

Measurement meets Simulation

Моделирование и измерения в СВЧ

совместный семинар

компаний Rohde&Schwarz, CST, MPI AST



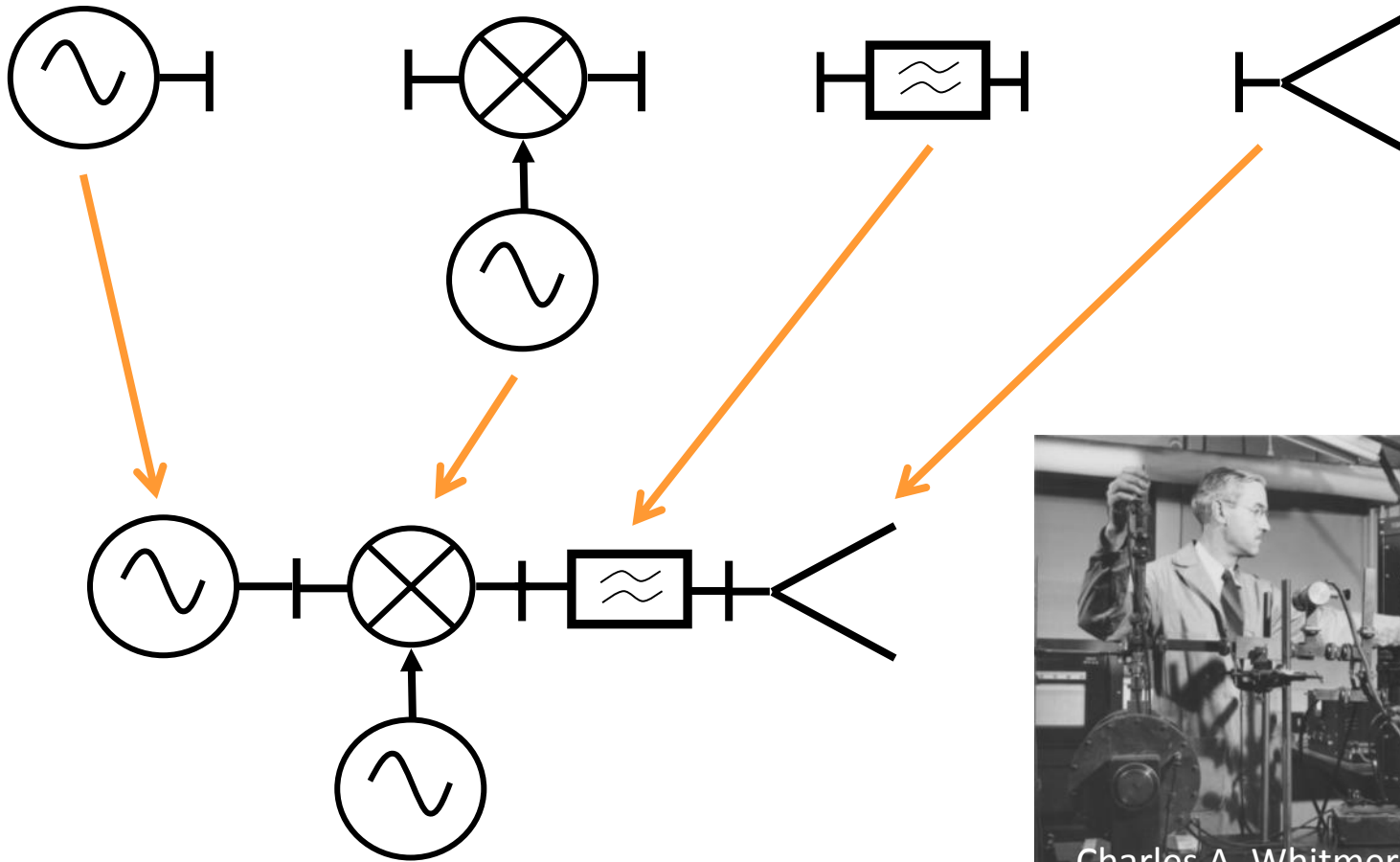
MPI

Москва, 12-13 апреля 2016 года

*Особенности измерений на
полупроводниковых подложках и
калибровочных методов в СВЧ диапазоне,
основанных на планарных линиях*

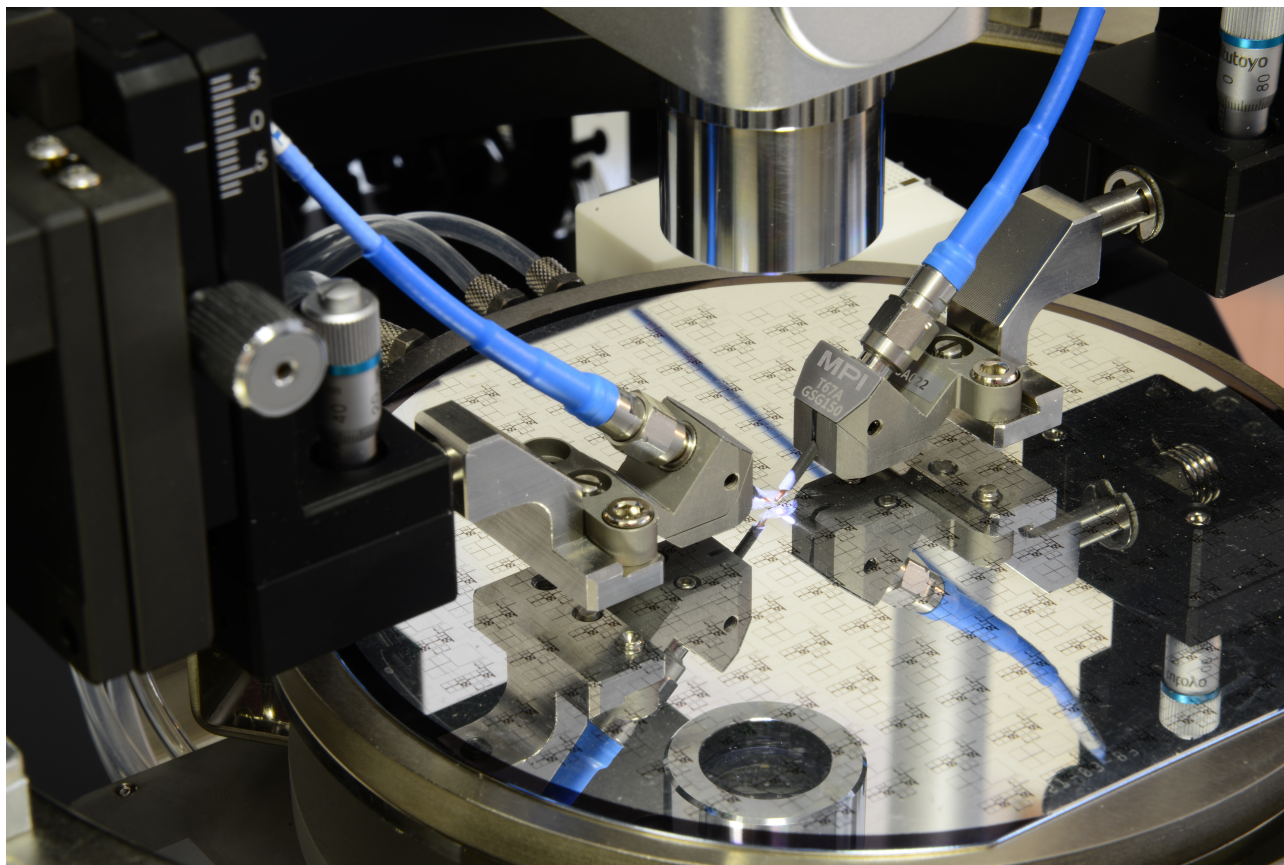
*Д-р Андрей Румянцев
Директор по СВЧ Технологиям*

Классический подход к задаче СВЧ дизайна

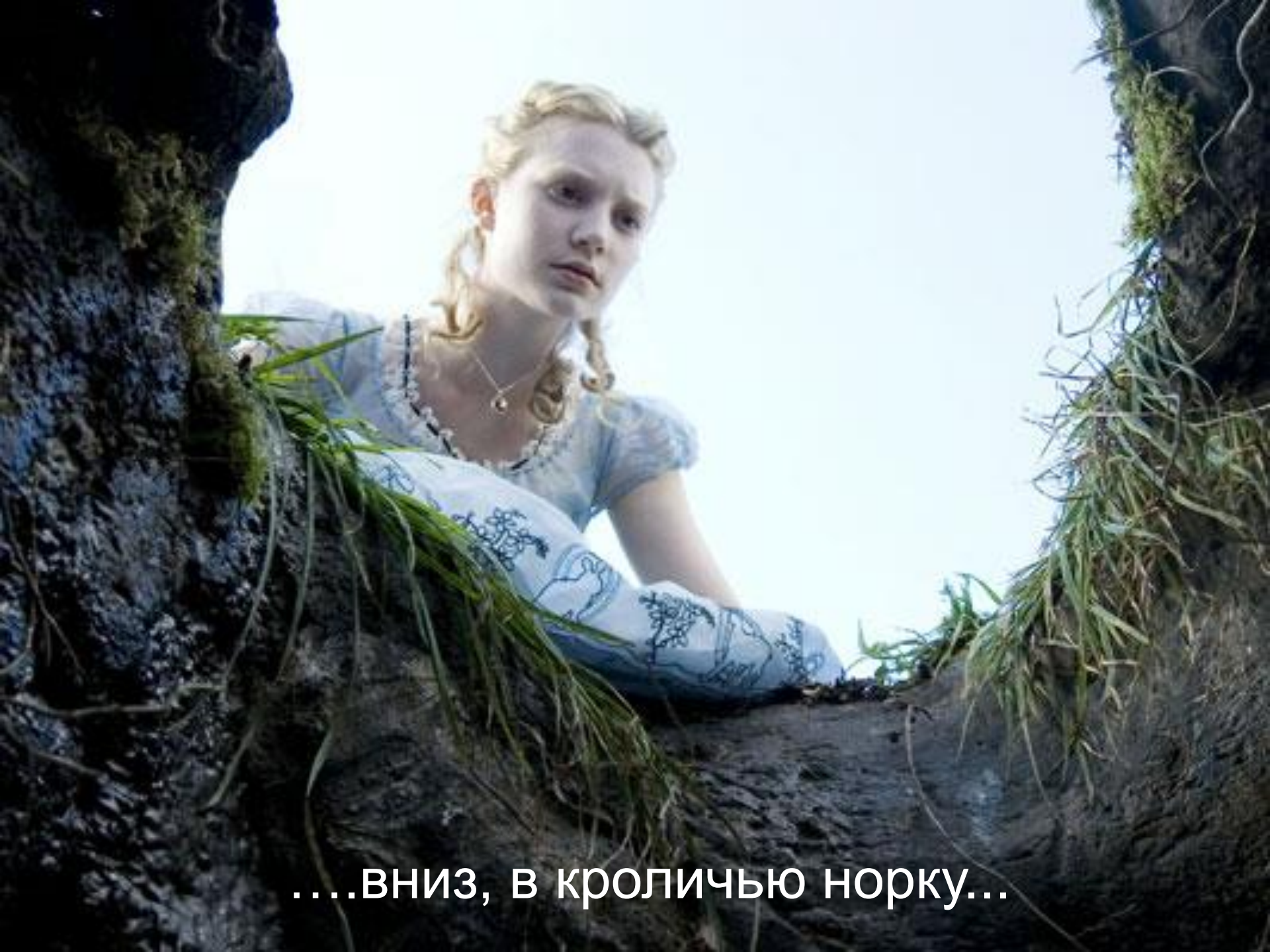


Courtesy: Dylan Williams, NIST

Последний дюйм до объекта измерений

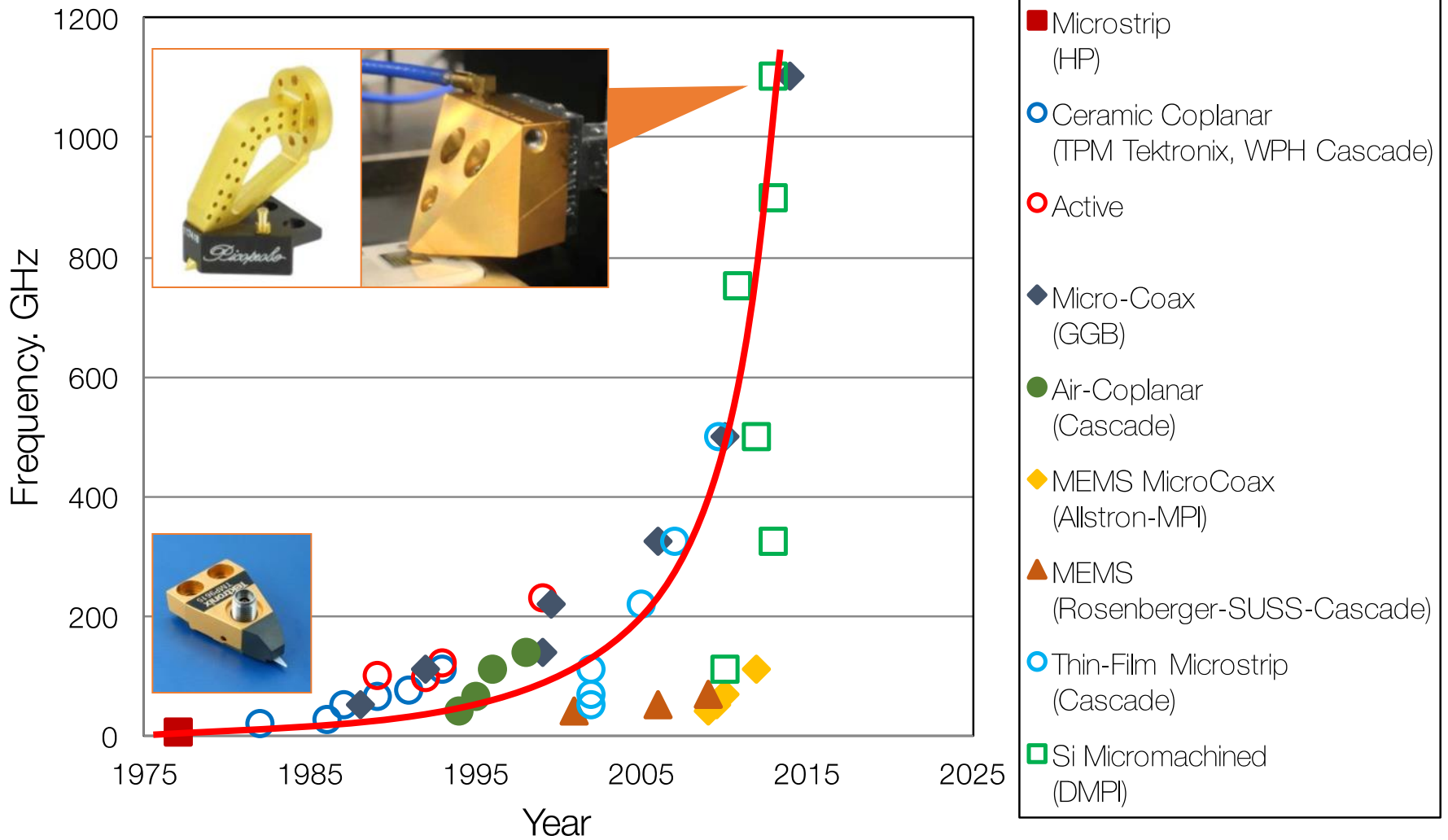


...дверь в другой мир...



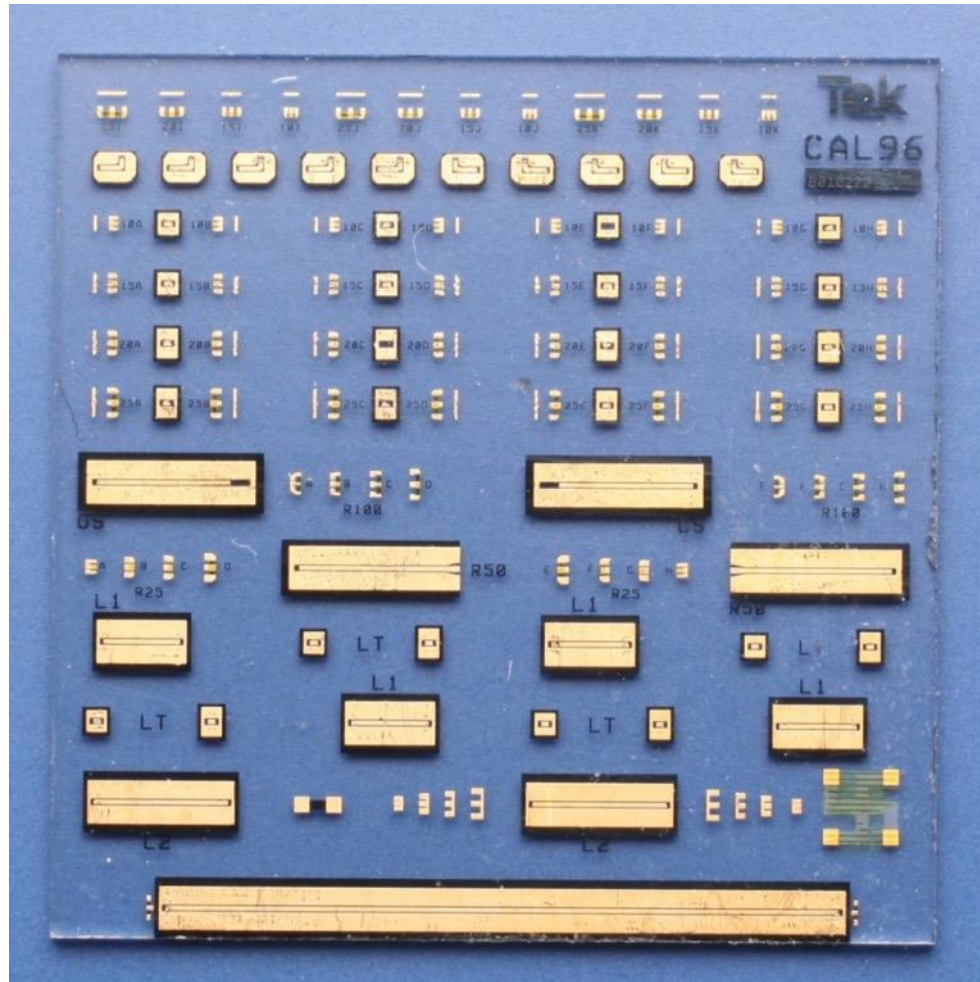
....ВНИЗ, В КРОЛИЧЬЮ НОРКУ...

Головки: 40 лет ~ 400х по частоте



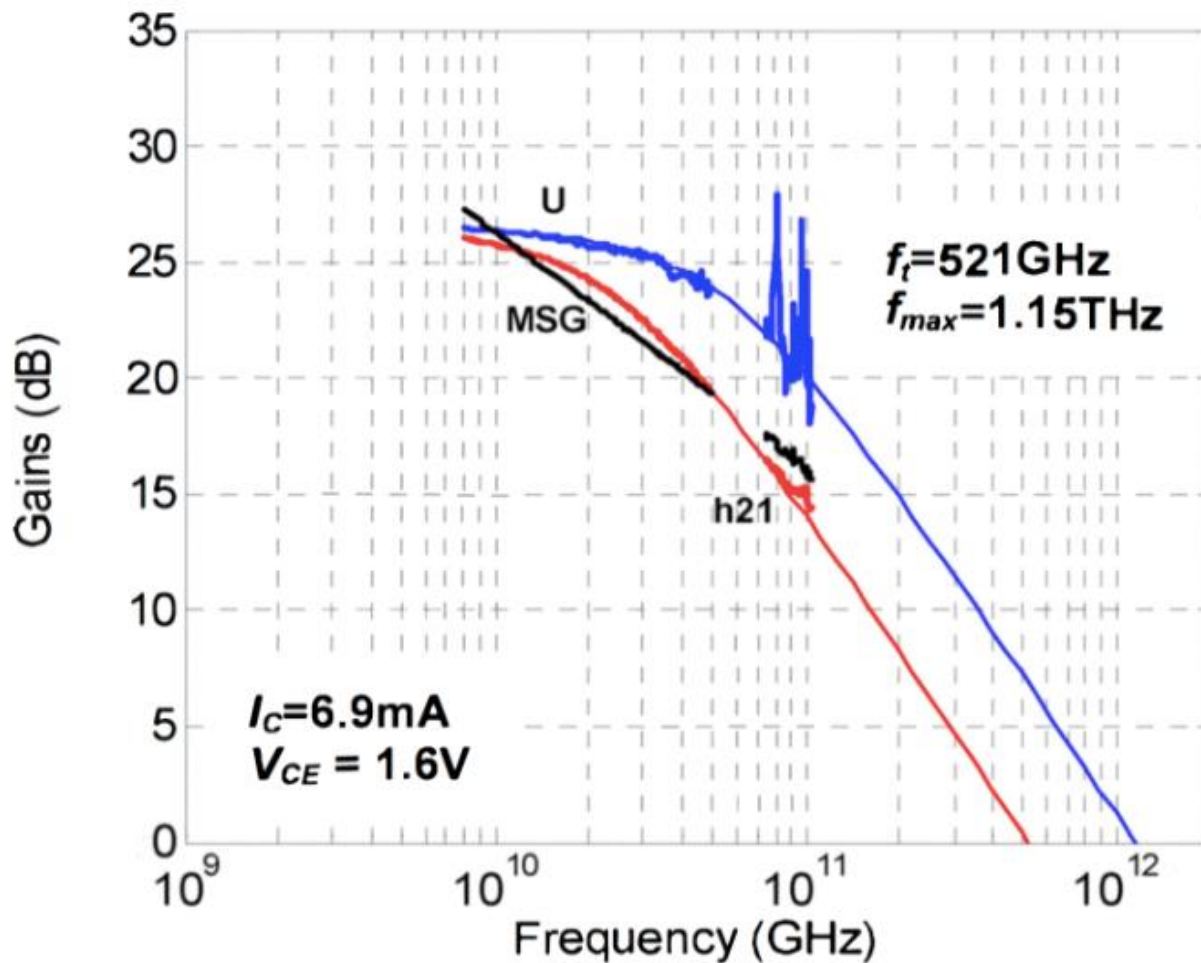
Source: Rumiantsev Microwave Magazine, Oct. 2013

Первые планарные калибровочные меры

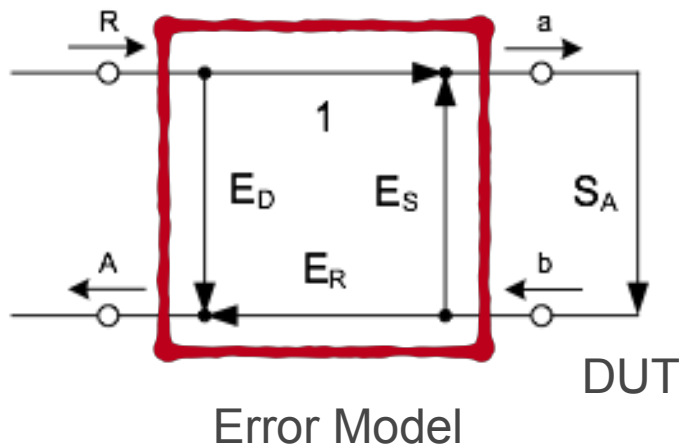


Source: Rumiantsev Microwave Magazine, Oct. 2013

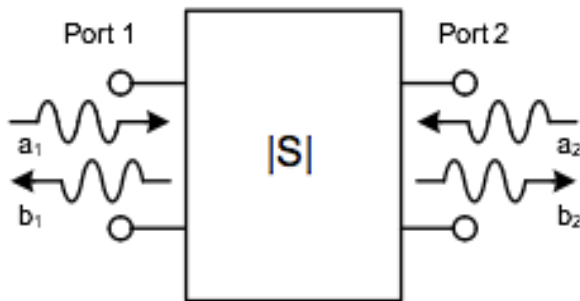
Как можно быть уверенным в таких результатах?



