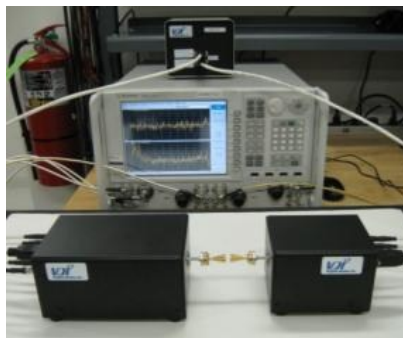
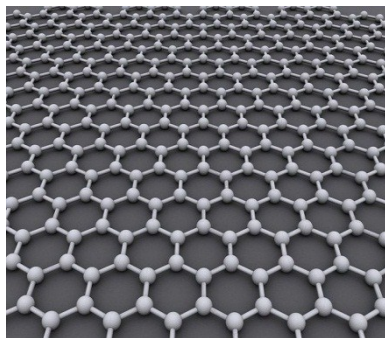
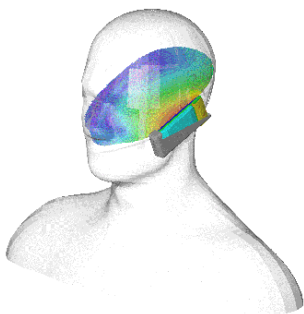


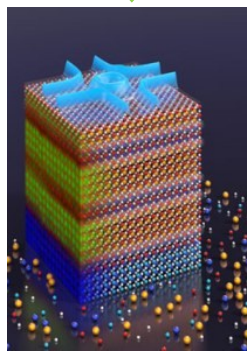
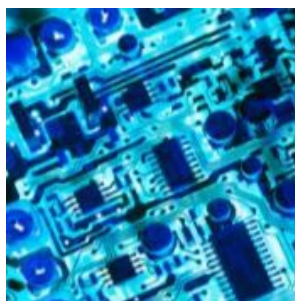
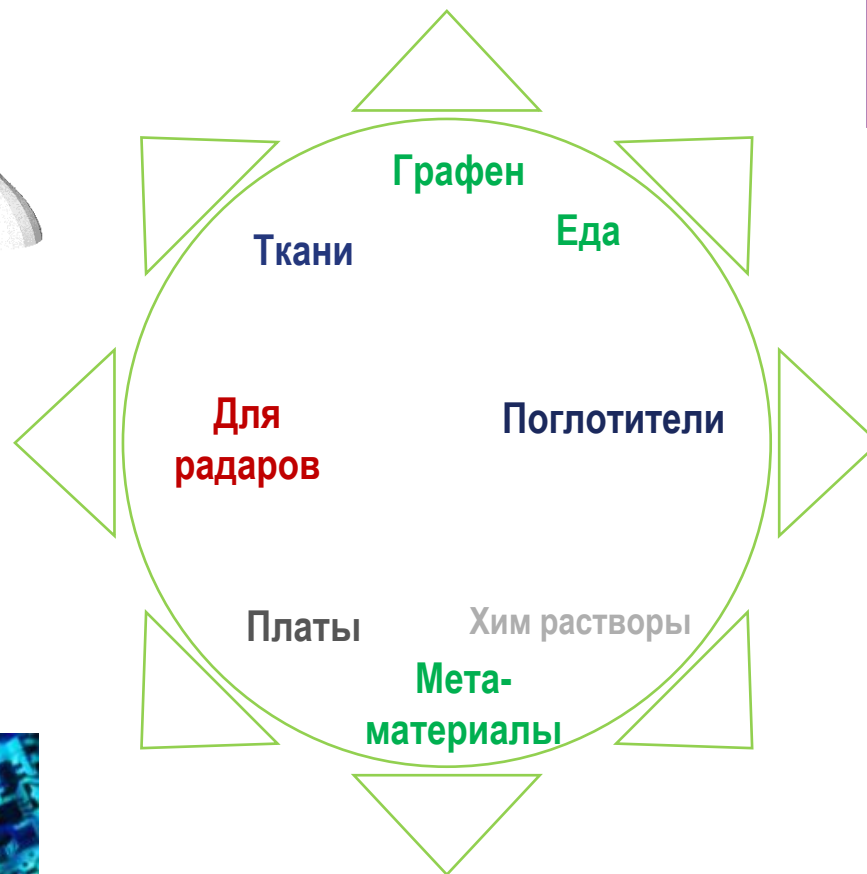
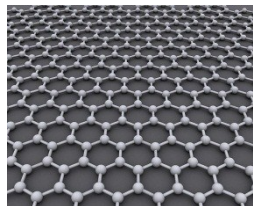
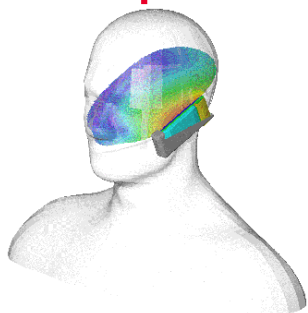
Характеризация параметров материалов от постоянного тока до терагерцового диапазона частот

Keysight Technologies

2015



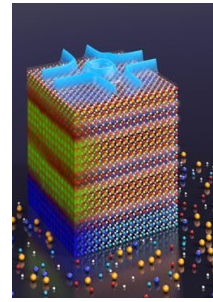
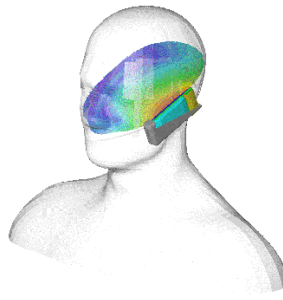
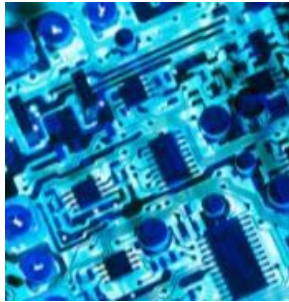
Типы материалов



Почему необходимы измерения диэлектрических свойств?

Моделирование распространения сигнала в среде требует наличия сведений о диэлектрических свойствах материала:

- Время задержки в микрополосковой линии?
- Насколько будет ослабляться сигнал под водой?
- Какая будет дисперсия сигнала в микрополосковой линии?
- Резонансная частота фильтра с диэлектрическим резонатором?
- Какая часть электромагнитной энергии пройдет через диэлектрик?
- Какая часть энергии будет поглощена в безэховой камере?



Диэлектрическая и магнитная проницаемости

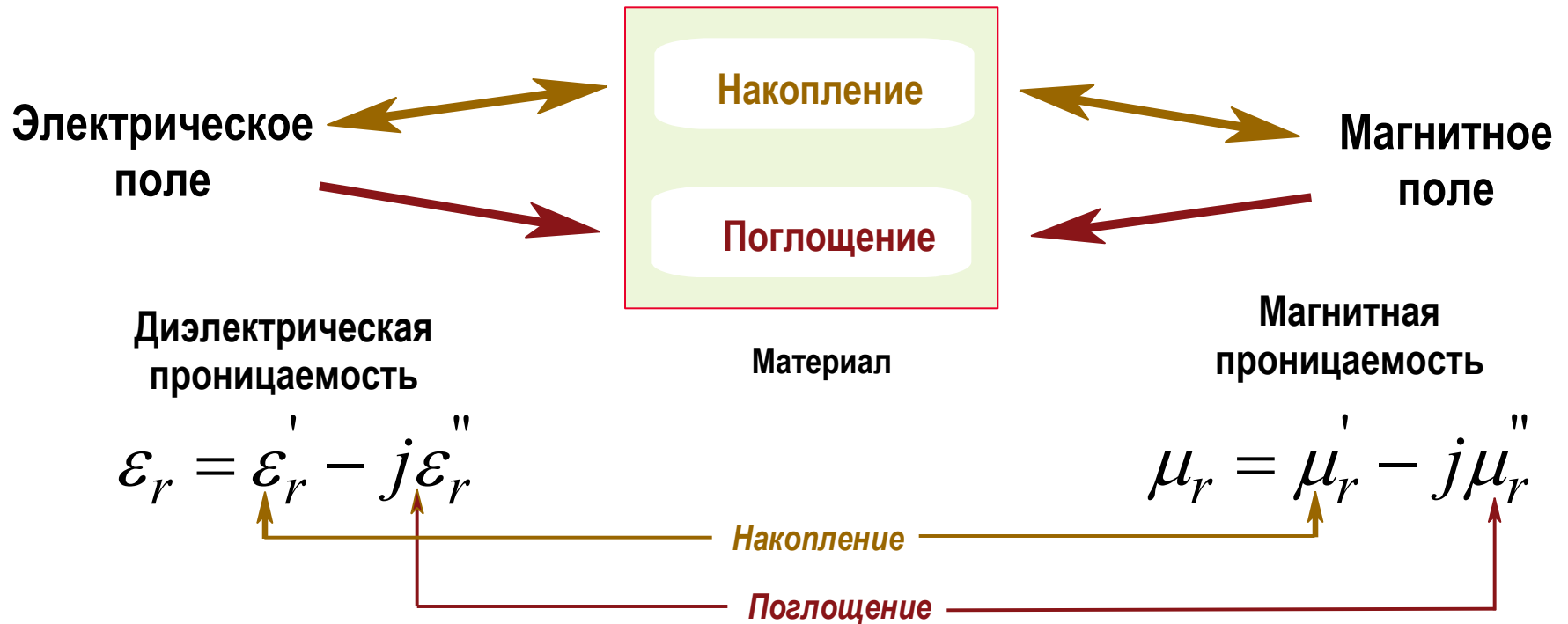
Диэлектрическая
проницаемость

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

Магнитная
проницаемость

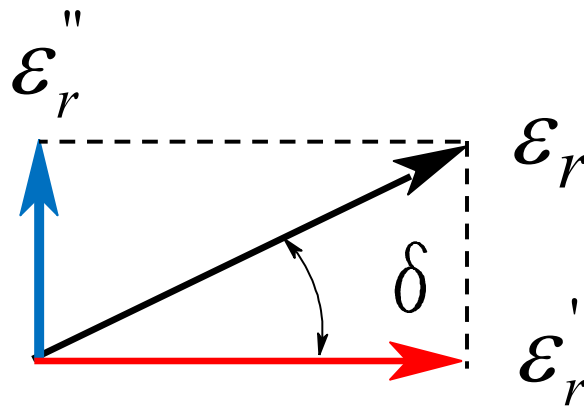
$$\mu = \frac{\mu}{\mu_0} = \mu_r' - j\mu_r''$$

Взаимосвязь электрического и магнитного полей



Тангенс угла диэлектрических потерь

$$\tan \delta = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'}$$



$$\tan \delta = D = \frac{1}{Q} = \frac{\text{Поглощенная Энергия}}{\text{Запасенная Энергия}}$$

D

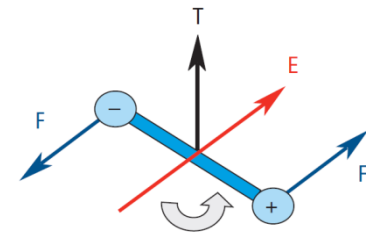
Тангенс угла потерь

Q

Добротность

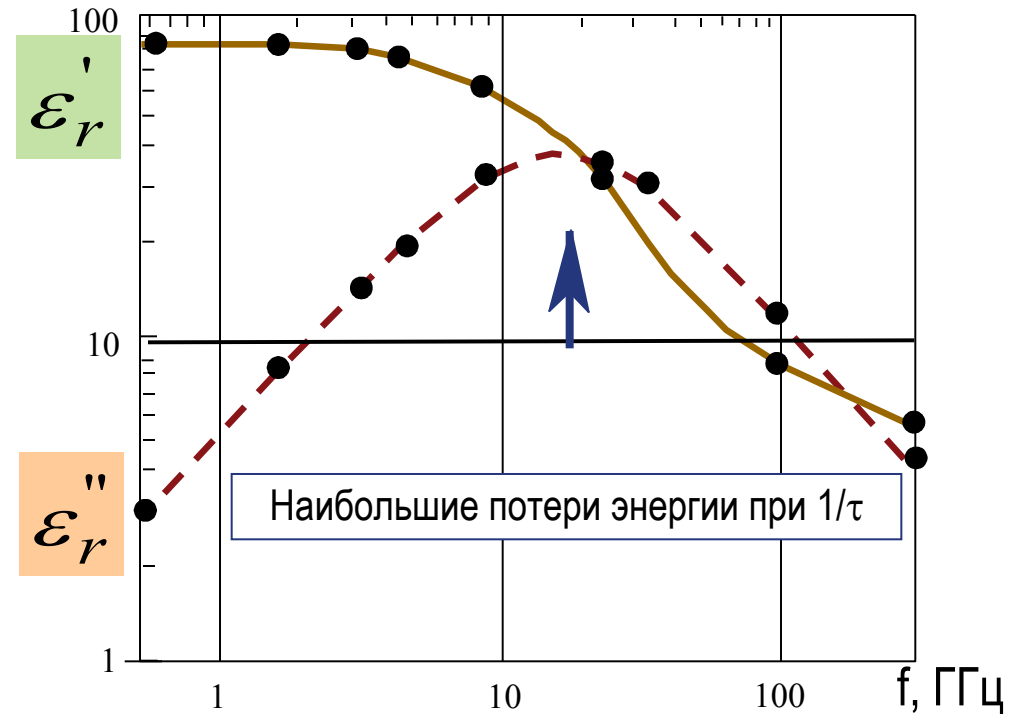
Df

Постоянная релаксации τ



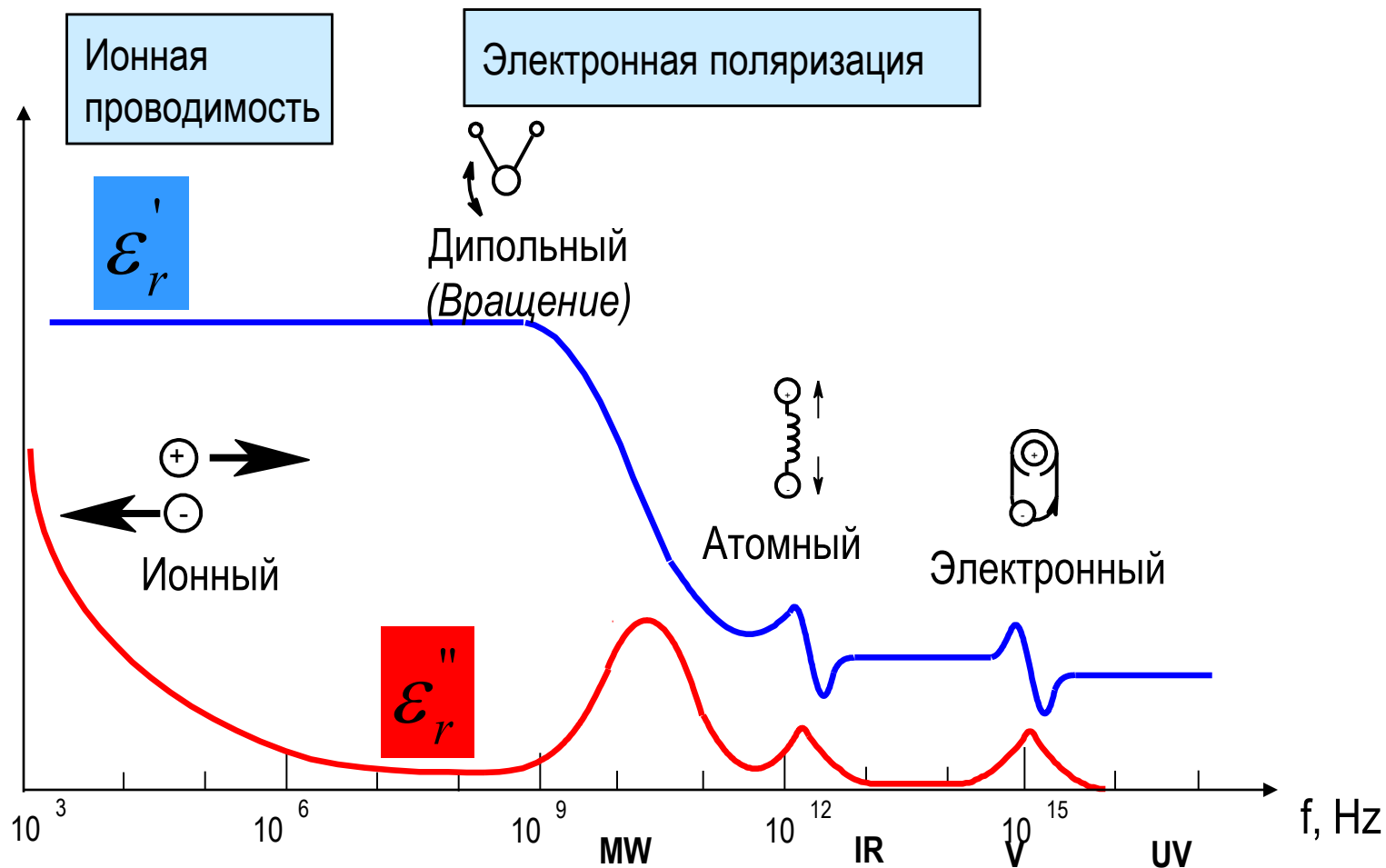
τ = Время необходимое для уменьшения поляризации системы в e раз, по сравнению с исходным значением после выключения внешнего поля..

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

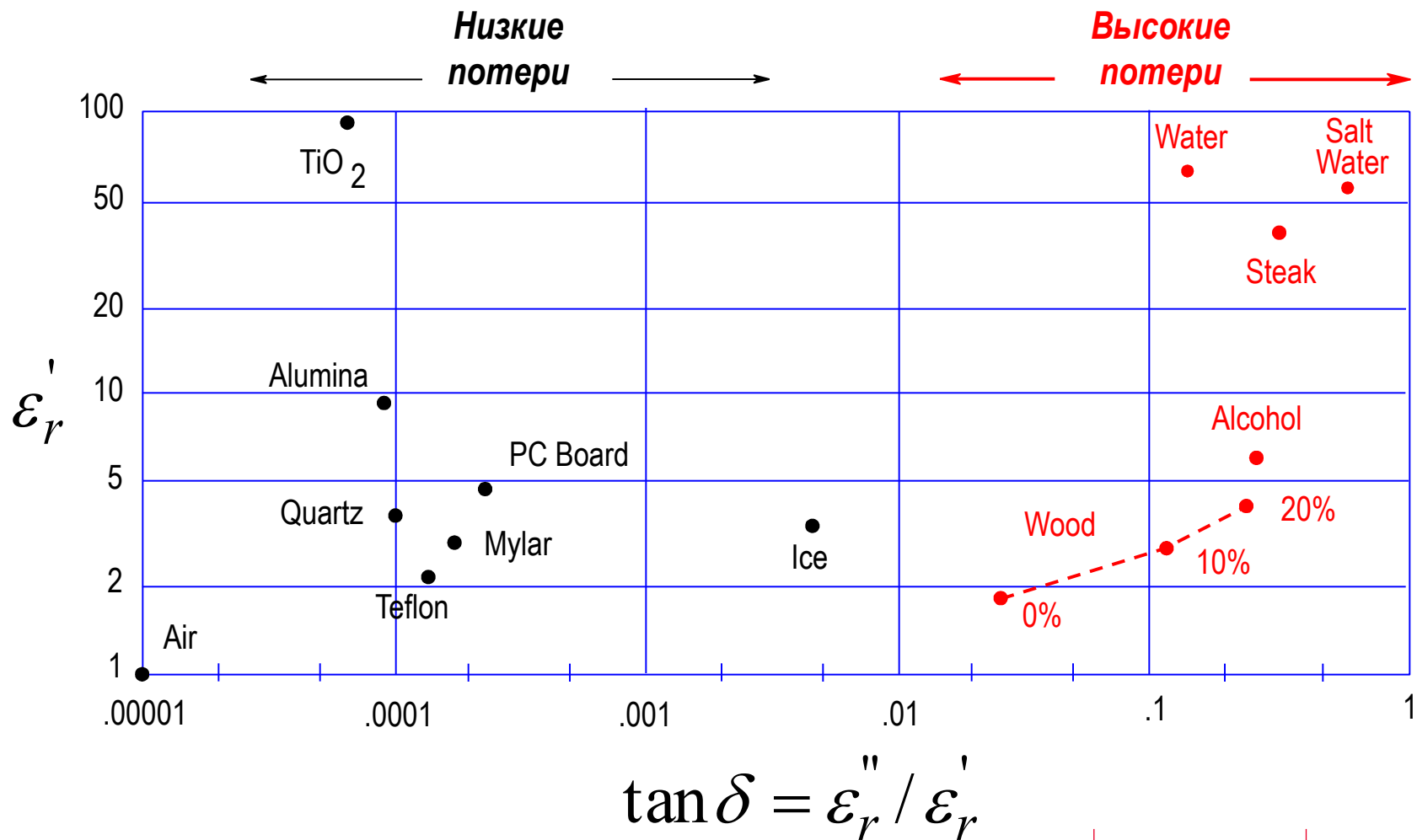


Уравнение Дебая: $\epsilon(\omega) = \epsilon_{\infty} + \frac{\epsilon_s - \epsilon_{\infty}}{1 + j\omega\tau}$

Активация диэлектрических механизмов

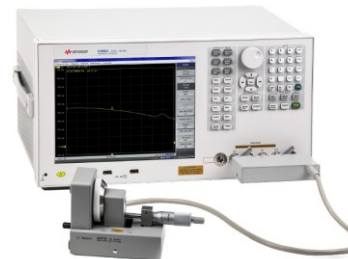
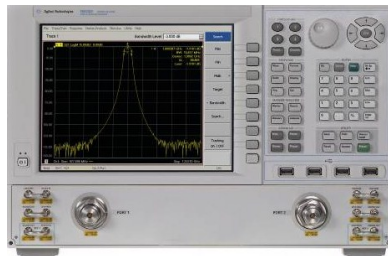


Свойства диэлектриков (при 3 ГГц)

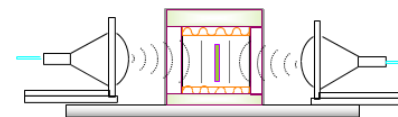


Измерительная система

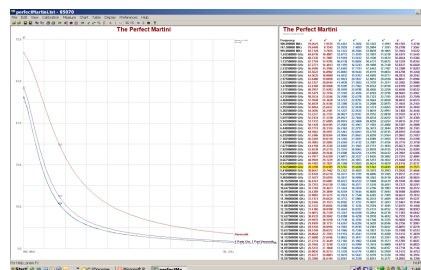
Прибор



Оснастка

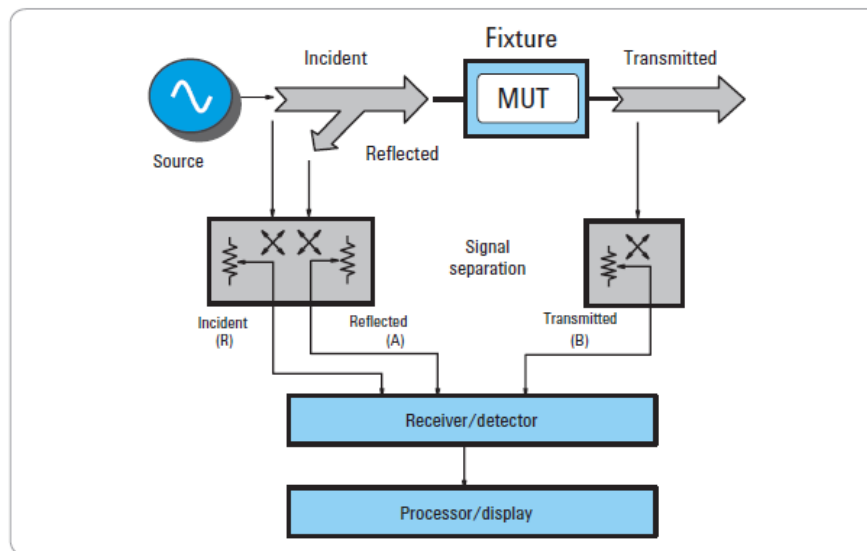
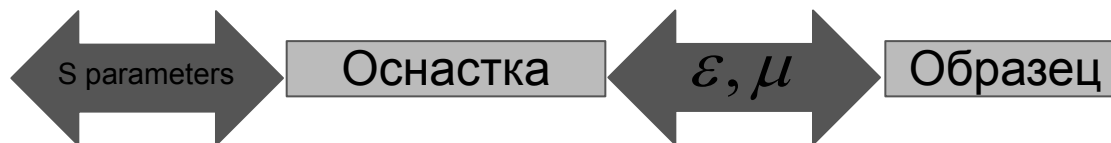
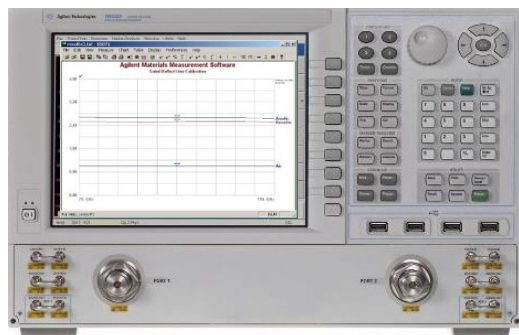


Програмное обеспечение



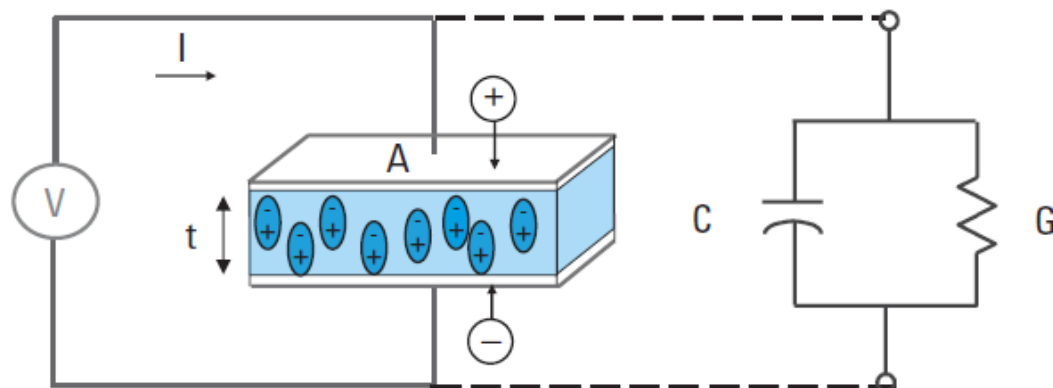
Измерительная система

Анализатор цепей



Измерительная система

Анализатор импеданса/LCR метр



На образец подается переменное напряжение и производится измерение падения напряжения на образце. Параметры материала вычисляются из емкости, тангенса угла диэлектрических потерь и размеров материала.

