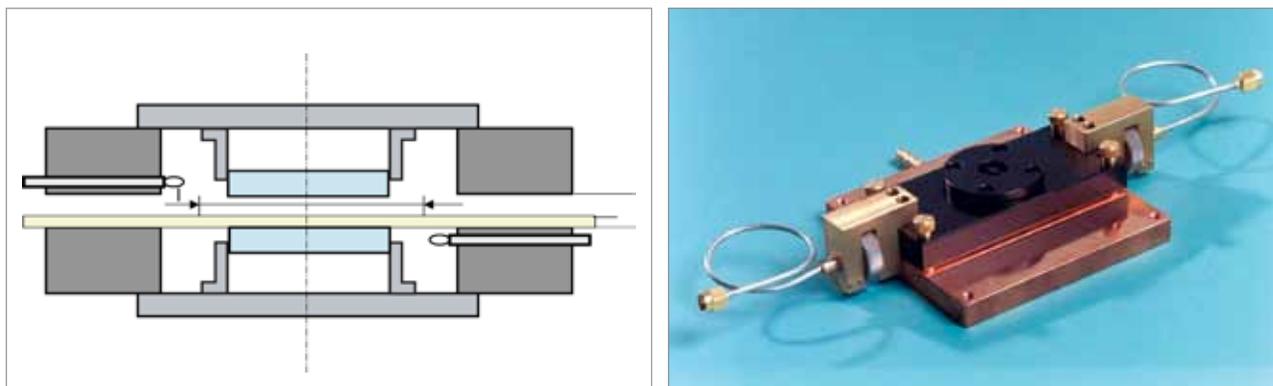


Рис. 24. Диэлектрический резонатор с разделённым стержнем на 5 ГГц компании QWED, поставляется Keysight под номером 85071E-E04

Диэлектрический резонатор с разделённым стержнем компании QWED использует диэлектрические материалы с малыми потерями, которые позволяют создавать резонаторы с более высокой добротностью и лучшей температурной стабильностью по сравнению с традиционными цельнометаллическими резонаторами. Этот метод является одним из самых простых и точных методов измерения комплексной диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь для тонких листовых материалов с малыми потерями¹⁶. Сравнительно недорогие тестовые оснастки для одиночных частот в диапазоне от 1 до 22 ГГц можно приобрести у компании QWED или через отдел специального проектирования компании Keysight. Номера моделей по каталогу Keysight:

1,1 ГГц	85071E E19
2,5 ГГц	85071E E03
5 ГГц	85071E E04
15 ГГц	85071E E15
22 ГГц	85071E E07

Изделия с другими частотами доступны по запросу.

Метод возмущения резонатора (ASTM D2520)



Рис. 25. Измерение в объёмном резонаторе

Метод возмущения резонатора ASTM 252010 использует прямоугольный волновод со связанными через диафрагму фланцами, который работает на моде TE_{10n} (рис. 25). Для измерения свойств диэлектрика образец помещается в максимум электрического поля. И хотя компания Keysight не поставляет готовых тестовых оснасток для метода возмущения резонатора, несложно адаптировать прямую секцию прецизионного волновода, аналогичную той, что входит в состав наборов для калибровки волноводов серии 11644A. Нужно просверлить отверстие точно в середине по длине волновода и изготовить два связанных через диафрагму фланца. Размеры отверстия диафрагмы $b/2,2$, где b – узкая сторона поперечного сечения волновода. Если образец вставляется через отверстие, расположенное на середине длины волновода, то нечётное число полуволн создаст максимум электрического поля в месте расположения образца, что позволит измерить его диэлектрические свойства. (Чётное число полуволн создаст в точке расположения образца максимум магнитного поля, что позволит измерить магнитные свойства образца.)

Для метода возмущения резонатора нужен очень маленький образец, чтобы поле в резонаторе искажалось очень слабо и смещало частоту резонанса и добротность. Такое предположение позволяет упростить теорию и использовать для расчёта диэлектрических свойств материала приведённые выше уравнения.