Цель/результат калибровки

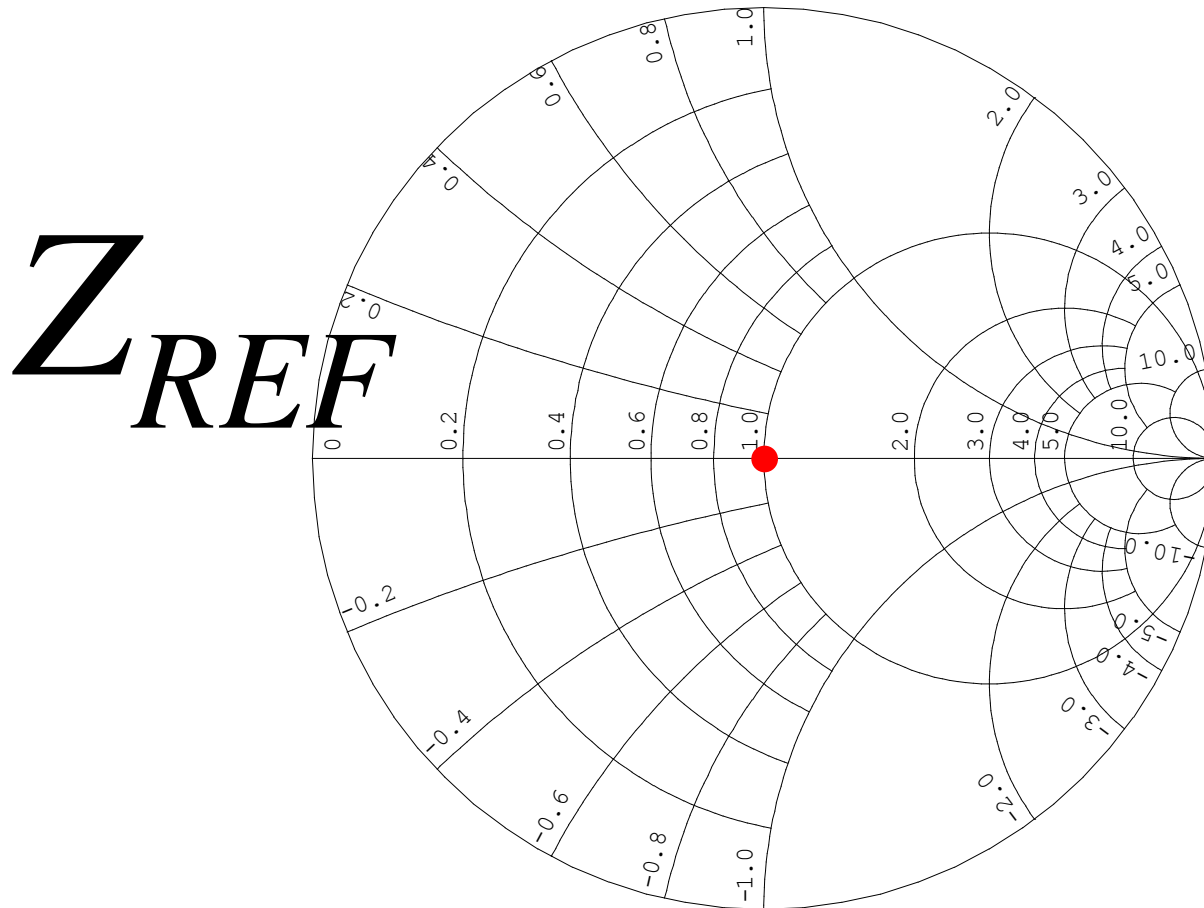


- Исключение систематических погрешностей
 - Сдвиг плоскости измерения
 - Определение опорного импеданса



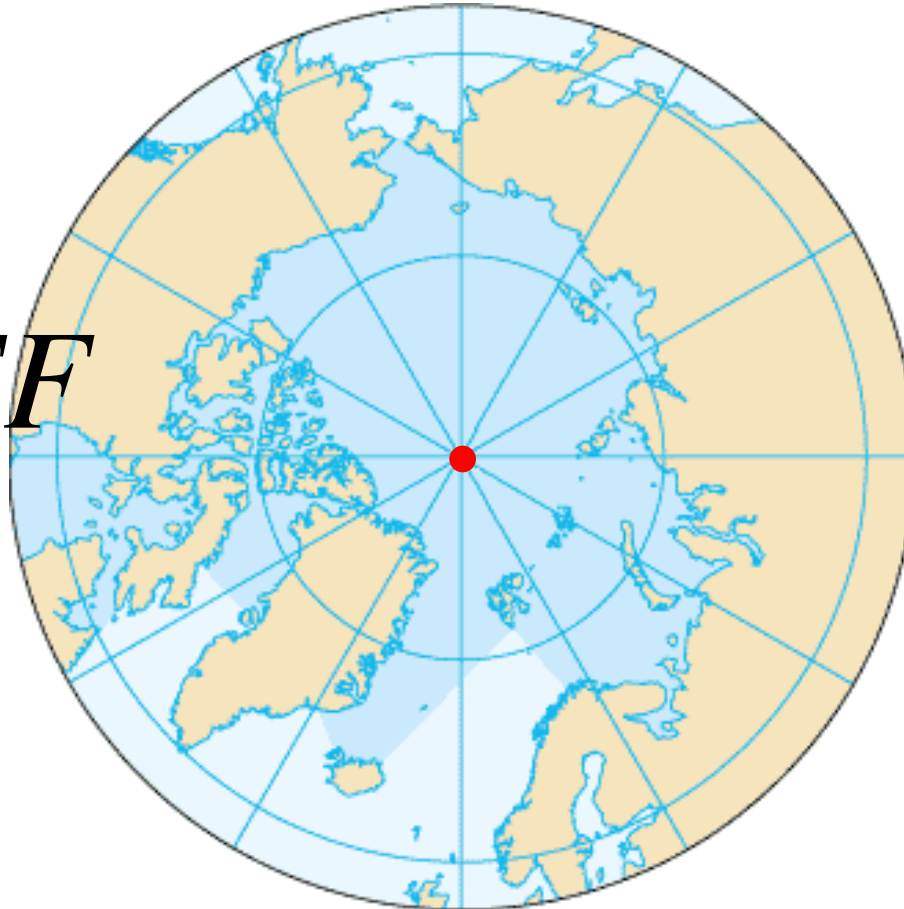
$$S_{ii} = \frac{b_i}{a_i} = \frac{Z_{DUT} - Z_{REF}}{Z_{DUT} + Z_{REF}}$$

Определение Z_{REF} – ключевой момент!

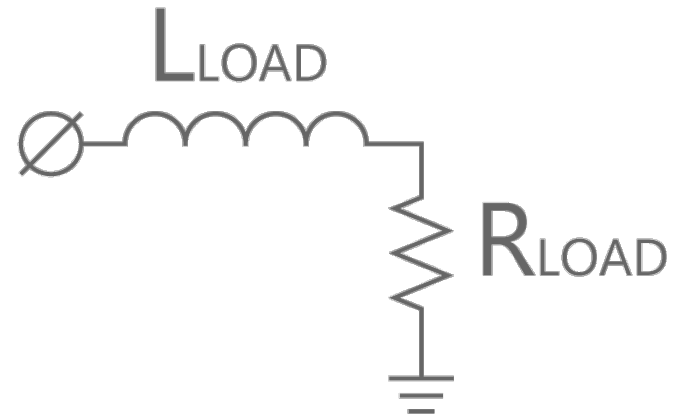


Z_{REF} – «ось» мира S-параметров

Z_{REF}

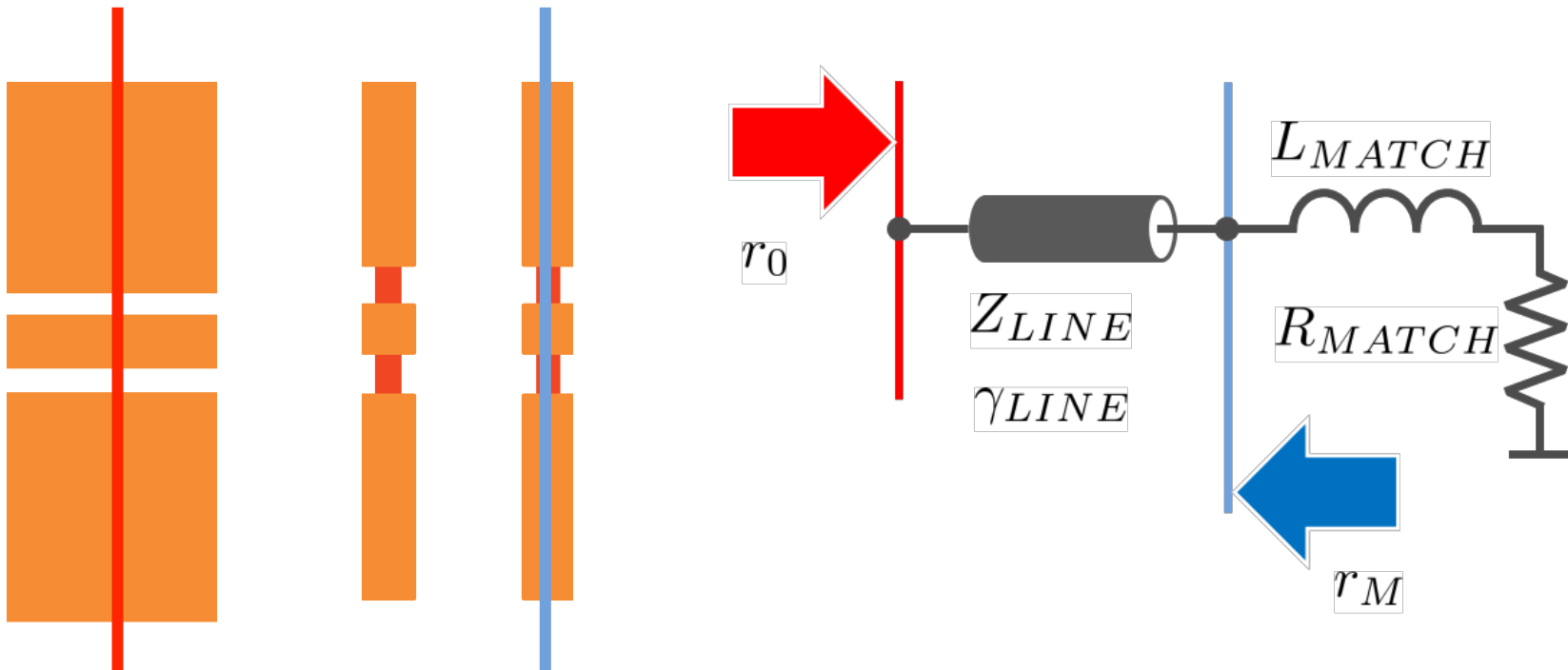


Z_{REF} В методах на сосредоточенных элементах



- Z_{REF} определяется Z_{LOAD}
- SOL, UMSO(SOLR), TOSM(SOLT), TMR(LRM), LRRM

Плоскость калибровки: середина Прохода



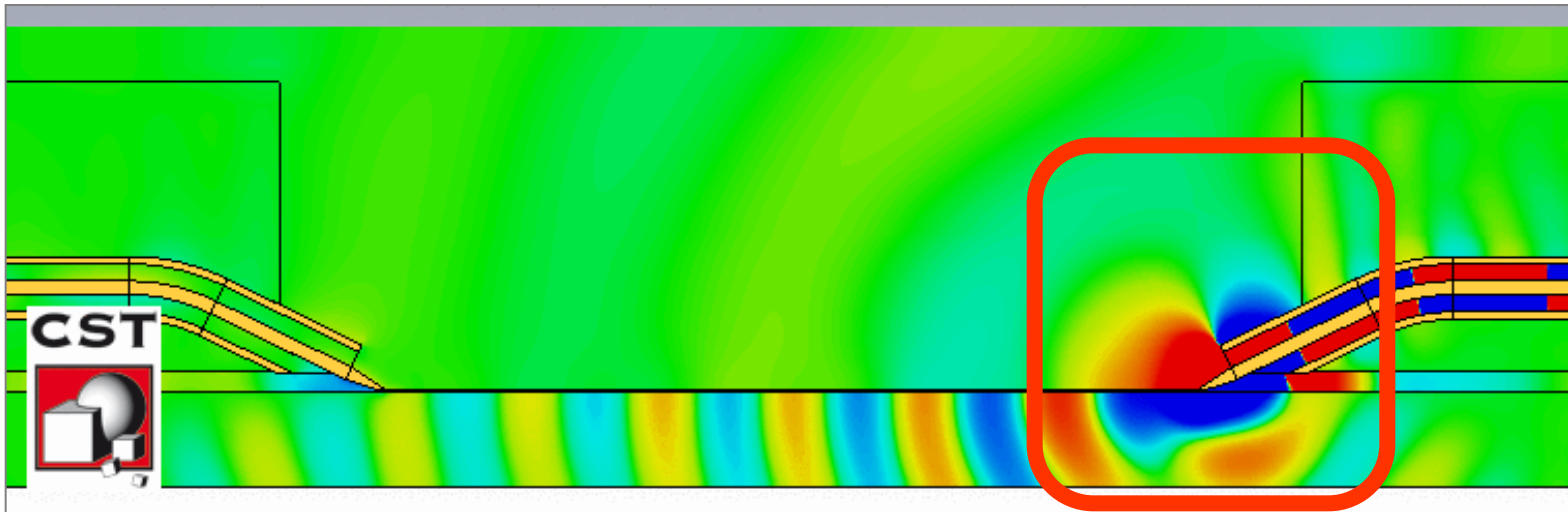
- Проход должен быть полностью известен!

Трудности в диапазоне мм-волн

- Нагрузка прямо у зондов
 - Меньше места на подложке
 - Больше групп – дешевле
- Приемлемая точность на низких частотах
- Импеданс нагрузки в мм-диапазоне?
- Точность калибровки и измерения?

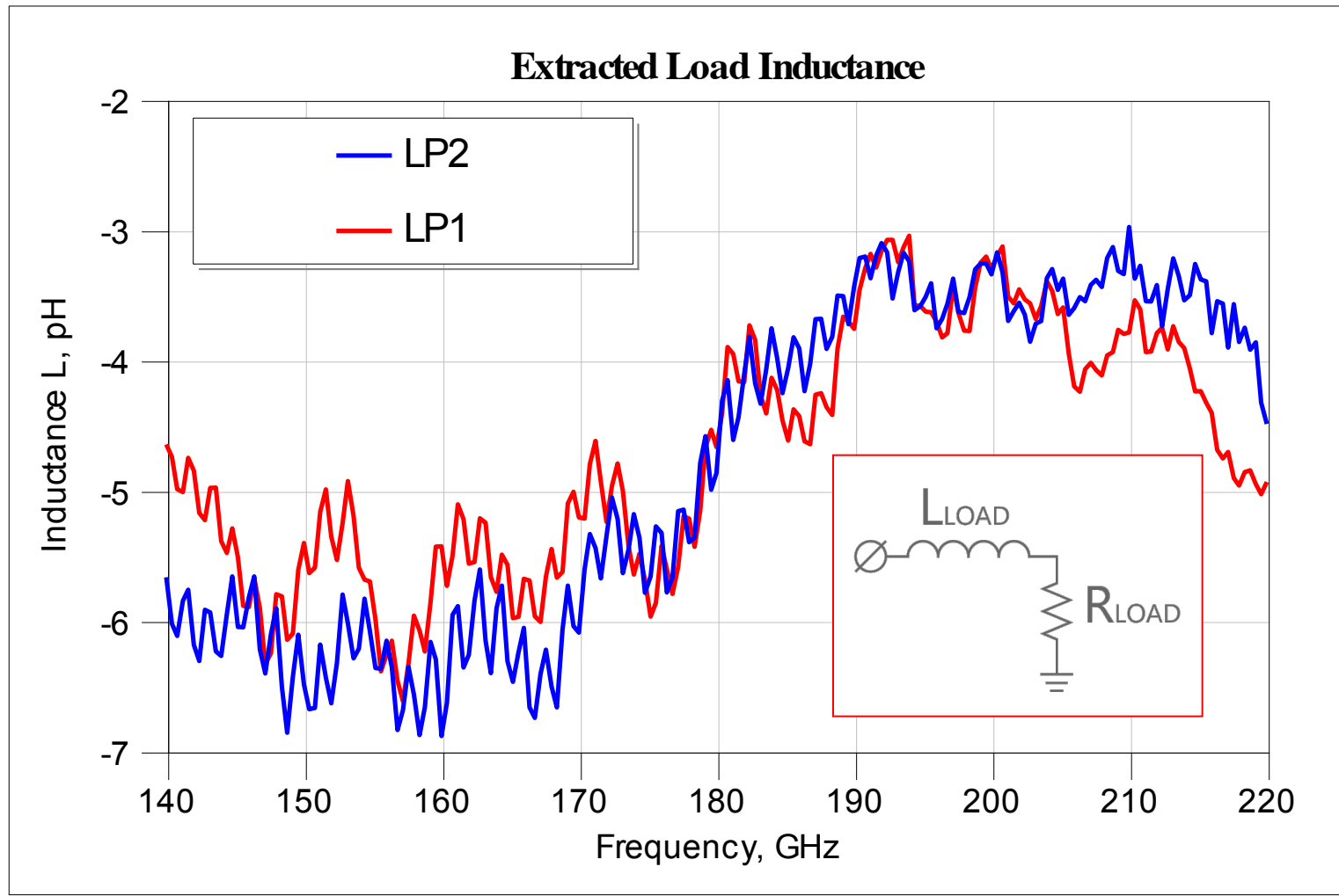
Нагрузка, размещенная у головки

- Точка перехода – неоднородность
- Неоднородное поле
- Импеданс нагрузки: - **неопределен**



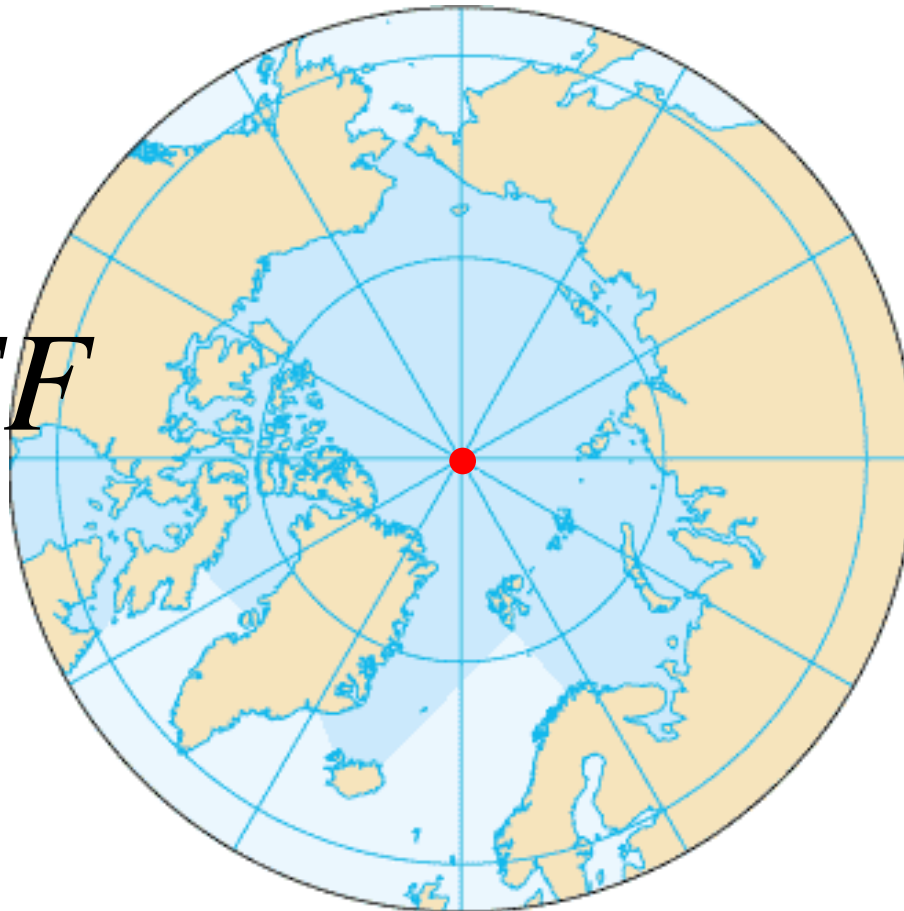
Courtesy: FBH

Измерение «индуктивности» нагрузки



Нестабильная «измерительная ось»