Типы оснасток



16454A



Индуктивные

Коаксиальный
зонд

Параллельные
пластины
(Емкость)

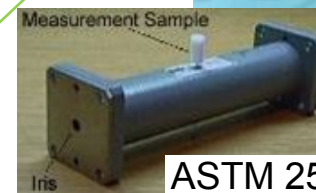
Резонатор

Линия
передачи

Свободное
пространство



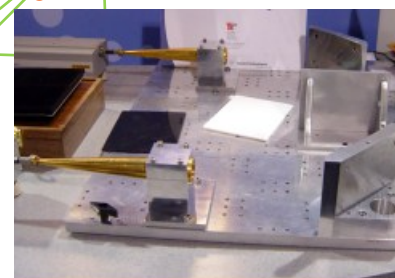
SPDR



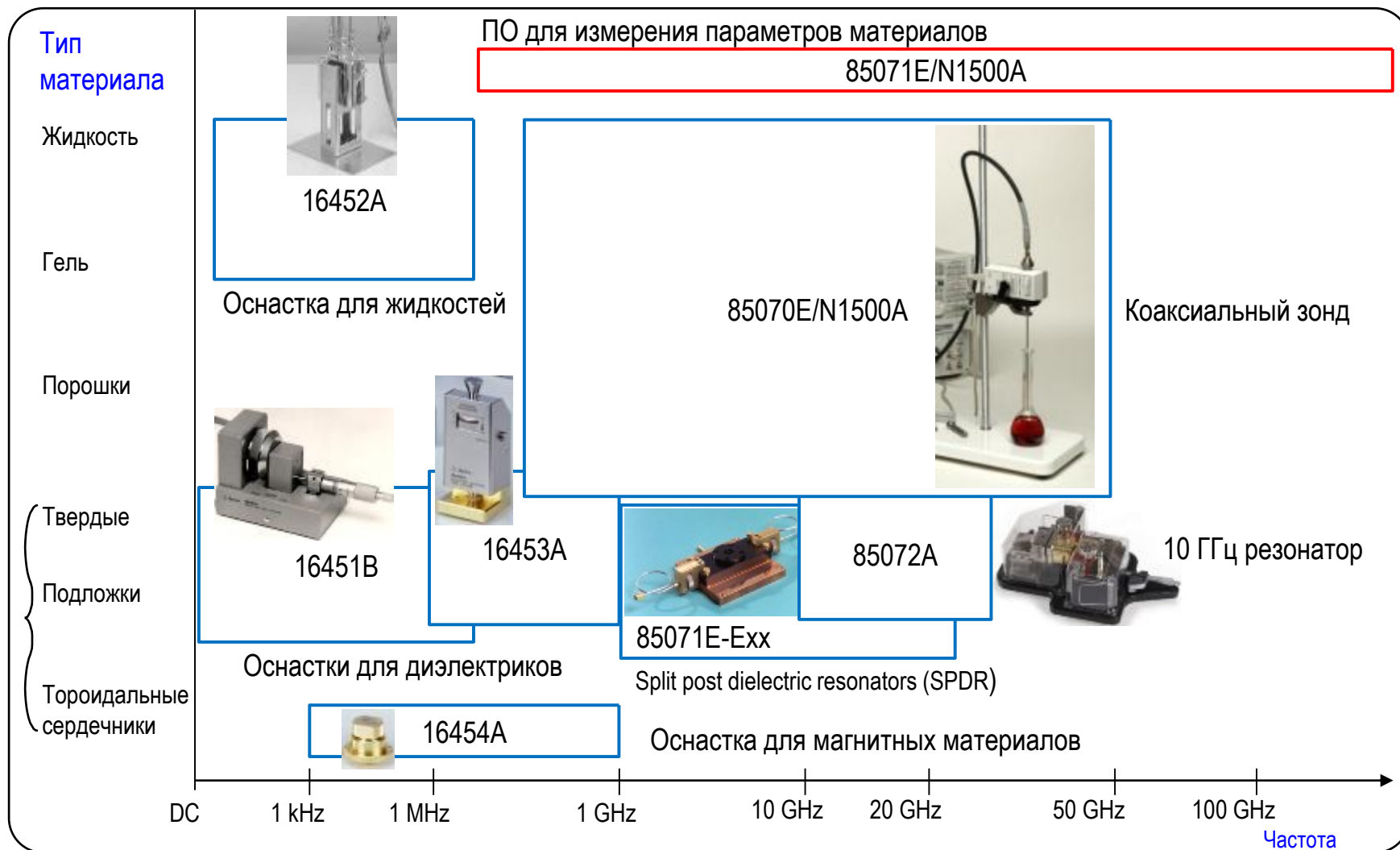
ASTM 2520



16451B/53A

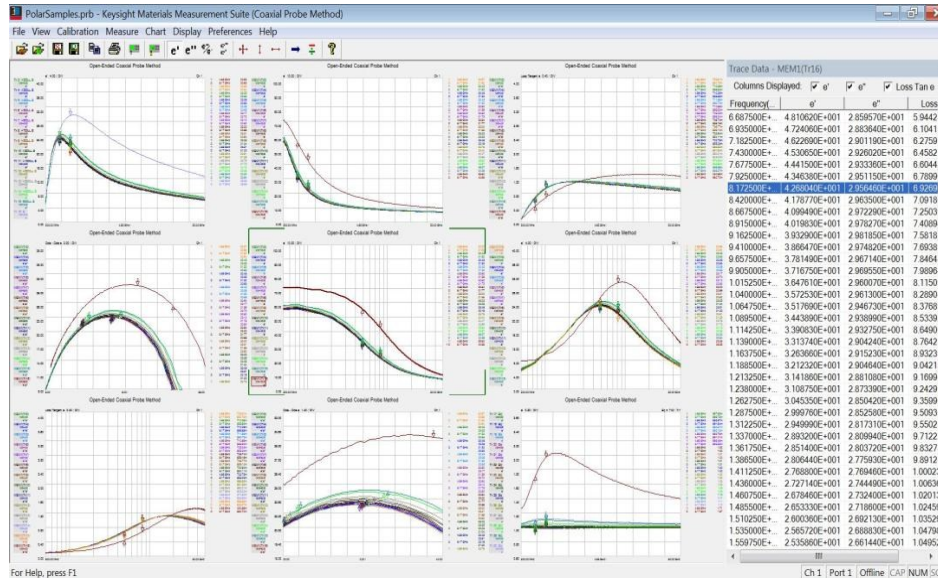
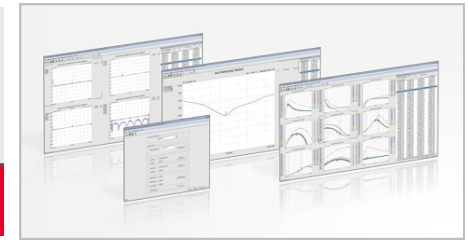


Типы оснасток



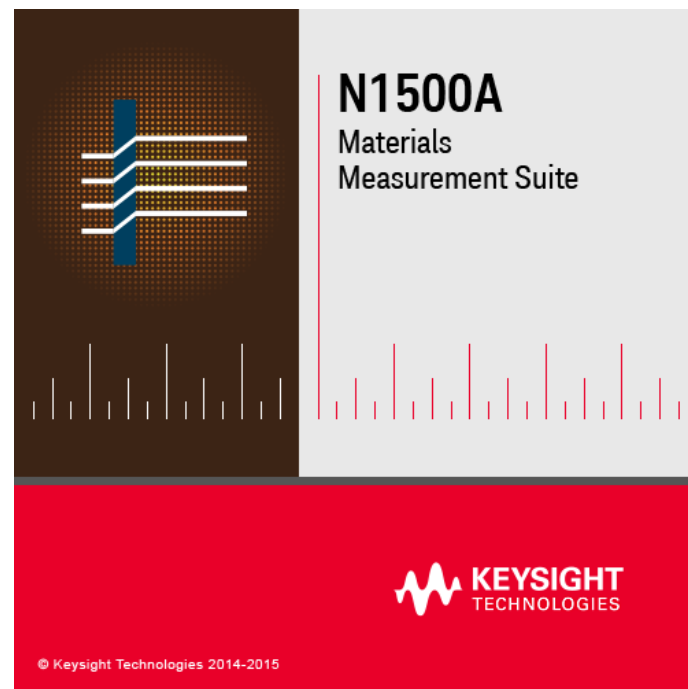
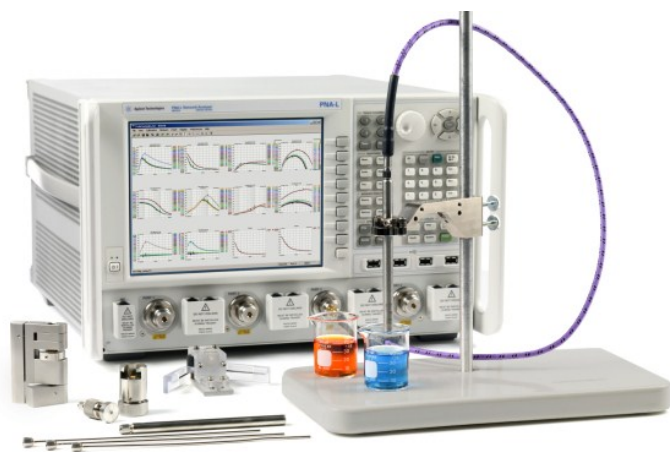
Измерительная система

Программное обеспечение

A screenshot of the 'Measurement Description' dialog box in the software. The dialog contains fields for 'Sample holder length' (0.383), 'Distance to sample' (d), 'Sample thickness' (0.0375), 'Port 1 thickness' (0), 'Port 2 thickness' (0.06), 'Cutoff frequency' (6.5600100218 GHz), and 'Deemed' (checked). It also includes a 'Sample holder' section with radio buttons for 'Coax/TEM', 'Waveguide', and 'Freespace'. A diagram at the bottom illustrates the sample holder geometry with labels for 'Distance to Sample', 'Port 1 Thickness', 'Sample Thickness', 'Port 2 Thickness', and 'Sample holder length'.

Измеренные параметры (S-параметры, емкость...) сами по себе не дают информации о таких параметрах материалов как ϵ и μ , поэтому, необходимо ПО для пересчета полученных данных в диэлектрическую и магнитную проницаемости. Также ПО позволяет учесть положение материала внутри оснастки, чтобы наиболее точно вычислить результат моделирования.

Новое ПО Keysight N1500A для измерения параметров материалов



ПО для измерения параметров материалов N1500A

Что такое N1500A?

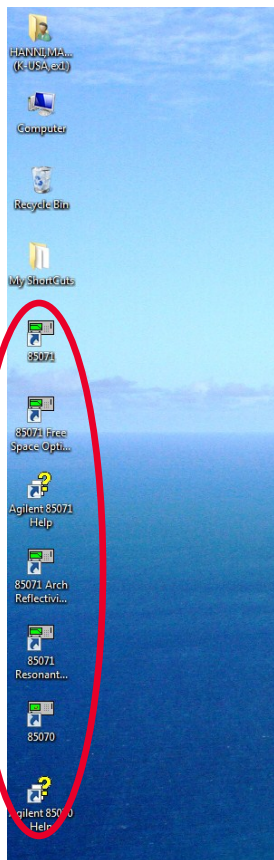
- Развитие ПО 85070E/71E с оптимизированным интерфейсом и расширенными возможностями по моделированию.
- Автоматизированные измерения комплексной диэлектрической и магнитной проницаемости с анализаторами цепей Keysight.
- Гибкая конфигурация измерительных возможностей
- Простой выбор необходимой методики моделирования и калибровки.



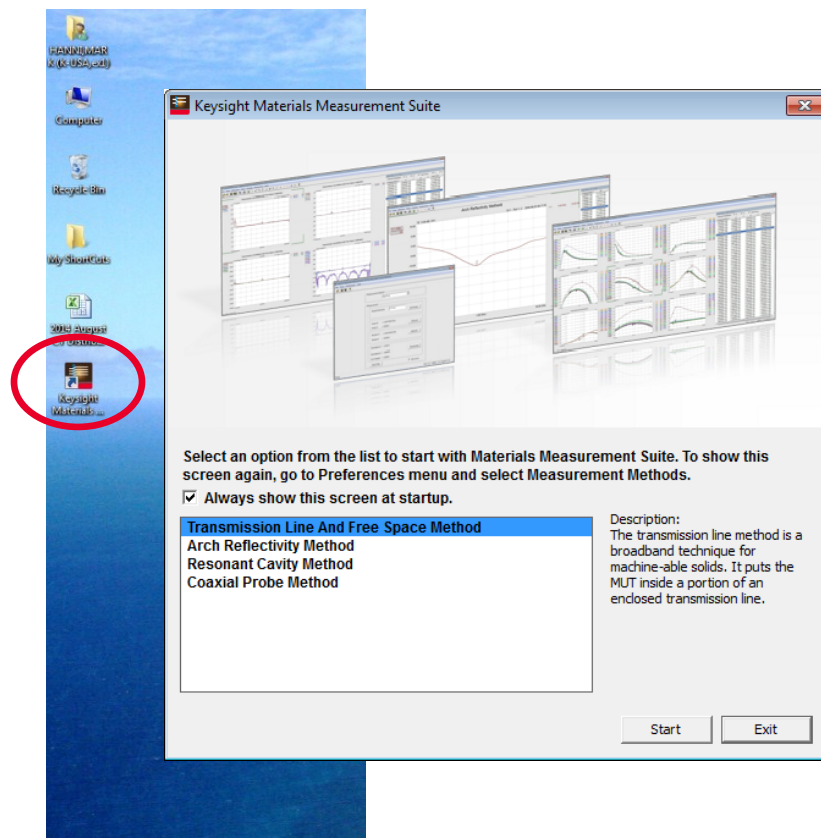
ПО для измерения параметров материалов N1500A

Упрощенный запуск

– 85070/71E



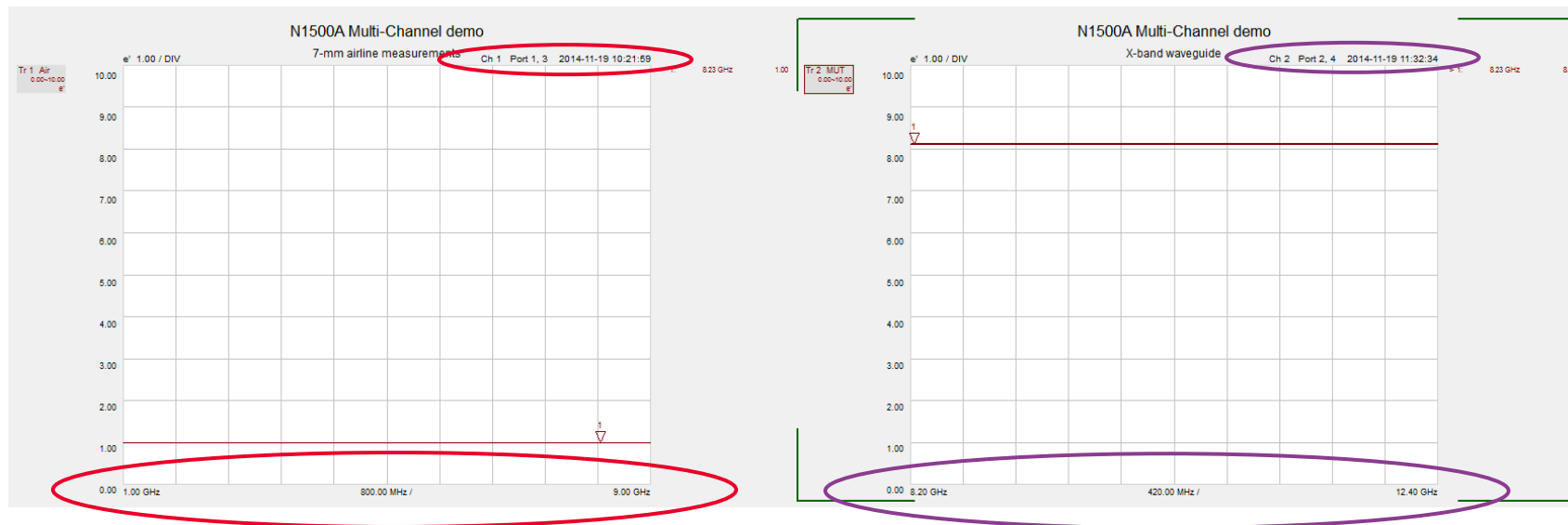
– N1500A method launcher



ПО для измерения параметров материалов N1500A

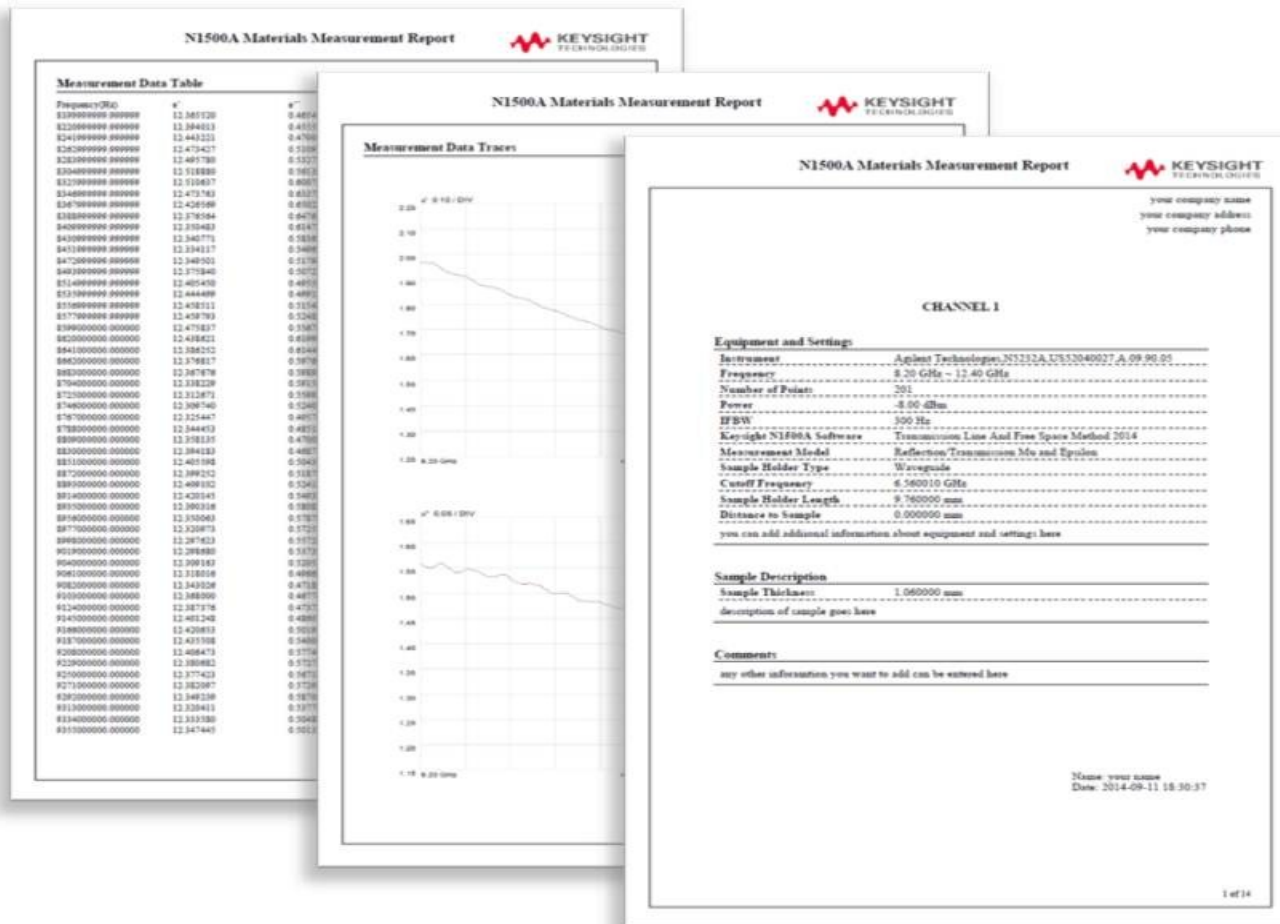
Многоканальные измерения

- Проведение измерений на разных портах и в разных частотных диапазонах
- Триггер измерений можно устанавливать независимо для каждого канала



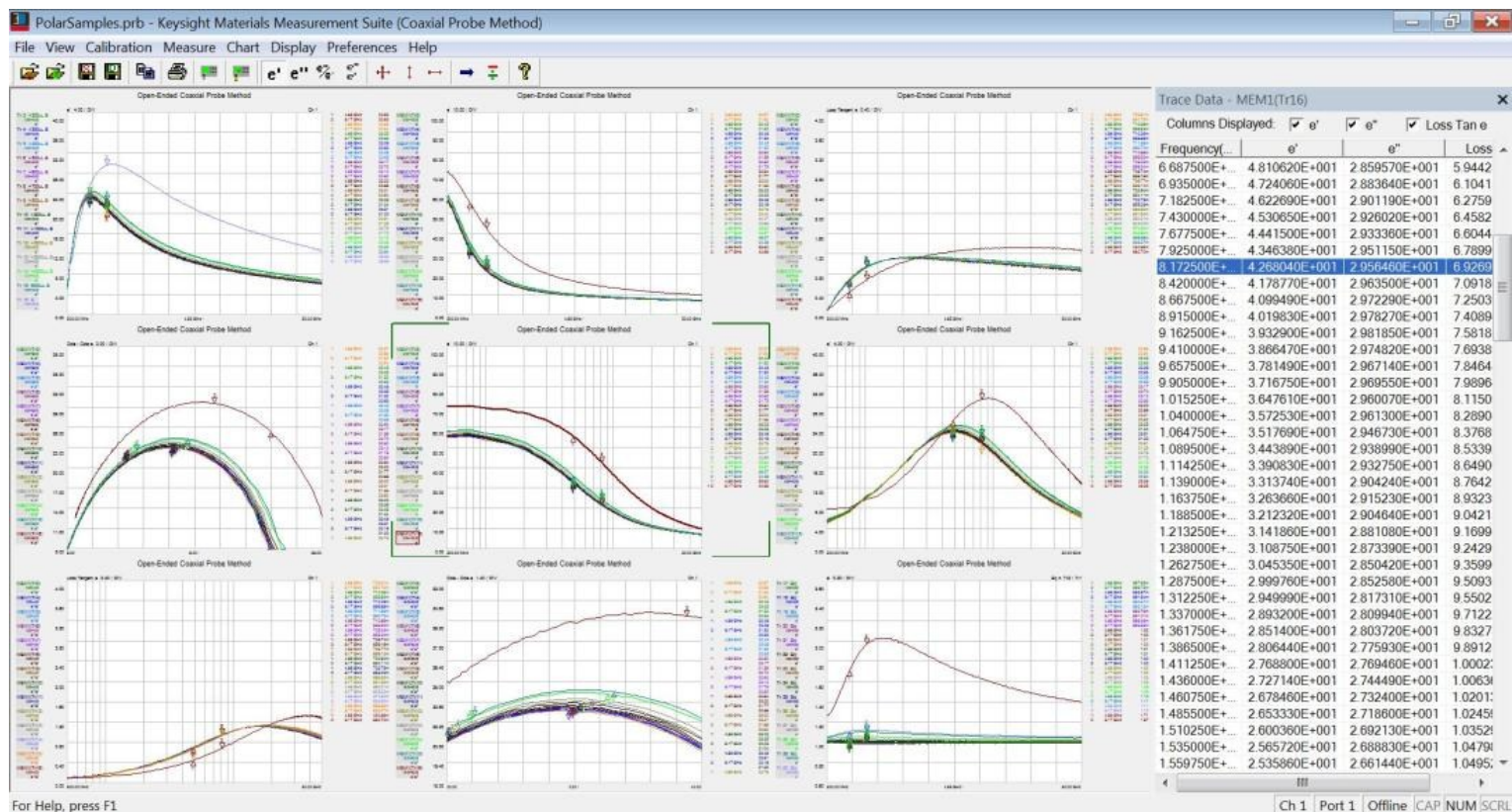
ПО для измерения параметров материалов N1500A