Метод параллельных пластин

Метод параллельных пластин, известный также как метод трёх контактов (стандарт ASTM D150¹²), заключается в размещении тонкого листа материала или жидкости между двумя электродами, так чтобы получился конденсатор. Затем измеренная ёмкость используется для расчёта диэлектрической проницаемости. В реальной схеме используются два электрода с тестовой оснасткой для установки диэлектрического материала. Прибор для измерения импеданса измеряет векторные компоненты ёмкости (C) и рассеяния (D), а ПО рассчитывает диэлектрическую проницаемость и тангенс угла потерь. Этот метод хорошо подходит для точных низкочастотных измерений характеристик тонких листовых материалов и жидкостей. Типовая система для измерения по методу параллельных пластин состоит из анализатора импеданса или измерителя иммитанса и тестовой оснастки, такой как тестовая оснастка для измерения свойств диэлектриков 16451В и 16453А, которая работает на частотах до 1 ГГц. Для измерения характеристик жидкостей предлагается тестовая оснастка 16452А. Дополнительная информация о методе параллельных пластин и других решениях Keysight для низкочастотных измерений характеристик материалов приведена в рекомендациях по применению 1369-1 (номер документа 5980-2862EN)¹ и 380-1¹¹.

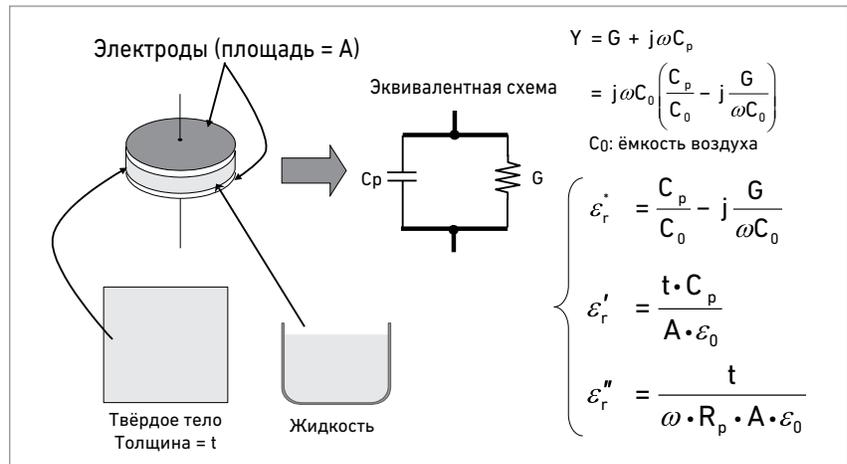


Рис. 26. Метод параллельных пластин



Рис. 27. Тестовая оснастка для измерения характеристик диэлектриков Keysight 16451В и 16453А с анализатором импеданса

Метод измерения индуктивности

Относительная магнитная проницаемость магнитного материала, полученная из самоиндукции катушки индуктивности с замкнутым магнитопроводом (например, с тороидальным сердечником), часто называется эффективной магнитной проницаемостью. Традиционный метод измерения эффективной магнитной проницаемости заключается в намотке провода на сердечнике и измерении индуктивности на выводах полученной катушки. Измерения такого типа обычно выполняются с помощью анализатора импеданса. Эффективная магнитная проницаемость рассчитывается по измеренному значению индуктивности. Тестовая оснастка для измерения свойств магнитных материалов Keysight 16454A предоставляет идеальную конструкцию для создания одновитковой катушки индуктивности, не создающей рассеяния магнитного потока при установке тороидального сердечника. Дополнительная информация о методе измерения индуктивности приведена в рекомендациях по применению 1369-1 (P/N 5980-2862EN)¹.