Z_{REF}

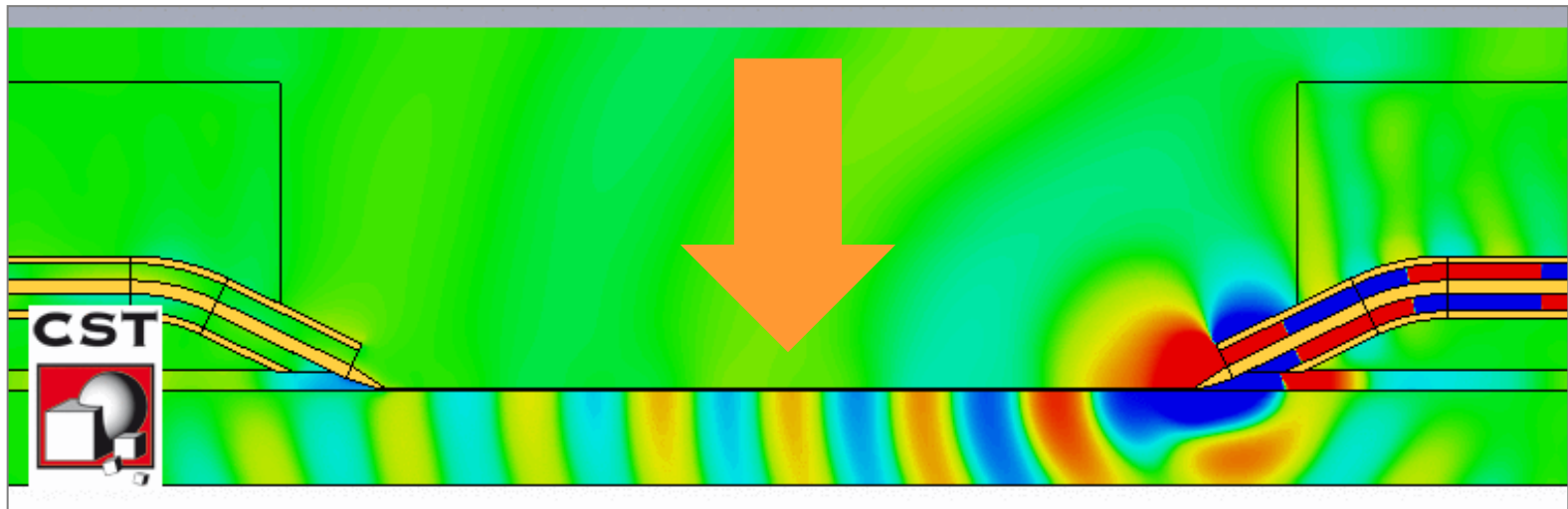


Нестабильная «измерительная ось»



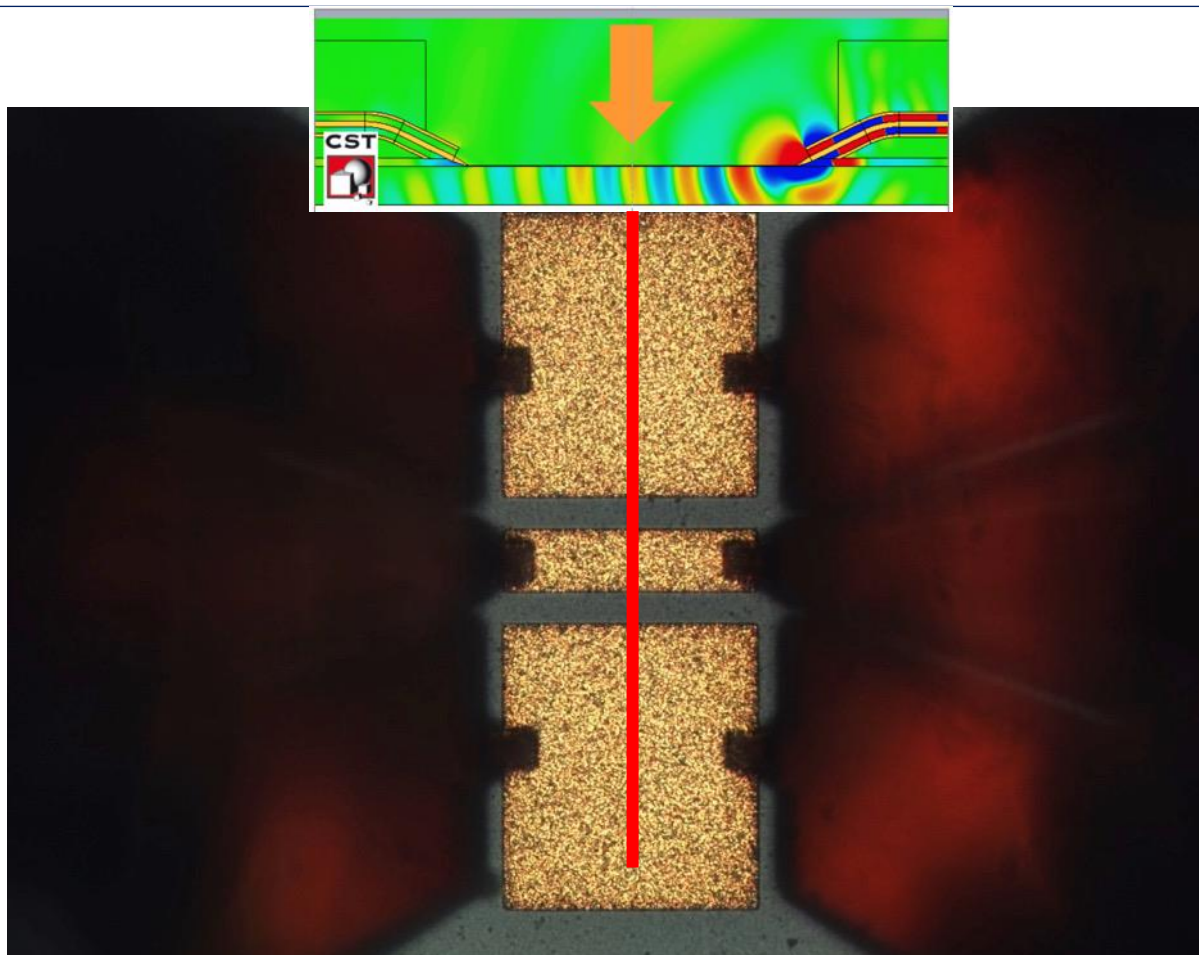
Чем дальше от перехода – тем лучше

- Переход в копланарную моду завершён
- Сформирована структура поля
- Определена бегущая волна
- Можно определить импеданс



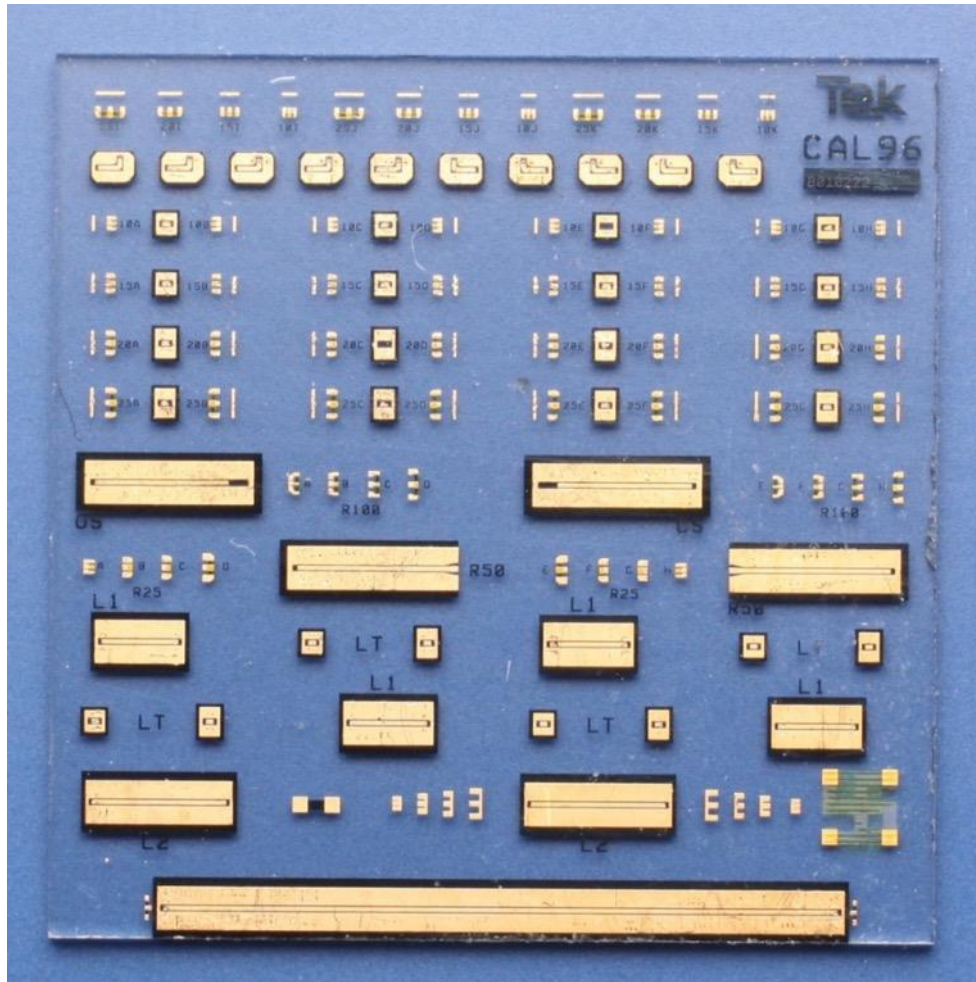
Courtesy: FBH

Чем дальше от перехода – тем лучше



Плоскость калибровки – середина прохода

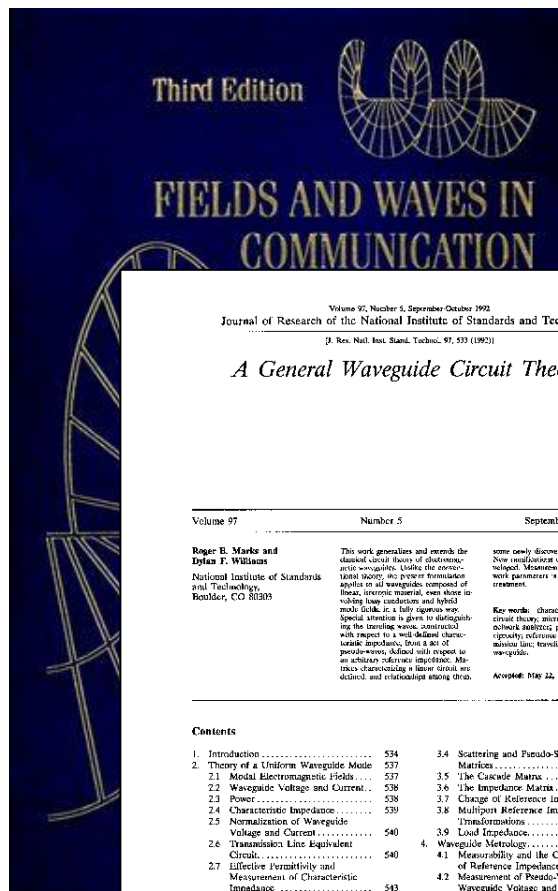
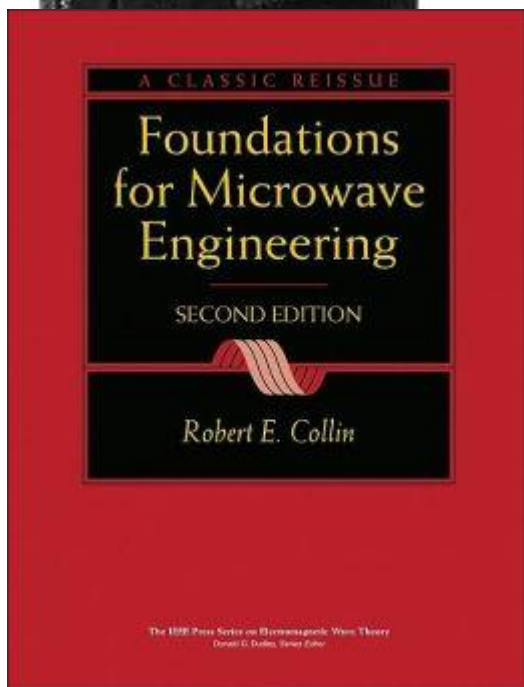
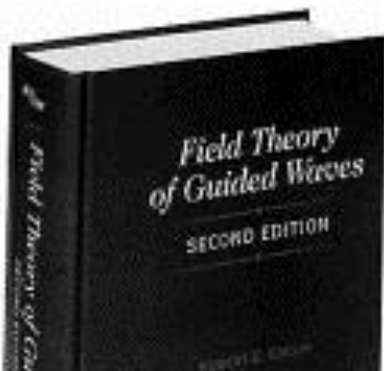
Планарные калибровочные меры



Букет проблем:

- Дисперсия
- Перекрестные искажения
- Неточность производства

Классические книги молчат



Volume 97, Number 5, September-October 1992
Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology
[J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol., 97, 533 (1992)]

A General Waveguide Circuit Theory

Volume 97 Number 5 September-October 1992

Roger B. Marks and Dylan F. Williams
National Institute of Standards and Technology
Boulder, CO 80503

This work generalizes and unifies the classical circuit theory of dielectric and metallic waveguides. Unlike the conventional theory, no power transmission applies to all waveguides composed of linear, isotropic material, even those exhibiting loss mechanisms and hybrid modes. GTEM is a fully rigorous step. Special attention is given to distinguishing the traveling wave, associated with input to a well-defined characteristic impedance, from a set of pseudo-waves defined with respect to an arbitrary reference impedance. Mathematics characterizing a linear circuit are distinct and distinguishable among them.

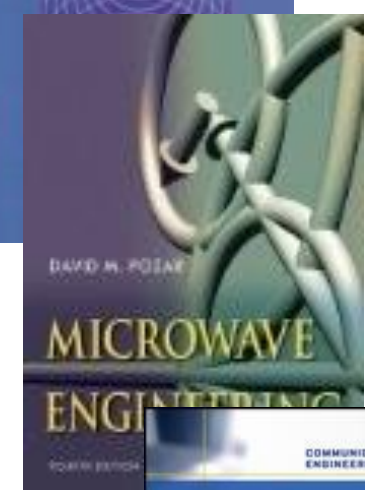
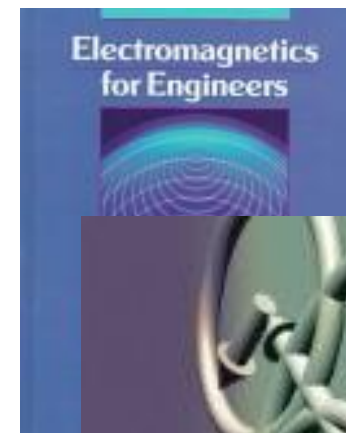
Some newly discovered, yet derived, new manifestations of reciprocity are developed. Measurement of certain network parameters is given extensive treatment.

Key words: characteristic impedance; circuit theory; microwave measurement; network synthesis; pseudo-waves; reciprocity; reference impedance; transmission line; traveling wave; waveguide.

Accepted: May 22, 1992

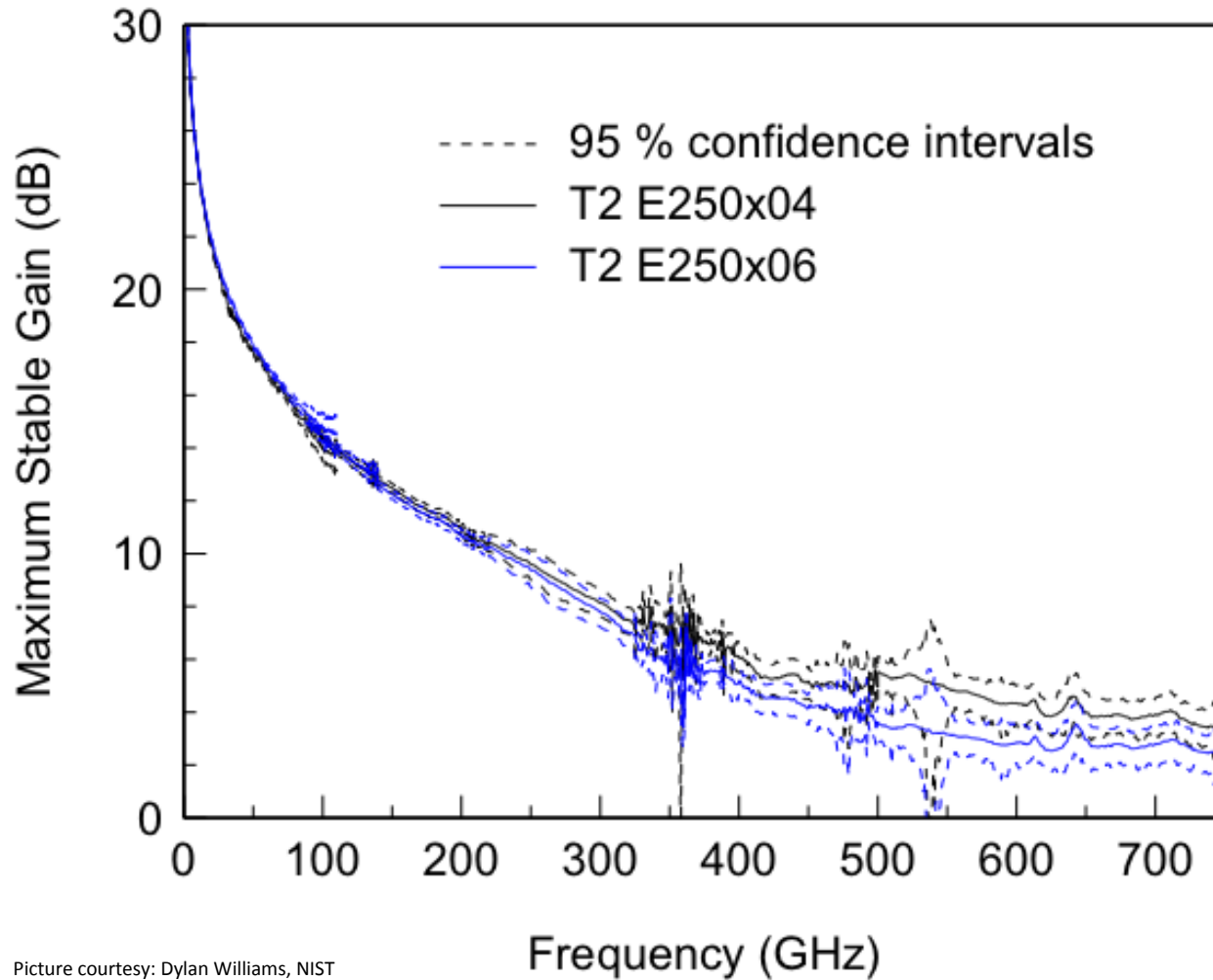
Contents	
1. Introduction	534
2. Theory of a Uniform Waveguide Mode	537
2.1 Modal Electromagnetic Fields	537
2.2 Waveguide Voltage and Current	538
2.3 Power	538
2.4 Characteristic Impedance	539
2.5 Normalization of Waveguide Voltage and Current	540
2.6 Transmission Line Equivalent Circuit	540
2.7 Effective Permittivity and Measurement of Characteristic Impedance	543
3. Waveguide Circuit Theory	543
3.1 Traveling Wave Intensities	543
3.2 Pseudo-Waves	544
3.3 Voltage Standing Wave Ratio	546
3.4 Scattering and Pseudo-Scattering Matrices	547
3.5 The Cascade Matrix	548
3.6 The Impedance Matrix	548
3.7 Change of Reference Impedance	548
3.8 Multiple Reference Impedance Transformations	549
3.9 Load Impedance	550
4. Waveguide Metrology	551
4.1 Measurability and the Choice of Reference Impedance	551
4.2 Measurement of Pseudo-Waves and Waveguide Voltage and Current	555
5. Alternative Circuit Theory Using Power Waves	555
6. Appendix A. Reduction of Maxwell's Equations	556