Мастер создания отчетов



ПО для измерения параметров материалов N1500A

Расширенные возможности по созданию графиков

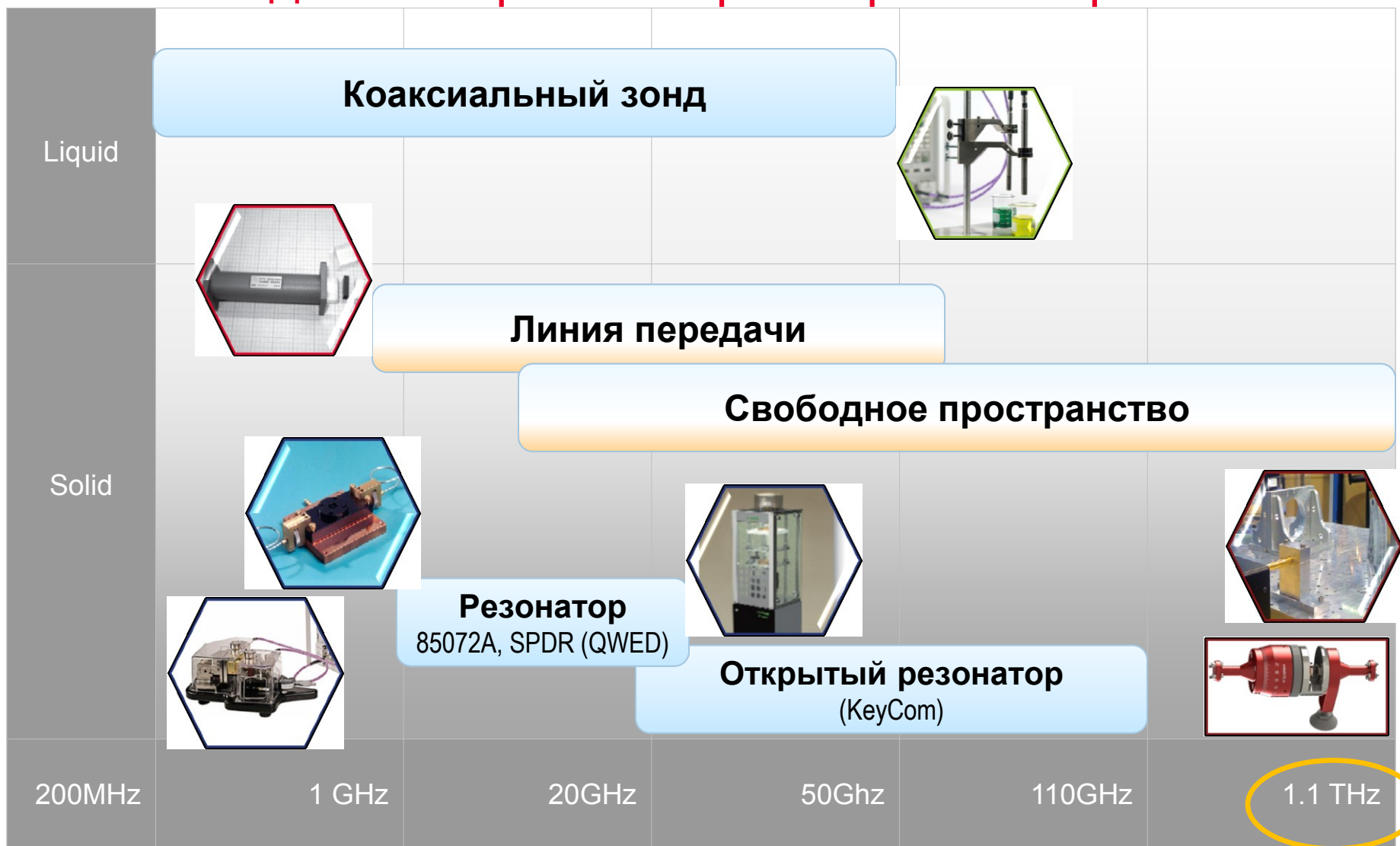


Какая методика лучше?

Это зависит от...

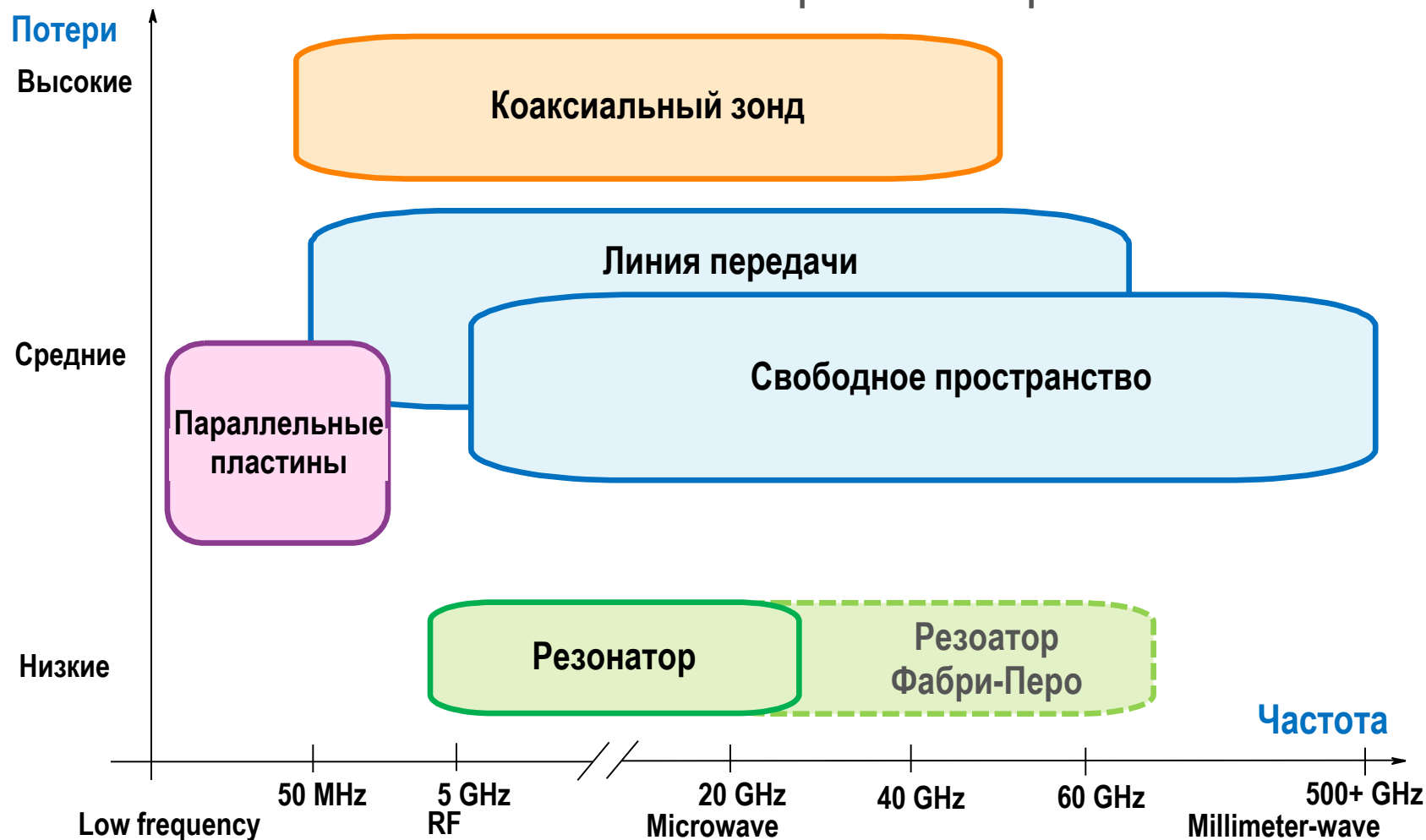
- ✓ Частотного диапазона
- ✓ Ожидаемых значений ϵ_r и μ_r
- ✓ Необходимая точность измерений
- ✓ Параметры материала (гомогенный, изотропный)
- ✓ Форма материала (жидкость, порошок, твердый, пластина/пленка)
- ✓ Размеры образца
- ✓ Можно ли разрушать образец
- ✓ Контактный или бесконтактный метод
- ✓ Температура

Решения для измерения параметров материалов

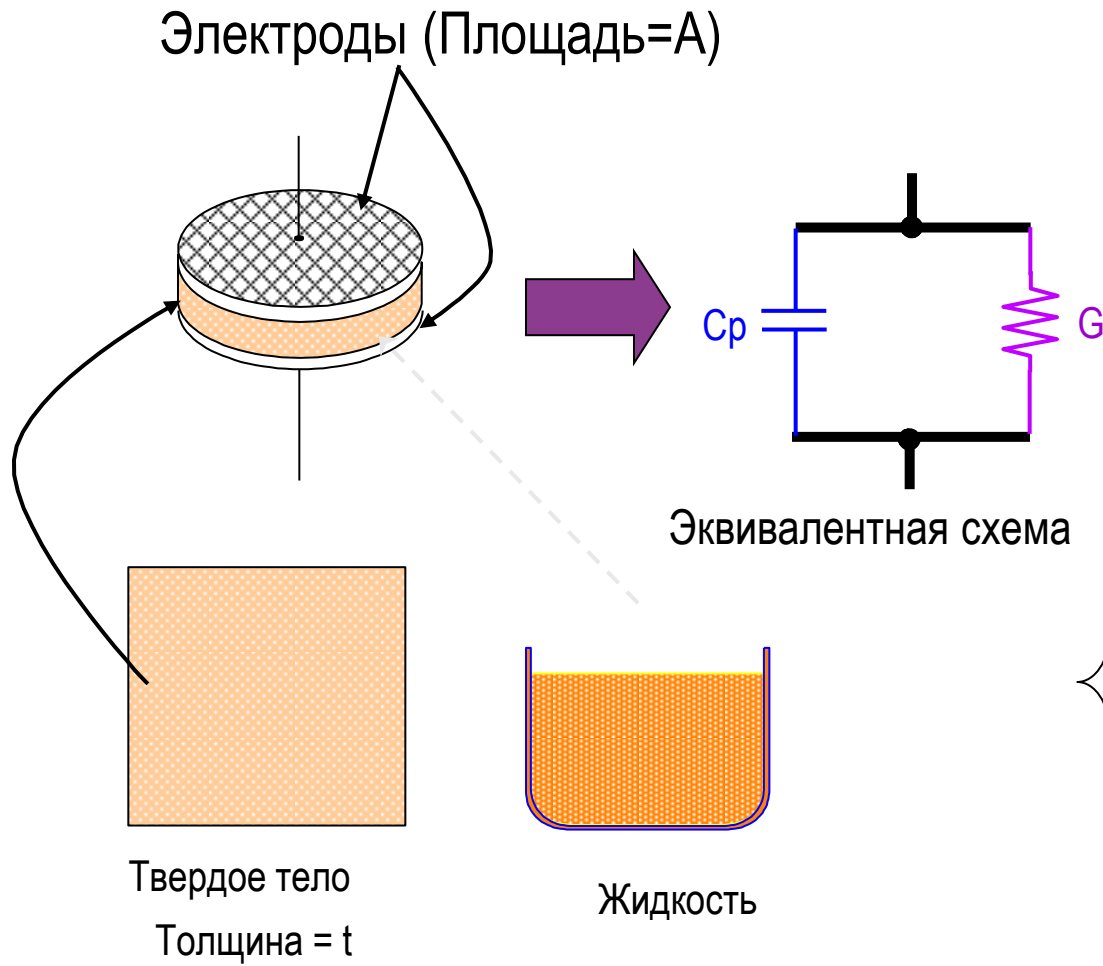


Методики измерения

Зависимость от частоты и потерь в материале



Метод параллельных пластин



$$Y = G + j\omega C_p$$

$$= j\omega C_0 \left(\frac{C_p}{C_0} - j \frac{G}{\omega C_0} \right)$$

C_0 : Air Capacitance

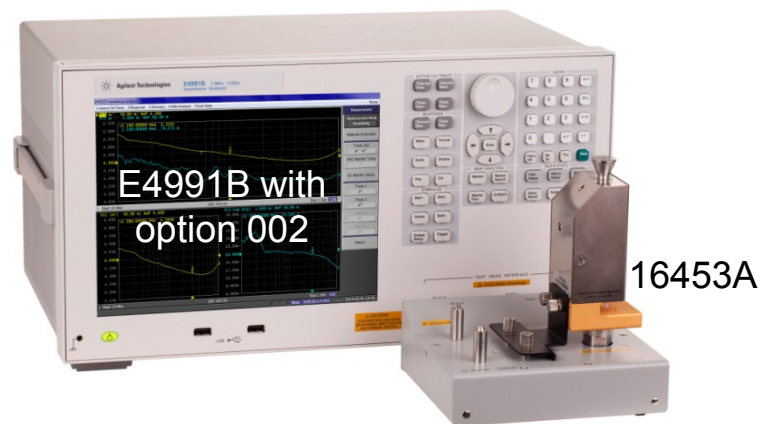
$$\epsilon_r^* = \frac{C_p}{C_0} - j \frac{G}{\omega C_0}$$

$$\epsilon_r' = \frac{t \cdot C_p}{A \cdot \epsilon_0}$$

$$\epsilon_r'' = \frac{t \cdot G}{\omega \cdot A \cdot \epsilon_0} = \epsilon_r' \cdot \tan \delta$$

Решения Keysight

Для метода параллельных платин

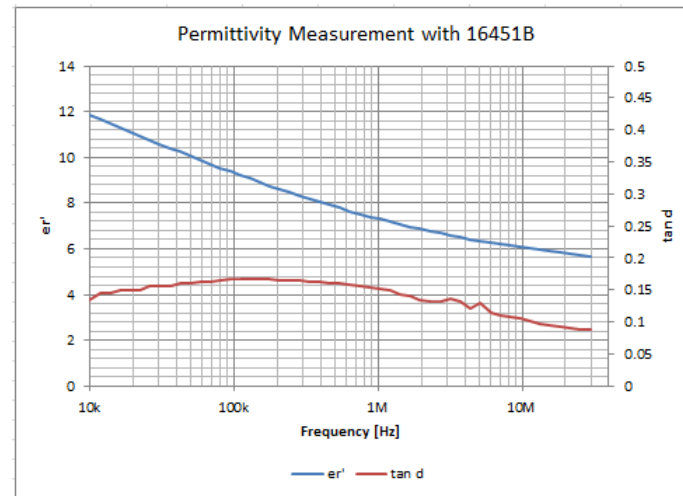


НЧ/ВЧ Решение (от 20 Гц до 30 МГц) ВЧ решение (от 1 МГц до 1 ГГц)

Измерение диэлектриков в НЧ/ВЧ диапазоне

Особенности 16451B

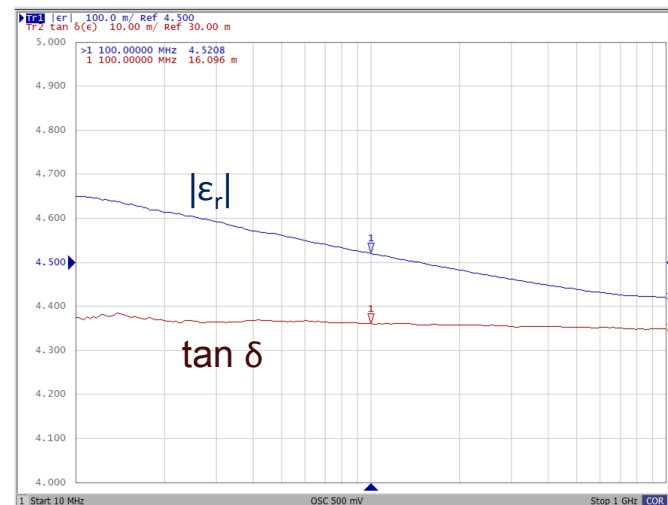
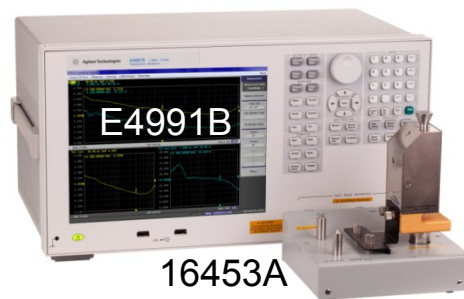
- Точные измерения в диапазоне до 30 МГц
- Четыре электрода для реализации различных методов и адаптации под размеры образца.
- Экранирующий электрод для снижения краевых эффектов.
- Простая компенсация оснастки мерами КЗ и ХХ
- Может быть использована с любым измерителем импеданса, использующим стандартную четырех-проводную схему подключения.



Измерение диэлектриков в ВЧ диапазоне

Особенности 16453A

- Широкий частотный диапазон от 1 МГц до 1 ГГц
- Высокая точность измерений ϵ_r и $\tan\delta$ с калибровкой КЗ/ХХ/Нагрузка
- E4991B Option 002 (Специальное ПО) Позволяет сразу получать на экране комплексную диэлектрическую проницаемость



Метод параллельных пластин



Относительно простые
вычисления ϵ_r из C и D



Хорошо работает для тонких
образцов: платы, пленки и т.д.



Недорогой



Точный: Лучшая
точность для НЧ

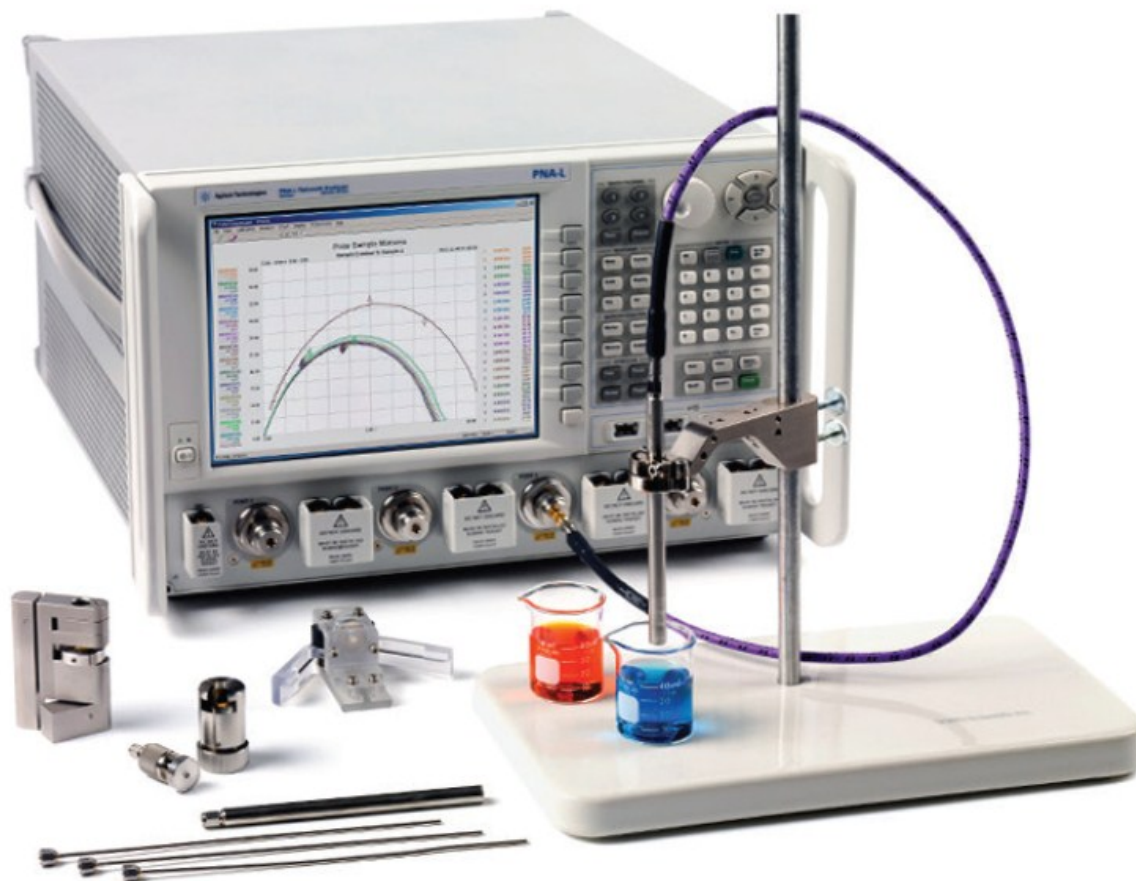


Ограничение по
частоте до 1 ГГц



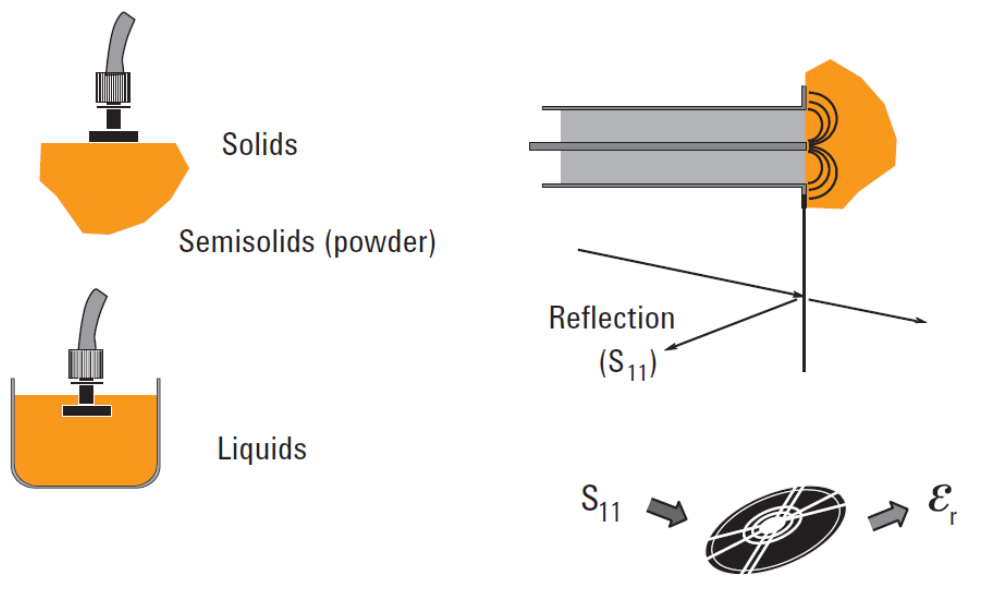
Образец должен иметь
ровную гладкую
поверхность

Система с коаксиальным зондом



Установка для измерения параметров диэлектриков с использованием коаксиального зонда

Система с коаксиальным зондом



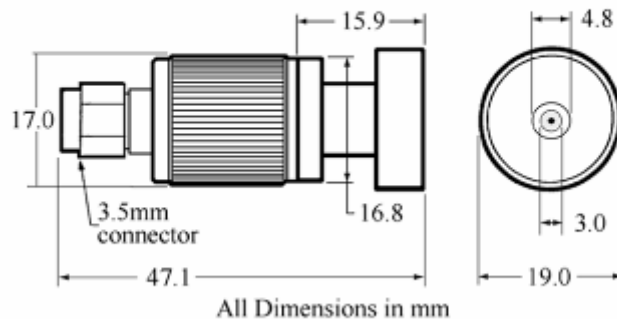
Особенности метода

- Широкополосный
- Простой и удобный (не разрушающий)
- Средняя точность измерения ϵ_r и $\tan d$, низкое разрешение
- Лучший вариант для жидкостей, гелей и сыпучих материалов

Требования к образцу

- “Полу-бесконечная” толщина
- Немагнитный
- Изотропный и гомогенный
- Плоская гладкая поверхность
- Отсутствие пузырьков или щелей

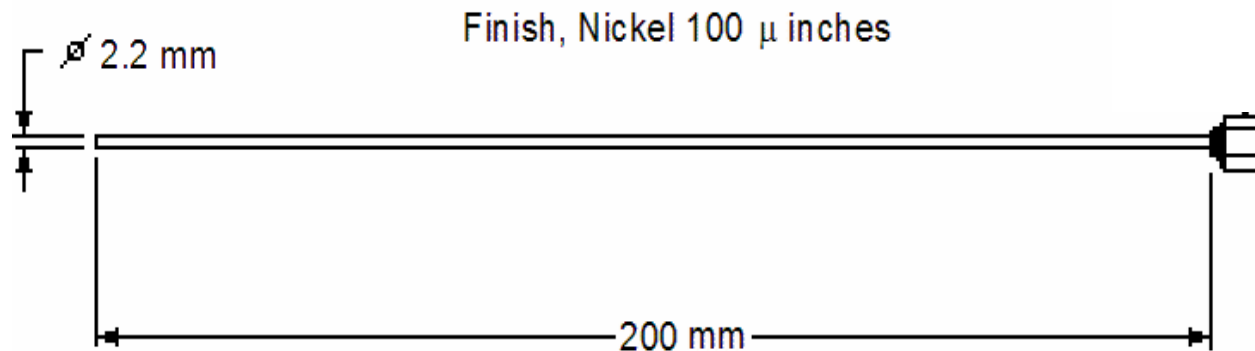
Три варианта зондов



Высокотемпературный зонд

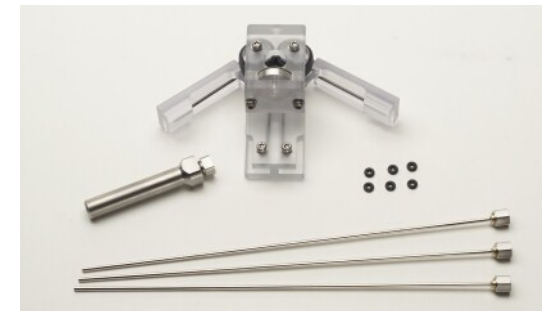
- 0.200 – 20 ГГц (от 10 МГц с анализатором импеданса)
- Диапазон температур от -40 до +200 градусов С
- Устойчив к химическому воздействию (устойчив к коррозии)
- Плоский дизайн контактной площадки повышает точность измерения твердых материалов с плоской поверхностью.