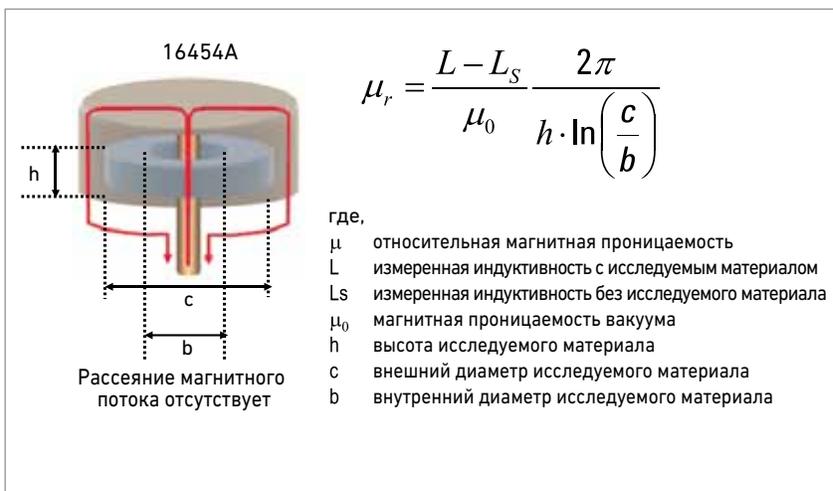


Рис. 28. Метод измерения индуктивности

Сравнение методов

Выбор наиболее подходящего метода измерения определяется многими факторами, такими как точность, удобство, форма и вид материала. Ниже приведён перечень наиболее важных факторов:

- Диапазон частот
- Ожидаемые значения ϵ_r и μ_r
- Необходимая точность измерения
- Свойства материала (например, однородность, изотропность)
- Вид материала (например, жидкость, порошок, твёрдое тело, лист)
- Ограничения на размер образца
- Разрушающий или неразрушающий метод
- Контактный или бесконтактный метод
- Температура
- Стоимость

На рис. 29 представлено краткое сравнение методов измерения, которые были описаны выше.

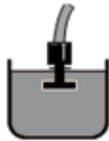
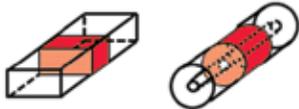
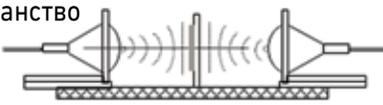
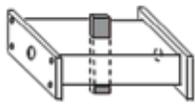
Коаксиальный пробник ϵ_r		Широкополосный, удобный, неразрушающий Хорошо подходит для материалов с большими потерями, жидкостей и порошкообразных веществ
Линия передачи ϵ_r и μ_r		Широкополосный Хорошо подходит для материалов с большими потерями, поддающихся обработке твёрдых веществ
Свободное пространство ϵ_r и μ_r		Широкополосный, бесконтактный Хорошо подходит для листовых материалов, порошков, высоких температур
Объёмный резонатор ϵ_r		Одна частота, точность Хорошо подходит для материалов с малыми потерями, небольших образцов
Параллельные пластины ϵ_r		Точность Хорошо подходит для низких частот, тонких листовых материалов
Измерение индуктивности μ_r		Точность, простота, необходим тороидальный сердечник

Рис. 29. Сравнение методов измерения

Решения Keysight

Компания Keysight предлагает широкий выбор тестовой оснастки для измерения диэлектрических свойств, охватывающий большинство видов материалов. На рис. 30 показано назначение тестовой оснастки Keysight в зависимости от вида материала и частотного диапазона.