533



Courtesy: Dylan Williams, NIST

Результат MSG измерения до 750 ГГц



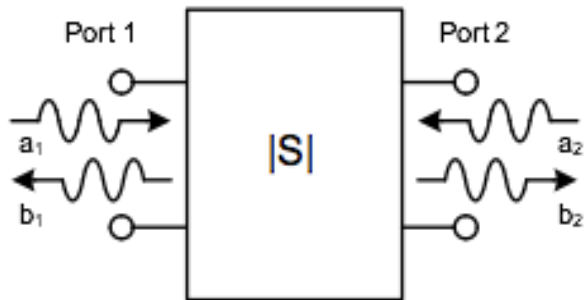
- NIST, Teledyne
- mTRL
- StatistiCAL



Picture courtesy: Dylan Williams, NIST

Определение опорного импеданса Z_{REF}

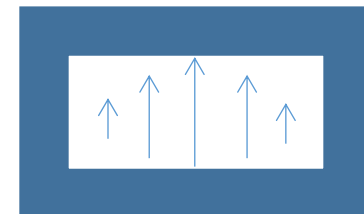
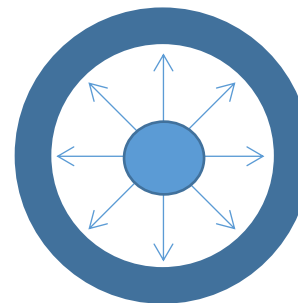
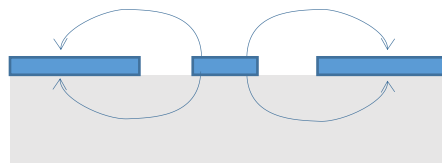
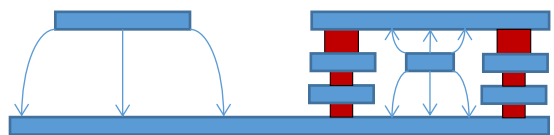
- Калибровка определяет опорный импеданс измерений Z_{REF}
- Точное определение Z_{REF} - ключ к правильной интерпретации S -параметров измеряемого ЧП



$$S_{ii} = \frac{b_i}{a_i} = \frac{Z_{DUT} - Z_{REF}}{Z_{DUT} + Z_{REF}}$$

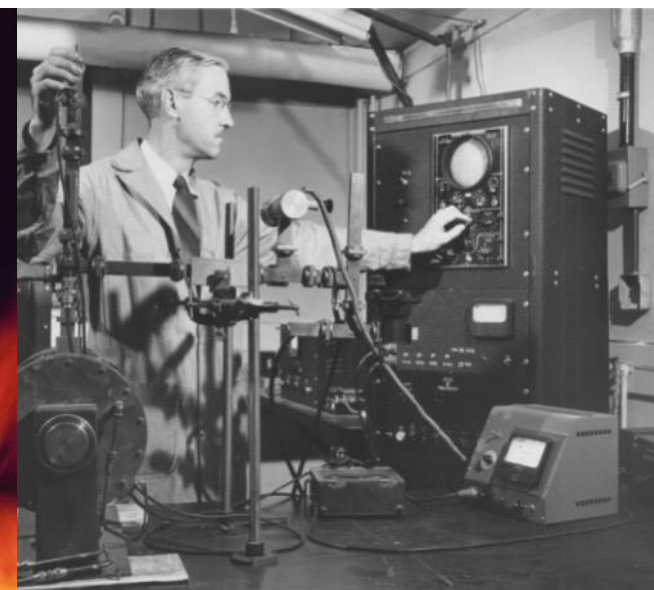
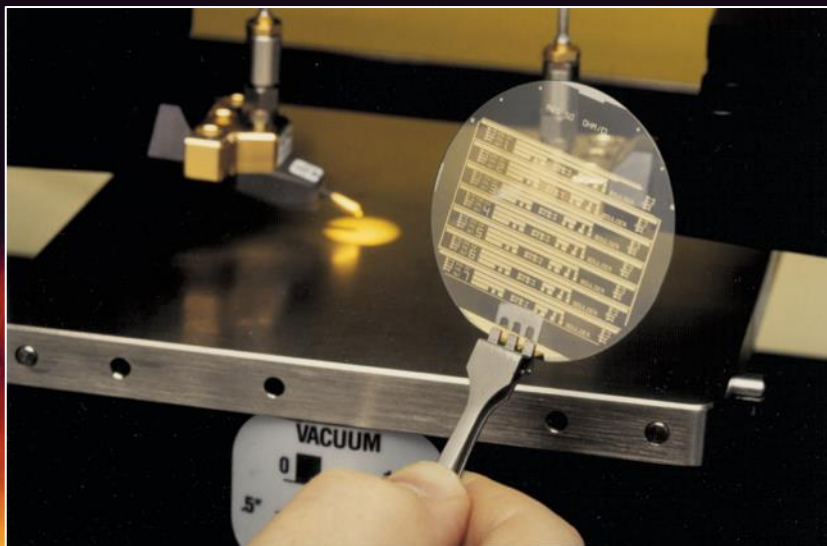
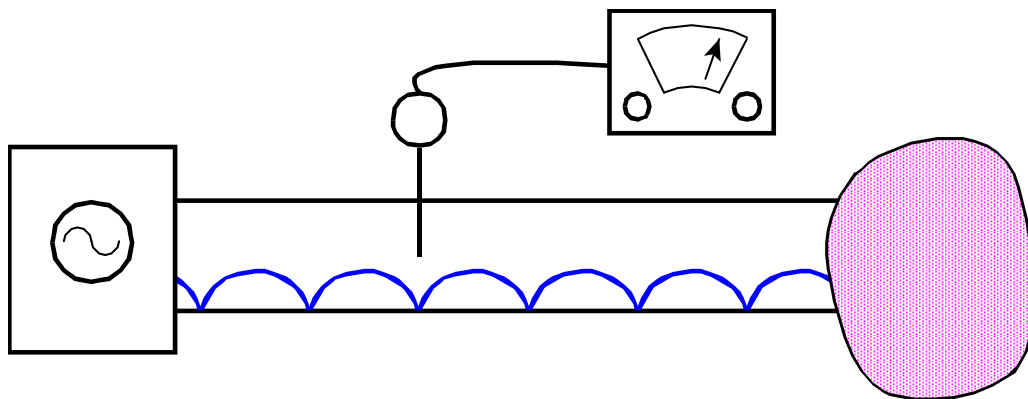
Бегущая волна

- Дискретное решение уравнений Максвелла для бегущей волны в равномерной линии передачи
 - $E_t = c^+ e^{-\gamma z} \mathbf{e}_t + c^- e^{+\gamma z} \mathbf{e}_t$
 - $H_t = c^+ e^{-\gamma z} \mathbf{h}_t - c^- e^{+\gamma z} \mathbf{h}_t$
- Мономодные распространения:
 - Коаксиальная линия
 - Микростриповая, копланарная линии
 - Волновод



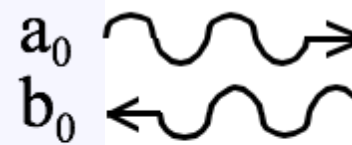
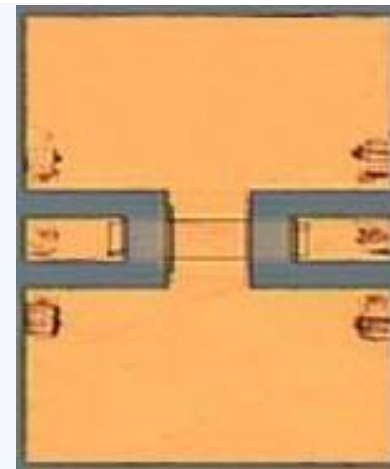
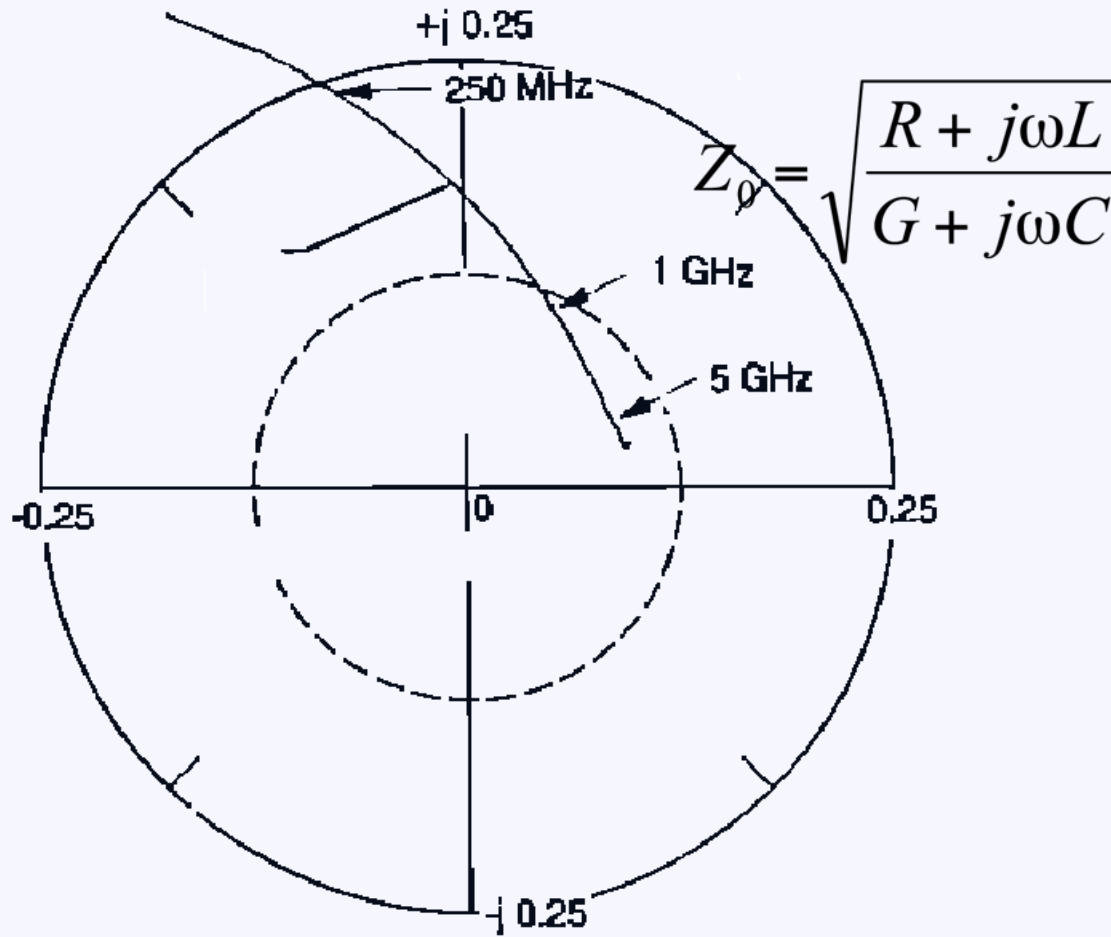
Courtesy: Dylan Williams, NIST

Бегущая волна в планарной линии



Courtesy: Dylan Williams, NIST

Феномен дисперсии копланарного волновода



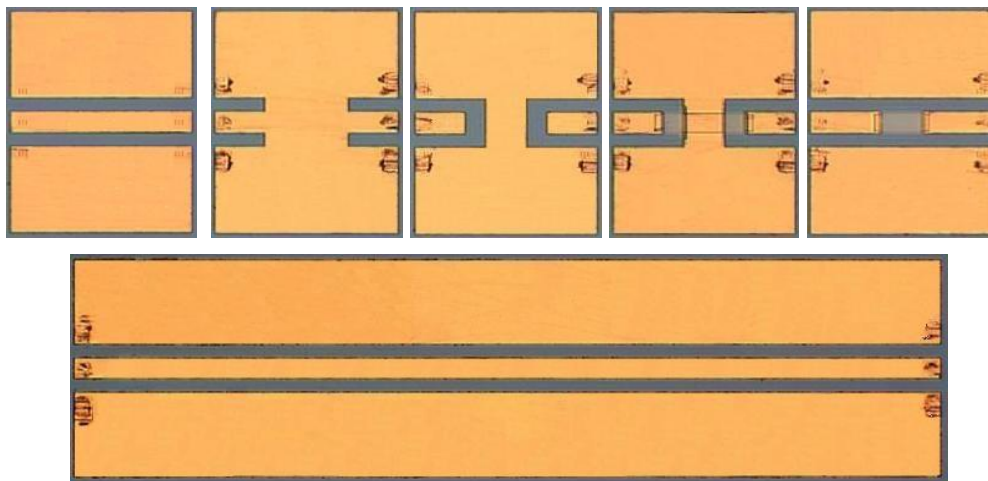
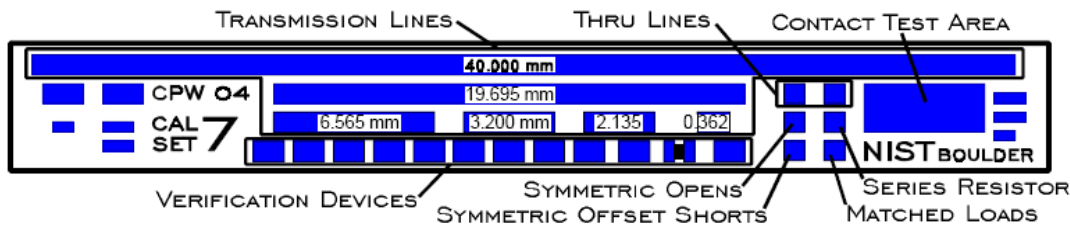
$$\Gamma = a_0 / b_0$$

Courtesy: Dylan Williams, NIST

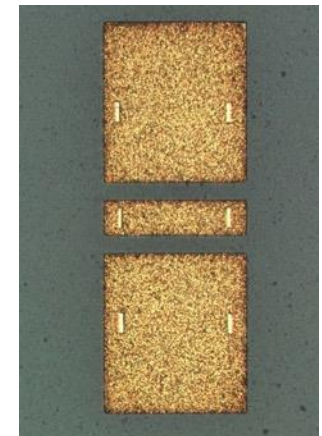
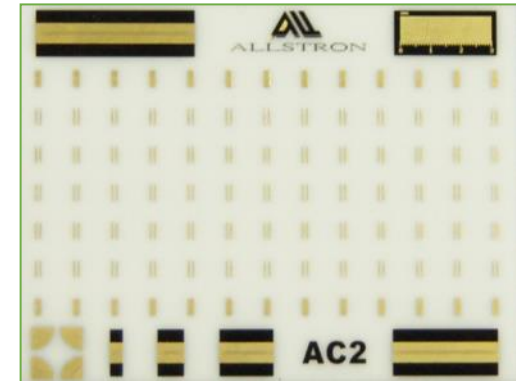
Копланарные меры: NIST RM8130 (GaAs) и коммерческая подложка (Поликор)

RM8130 (NIST)

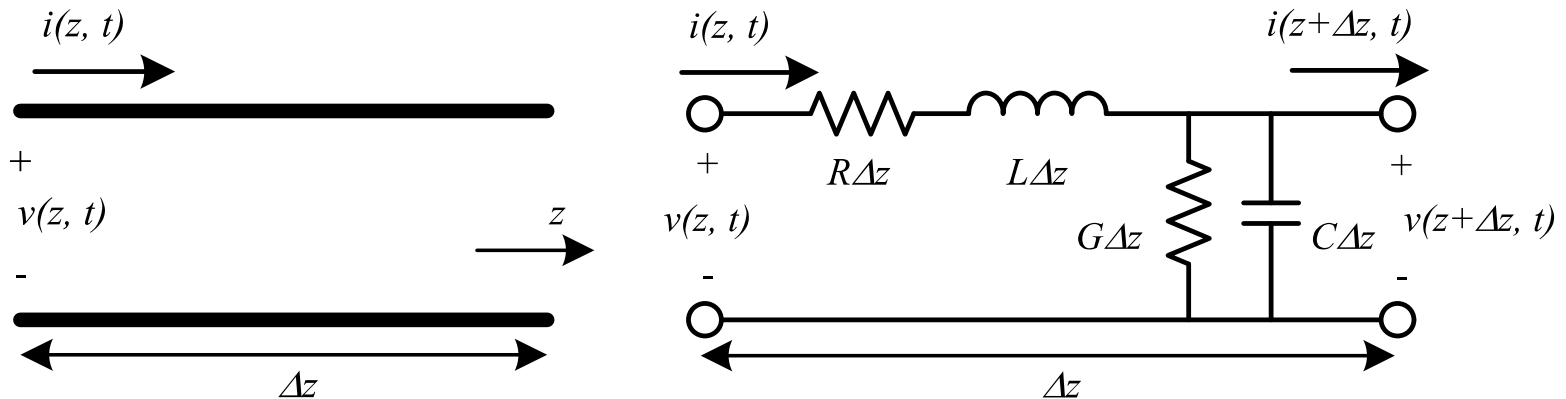
CPW CALIBRATION SET DIAGRAM



AC-2 (MPI)



Постоянная распределения γ и характеристическое сопротивление Z_0



$$j\omega C + G \equiv \frac{\gamma}{Z_0},$$

$$\frac{dv}{dz} = (j\omega L + R)i, \quad \gamma = \sqrt{(j\omega L + R)(j\omega C + G)},$$

$$j\omega L + R = \gamma Z_0.$$

$$\frac{di}{dz} = -(j\omega C + G)v.$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{j\omega L + R}{j\omega C + G}}.$$

Проблемы планарных волноводов

■ Низкочастотная область:

- R
- G

$$Z_0 = \sqrt{\frac{j\omega L + R}{j\omega C + G}}$$

■ Высокочастотная область:

- Излучение
- Моды высокого порядка
- Перекрёстные искажения (наводки)

■ Как определить:

- Постоянную распространения
- Характеристическое сопротивление

Измерение Z_0 , γ при малых потерях диэлектрика

■ NIST метод концентрированной нагрузки

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} = \frac{\gamma}{G + j\omega C}$$

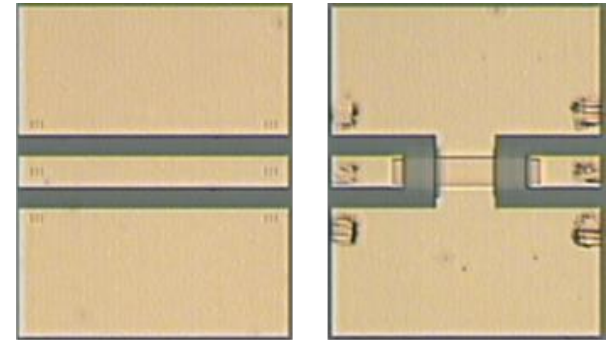
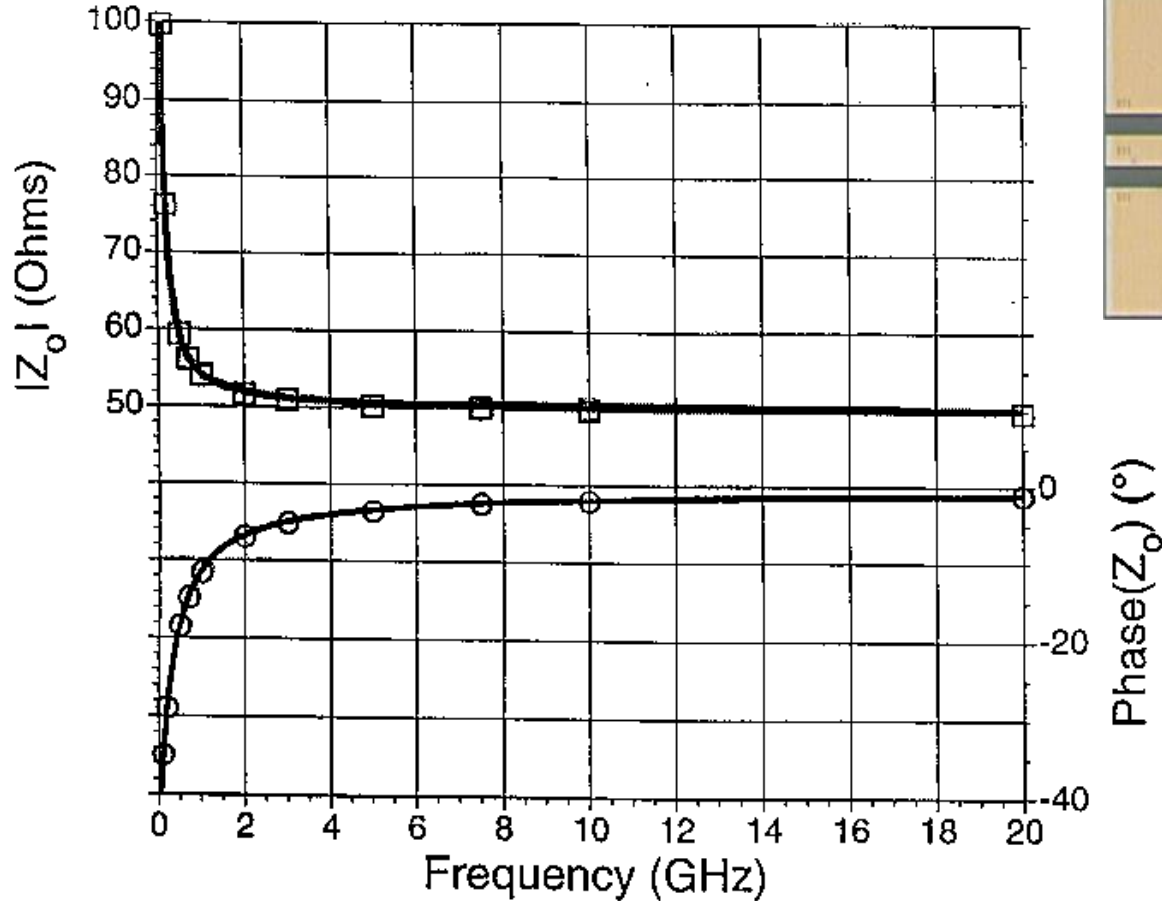
TRL результат

малы

$$C' \approx \Re \left(\frac{\gamma}{j\omega R_{LOAD}} \frac{1 + \Gamma_{LOAD, Z_{LINE}}}{1 - \Gamma_{LOAD, Z_{LINE}}} \right)$$

D. F. Williams and R. B. Marks, "Transmission line capacitance measurement," *Microwave and Guided Wave Letters, IEEE*, vol. 1, pp. 243-245, 1991.

Измерение Z_0 , γ при малых потерях диэлектрика



R. B. Marks and D. F. Williams, "Characteristic impedance determination using propagation constant measurement," IEEE Microwave and Guided Wave Letters, vol. 1, pp. 141-143, June 1991.
D. F. Williams and R. B. Marks, "Transmission line capacitance measurement," Microwave and Guided Wave Letters, IEEE, vol. 1, pp. 243-245, 1991.