Три варианта зондов

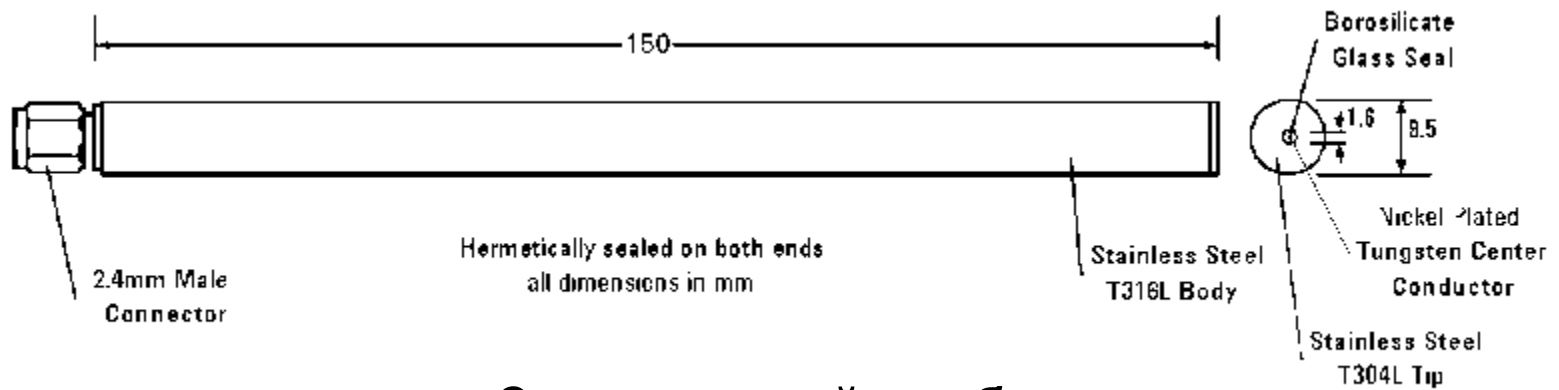


Тонкий зонд

- 0.500 – 50 ГГц
- Низкая стоимость
- Подходит под узкие отверстия
- Только для жидкостей, гелей и порошков



Три варианта зондов



Специальный пробник

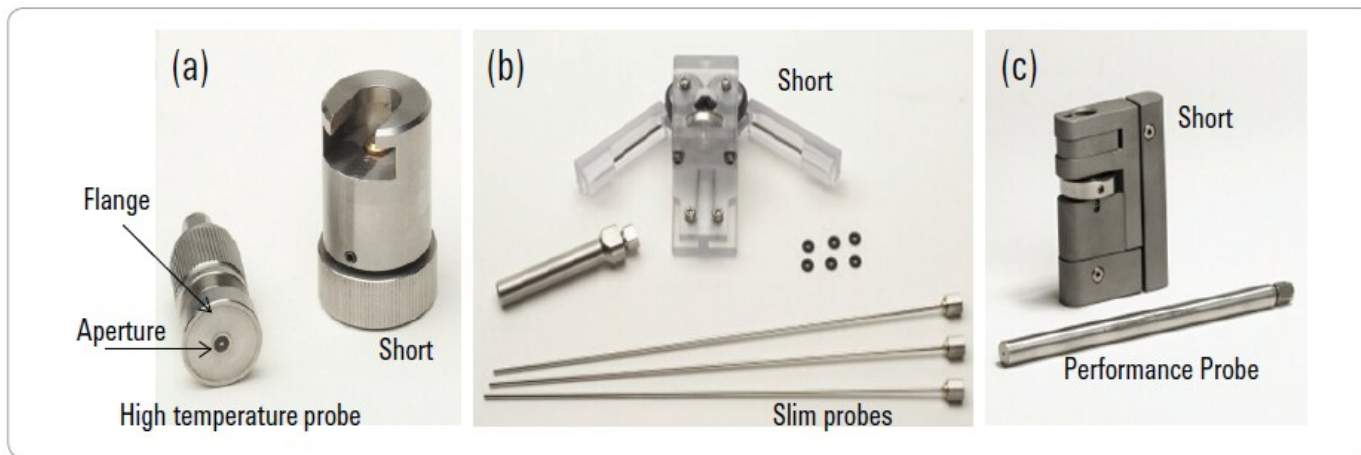
Объединяет преимущества высокотемпературного и тонкого зонда.

- 0.500 – 50 ГГц
- Диапазон температур от -40 до +200 градусов С
- Герметичный, подходит для автоклав
- Сталь пищевой марки, можно использовать для контроля продуктов

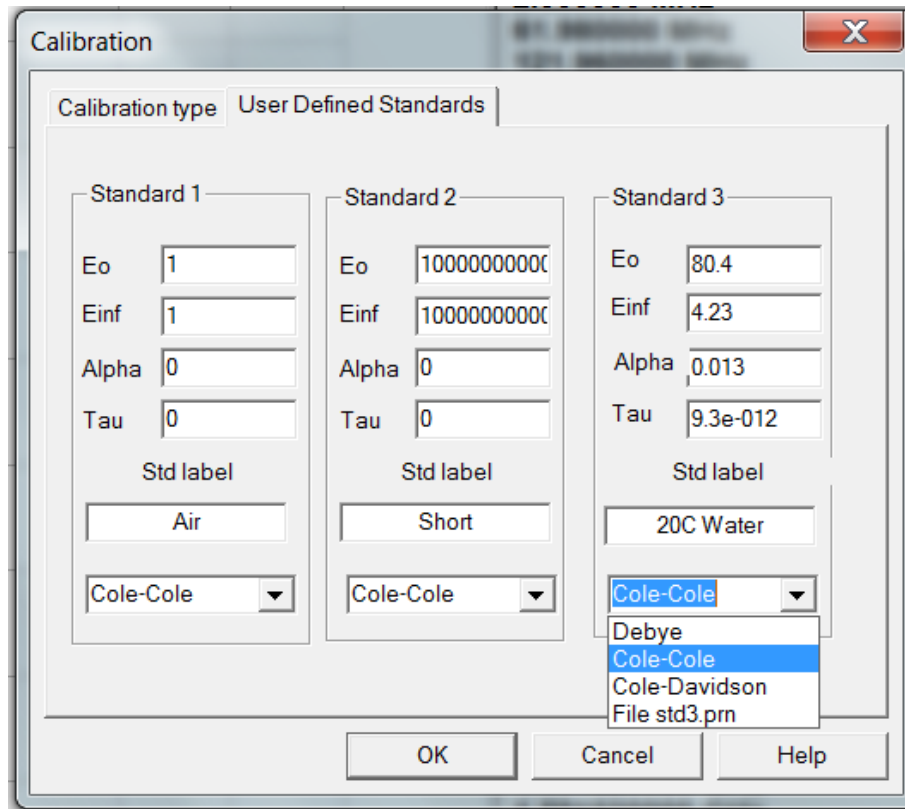


Система с коаксиальным зондом

Необходима калибровка



Система с коаксиальным зондом



Три калибровочных стандарта:

Воздух, КЗ, Вода

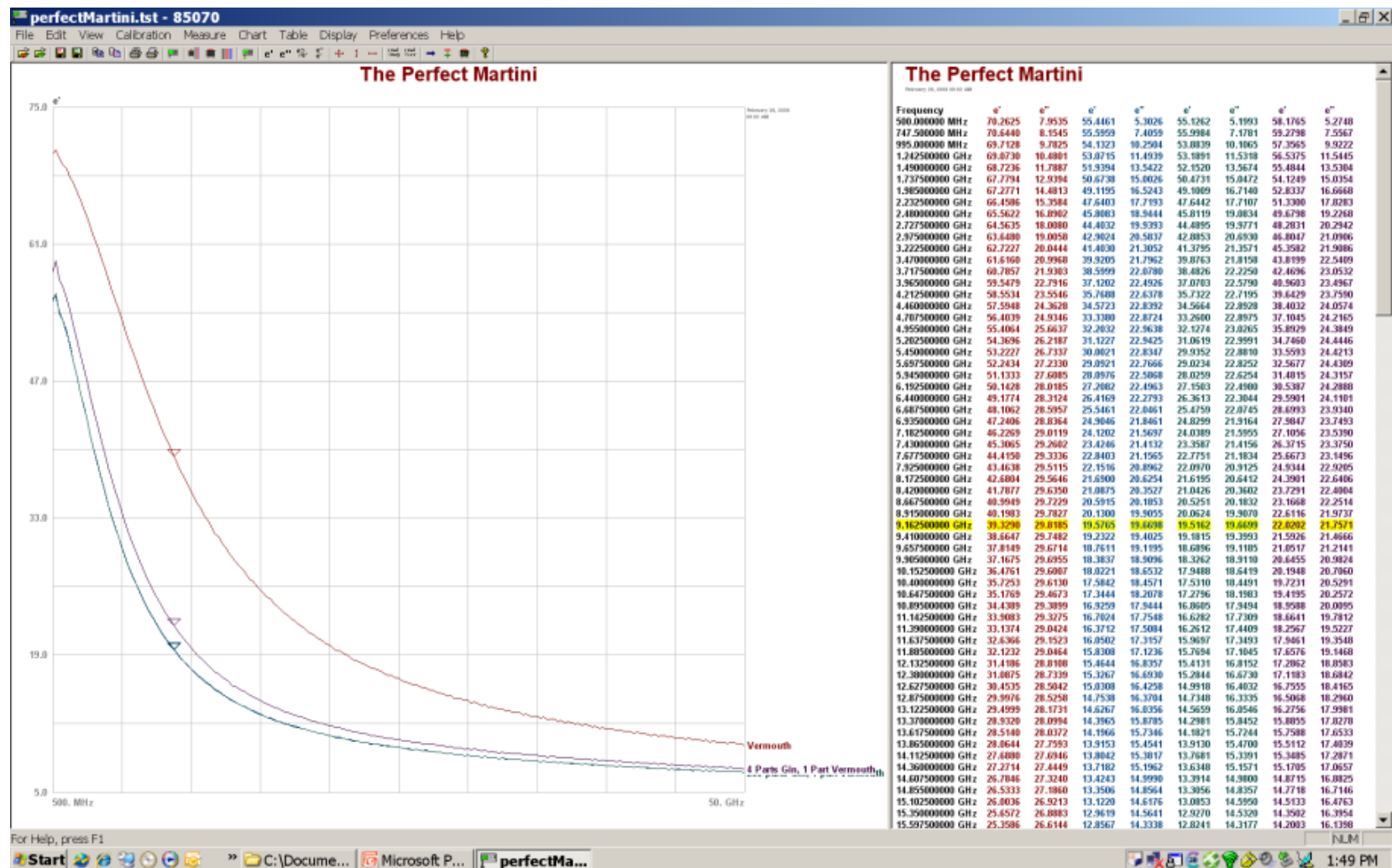
Воздух, КЗ, Нагрузка

Стандарт с известными параметрами:

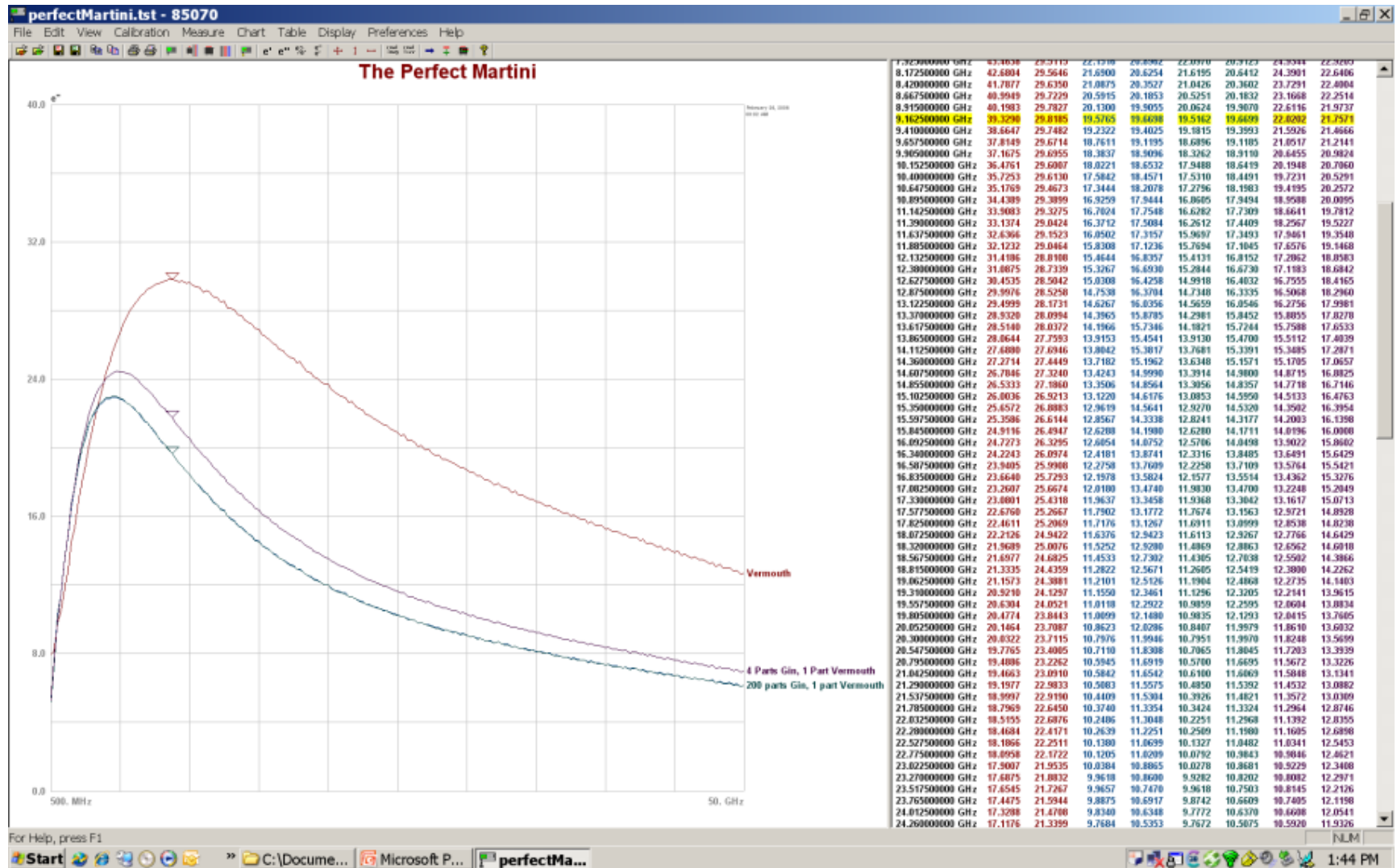
- уравнения Дебая
- Ф-ии Коула-Коула
- Коула-Дэвидсона

-Известные данные диэлектрической проницаемости

Пример измерений с коаксиальным зондом



Пример измерений с коаксиальным зондом



Рекомендации для коаксиальных зондов

- Очищайте кончик зонда
- Избегайте сильного изгиба кабелей
- Следите за пузырьками!
- Контроль температуры
- Вовремя обновляйте калибровку



Система с коаксиальным зондом



Проста в использовании



Не требуется особая подготовка образца



Неразрушающая для большинства материалов



Идеальна для жидкостей и полутвердых образцов



Широкий частотный диапазон (0.2-50 ГГц в зависимости от ϵ_r)



Необходима толщина образца > 1 см (тип)



Твердые образцы должны иметь гладкую поверхность



Точность ϵ'_r ($\pm 5\%$) и разрешение $\tan\delta$ ($\pm .05$)



Не работает для образцов с высоким ϵ'_r и низким ϵ''_r

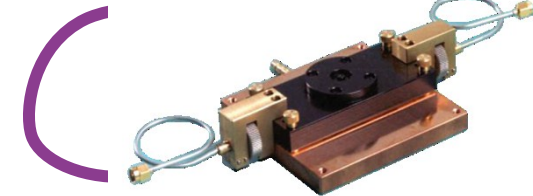


Не измеряет μ_r

Метод резонансной полости



Keysight Split Cylinder
Resonator IPC TM-650-
2.5.5.5.13



Split Post Dielectric
Resonators from QWED

ASTM 2520
Волноводные
резонаторы



Методика резонансной полости

f_c = Резонансная частота пустой полости

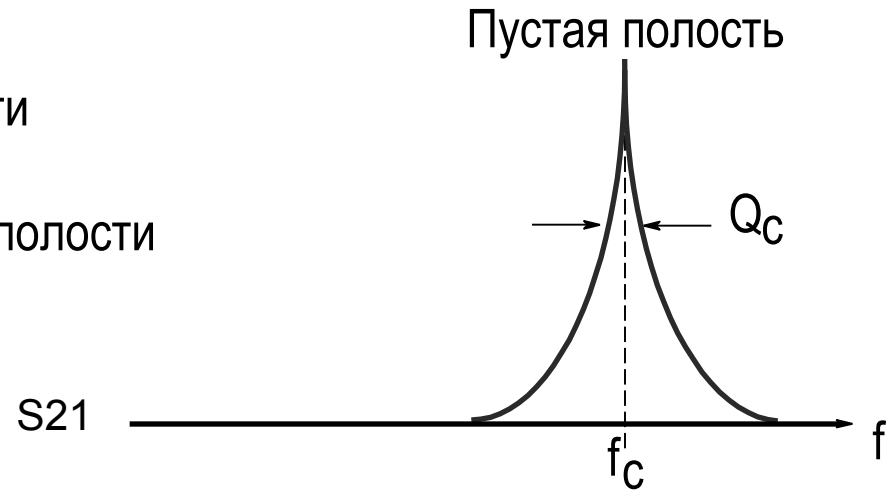
f_s = Резонансная частота заполненной полости

Q_c = Q пустой полости

Q_s = Q заполненной полости

V_s = Объем пустой полости

V_c = Объем заполненной полости



$$\varepsilon'_r = 1 + \frac{V_c(f_c - f_s)}{2V_s f_s} =$$
$$\varepsilon''_r = \frac{V_c}{4V_s} \left(\frac{1}{Q_s} - \frac{1}{Q_c} \right)$$

ASTM 2520

Методика резонансной полости

f_c = Резонансная частота пустой полости

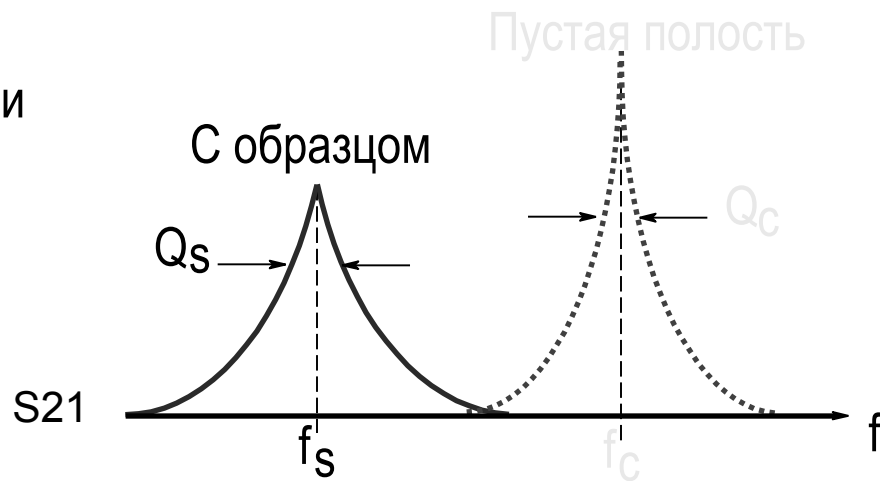
f_s = Резонансная частота заполненной полости

Q_c = Q пустой полости

Q_s = Q заполненной полости

V_s = Объем пустой полости

V_c = Объем заполненной полости



$$\varepsilon'_r = 1 + \frac{V_c(f_c - f_s)}{2V_s f_s} =$$

$$\varepsilon''_r = \frac{V_c}{4V_s} \left(\frac{1}{Q_s} - \frac{1}{Q_c} \right)$$

ASTM 2520

Методика резонансной полости

f_c = Резонансная частота пустой полости

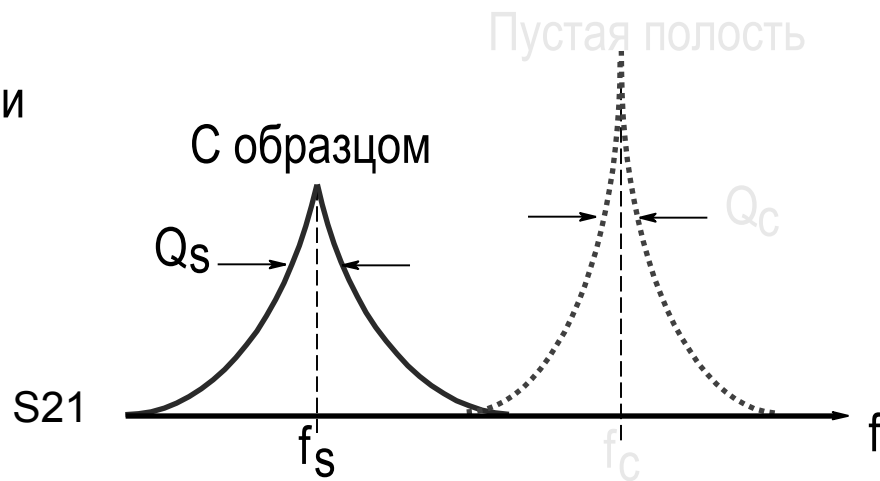
f_s = Резонансная частота заполненной полости