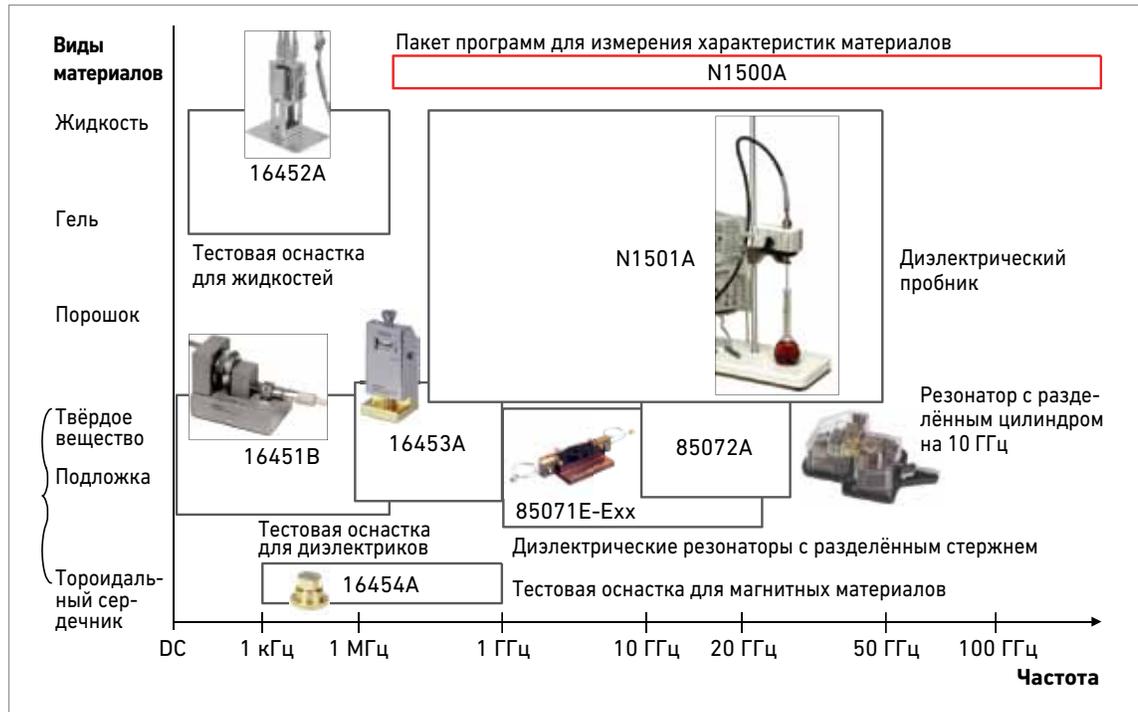


Рис. 30. Тестовая оснастка для измерения свойств материалов

Кроме того, компания Keysight предлагает мощное программное обеспечение, которое помогает заказчикам автоматизировать анализ комплексной диэлектрической и магнитной проницаемости. Пакет программ для измерения характеристик материалов N1500A упрощает процесс измерения диэлектрической и магнитной проницаемости с помощью анализатора цепей Keysight. Простое в обращении ПО проводит пользователя через настройку и измерение, мгновенно преобразуя полученные от анализатора цепей S-параметры в выбранный вами формат данных и в считанные секунды отображая результаты. Результаты можно представить во множестве форматов:

ϵ_r' , ϵ_r'' , $\text{tg } \delta$, μ_r' , μ_r'' , $\text{tg } \delta_m$ и диаграмма Коул-Коула

Предлагается множество методов измерения и математических моделей, позволяющих удовлетворить требования большинства приложений.

Опция для калибровки в свободном пространстве поддерживает эксклюзивный метод калибровки GRL (стробируемое согласование, отражение, линия) для измерения характеристик материалов в свободном пространстве. Опция дугового отражения автоматизирует популярный метод NRL arch для измерения отражений от поверхности образца. Опция объёмного резонатора обеспечивает высочайшую точность измерений тангенса угла потерь и высокое разрешение. Опция коаксиального пробника автоматизирует измерения с помощью набора диэлектрических пробников.

На рис. 31 приведена сводка тестовой оснастки Keysight и совместимых измерительных приборов.

		PNA	ENA	FieldFox	E4991B	E4990A	E4980A	4285A	Метод
N1501A	Набор диэлектрических пробников	●	●	●	●				Коаксиальный пробник
85071E Exx	Резонаторы с разделённым стержнем	●	●	●					Объёмный резонатор
85072A	Резонатор с разделённым цилиндром на 10 ГГц	●							Объёмный резонатор
16451B	Тестовая оснастка для диэлектрических материалов					●	●	●	Параллельные пластины
16452A	Тестовая оснастка для жидкостей					●	●	●	Параллельные пластины
16453A	Тестовая оснастка для диэлектрических материалов				●				Параллельные пластины
16454A	Тестовая оснастка для магнитных материалов				●	●			Индуктивность