NIST RM8130 (GaAs)



National Institute of Standard and Technology

Report of Investigation

Reference Material 8130

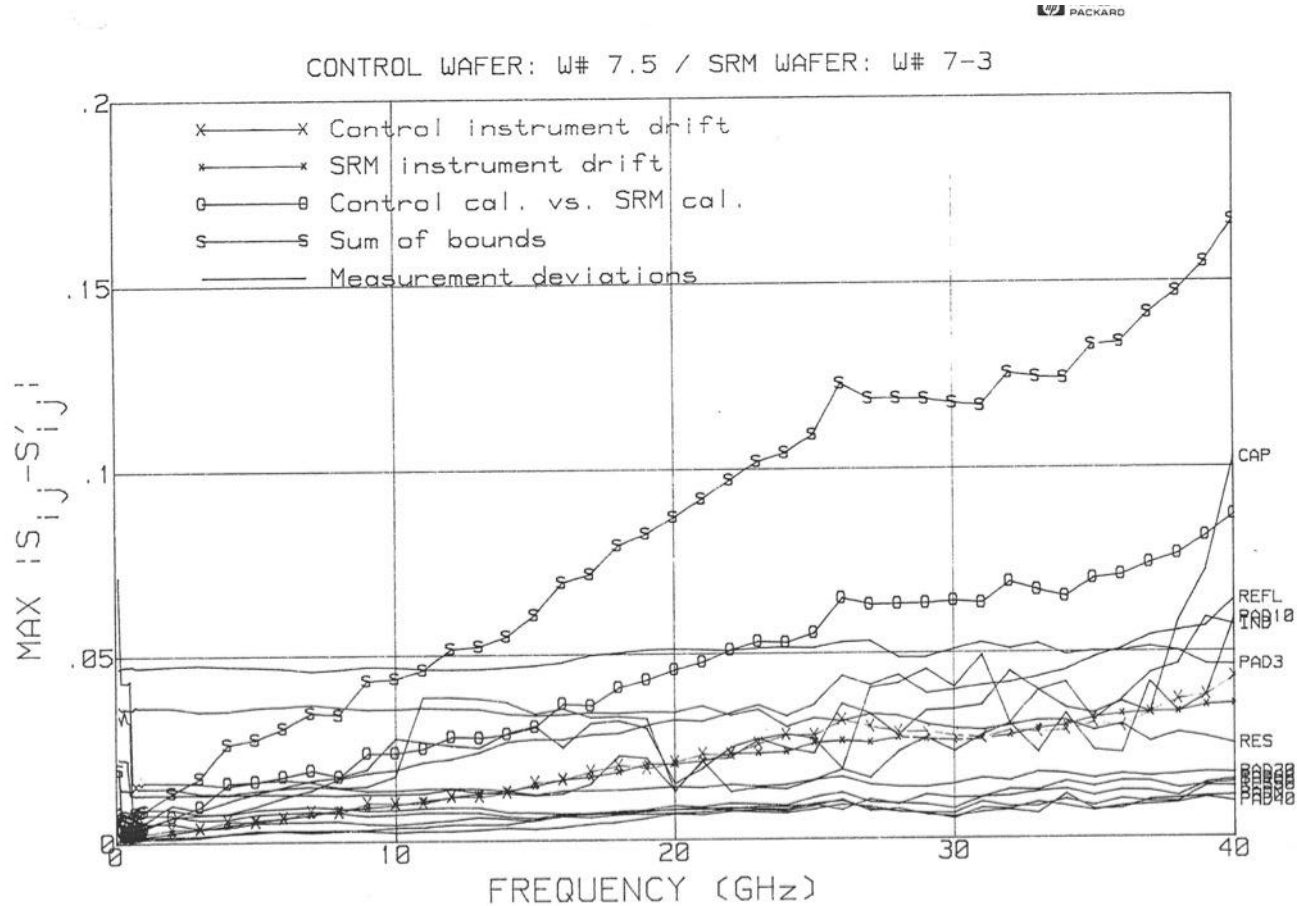
Coplanar Waveguide Calibration Set

This Reference Material (RM) is intended for use by industrial laboratories that wish to implement the procedure described in Part 1 of the NIST/Industrial MMIC Consortium's "Proposed Procedures for Verifying Probe Station Integrity and On-wafer Measurement Accuracy" for the measurement of microwave probe station stability and for verifying the ability to repeat on-wafer microwave measurements performed at NIST. RM 8130 measures the instrument drift (stability) of microwave probe stations and verifies the ability of a laboratory to repeat NIST measurements. It consists of a coplanar waveguide (CPW) calibration set fabricated on a gallium arsenide wafer. Each RM is individually tested, bears a boule number, wafer number, a calibration set number (see Table 1), and comes with a data disk unique to the RM. The RM wafers are mounted on a glass slide for ease of handling.

Table 1. RM Calibration Set Data

Calibration Set Serial No.	3
Boule No.	5634
Wafer No.	7
Measured Line Capacitance (information value only)	1.7877 pF/cm

NIST RM8130: Анализа точности и сличения



National Institute of Standards and Technology
NIST/Industrial MMIC Consortium

Probe station instrumentation verification
19 Dec 1997 14:12:06

Сличение двух установок

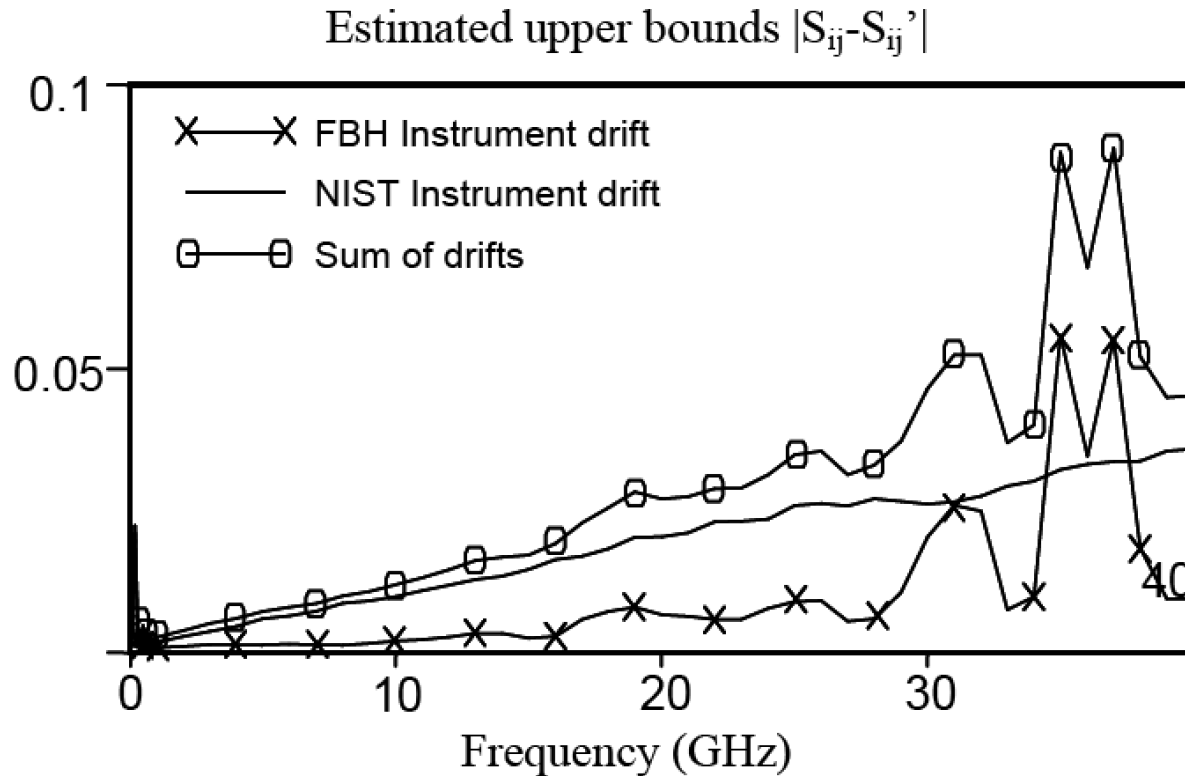
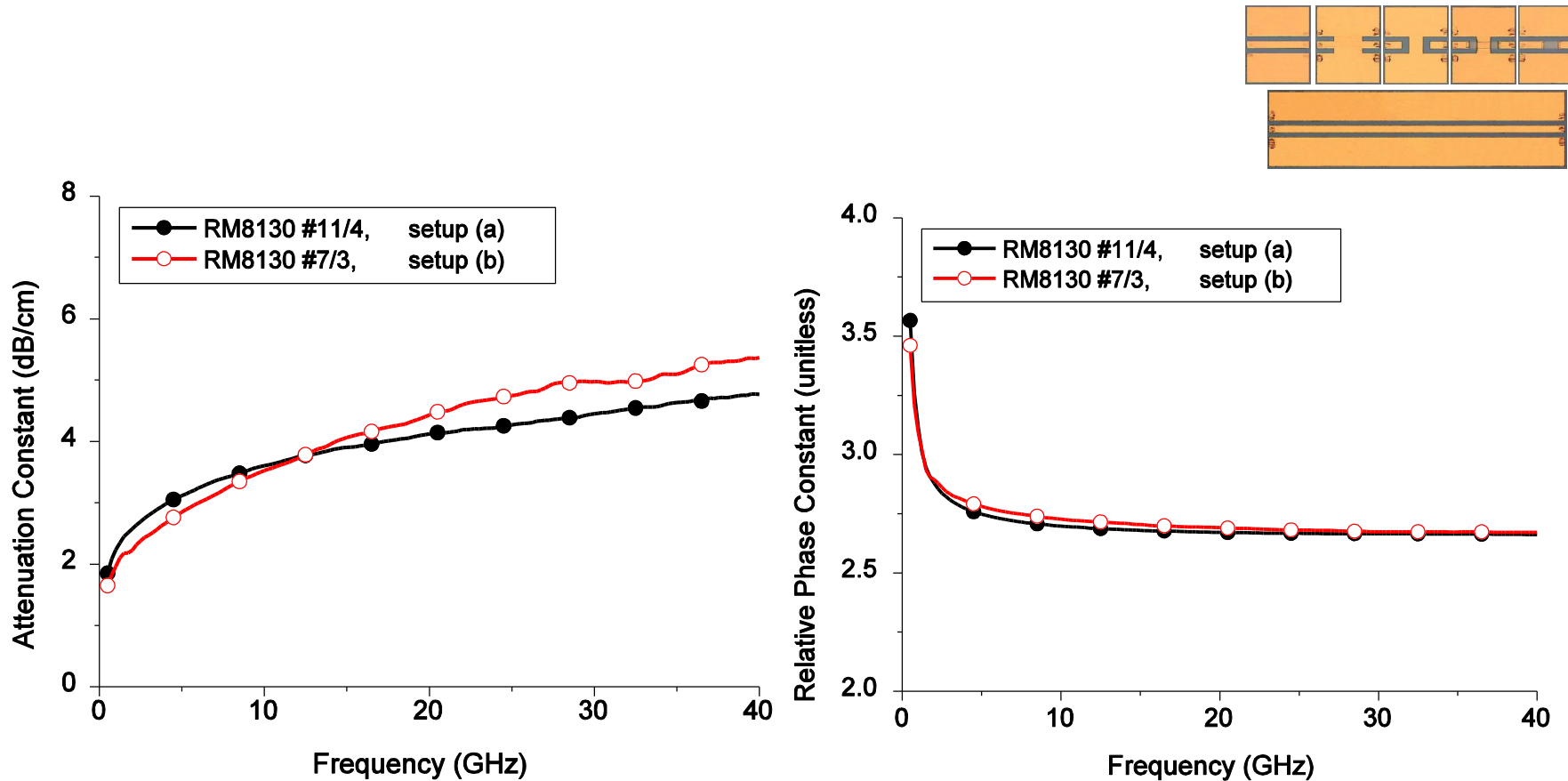


Fig. 1. Verification results on integrity of the wafer-level measurement setup used.

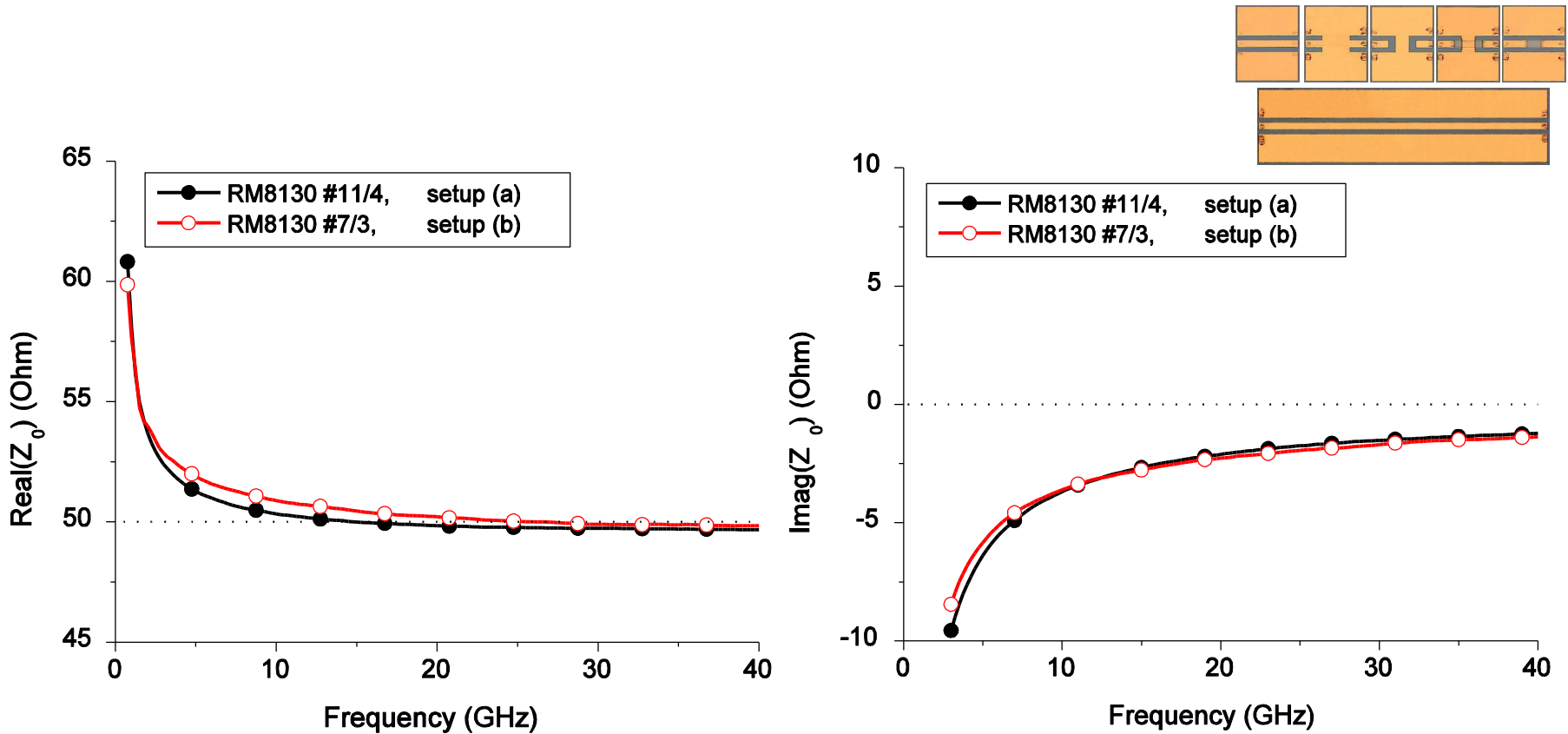
R. Doerner and A. Rumiantsev, "Verification of the wafer-level LRM+ calibration technique for GaAs applications up to 110 GHz," in *ARFTG Microwave Measurements Conference-Spring, 65th*, 2005, pp. 15-19.

Измерение постоянной распределения



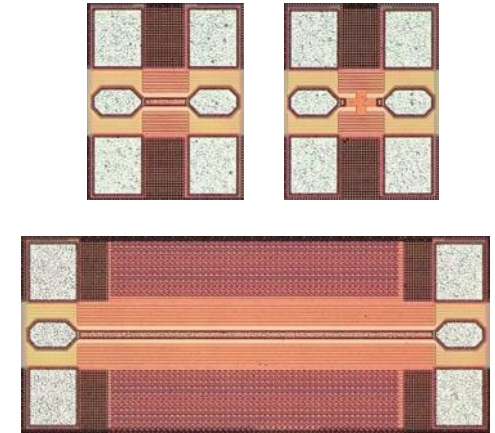
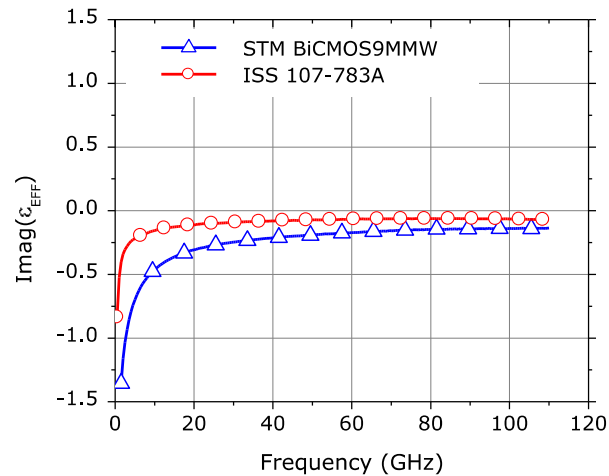
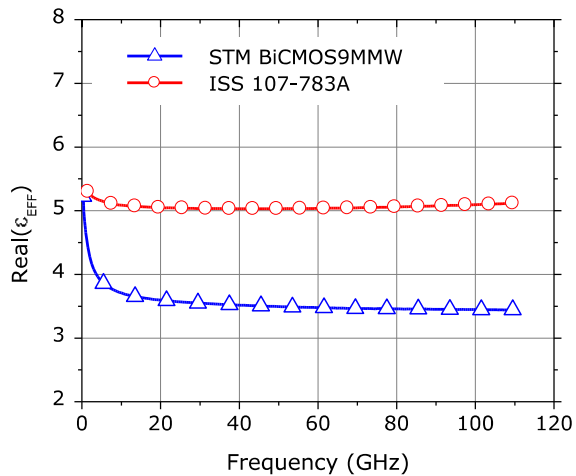
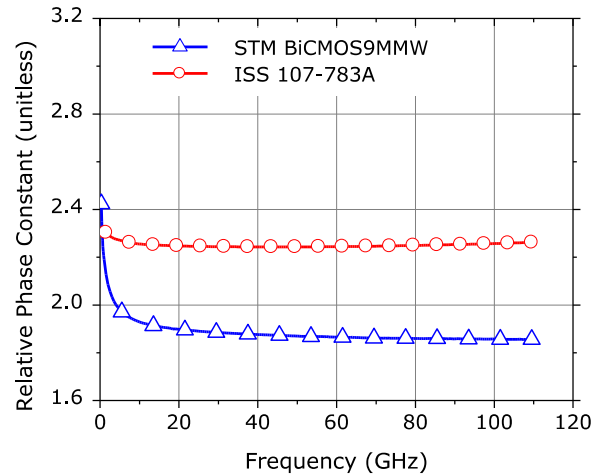
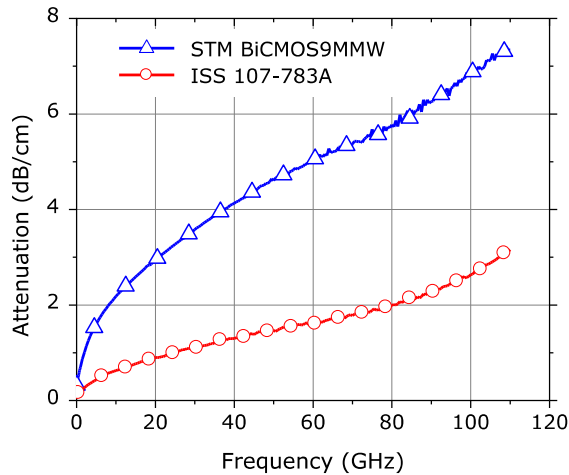
A. Rumiantsev, "On-Wafer calibration techniques enabling accurate characterization of high-performance silicon devices at the mm-wave range and beyond," Fakultät für Maschinenbau, Elektrotechnik und Wirtschaftsingenieurwesen, BTU Cottbus, Cottbus, 2014.

Измерение характеристического сопротивления



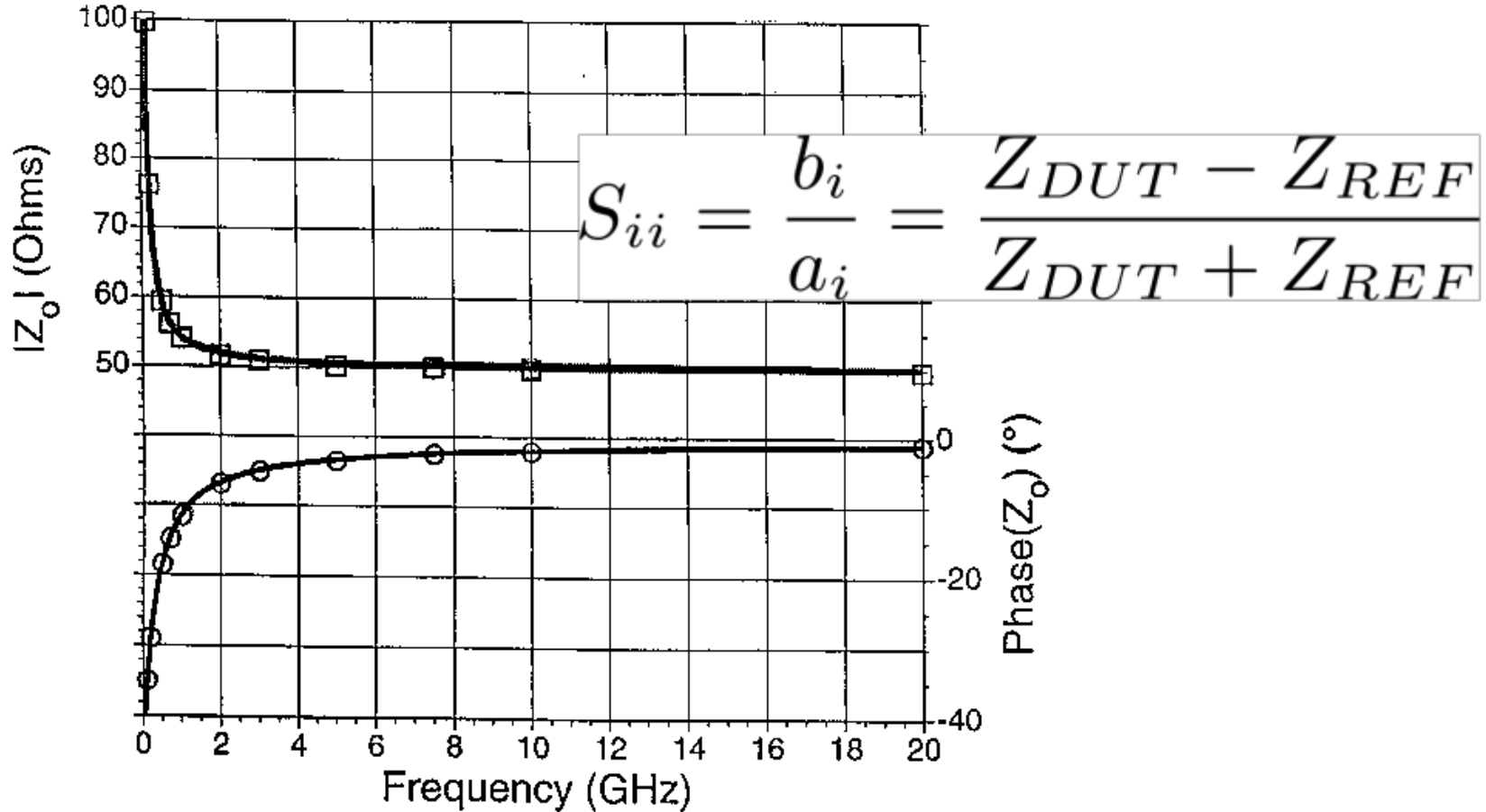
A. Rumiantsev, "On-Wafer calibration techniques enabling accurate characterization of high-performance silicon devices at the mm-wave range and beyond," Fakultät für Maschinenbau, Elektrotechnik und Wirtschaftsingenieurwesen, BTU Cottbus, Cottbus, 2014.