Q_c = Q пустой полости

Q_s = Q заполненной полости

V_s = Объем пустой полости

V_c = Объем заполненной полости



$$\epsilon'_r = 1 + \frac{V_c}{2V_s} =$$

$$\epsilon''_r = \frac{V_c}{4V_s} \left(\frac{1}{Q_s} - \frac{1}{Q_c} \right)$$

ASTM 2520

Методика резонансной полости

f_c = Резонансная частота пустой полости

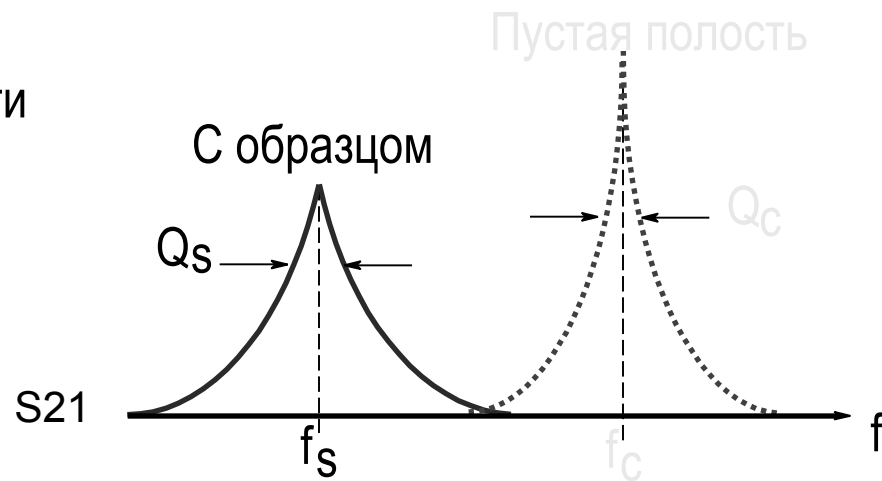
f_s = Резонансная частота заполненной полости

Q_c = Q пустой полости

Q_s = Q заполненной полости

V_s = Объем пустой полости

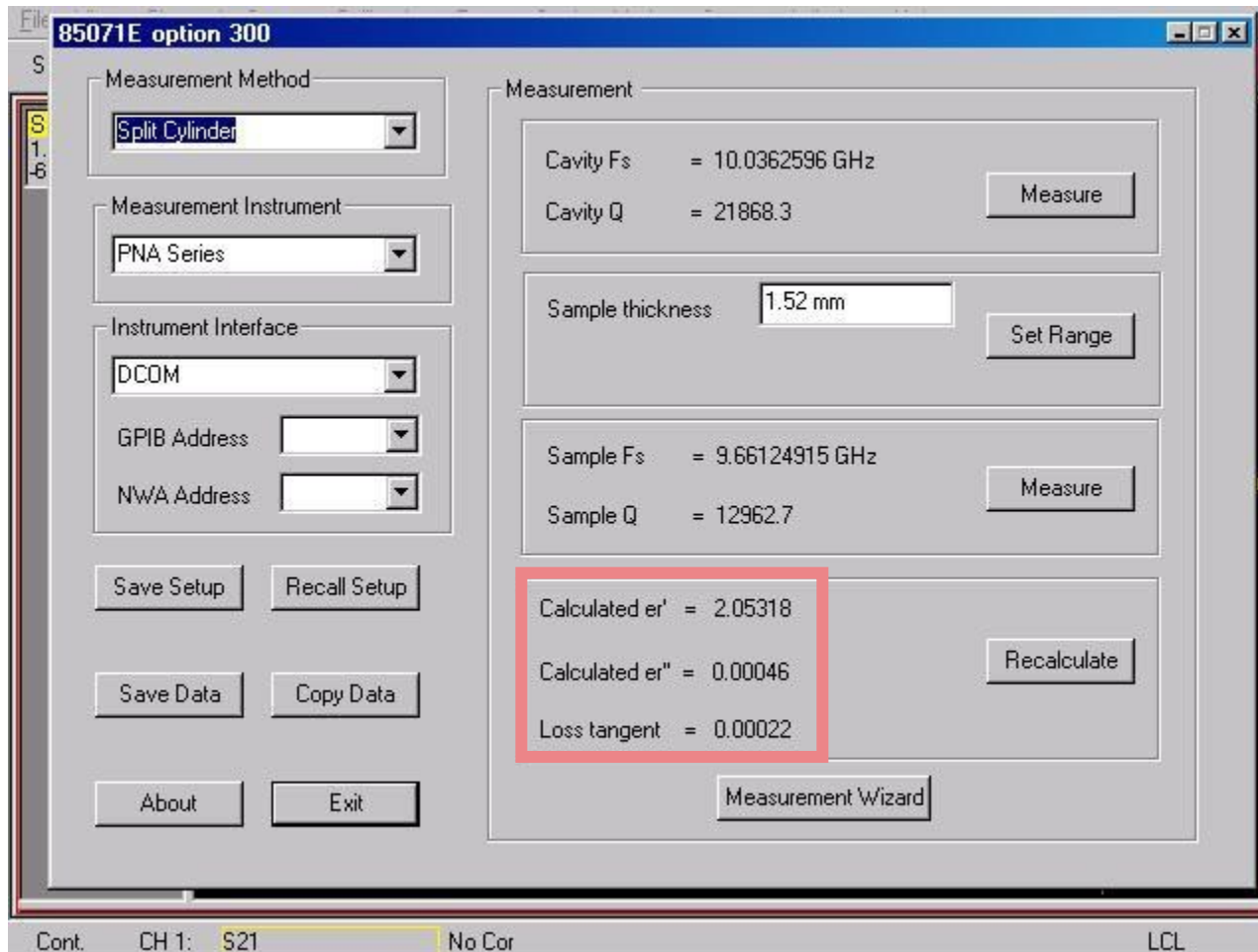
V_c = Объем заполненной полости



$$\varepsilon'_r = 1 + \frac{V_c(f_c - f_s)}{2V_s f_s} =$$
$$\varepsilon''_r = \frac{V_c}{4V_s} \left(\frac{1}{\text{blue circle}} - \frac{1}{\text{blue circle}} \right)$$

ASTM 2520

Пример измерений в резонансной полости



Резонансный и широкополосный метод

	Резонансный	Широкополосный
Материалы с низкими потерями	Да Разрешение $\epsilon_r'' \leq 10^{-4}$	Нет Разрешение $\epsilon_r'' \geq 10^{-2}-10^{-3}$
Тонкие пленки и листы	Да При 10ГГц толщина образца <1мм	Нет При 10GHz оптимальная толщина ~ 5-10мм
Калибровка	Не требуется	Необходима
Частотный диапазон	Дискретные частоты	Широкополосный

Метод резонансной полости



Очень точный, лучший для материалов печатных плат .



Очень чувствительный при низких потерях (до 10^{-6} в некоторых резонаторах)



Различные конструкции резонаторов, чаще неразрушающее воздействие



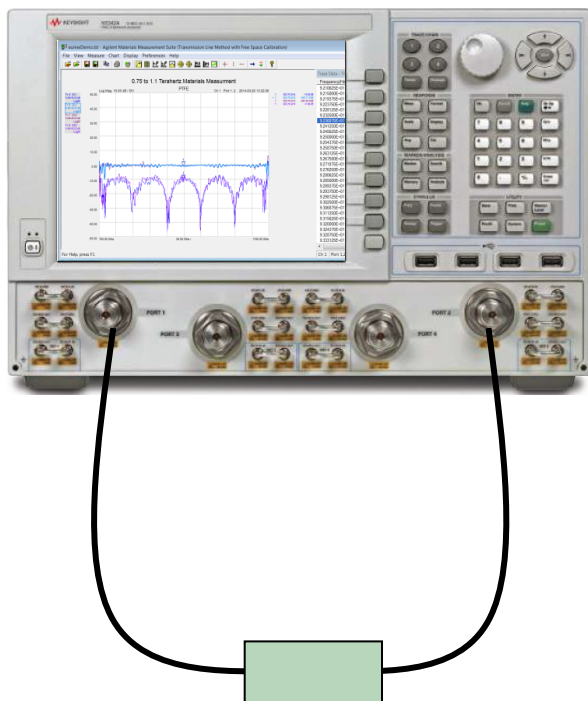
Не позволяет получить данные в диапазоне частот



Высокая точность изготовления образца для волноводных резонаторов ASTM .

Метод линии передачи

Анализатор цепей

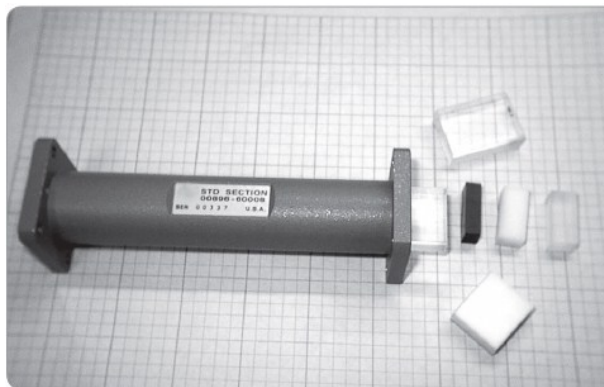
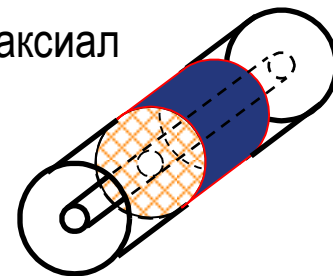


Держатель образца
подключается между
коаксиальными кабелями

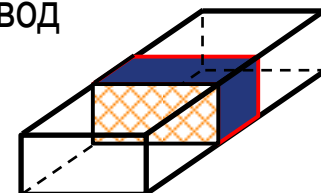
Необходима калибровка



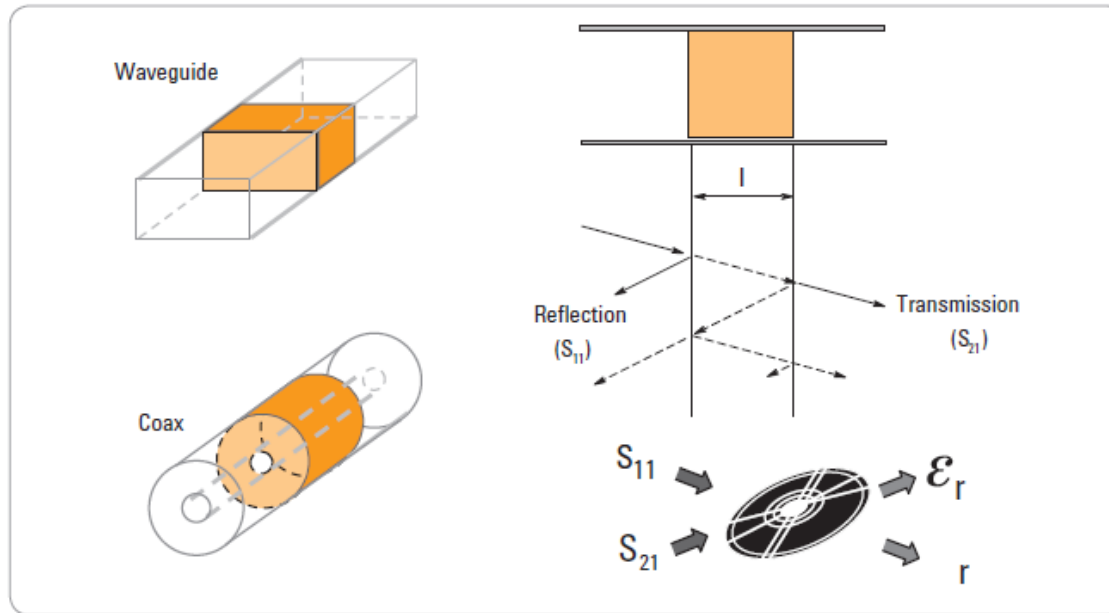
Коаксиал



Волновод



Метод линии передачи



Требования к образцу

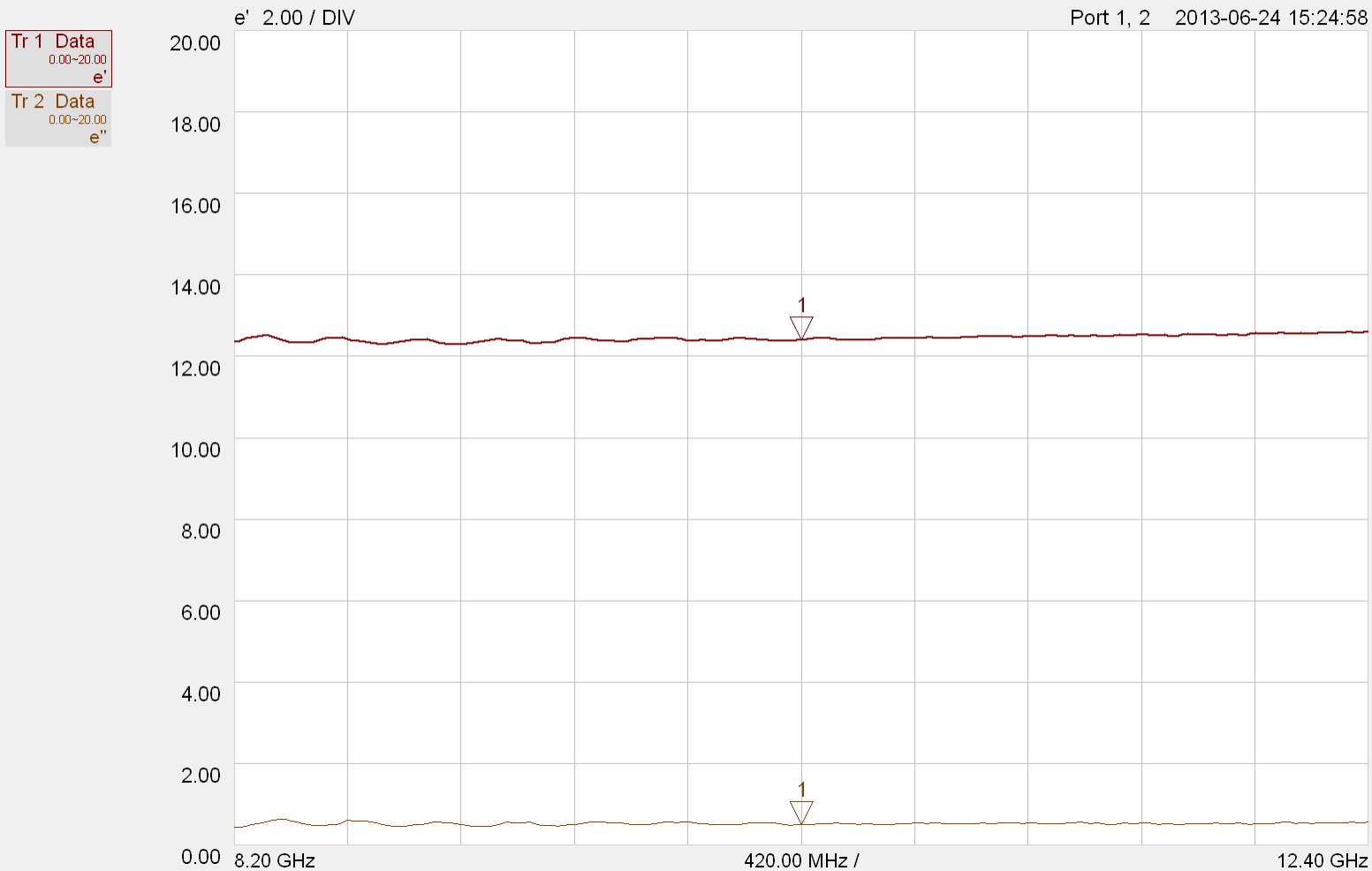
- Заполняет сечение держателя
- Нет щелей между образцом и стенками
- Ровные гладкие поверхности, перпендикулярные продольной оси держателя
- Однородные по структуре

Особенности метода

- Широкополосный – нижняя граница обуславливается длиной образца
- Ограниченная чувствительность к потерям (зависит от длины образца)
- Измерение магнитных материалов
- Анизотропные материалы можно измерять в волноводе

Пример измерения (ϵ')

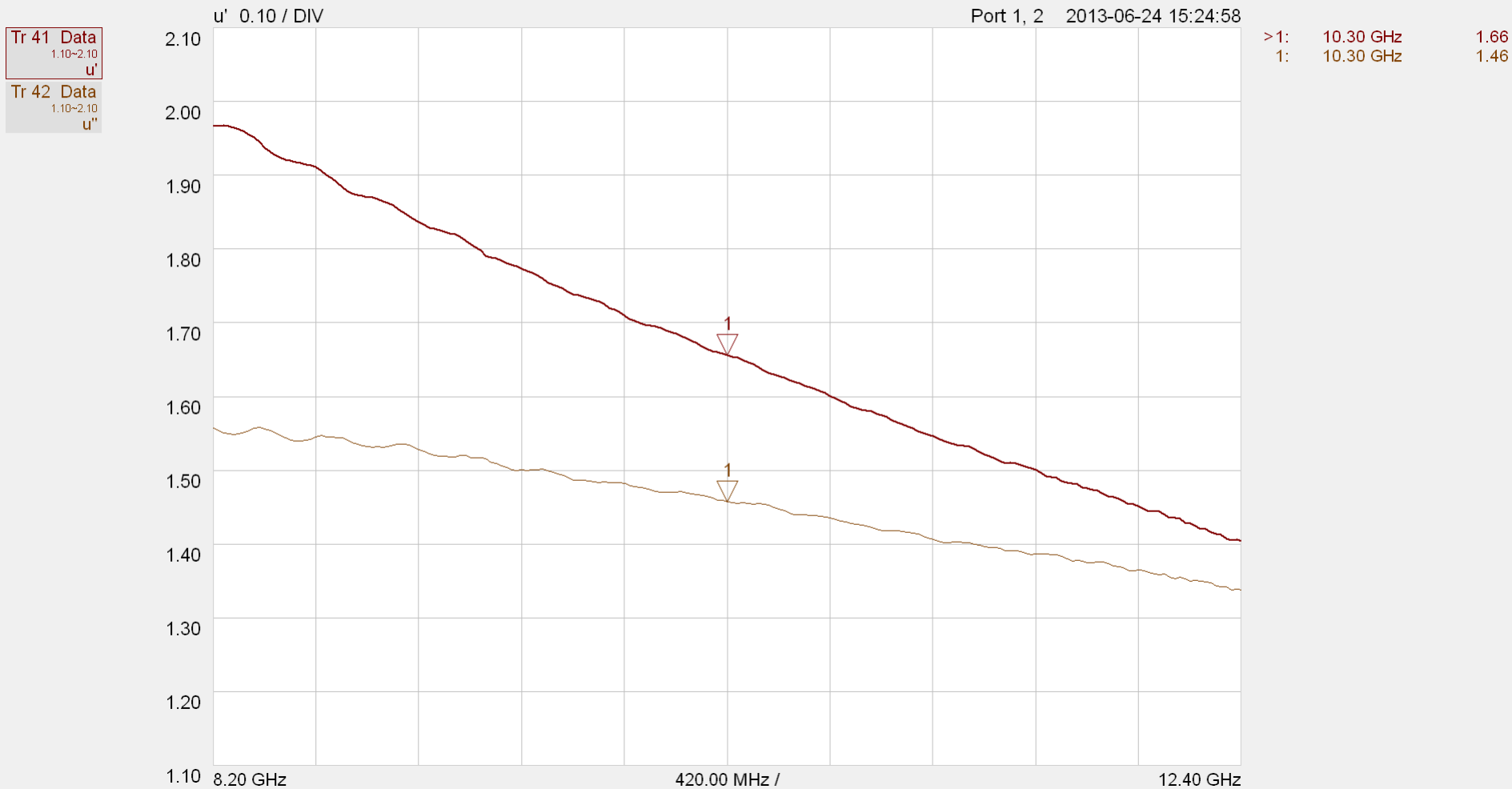
Permittivity



>1: 10.30 GHz 12.42
1: 10.30 GHz 517.92m

Пример измерения (μ')

Permeability



Метод линии передачи



Измерение ϵ_r и μ_r



Легко найти оснастку



Широкий диапазон частот
(0.1-110 ГГц)



Совместим с методом
свободного пространства



Ограничение по частоте
(диапазоны волновода)



Точное изготовление образца
(механическая обработка)



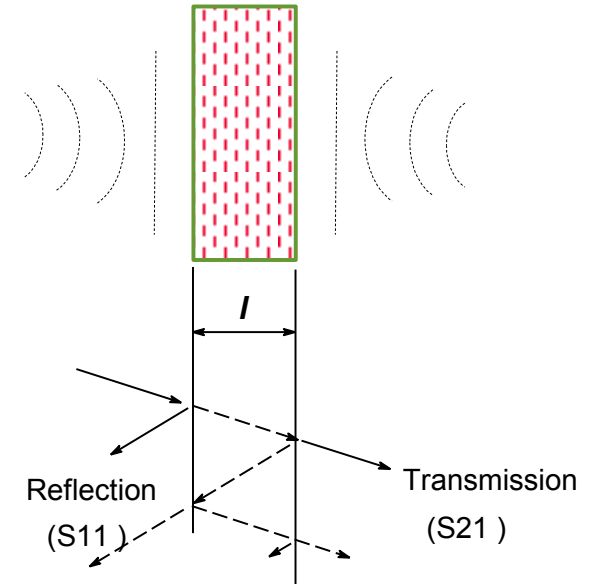
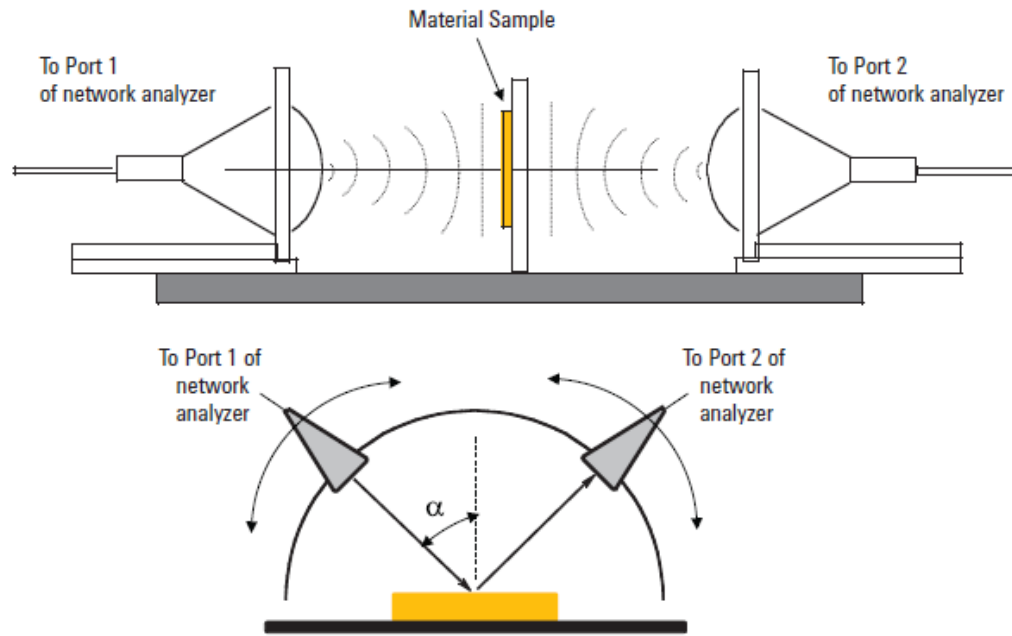
Ограниченная точность при
низких потерях

Измерение в свободном пространстве



Установка для измерения диэлектрической проницаемости в свободном пространстве

Измерение в свободном пространстве



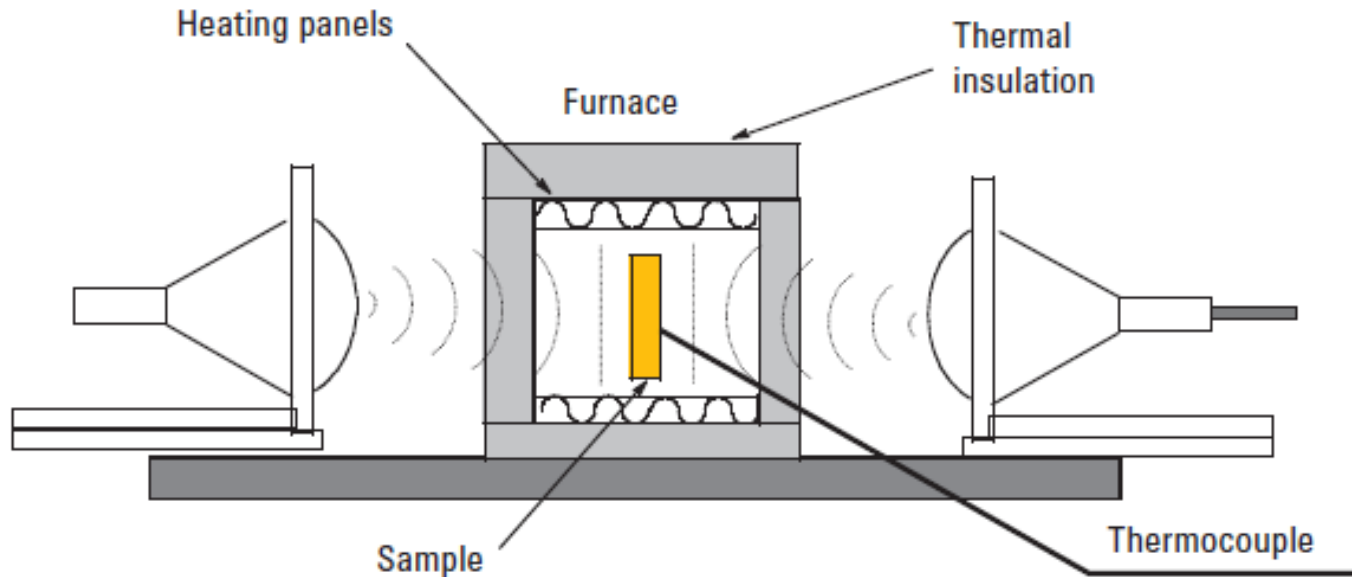
Требования к образцу:

- Плоские образцы с параллельными гранями (плоскостями)
- Образец должен находиться вне реактивной области антенны
- Образец должен перекрывать большую часть луча
- Толщина в пределах от 20 до 360 градусов

Особенности метода

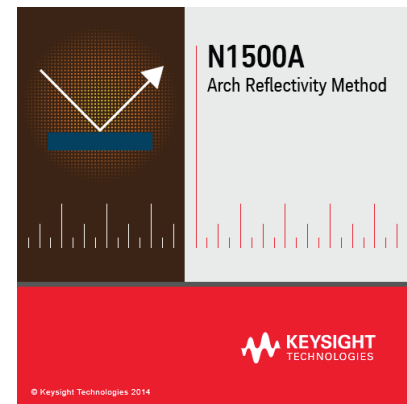
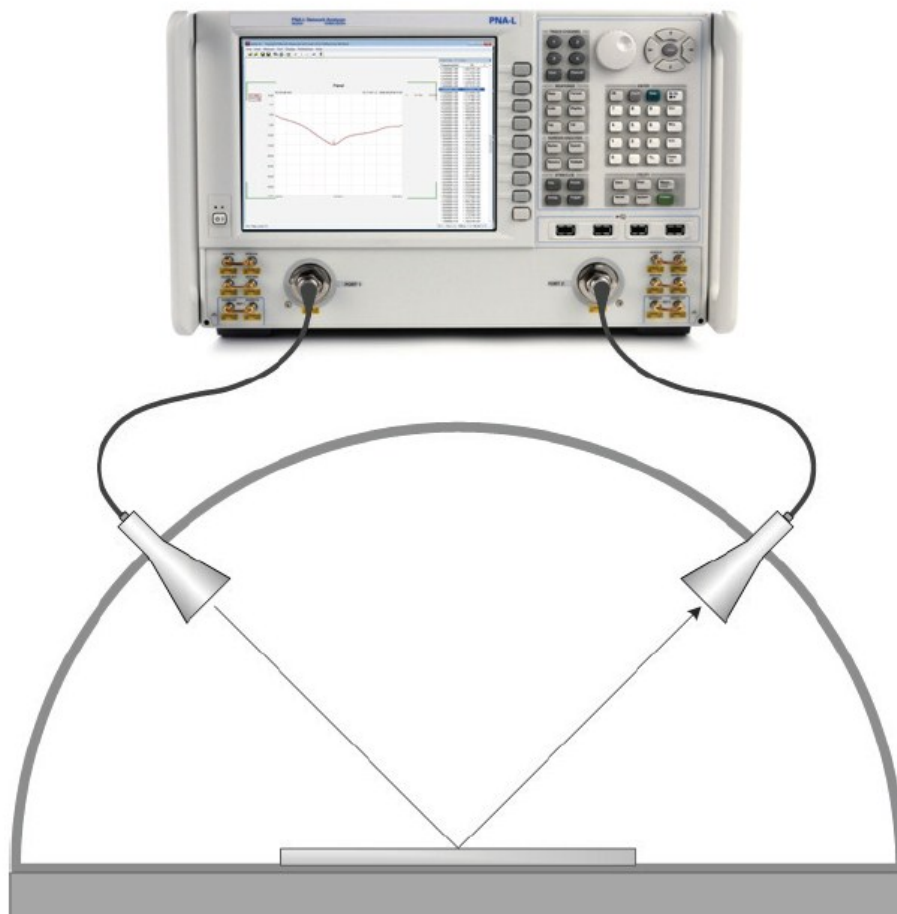
- Неконтактный, неразрушающий
- Высокочастотный – нижняя частота ограничивается размерами образца и антенн
- Широкий диапазон температур
- Можно изменять поляризацию антенны при измерении анизотропных материалов
- Измерение магнитных материалов

Высокотемпературные измерения

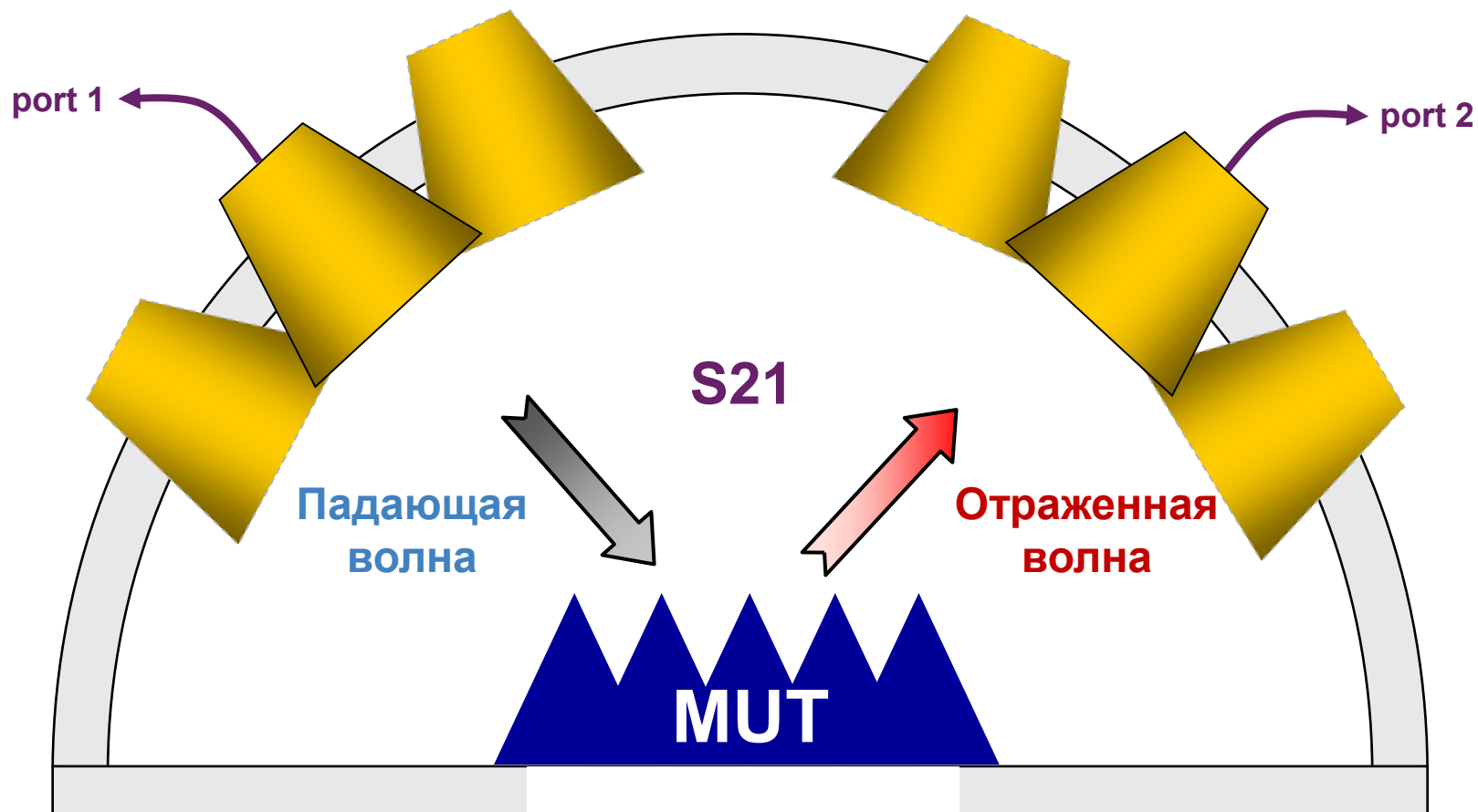


- Не требует точной установки образца
- Легко сделать термоизолированную камеру
- Волокнистые материалы термоизоляции могут быть практически прозрачны для микроволнового излучения

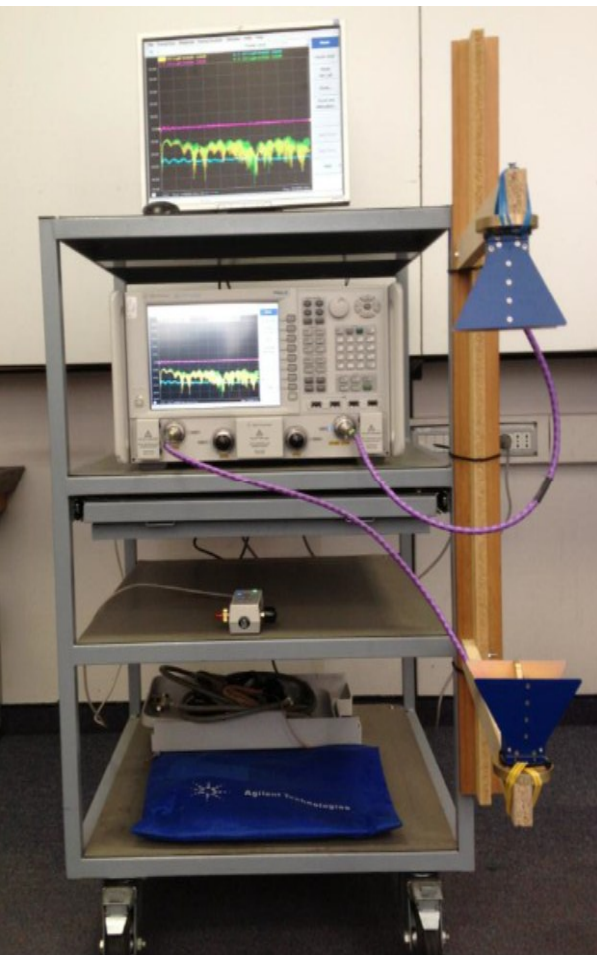
Измерения на отраженном сигнале



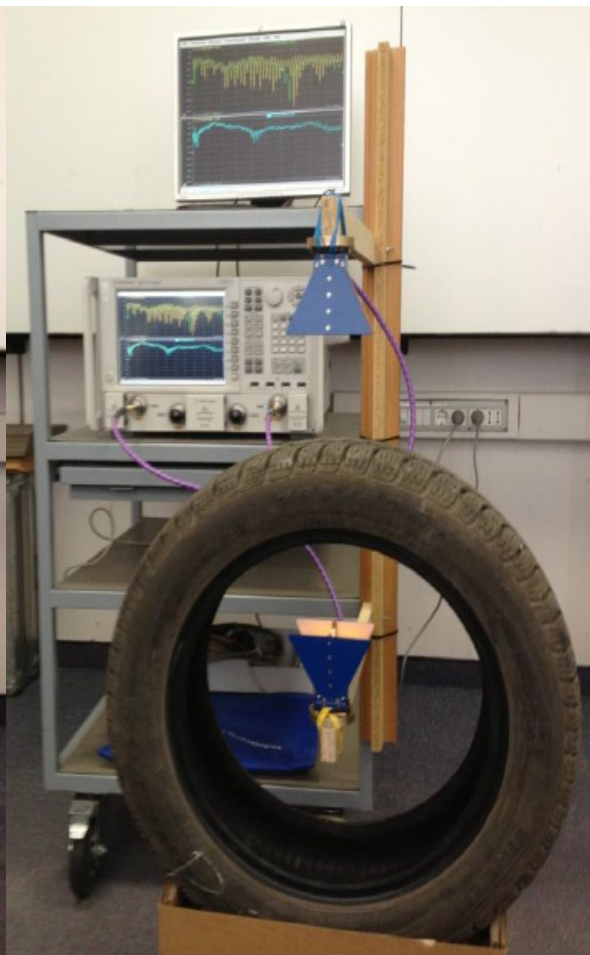
Измерения на отраженном сигнале



Измерение в свободном пространстве



Установка

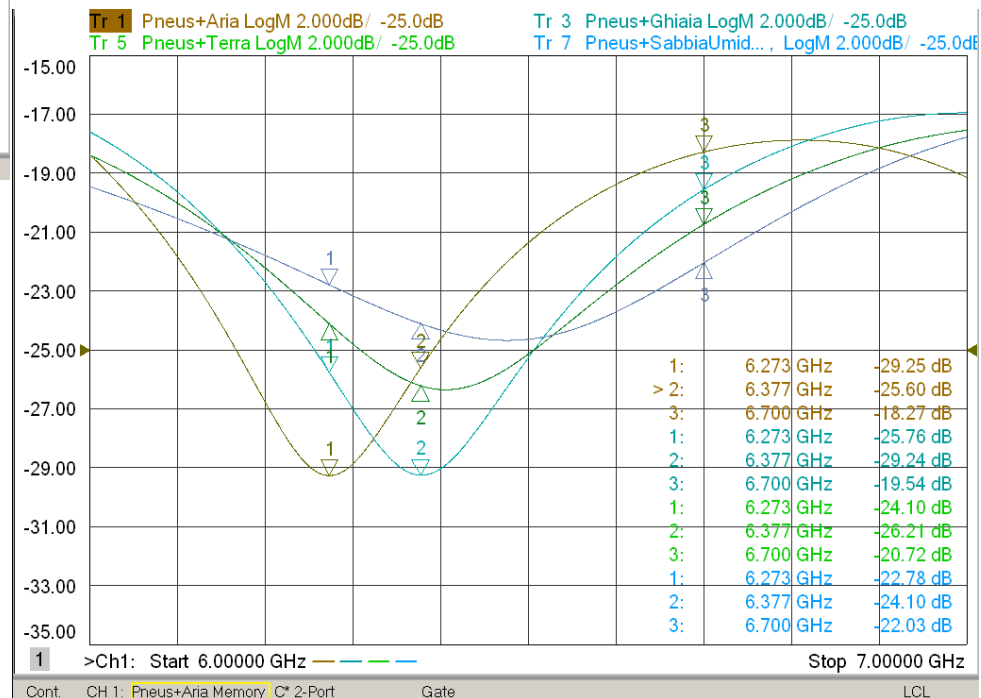
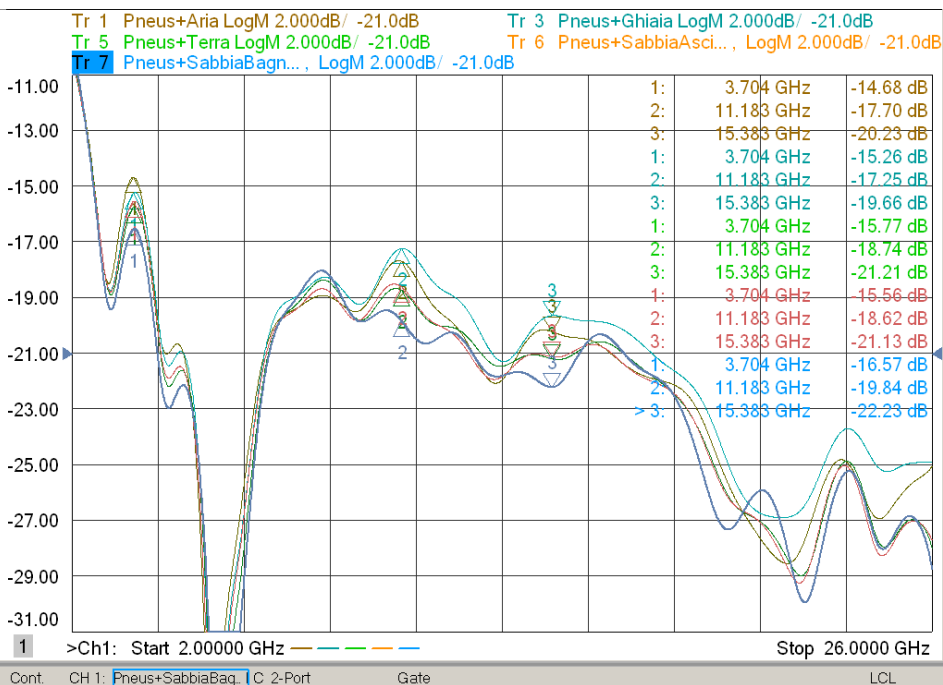


Измерение шины

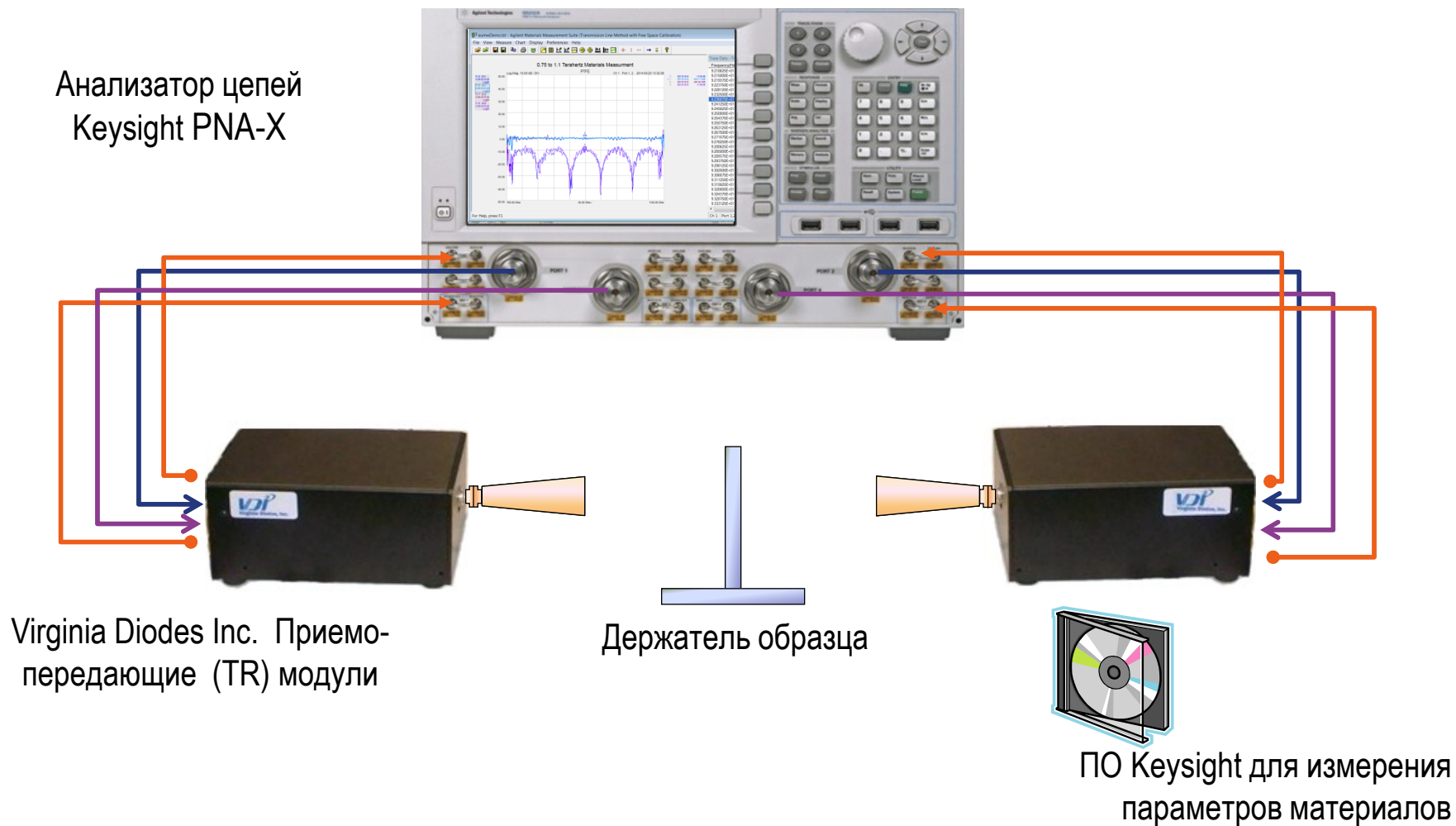


Измерение шины с землей

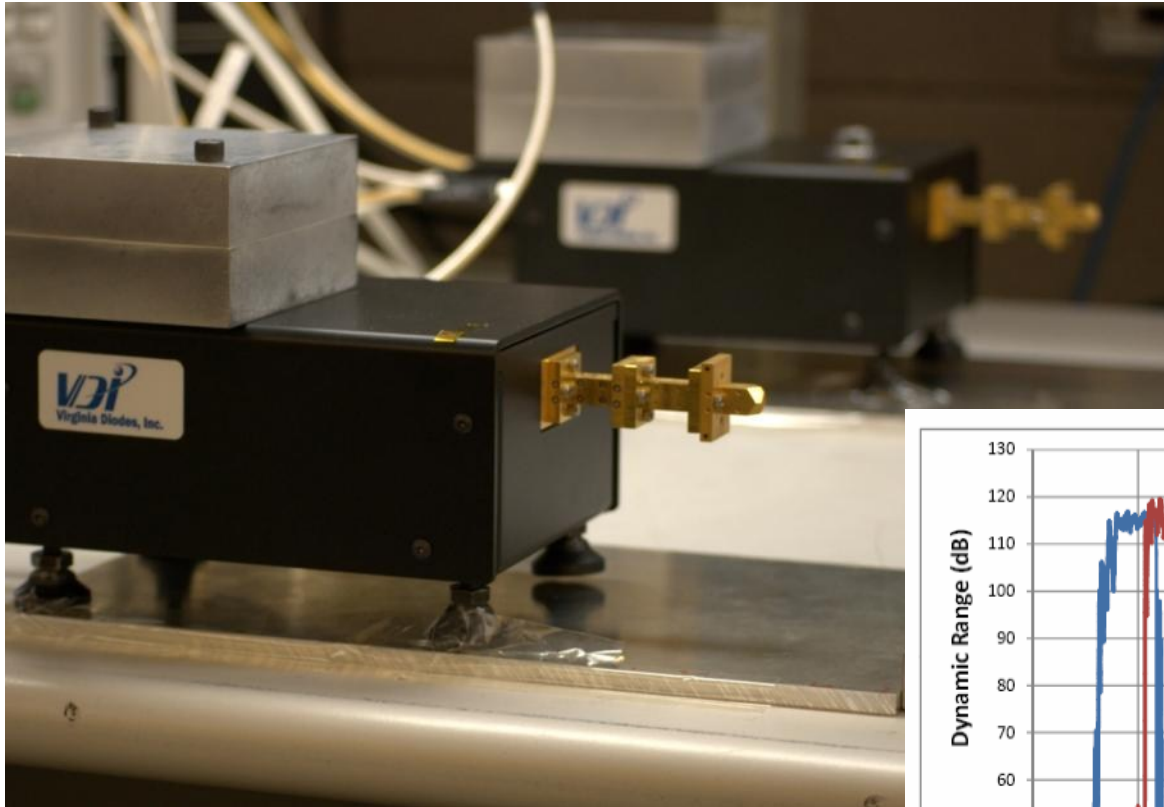
Измерение в свободном пространстве



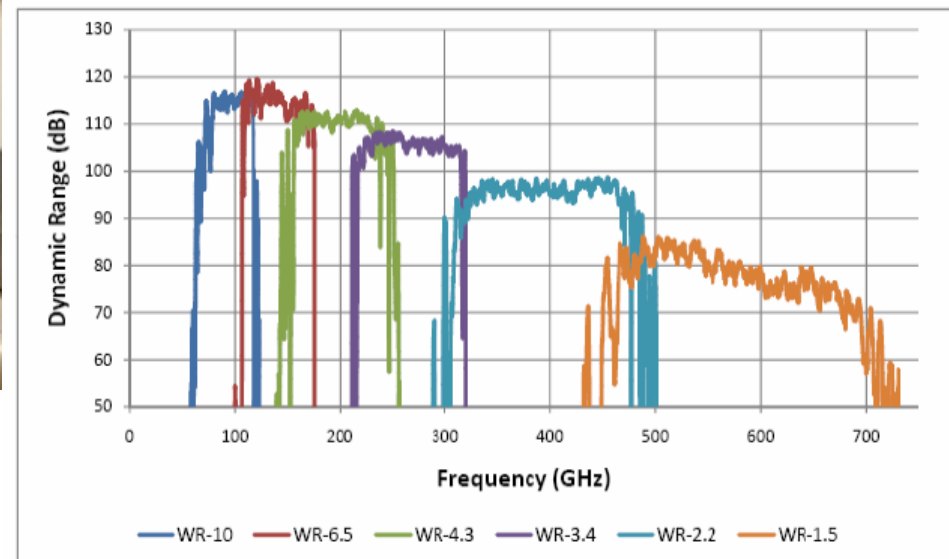
Измерение в свободном пространстве на 1.1 ТГц



Модули расширения по частоте VDI



VDI предоставляет модули расширения по частоте с широким динамическим диапазоном от 50ГГц до 1,1ТГц.