Рис. 31. Измерительные приборы и тестовая оснастка Keysight

Литература

1. Решения для измерения диэлектрической и магнитной проницаемости с помощью измерителей иммитанса и анализаторов импеданса, Keysight, номер документа 5980-2862EN, 28 октября 2008 г.
2. Основные принципы векторного анализа цепей, Keysight, номер документа 5965-7707E, 12 декабря 2012 г.
3. Архитектуры анализаторов цепей, Keysight, номер документа 5965-7708E, 6 декабря 2000 г.
4. Применение коррекции ошибок в измерениях с помощью анализаторов цепей, Keysight, номер документа 5965-7709E, 27 марта 2002 г.
5. Д. В. Блекман, Р. Д. Поллард, Улучшенный метод измерения диэлектрической проницаемости с помощью коаксиального пробника, IEEE Trans. on Instr. Meas., том. 46, № 5, октябрь 1997 г., сс. 1093-1099
6. Технический обзор, Пакет программ для измерения характеристик материалов Keysight N1500A, Keysight, номер документа 5992-0263EN
7. Технический обзор, Набор диэлектрических пробников Keysight N1501A, Keysight, номер документа 5991-0264EN
8. Онлайн справка пакета для измерения характеристик материалов, <http://na.tm.keysight.com/materials/downloads.html>
9. Методы ASTM для измерения комплексной диэлектрической проницаемости твёрдых неэлектропроводных материалов в СВЧ диапазоне при температурах до 1650 °C, стандарт ASTM D2520, Американское общество по испытаниям и материалам
10. Измерение диэлектрической проницаемости твёрдых материалов с помощью тестовой оснастки 16451B, Keysight, номер документа 5950-2390, сентябрь 1998 г.
11. ASTM, «Методы измерения параметров потерь А-С и диэлектрической проницаемости твёрдых неэлектропроводных материалов», стандарт ASTM D 150, Американское общество по испытаниям и материалам
12. Технический обзор, Резонатор с разделённым цилиндром на 10 ГГц Keysight 85072A, Keysight, номер документа 5989-6182EN, 8 мая 2012 г.
13. М. Д. Джанезик, "Неразрушающие измерения относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь с помощью резонатора с разделённым цилиндром", диссертация, Колорадский университет в Боулдер-Сити, 2003 г.
14. IPC TM-650 2.5.5.13 Измерение относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь с помощью резонатора с разделённым цилиндром
15. Диэлектрические резонаторы с разделённым стержнем для диэлектрических измерений подложек, Keysight, номер документа 5989-5384EN, 19 июля 2006 г.

1. Для 85070E с E4991B нужно ПО N1500A-004 версии v2014-20150115 или выше.

myKeysight

myKeysight

www.keysight.com/find/mykeysight

Персонализированное представление интересующей вас информации.



www.axiestandard.org

AXIe представляет собой открытый стандарт, основанный на AdvancedTCA®, с расширениями для контрольно-измерительных приложений. Компания Keysight входит в число основателей консорциума AXIe. ATCA®, AdvancedTCA® и логотип ATCA являются зарегистрированными в США товарными знаками PCI Industrial Computer Manufacturers Group.



www.lxistandard.org

LXI представляет собой интерфейс на основе Ethernet, пришедший на смену интерфейсу GPIB. Он обеспечивает более быстрый обмен данными и позволяет использовать в измерительных приборах веб-технологии. Компания Keysight входит в число основателей консорциума LXI.



www.pxisa.org

PXI (PCI eXtensions for Instrumentation) – это формат модульного высокопроизводительного вычислительного и контрольно-измерительного оборудования, предназначенного для работы в жестких производственных условиях.



Трехлетняя гарантия

www.keysight.com/find/ThreeYearWarranty

Компания Keysight обеспечивает высшее качество выпускаемой продукции и минимальные общие эксплуатационные расходы. Подтверждением этому является стандартная трехлетняя гарантия на все предлагаемые приборы независимо от региона продажи.



Планы компании Keysight по гарантийному обслуживанию

www.keysight.com/find/AssurancePlans

Пятилетняя страховка защитит вас от внеплановых расходов, связанных с ремонтом и проверкой/калибровкой приборов.



www.keysight.com/go/quality

Система управления качеством Keysight Technologies, Inc. сертифицирована DEKRA по ISO 9001:2008.

Торговые партнеры компании Keysight

www.keysight.com/find/channelpartners

Получите двойную выгоду: богатый опыт и широкий выбор продуктов Keysight в сочетании с удобствами, предлагаемыми торговыми партнерами.

www.keysight.com/find/materials

www.keysight.com/find/na

www.keysight.com/find/impedance

www.keysight.com/find/ecal

Российское отделение Keysight Technologies

115054, Москва, Космодамианская
наб., 52, стр. 3

Тел.: +7 (495) 7973954

8 800 500 9286 (Звонок по России
бесплатный)

Факс: +7 (495) 7973902

e-mail: tmo_russia@keysight.com

www.keysight.ru

Сервисный Центр Keysight Technologies в России

115054, Москва, Космодамианская
наб., 52, стр. 3

Тел.: +7 (495) 7973930

Факс: +7 (495) 7973901

e-mail: tmo_russia@keysight.com