Результаты измерений: кремний и поликор



A. Rumiantsev, "On-Wafer calibration techniques enabling accurate characterization of high-performance silicon devices at the mm-wave range and beyond," Fakultät für Maschinenbau, Elektrotechnik und Wirtschaftsingenieurwesen, BTU Cottbus, Cottbus, 2014.

Опорный импеданс TRL $Z_{REF} = Z_{LINE}$



R. B. Marks and D. F. Williams, "Characteristic impedance determination using propagation constant measurement," IEEE Microwave and Guided Wave Letters, vol. 1, pp. 141-143, June 1991.

D. F. Williams and R. B. Marks, "Transmission line capacitance measurement," Microwave and Guided Wave Letters, IEEE, vol. 1, pp. 243-245, 1991.

Псевдо бегущая волна

$$a(Z_{ref}) \equiv \left(\frac{|v_0|}{v_0} \frac{\sqrt{\Re(Z_{ref})}}{2|Z_{ref}|} \right) (v + iZ_{ref})$$

$$b(Z_{ref}) \equiv \left(\frac{|v_0|}{v_0} \frac{\sqrt{\Re(Z_{ref})}}{2|Z_{ref}|} \right) (v - iZ_{ref}).$$

Volume 97, Number 5, September-October 1992
Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology

[J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol., 97, 533 (1992)]

A General Waveguide Circuit Theory

September-October 1992

es and extends the
of electrocon-
siting the circuit-
eter formulation
vides composed of
serial, even those in-
ons and hybrid
ly rigorous way,
given to distinguish
ow, restricted
ill-defined charac-
From a set of
ed with respect to
ce impedance. Ma-
n linear circuit are
calyps among them.

some newly discovered, are derived.
New realizations of equivalently are de-
veloped. Measurements of various net-
work parameters a given extensive
treatment.

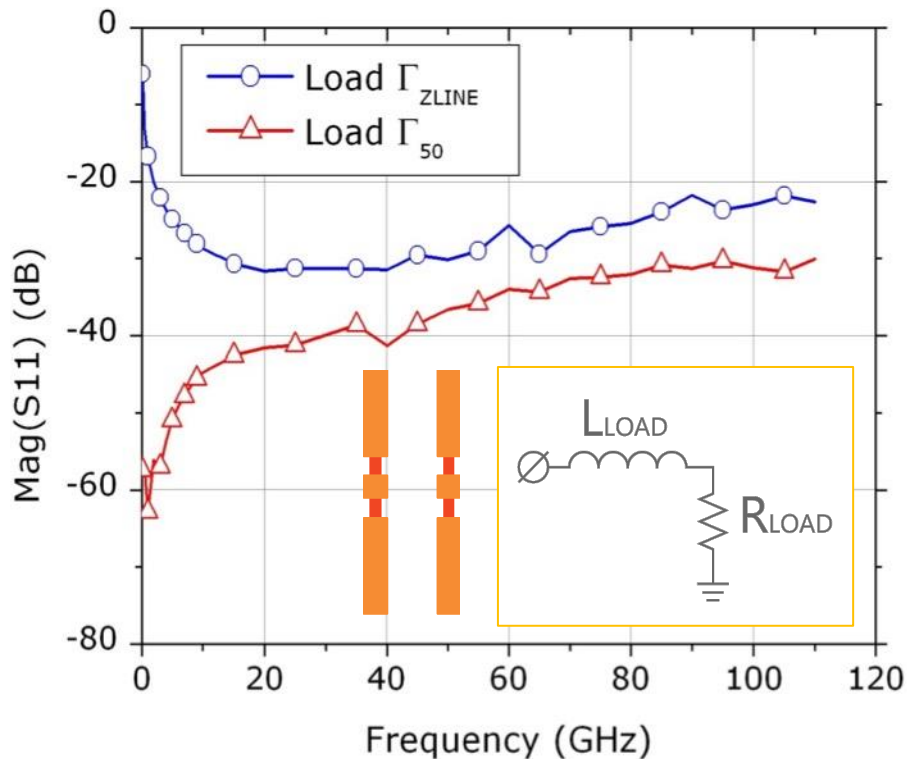
Key words: characteristic impedance;
circuit theory; microwave measurement;
circuit analysis; pseudo-wave; re-
ciprocally; reference impedance; trans-
mission line; traveling waves;
waveguide.

Accepted: May 22, 1992

3.4	Scattering and Pseudo-Scattering Matrices	547
3.5	The Cascade Matrix	548
3.6	The Impedance Matrix	548
3.7	Change of Reference Impedance	548
3.8	Multiple Reference Impedance Transformations	549
3.9	Load Impedance	550
4.	Waveguide Metrology	551
4.1	Measurability and the Choice of Reference Impedance	551
4.2	Measurement of Pseudo-Waves and Waveguide Voltage and Current	555
5.	Alternative Circuit Theory Using Power Waves	555
6.	Appendix A. Reduction of Maxwell's Equations	556

133

Псевдо бегущая волна



■ S-параметры:

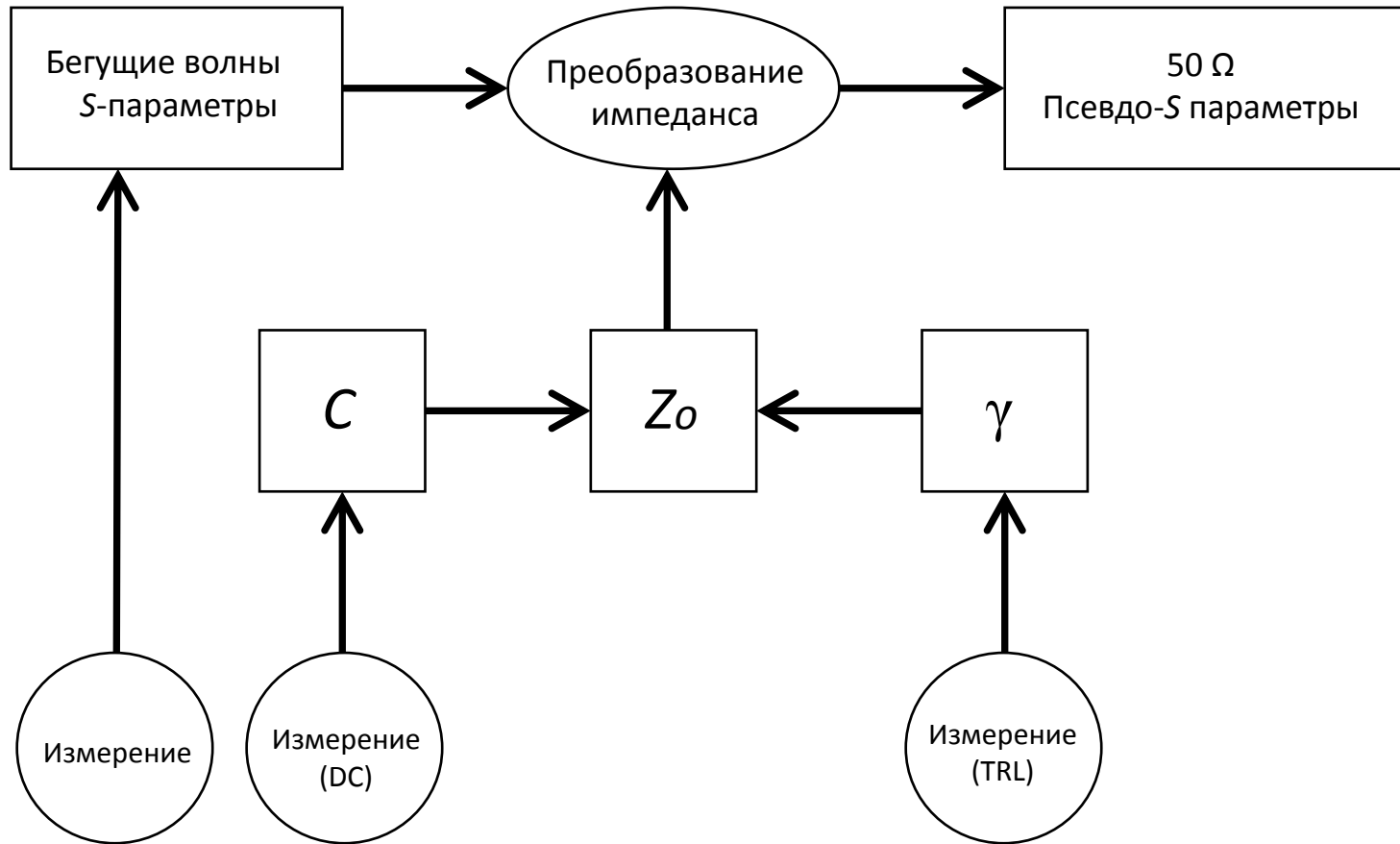
■ $Z_{REF}=Z_{LINE}$

■ Псевдо S-параметры:

■ $Z_{REF}=50 \Omega$

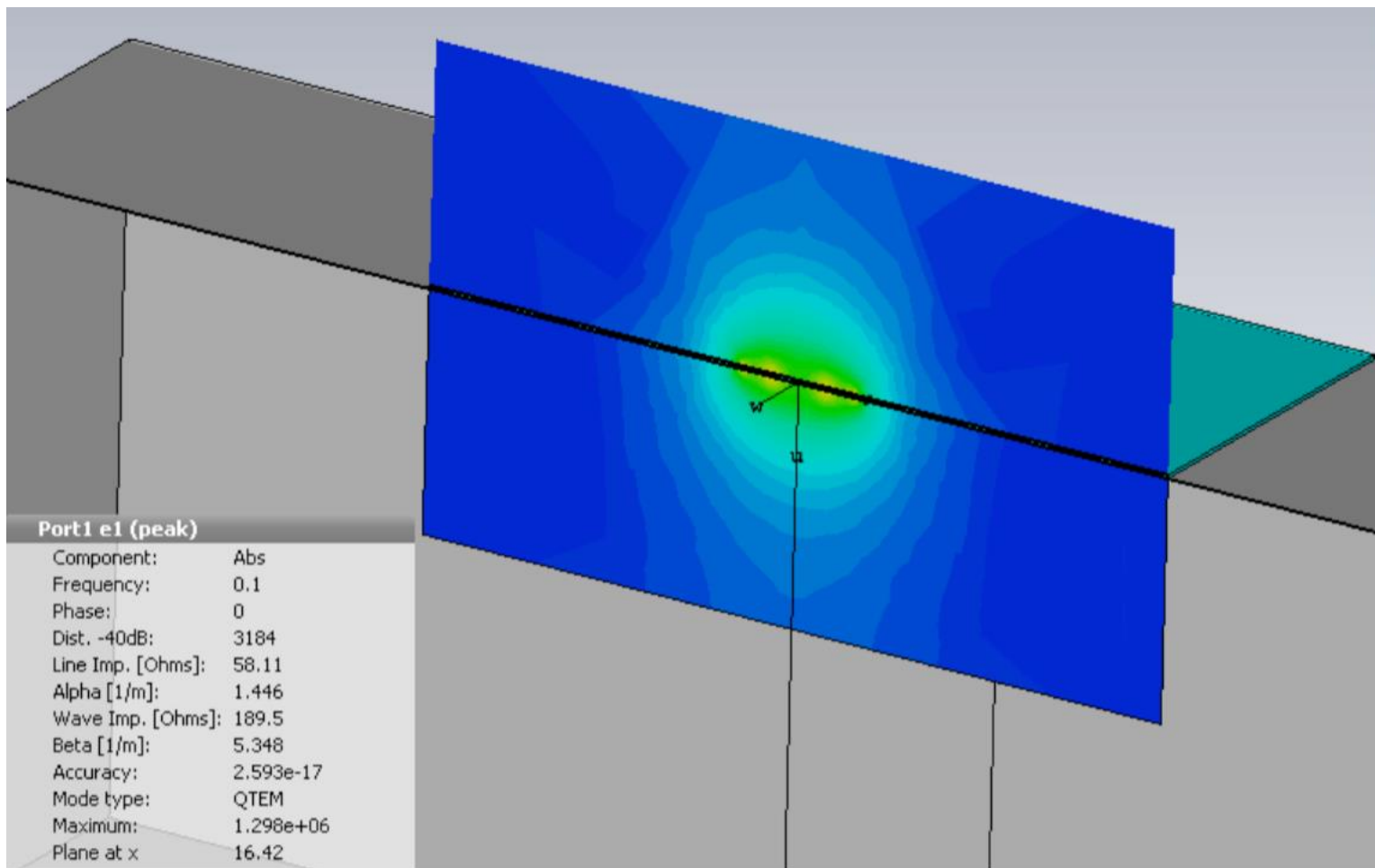
Полезно ознакомиться с: D. Williams, "Traveling waves and power waves", *Microwave Magazine*, Nov-Dec 2013.