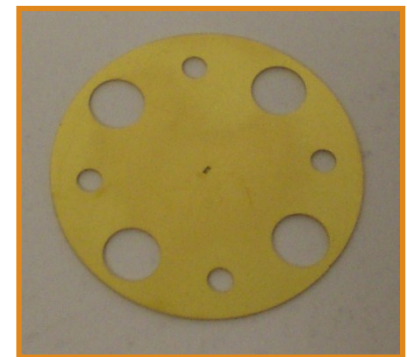
Measured Dynamic Range for a Modular TxRx / Rx VNA extender system. The measurement bandwidth is 10Hz.

Калибровка в волноводе до ТГц

- **Стандартный волноводный калибровочный набор от VDI для WR-3.4 и больше**
 - 2 нагрузки
 - 2 КЗ
 - 3 1/8 –волновые вставки
 - 2 четверть-волновые вставки

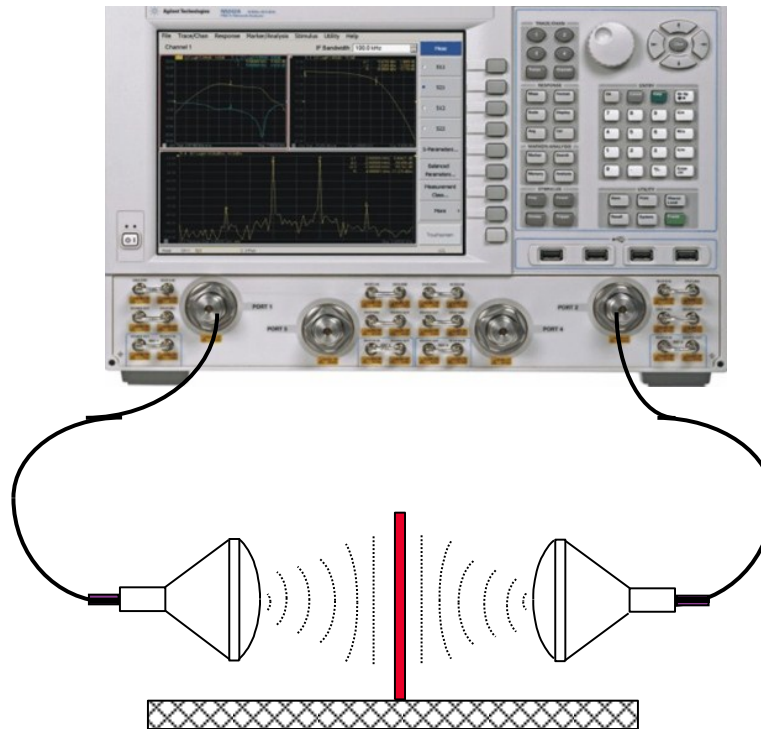
Для TRL калибровки:

 - 1 прецизионная стандартная секция
 - Калибровка: TRL, SOLT, КЗ со смещением, Нагрузка со смещением, ...
- **Калибровочный набор VDI для WR-2.2 и меньше**
 - Четвертьволновые вставки становятся хрупкими → используется SOLT с прецизионной нагрузкой
 - 2 Нагрузки
 - Прецизионные, обратные потери 50дБ
 - 2 КЗ
 - 2 КЗ со смещением на 1/4 волны
 - 1 прецизионная стандартная секция
 - Калибровка: SOLT



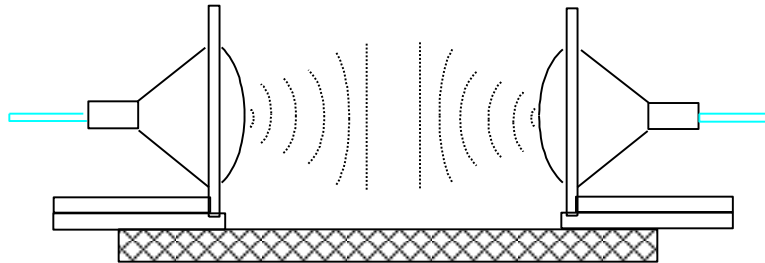
1/4-волновая
вставка

Калибровка в свободном пространстве

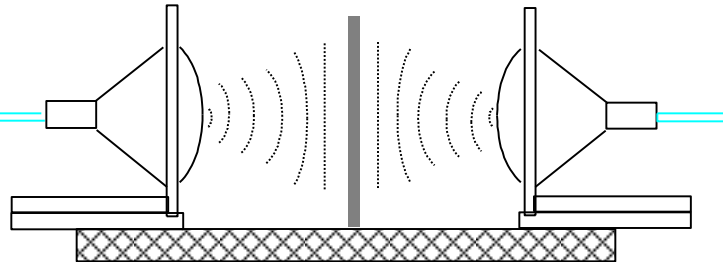


Калибровка TRM

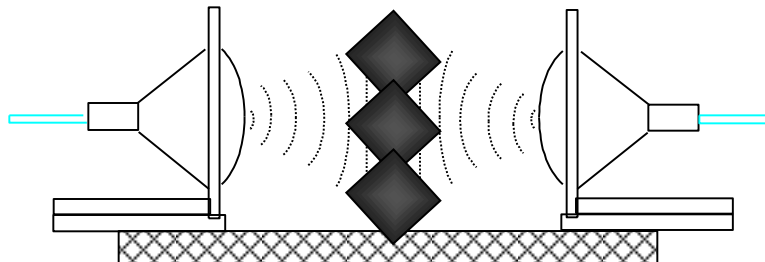
Проход (Thru)



Отражение (Reflect)



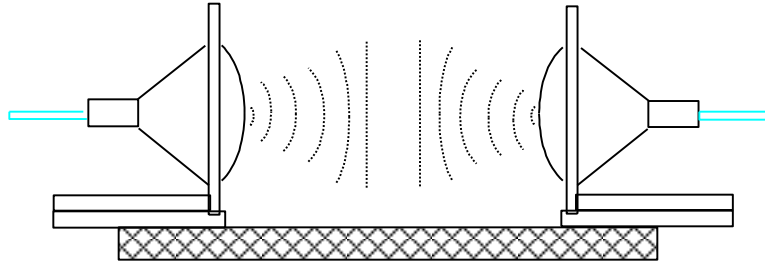
Нагрузка (Match)



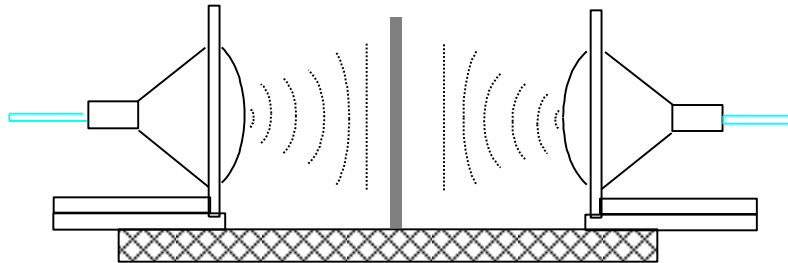
Сложно найти широкополосные
поглотители с точными характеристиками

Калибровка TRL

Проход (Thru)

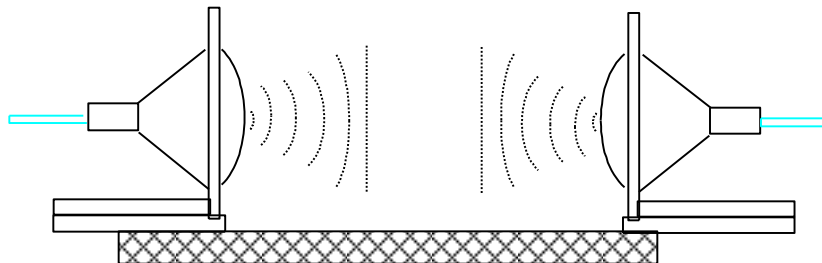


Отражение (Reflect)



Сместить антенну назад для компенсации толщины закоротки. Вернуть в начальное положение.

Линия (Line)



Переместить антенну назад на четверть длины волны, вернуть в начальное положение.

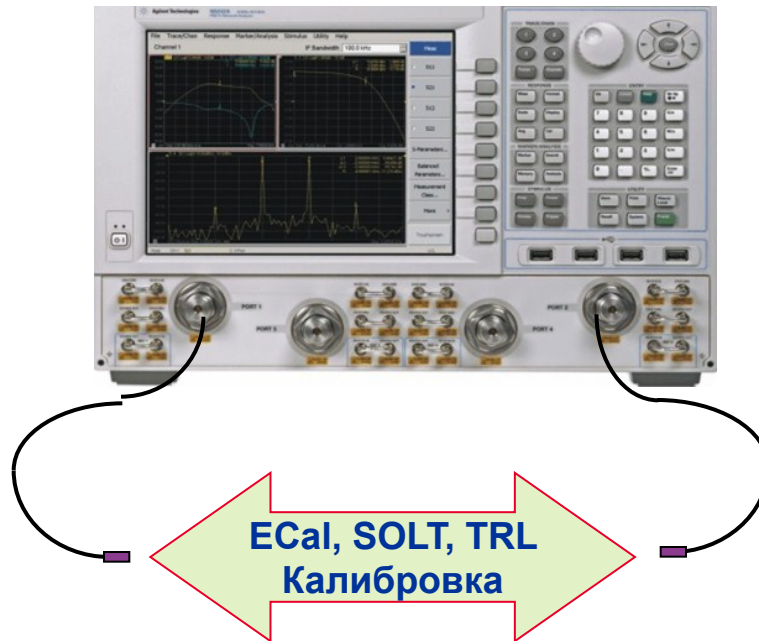
Точные позиционеры для антенн могут быть очень дорогостоящими

Калибровка Gated Reflect Line (GRL)

Состоит из двух шагов

1.

– Двухпортовая калибровка в плоскости подключения антенн (коаксиал или волновод) убирает эффекты связанные с кабелями



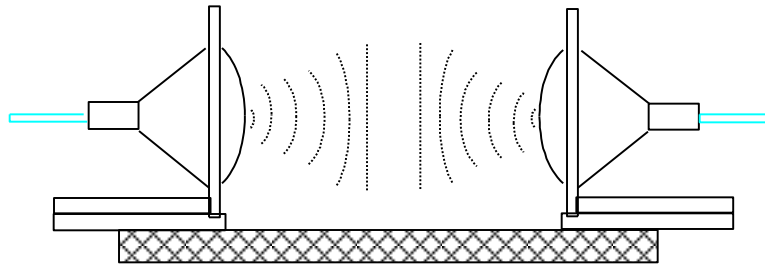
Калибровка Gated Reflect Line (GRL)

Состоит из двух шагов

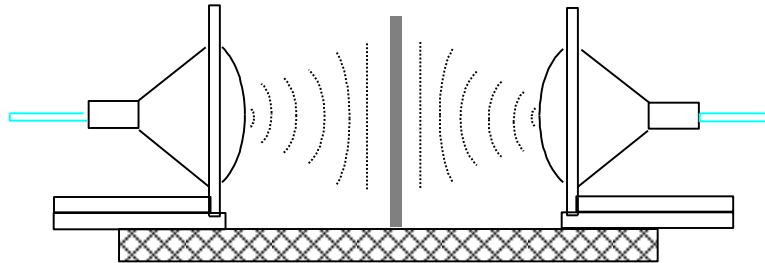
2.

– Два стандарта позволяют убрать эффекты связанные с антеннами и оснасткой.

**Линия (Line) -
Пустая оснастка**



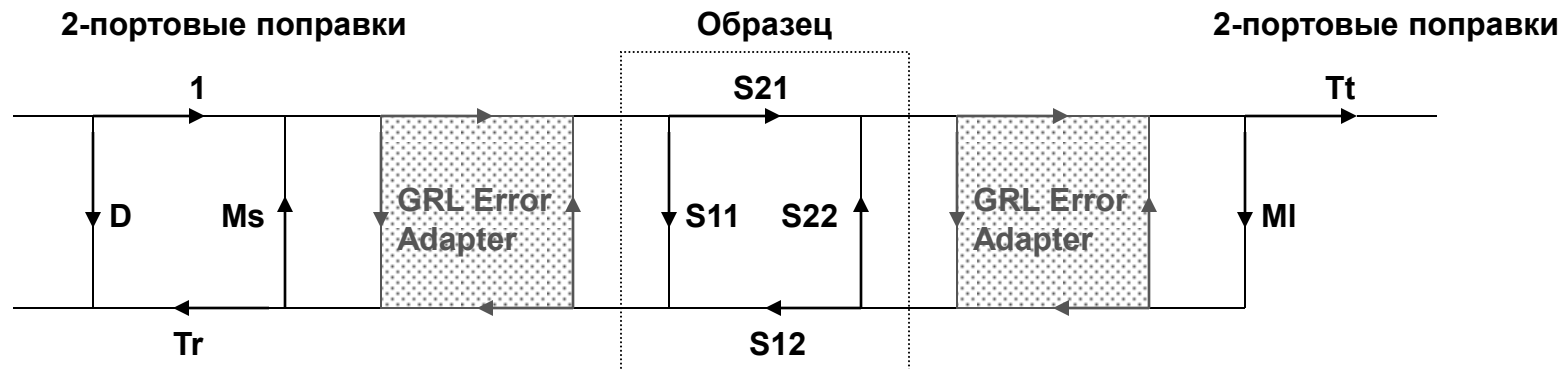
**Отражение (Reflect) -
Металлическая пластина
известной толщины**



Калибровка Gated Reflect Line (GRL)

Как это работает

Модель калибровки GRL (в одну сторону)



- После 2-портовой калибровки поправки корректируют систему вплоть до концов кабелей
- Предполагается, что поправки для антенны и оснастки могут быть объединены в подобие адаптера (GRL error adapter).
- Параметры GRL «адаптера» определяются в ходе измерения стандартов отражения и линии (на проход).
- Измеренные поправки добавляются к исходной 2-портовой калибровке, чтобы учесть влияние GRL «адаптера».

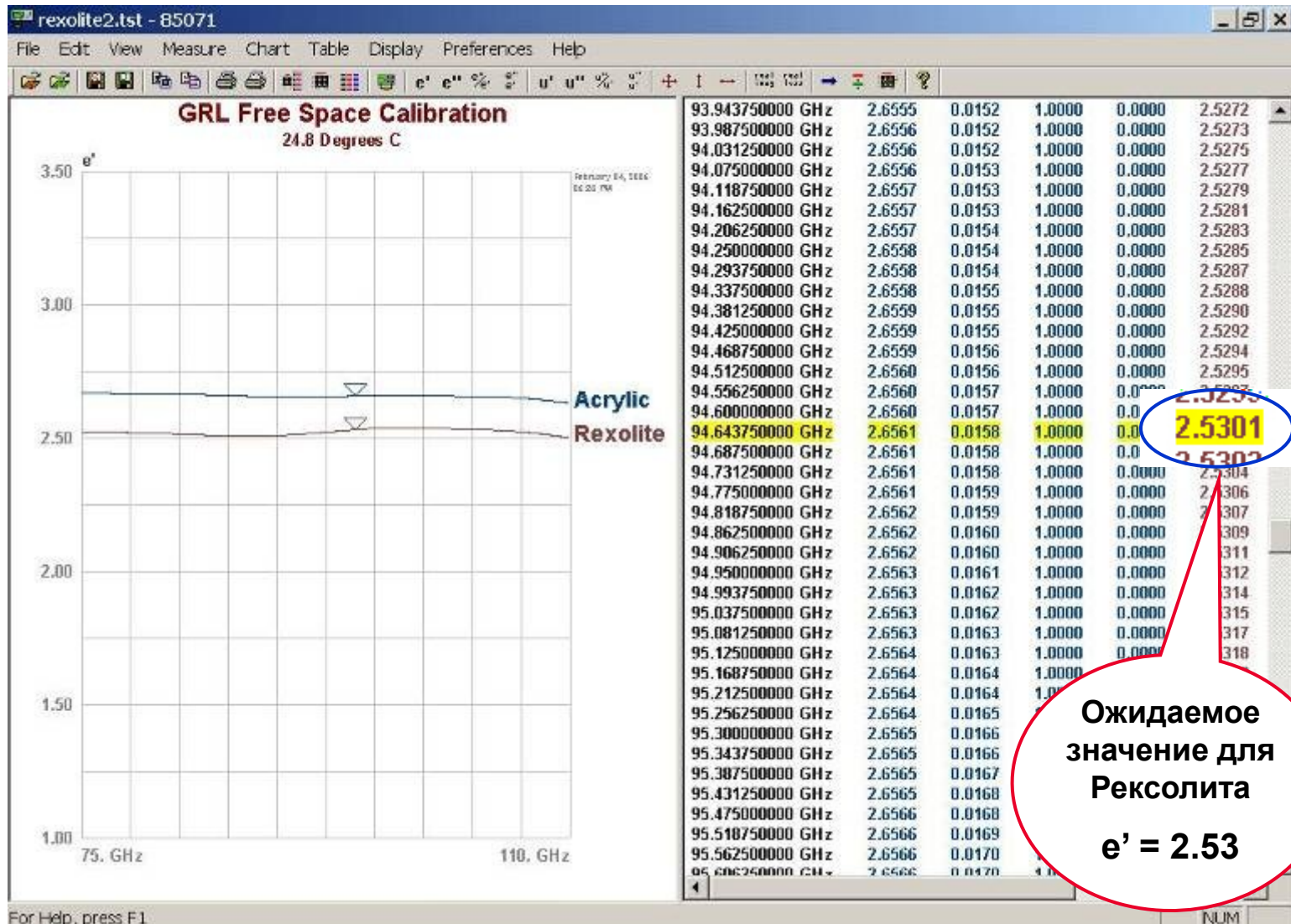
Калибровка GRL – Гейтинг (Gating)