Переход к псевдо бегущей волне

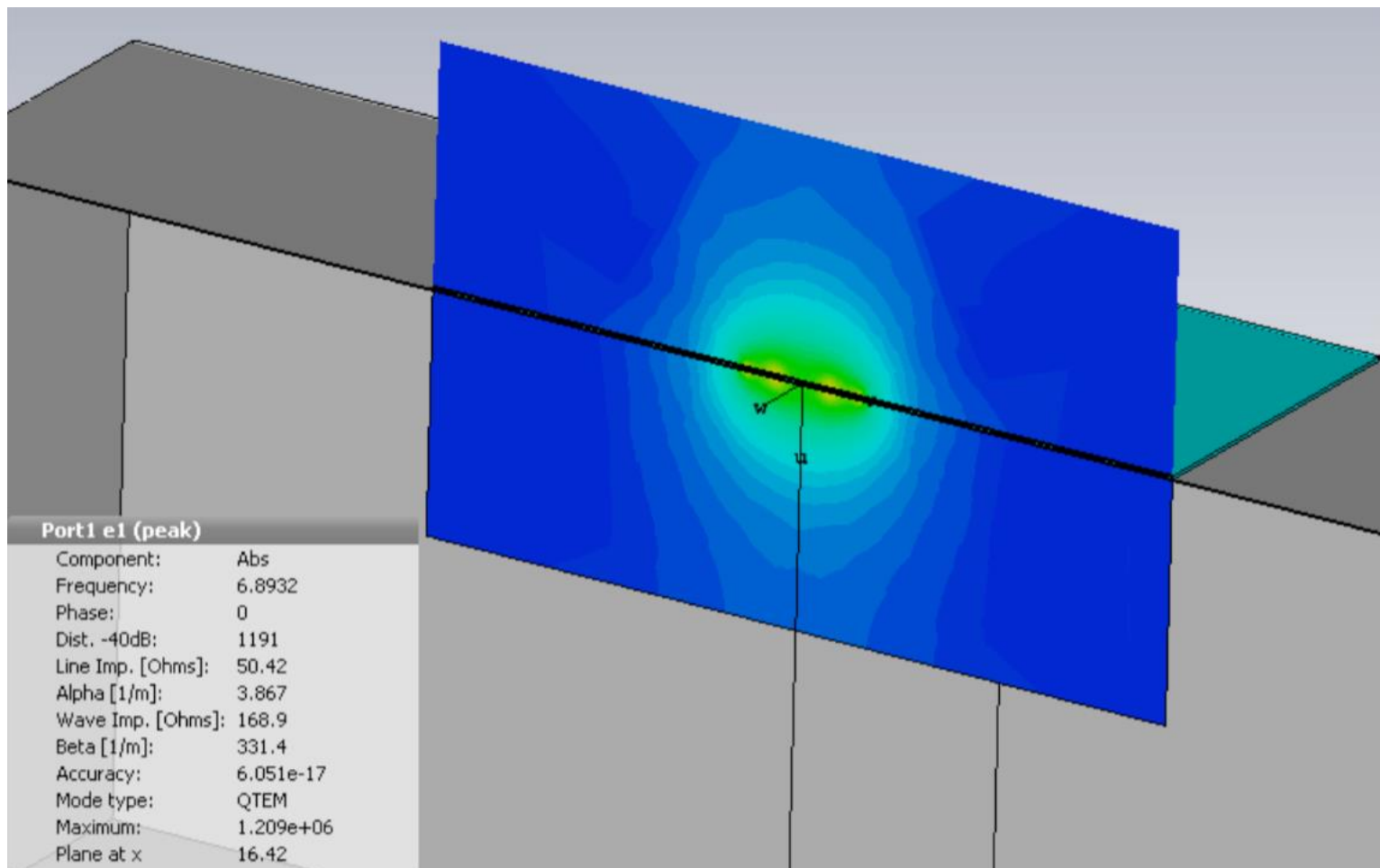


Courtesy: Dylan Williams, NIST

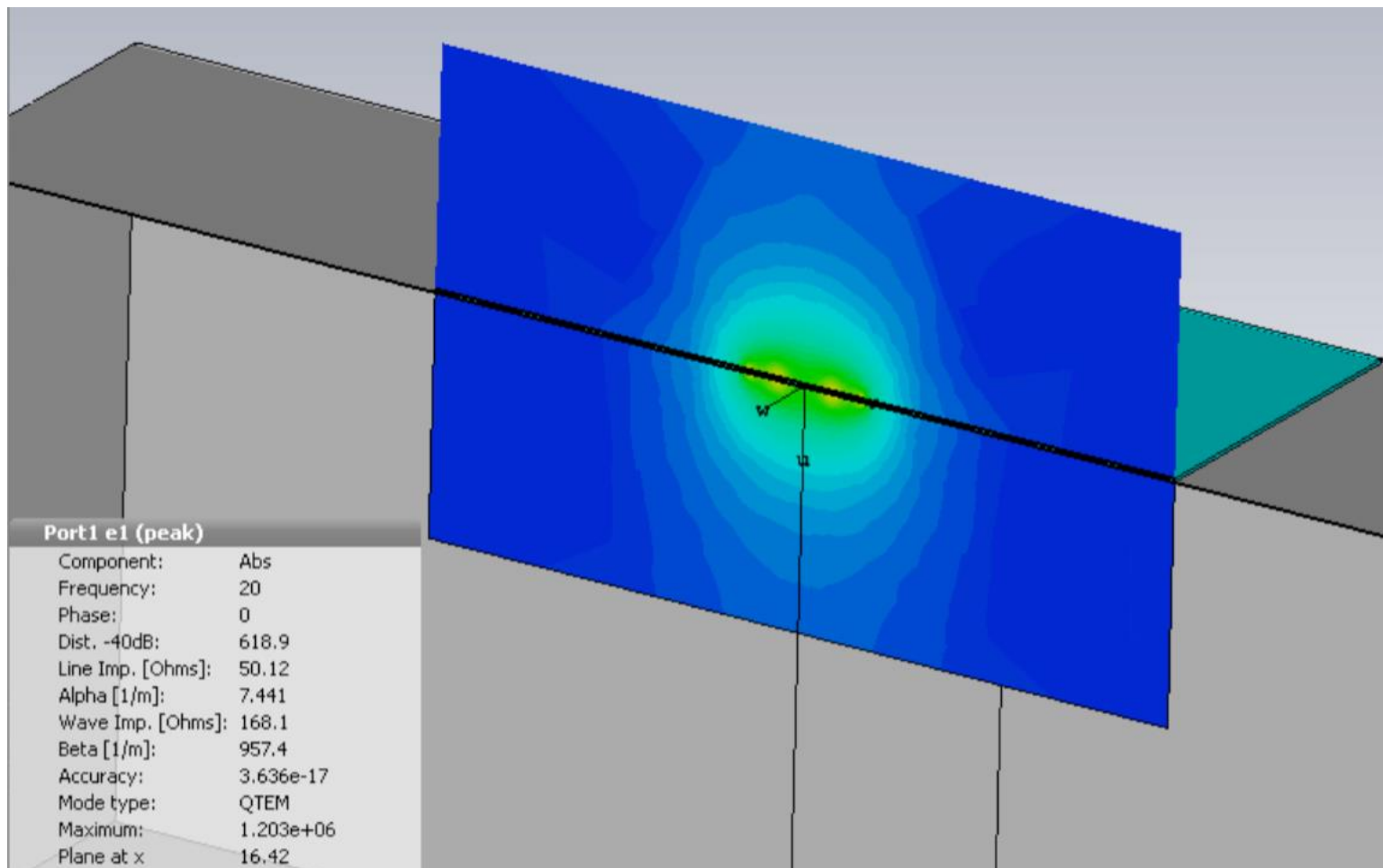
Копланарный волновод: 100 МГц



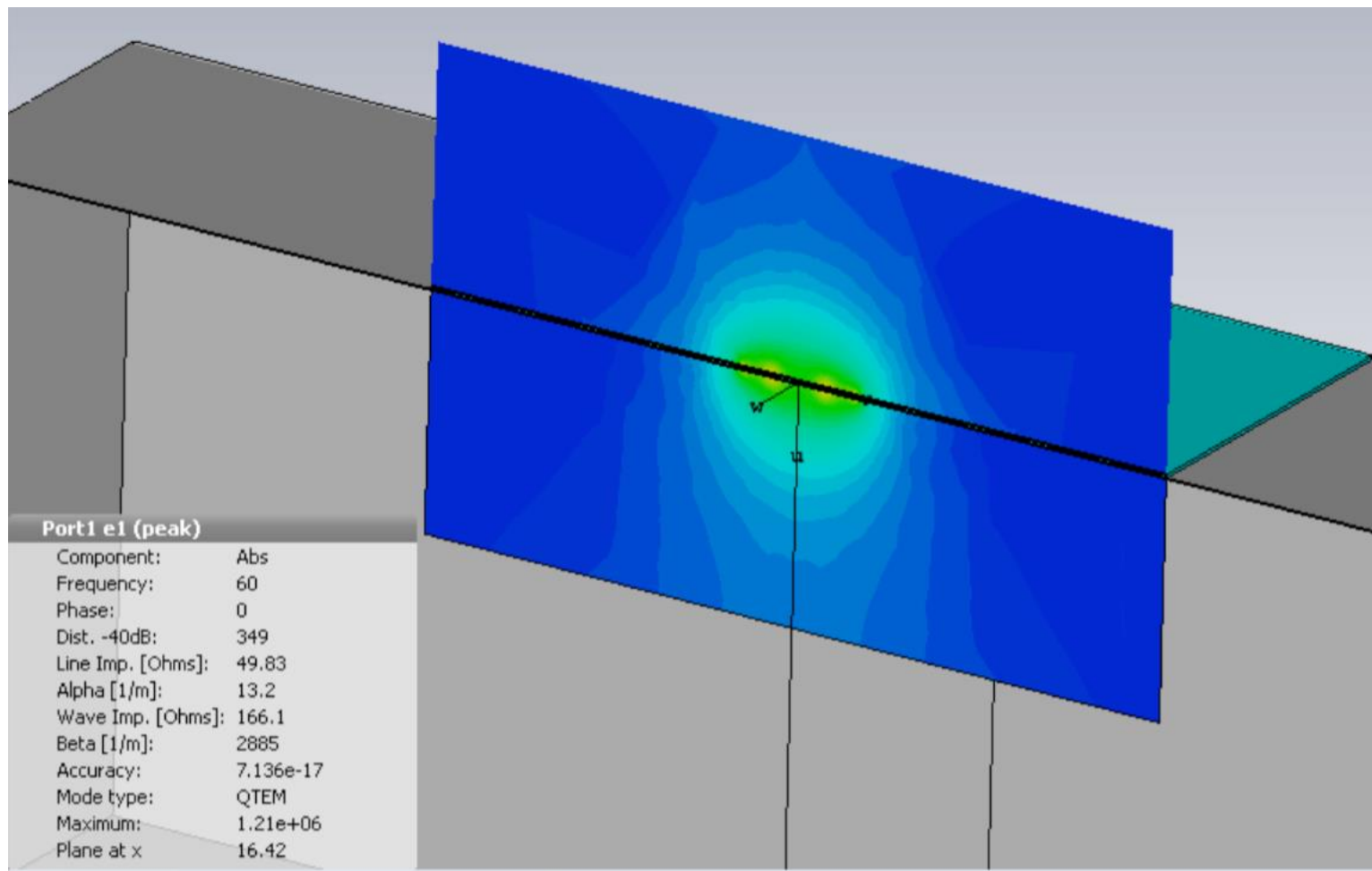
Копланарный волновод: 7 ГГц



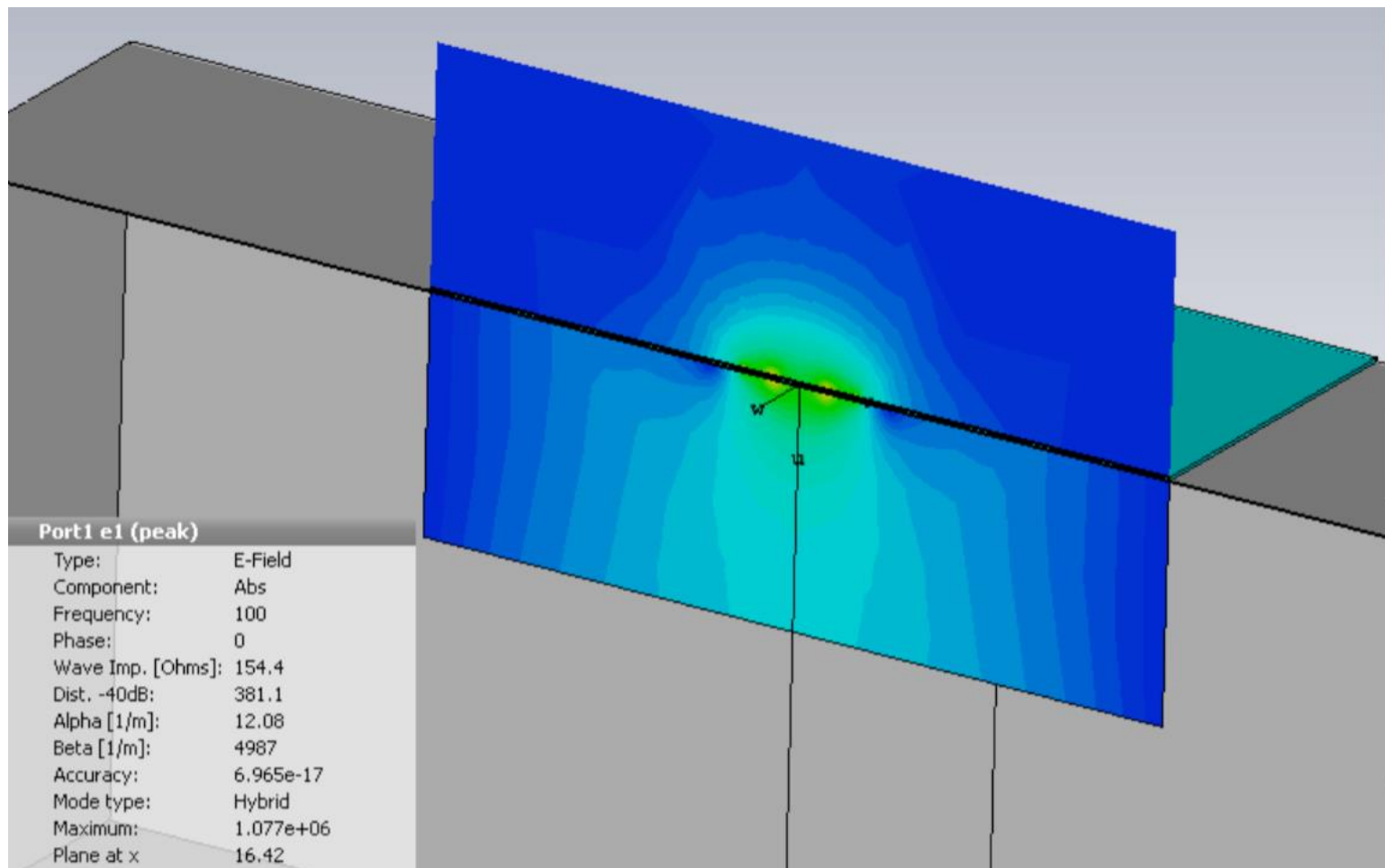
Копланарный волновод: 20 ГГц



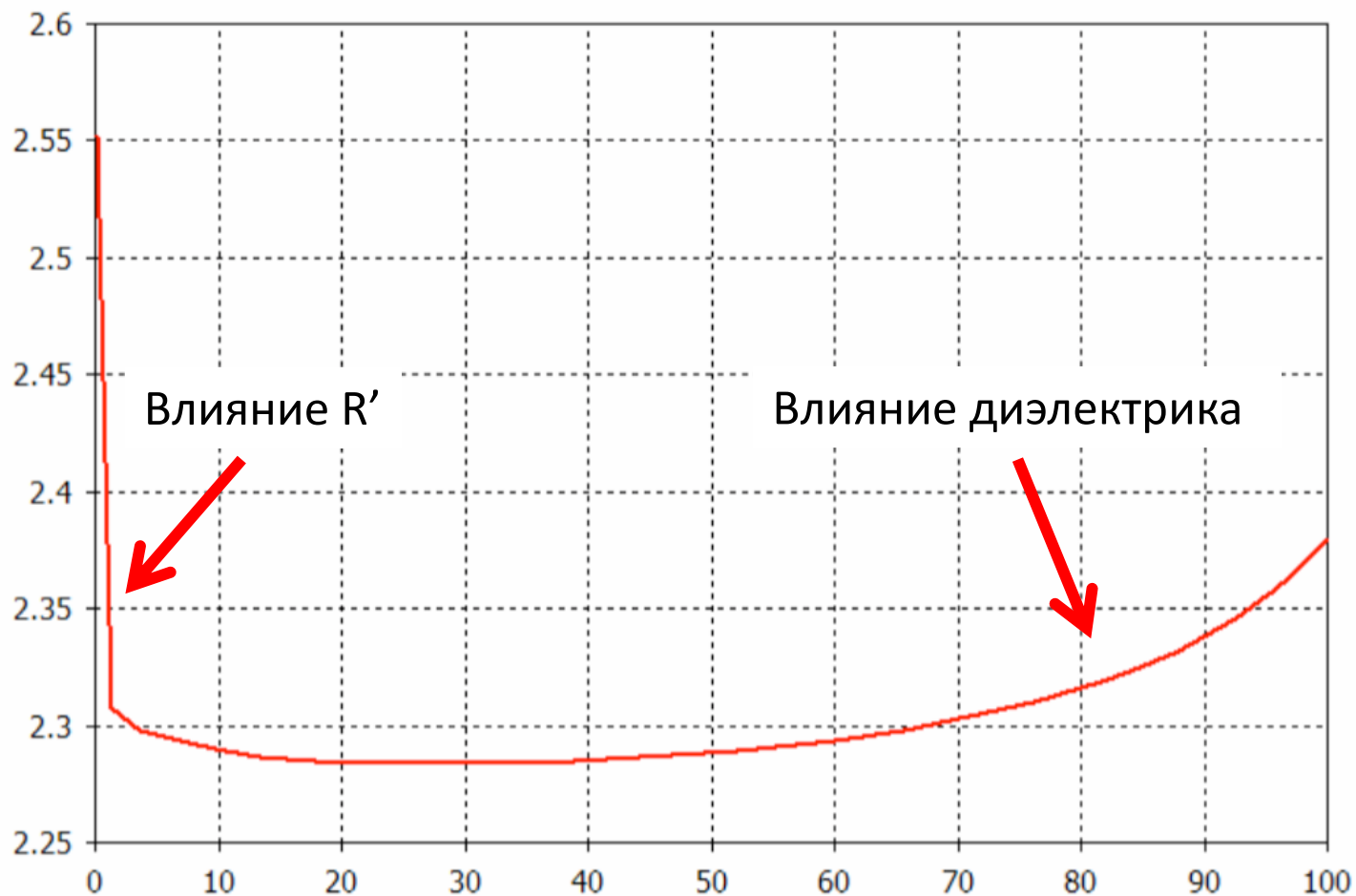
Копланарный волновод: 60 ГГц



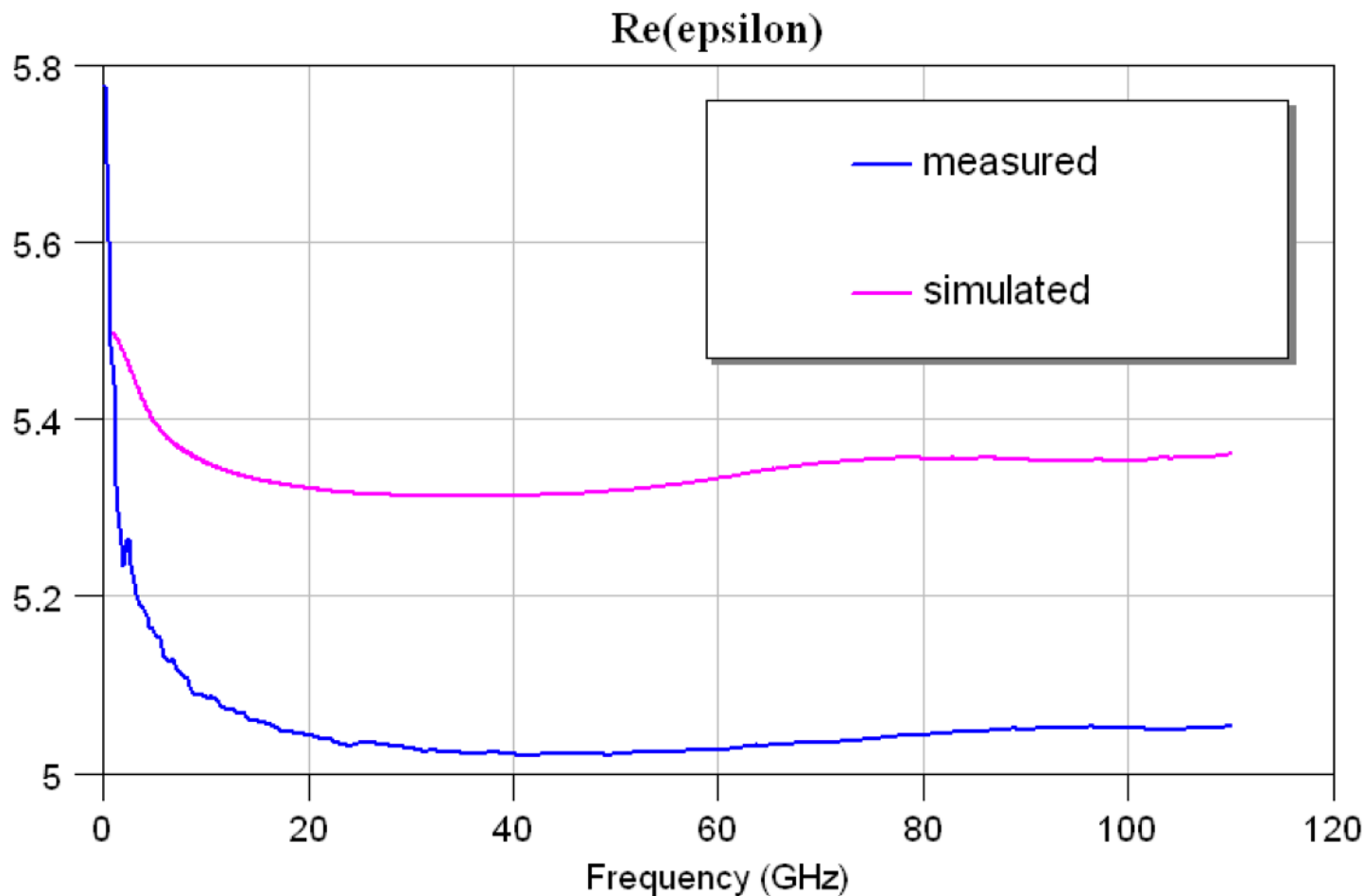
Копланарный волновод: 100 ГГц



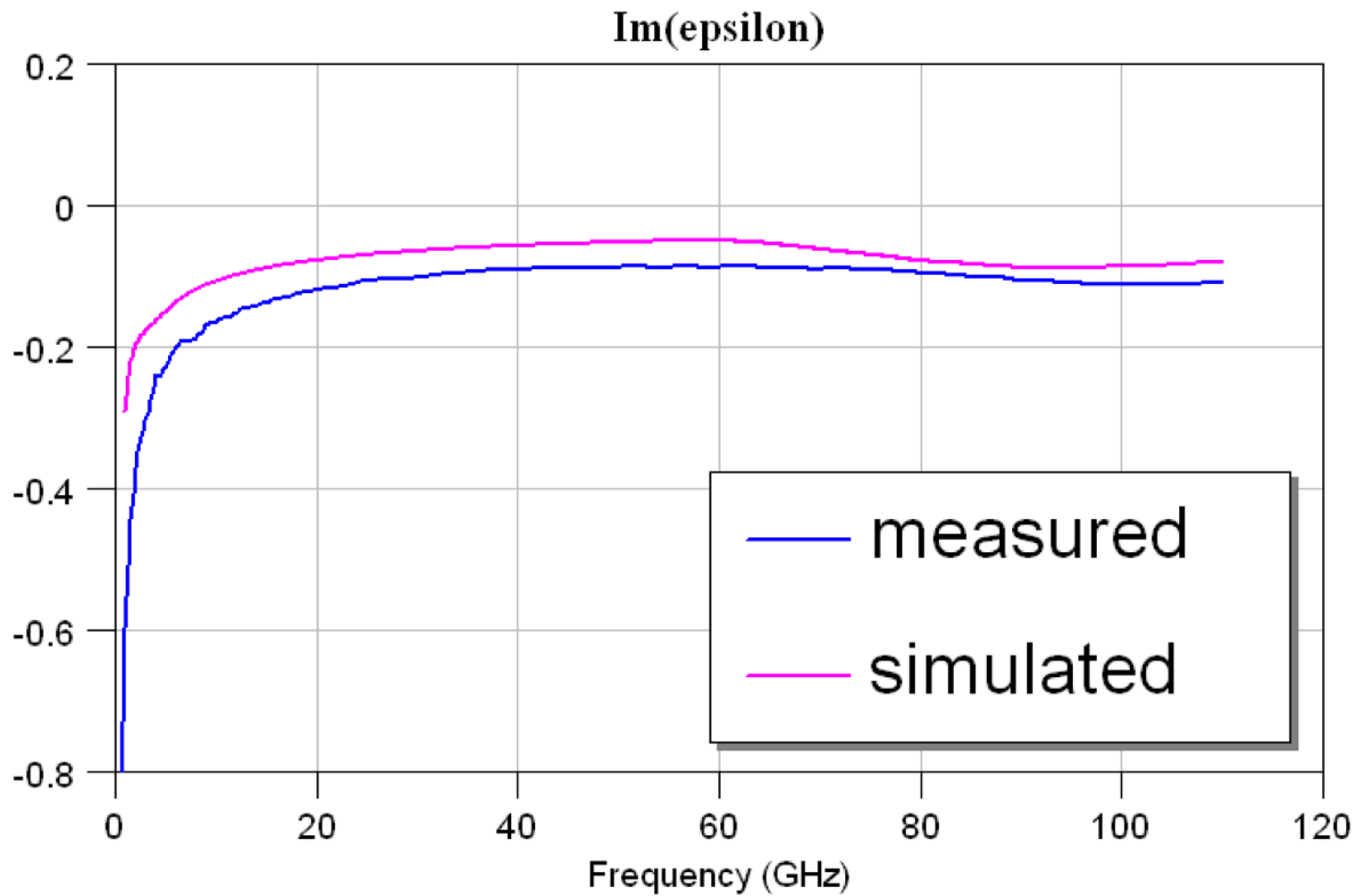
β/β_0 : Результаты CST моделирования



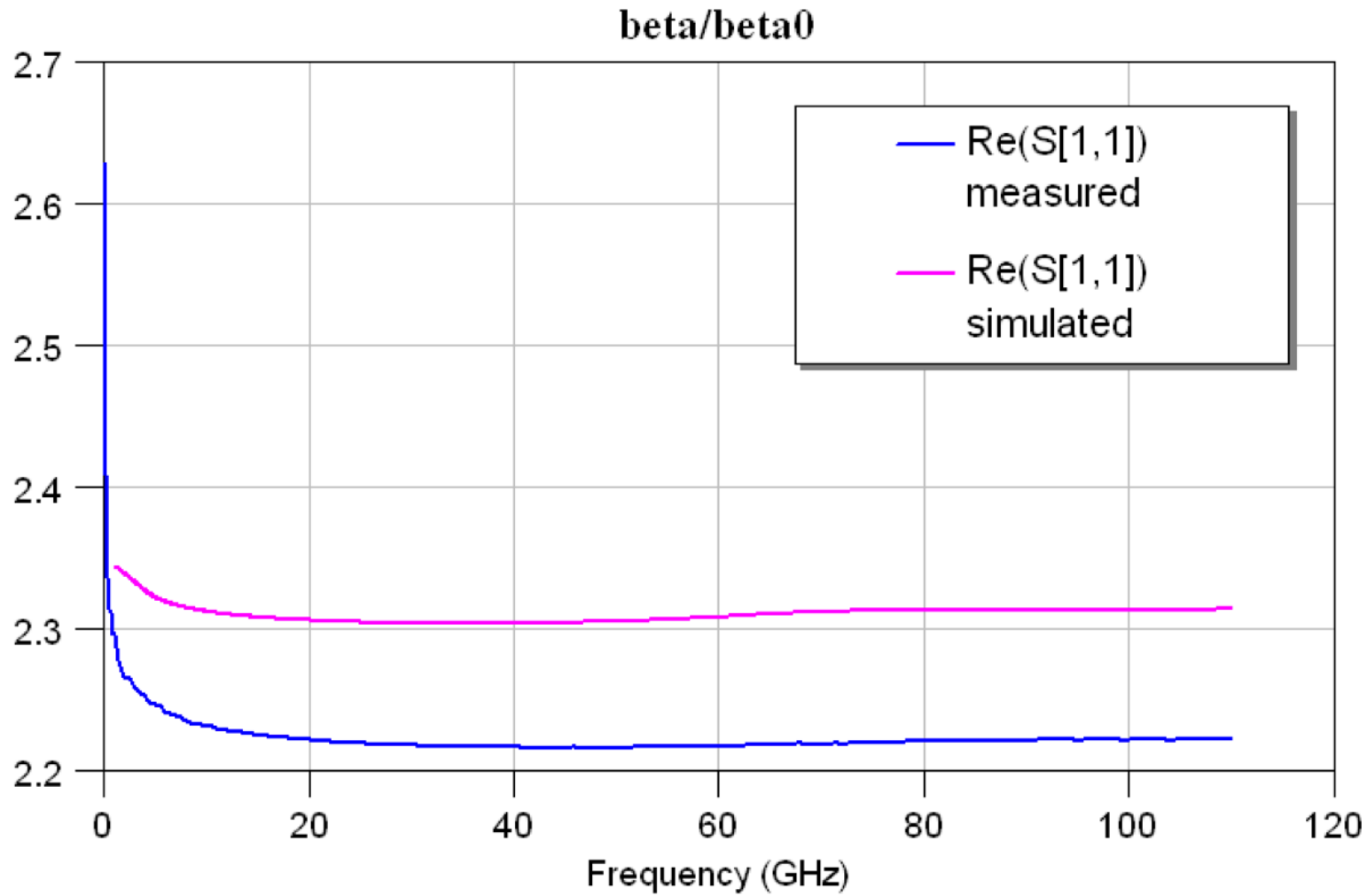
Виртуальная mTRL (CST) и измерения



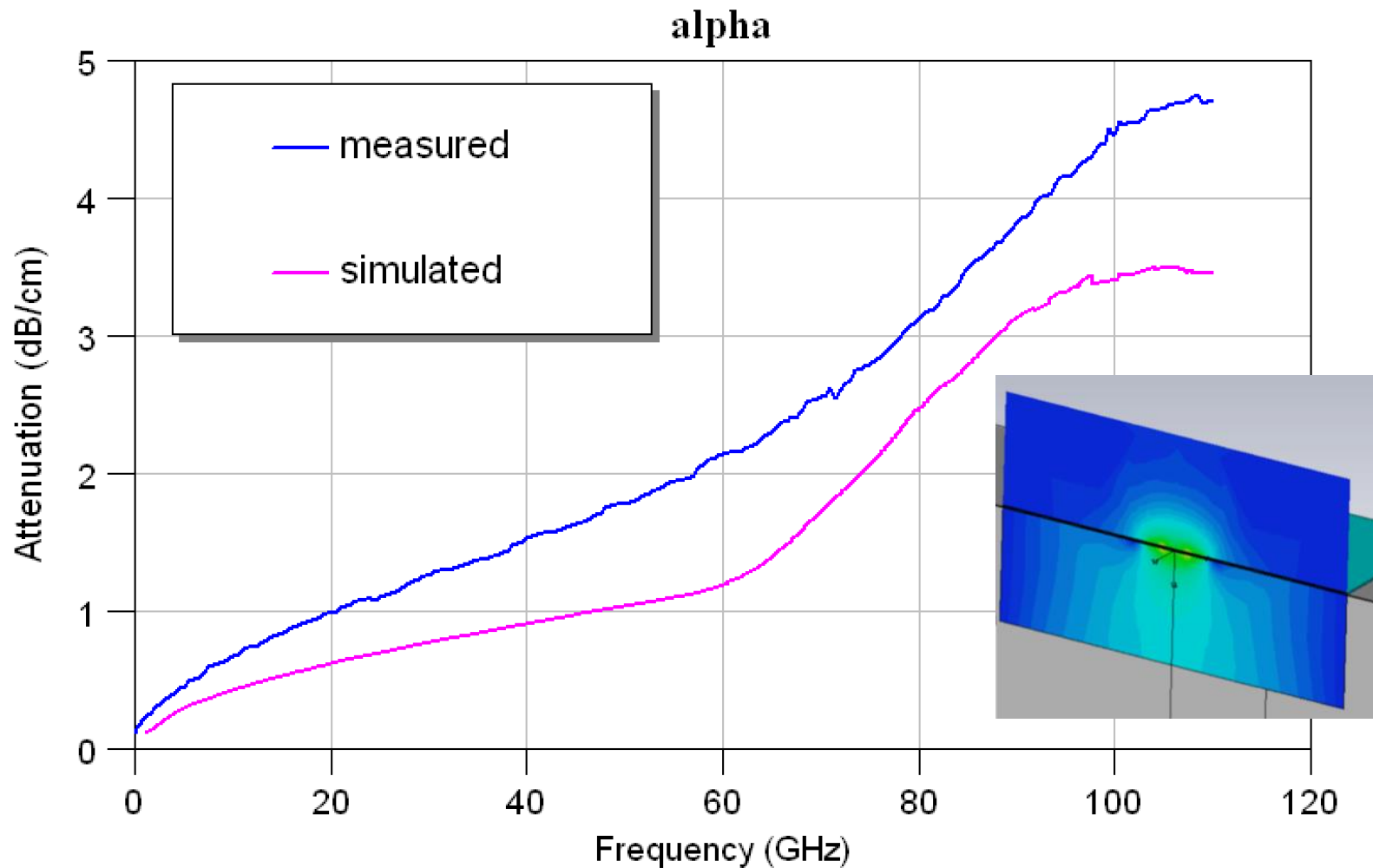
Виртуальная mTRL (CST) и измерения



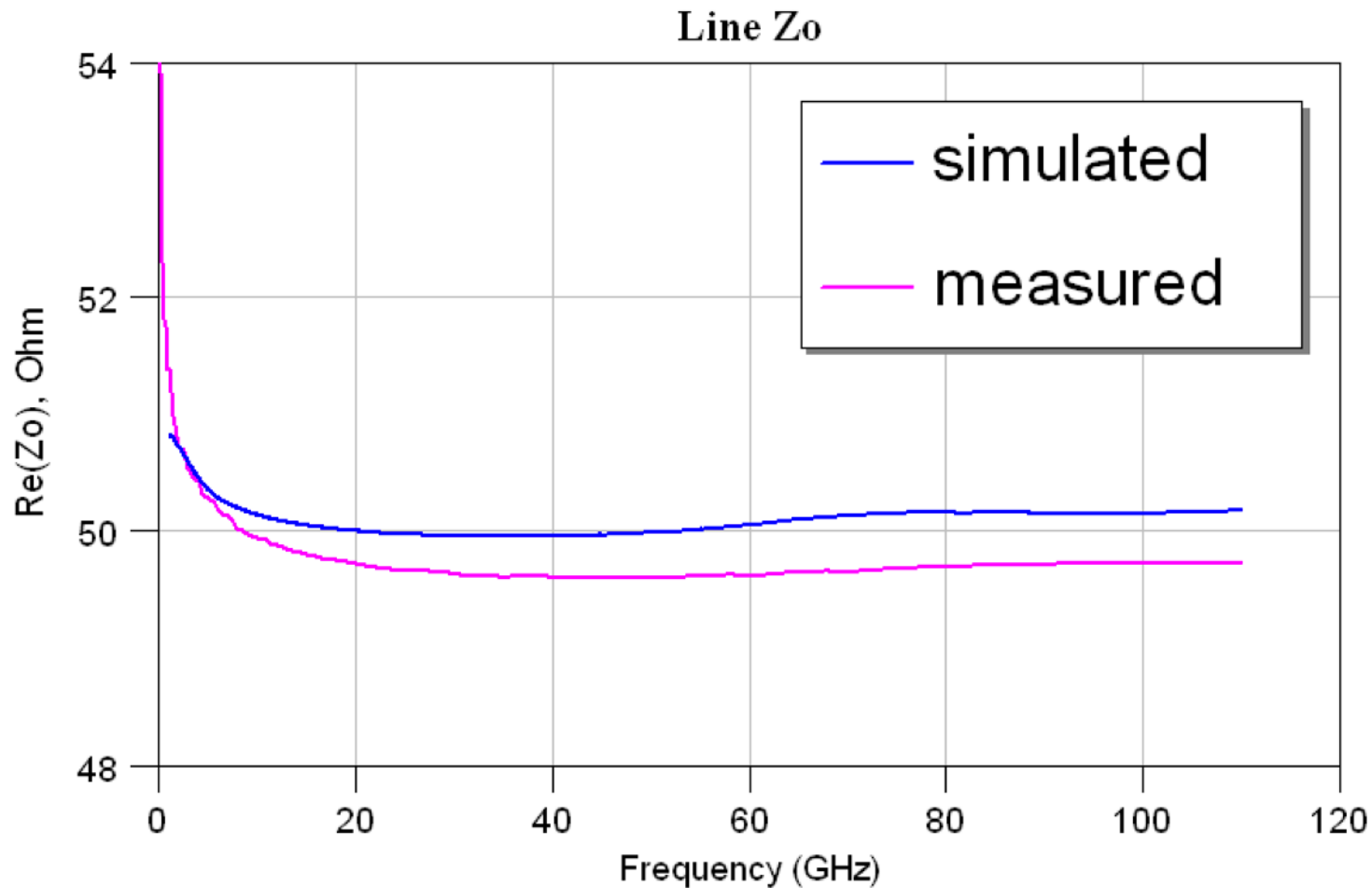
Виртуальная mTRL (CST) и измерения



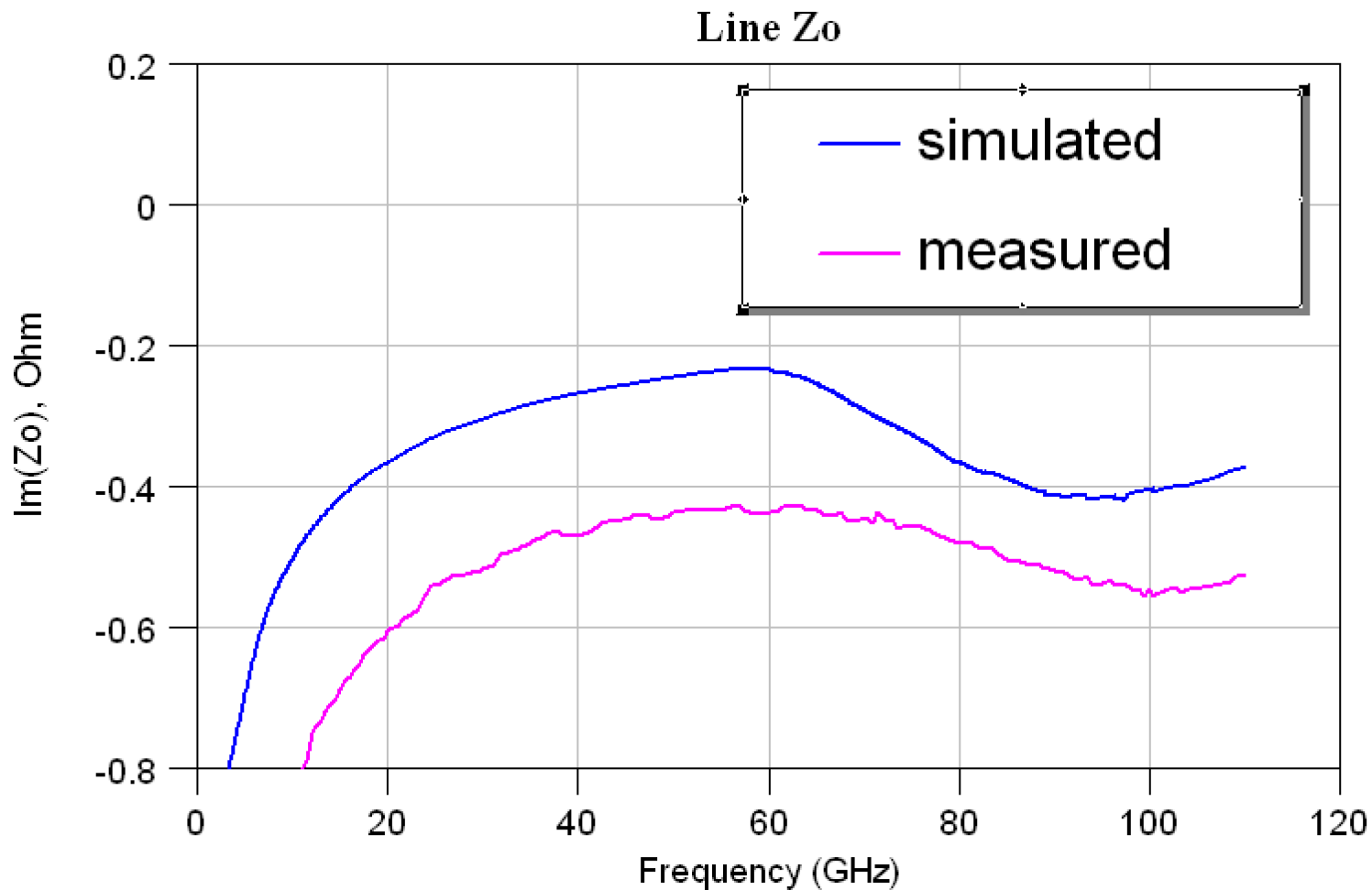
Виртуальная mTRL (CST) и измерения



Виртуальная mTRL (CST) и измерения

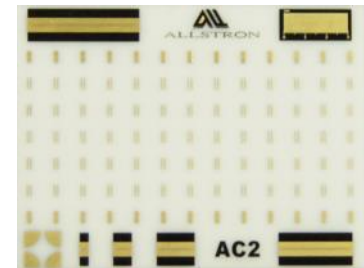