Измерение пустой оснастки во временной области

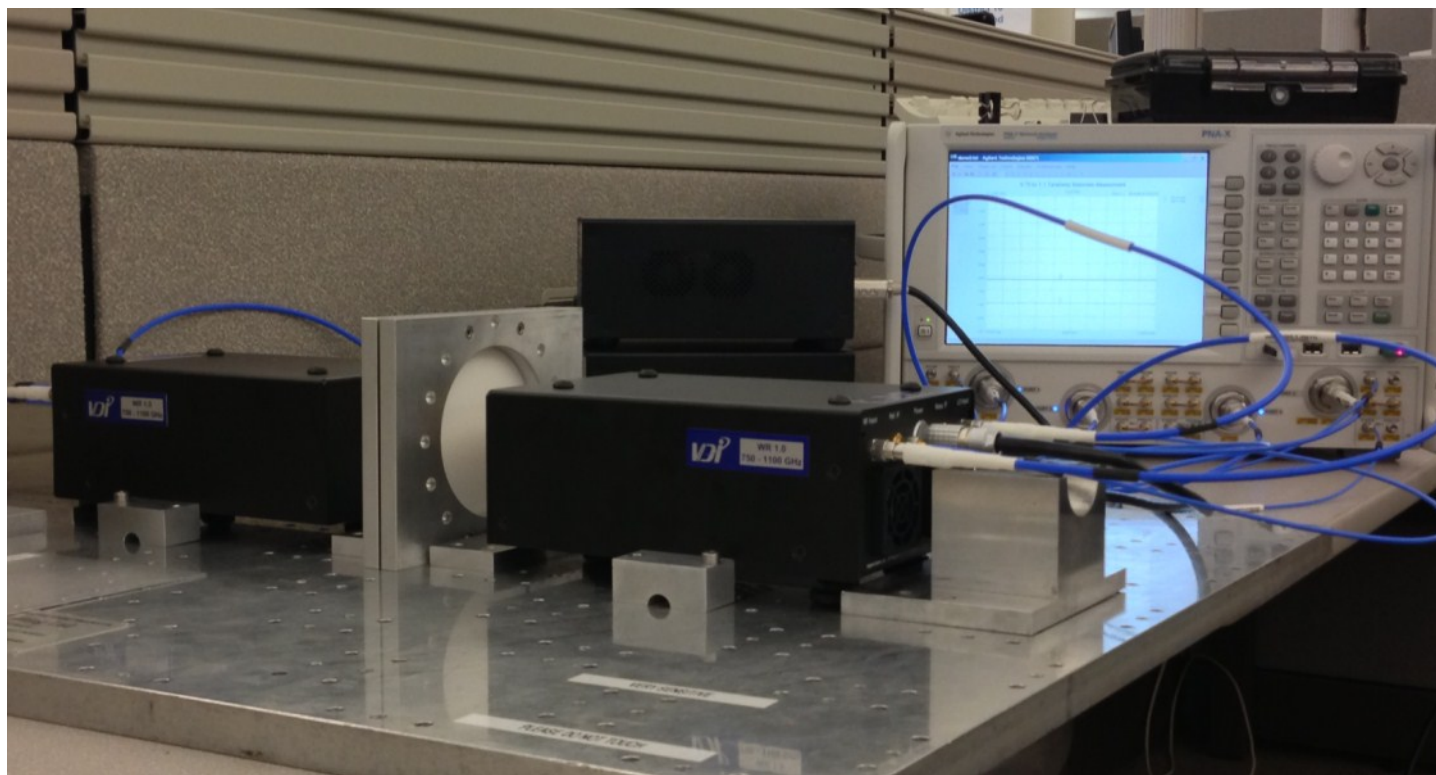
Используется для определения O11 и T11



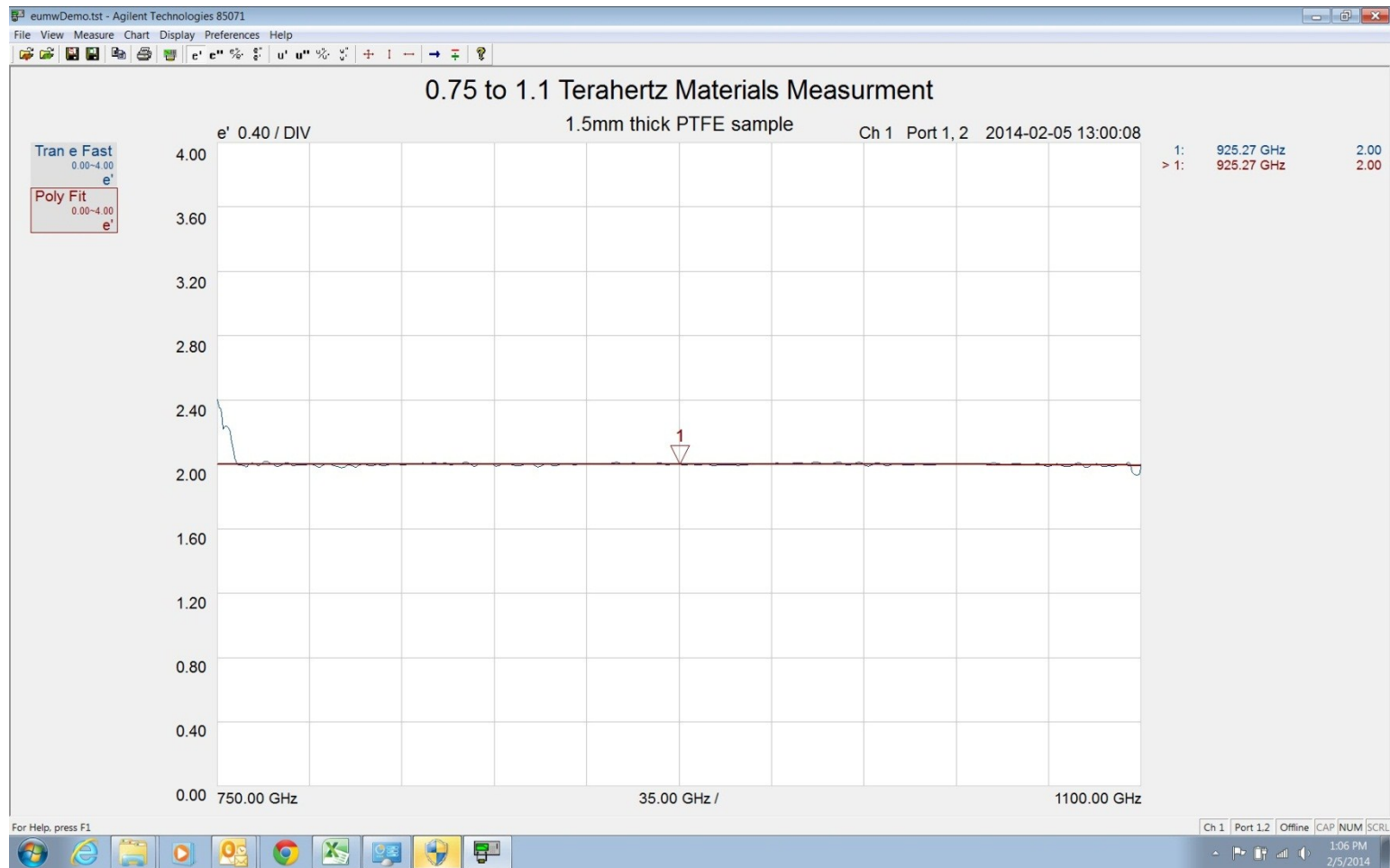
Результаты измерений в мм- диапазоне



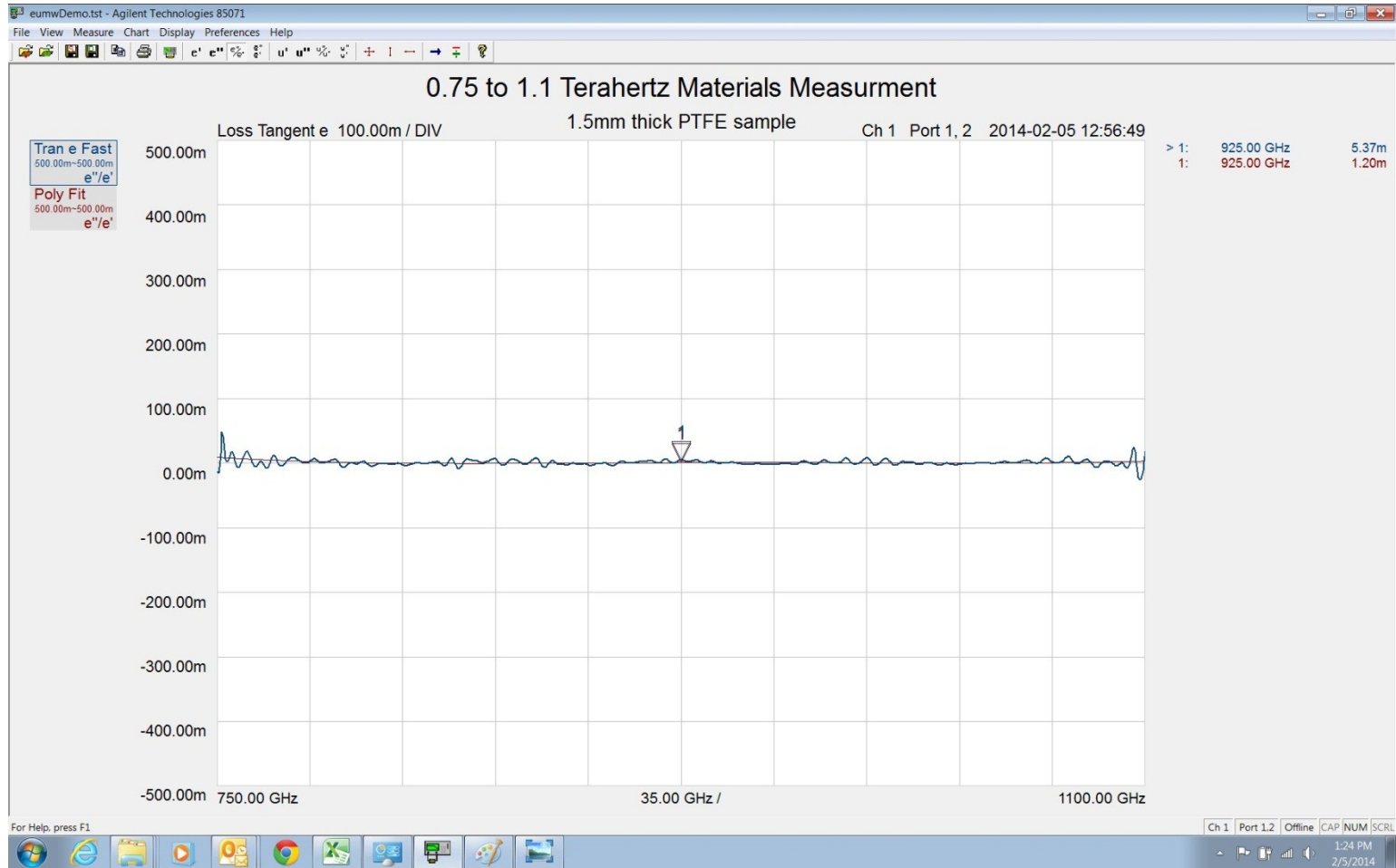
Решение для измерения параметров при 1,1 ТГц



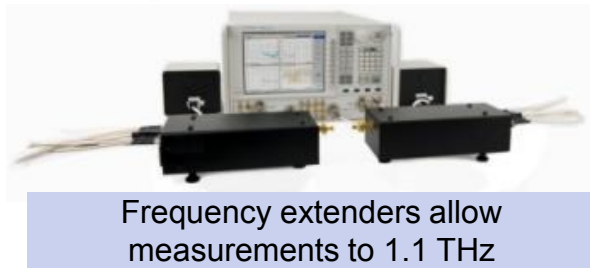
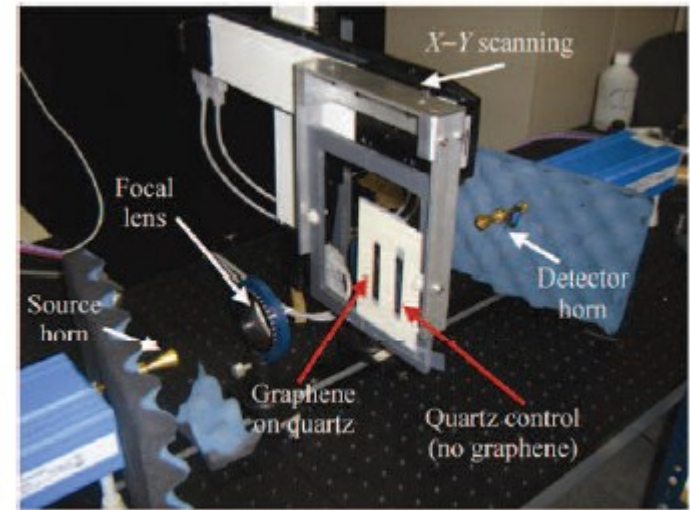
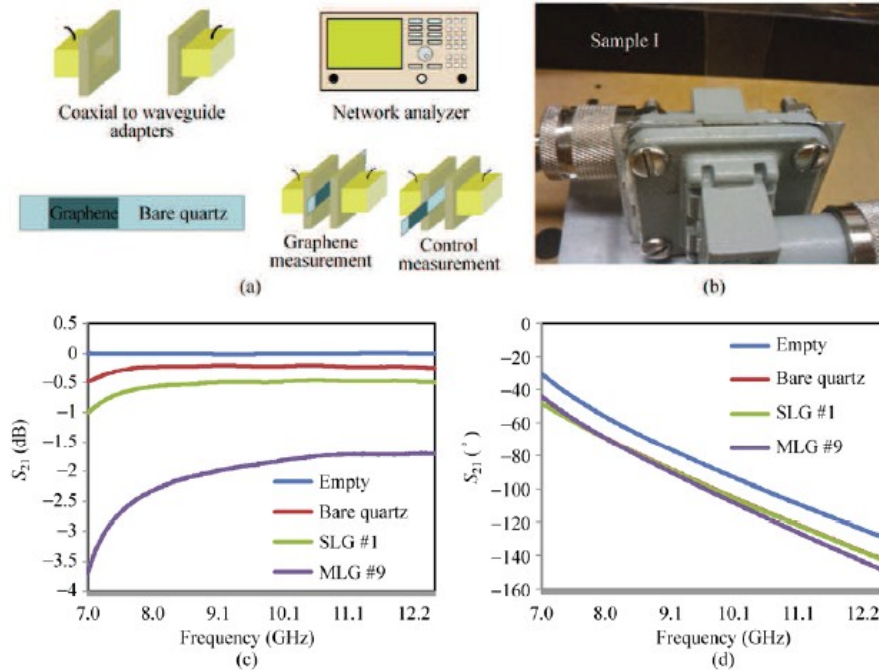
ϵ' для Тefлона (Teflon) при 1.1 ТГц



Тангенс угла потерь для Тefлона (Teflon) при 1.1 ТГц



Характеризация графена при ТГц



Измерение

Измерение абсолютного значения проводимости и прозрачности многослойного графена (MLG) и однослойного графена (SLG) в частотной области от DC до 1 ТГц



Статья

Terahertz Graphene Optics

Nima Rouhi¹, Santiago Capdevila², Dheeraj Jain¹, Katayoun Zand¹, Yung Yu Wang¹, Elliott Brown³, Lluís Jofre², and Peter Burke¹ (✉)

¹ Integrated Nanosystems Research Facility, Department of Electrical Engineering and Computer Science, University of California, Irvine, CA 92697, USA

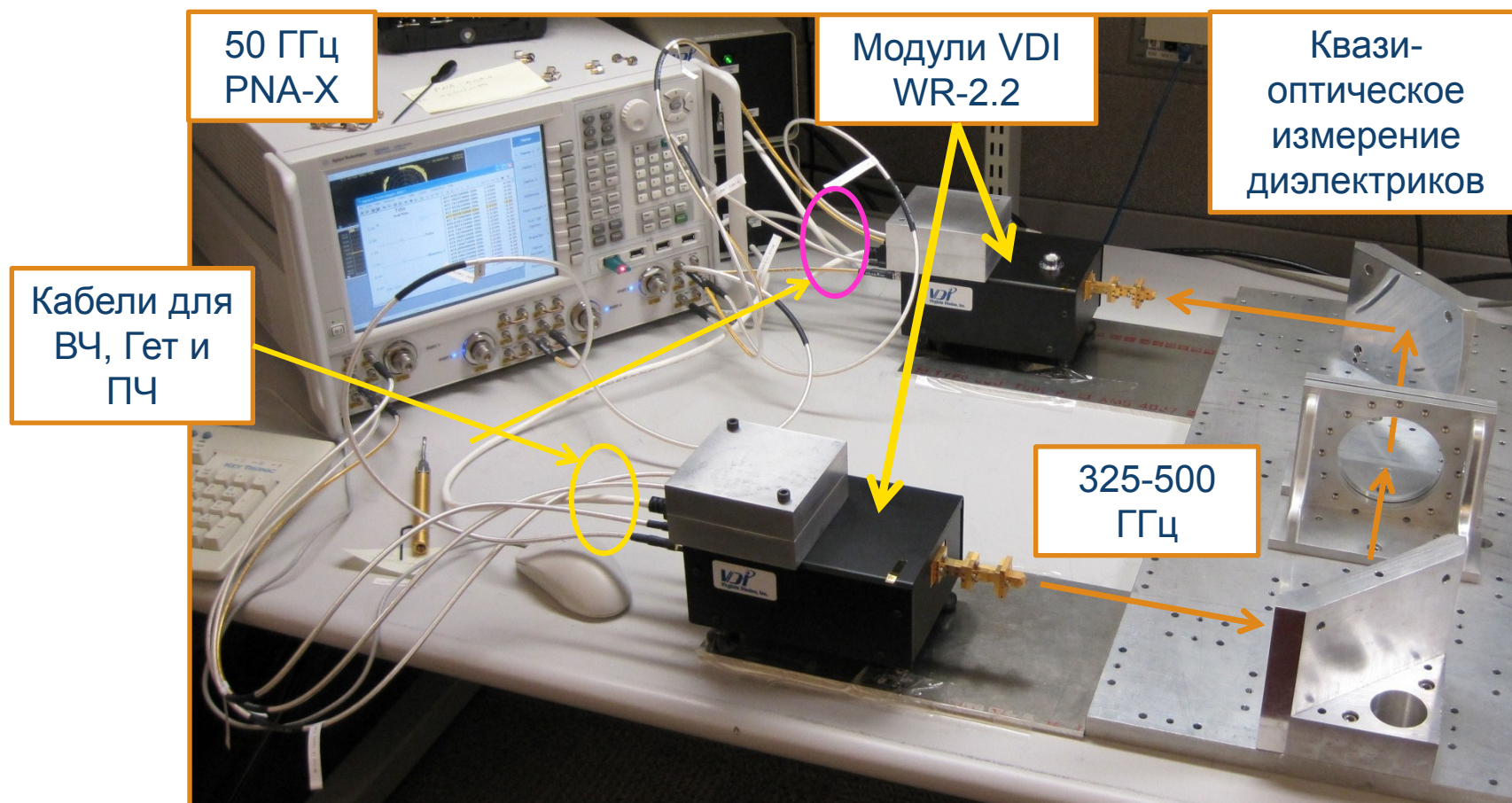
² Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Spain

³ Wright State University, Dayton, OH 45435, USA

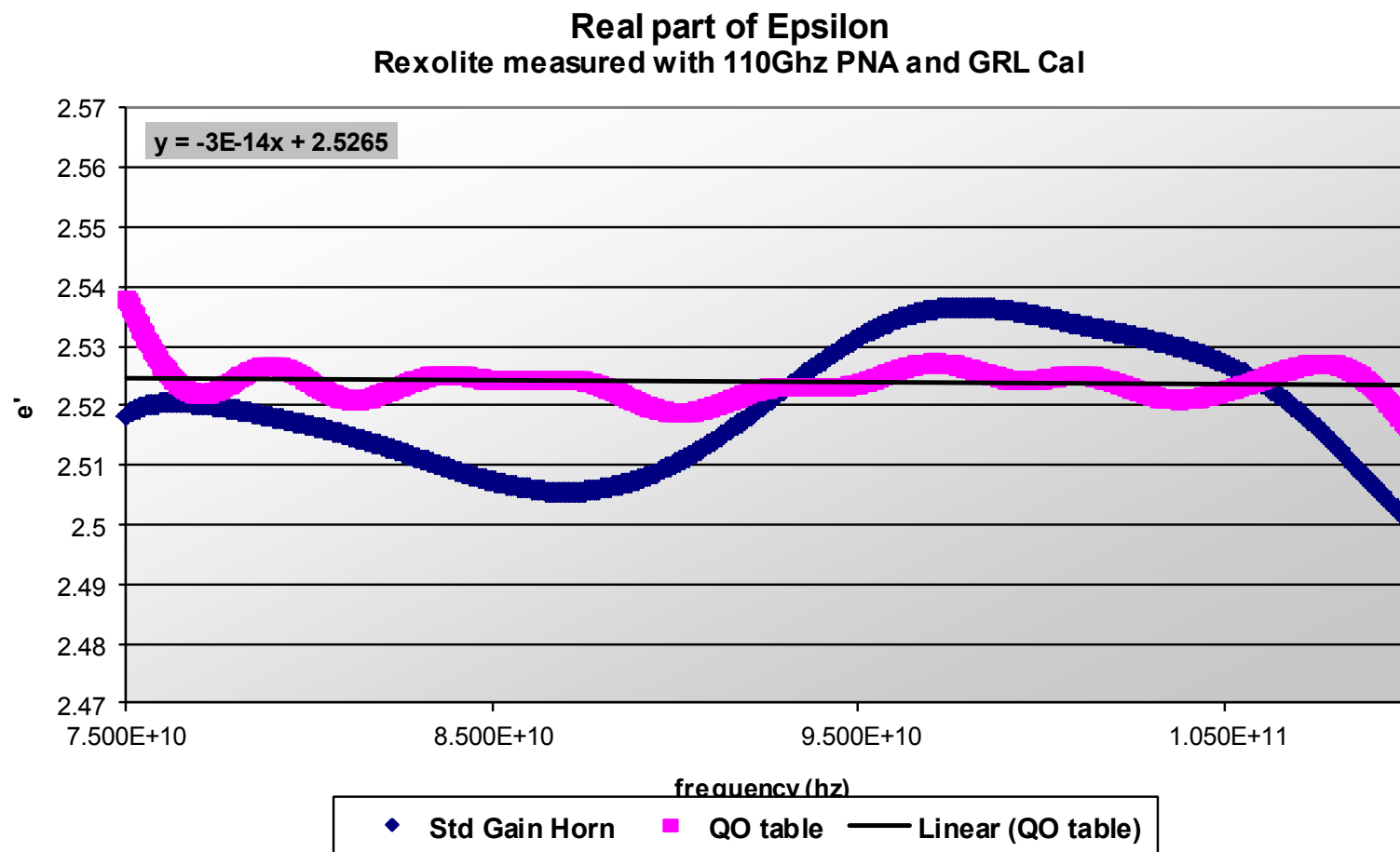
Received: 13 June 2012 / Revised: 7 August 2012 / Accepted: 9 August 2012

© Tsinghua University Press and Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012

Квази-оптические измерения на анализаторе цепей

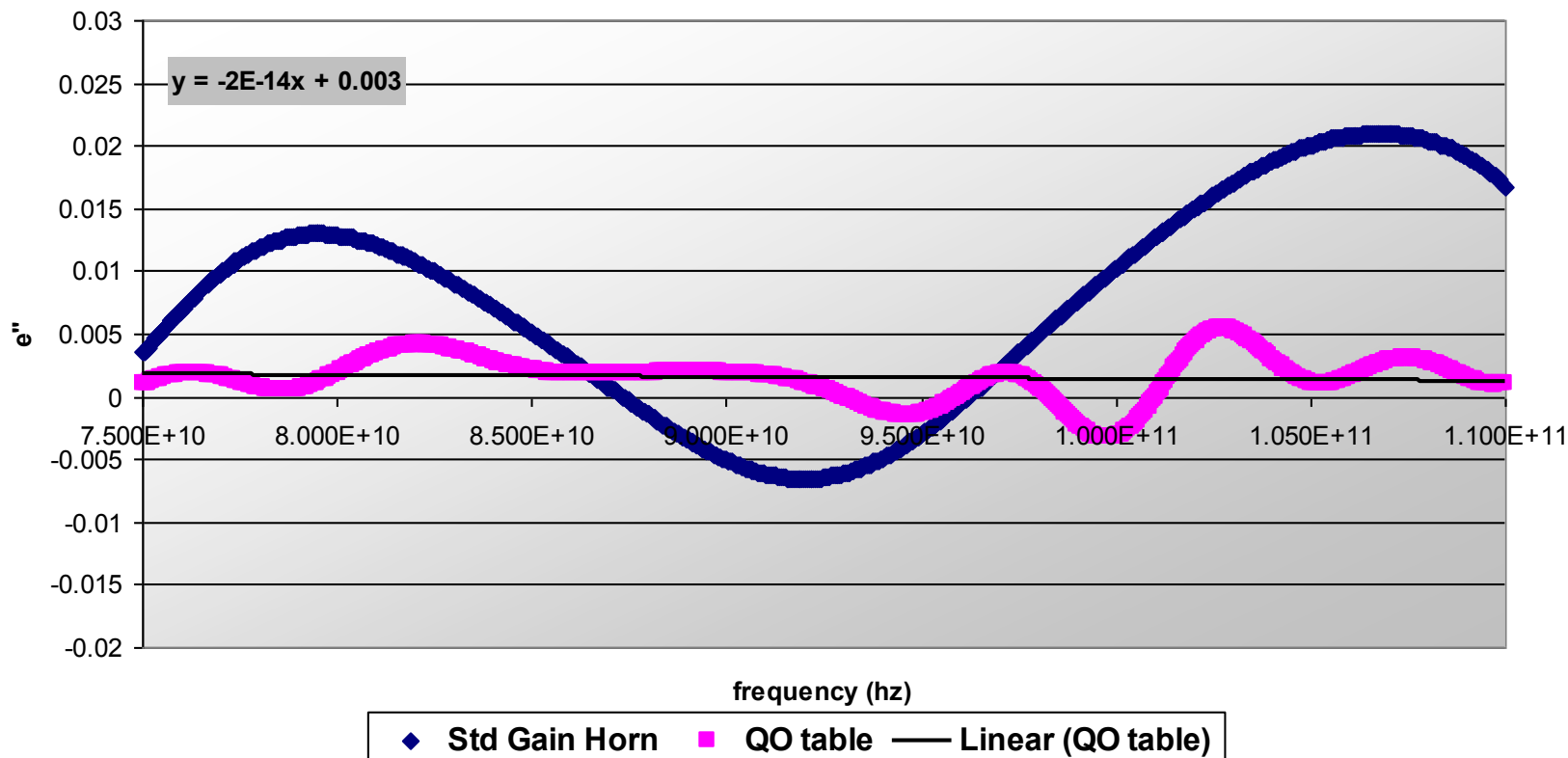


Результаты измерений



Результаты измерений

Imaginary part of Epsilon
Rexolite measured with 110Ghz PNA and GRL Cal



Измерение в свободном пространстве



- Безконтактный, неразрушающий
- Не требуется точная механическая обработка
- Высокотемпературный
- Высокая точность



- Калибровка GRL
- Гейтинг во временной области



- Измерение диэлектрической и магнитной проницаемости



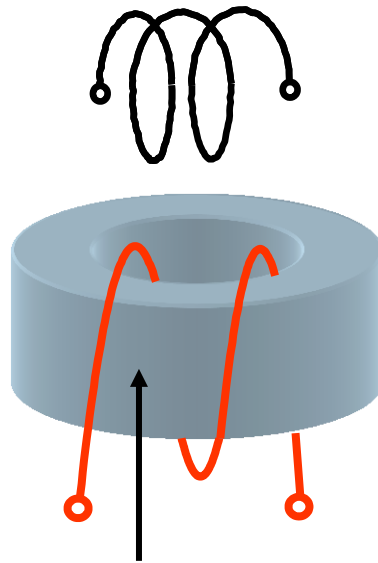
Необходим достаточно большой и тонкий образец с параллельными гранями



Необходимо точно знать толщину металлической пластины

Измерение магнитных материалов

Индуктивный метод



Образец - Тороидальный сердечник

Решения Keysight

Измерение магнитной проницаемости



НЧ/ВЧ Решение (от 1 кГц до 120 МГц)



ВЧ Решение (1 МГц to 1 ГГц)

16454A (оснастка для магнитных материалов)

- Точные измерения μ_r / $\tan\delta$ в широком диапазоне 1 кГц до 1 ГГц
- Нет необходимости накручивать проволоку на тороид.
- Несколько вариантов корпуса совместимы с различными размерами образцов.
- Совместим с E4991B Opt 002.
- Возможна температурная характеристика от $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Простая интеграция в систему для температурных измерений E4991B.



16454A

Измерение магнитных материалов



Широкий частотный диапазон в НЧ области



Ограничение по верхней частоте



Хорошая точность



Хорошо подходит для материалов с низкой магнитной проницаемостью



Простая установка и настройка

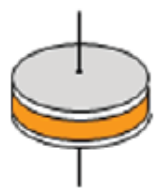
Решения Keysight для измерения параметров материалов

Coaxial Probe
 ϵ_r



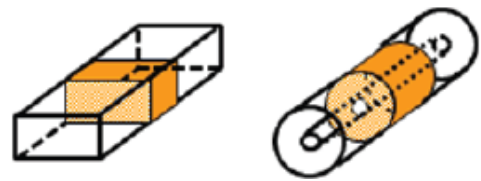
Broadband, convenient, non-destructive
Best for lossy MUTs; liquids and semi-solids

Parallel Plate
 ϵ_r



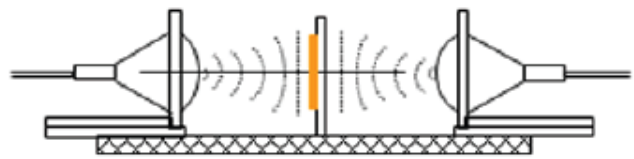
Accurate
Best for low frequencies; thin, flat sheets

Transmission Line
 ϵ_r and μ_r



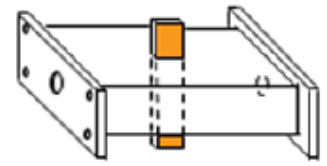
Broadband
Best for lossy to low loss MUTs;
machineable solids

Free Space
 ϵ_r and μ_r



Broadband; Non-contacting
Best for flats sheets, powders, high temperatures

Resonant Cavity
 ϵ_r



Single frequency; Accurate
Best for low loss MUTs; small samples

Вопросы