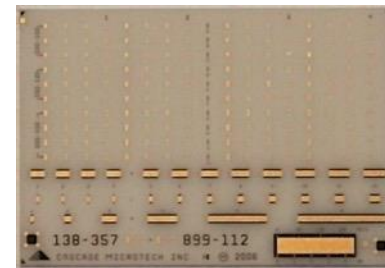
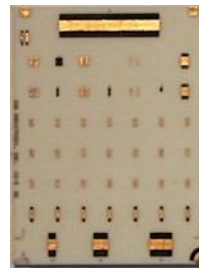
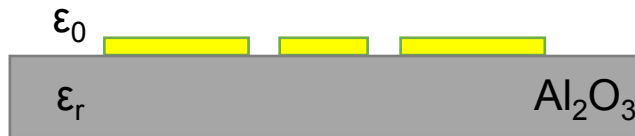


Виртуальная mTRL (CST) и измерения

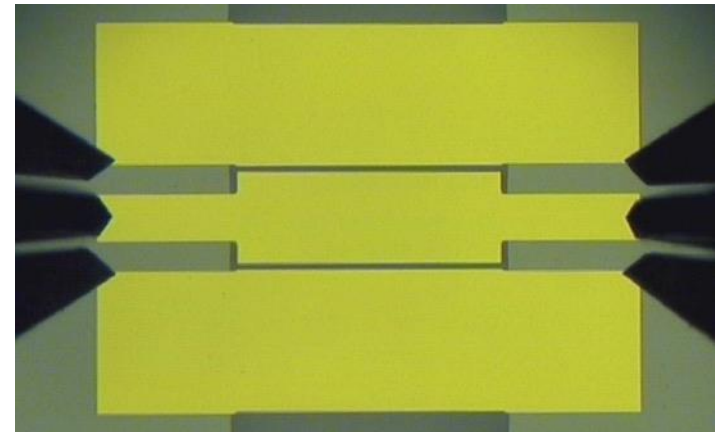
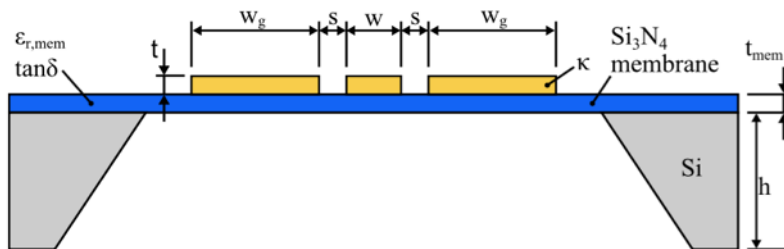


Мембранная копланарная линия

Копланарная линия на поликоре

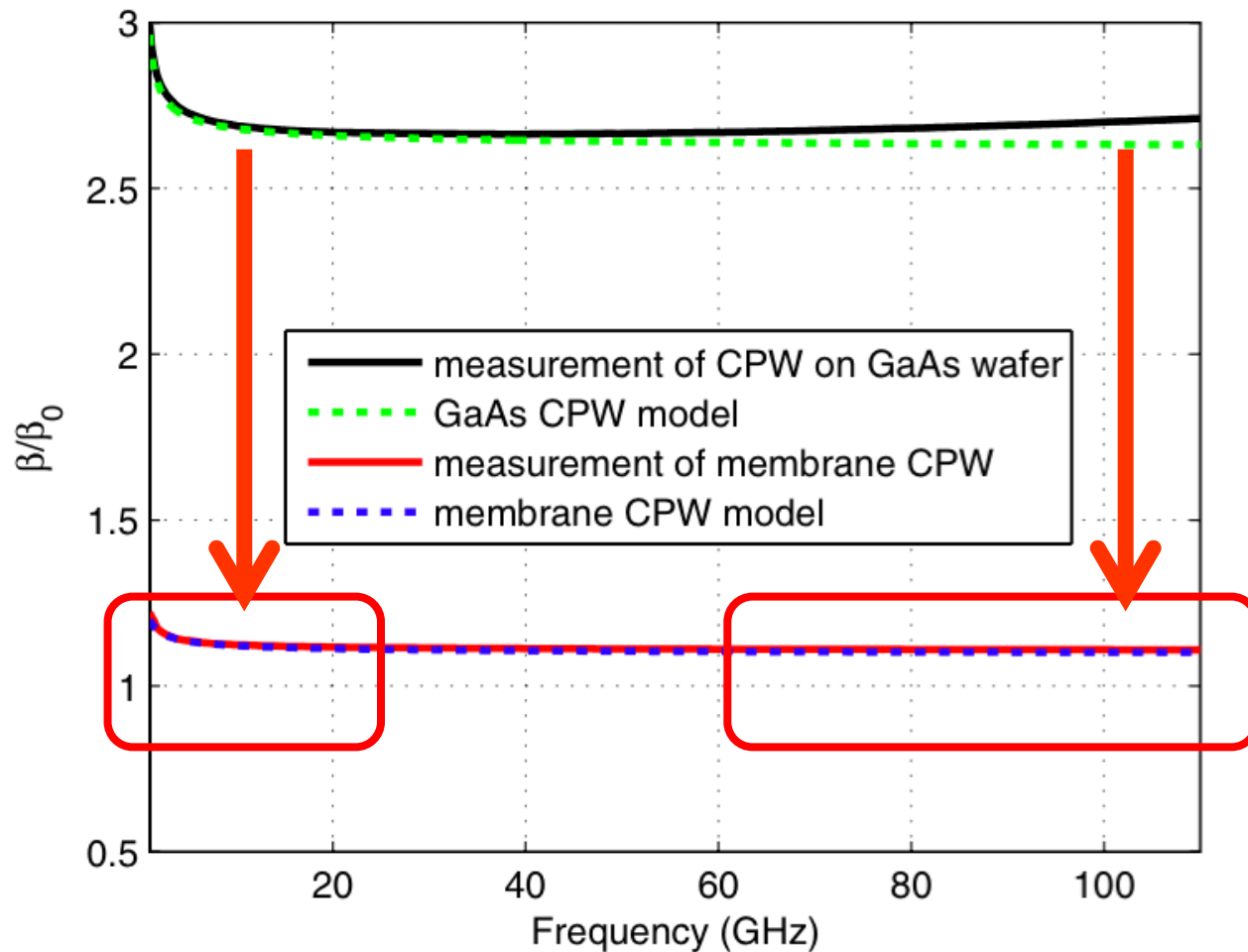


Мембранная копланарная линия



U. Arz, M. Rohland, and S. Büttgenbach, Improving the Performance of 110 GHz Membrane-Based Interconnects on Silicon: Modeling, Measurements, and Uncertainty Analysis, in *EEE Trans. on Components, Packaging and Manufacturing Tech.*, vol. 3, No. 11, Nov. 2013

Мембранная копланарная линия



U. Arz, M. Rohland, and S. Büttgenbach, Improving the Performance of 110 GHz Membrane-Based Interconnects on Silicon: Modeling, Measurements, and Uncertainty Analysis, in *EEE Trans. on Components, Packaging and Manufacturing Tech.*, vol. 3, No. 11, Nov. 2013

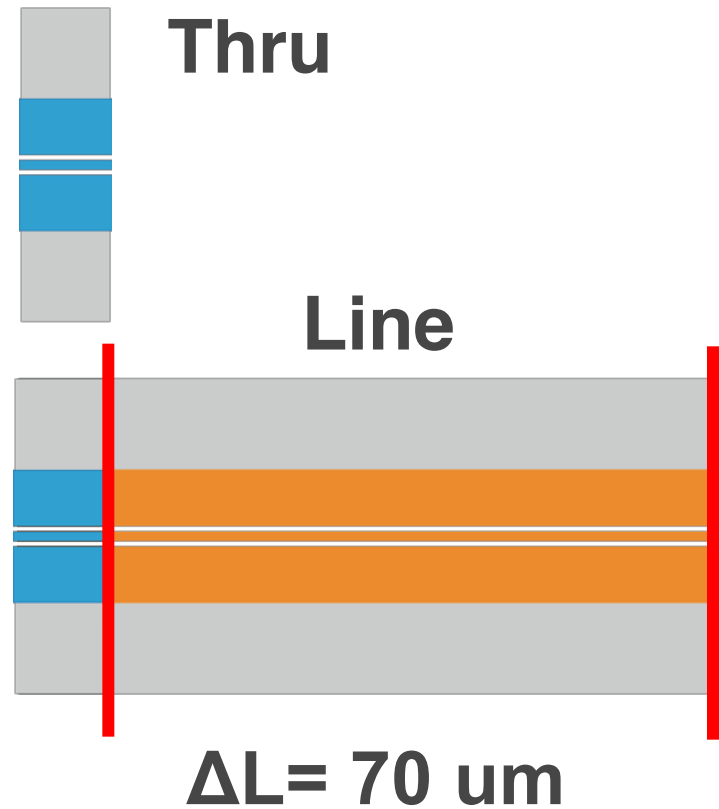
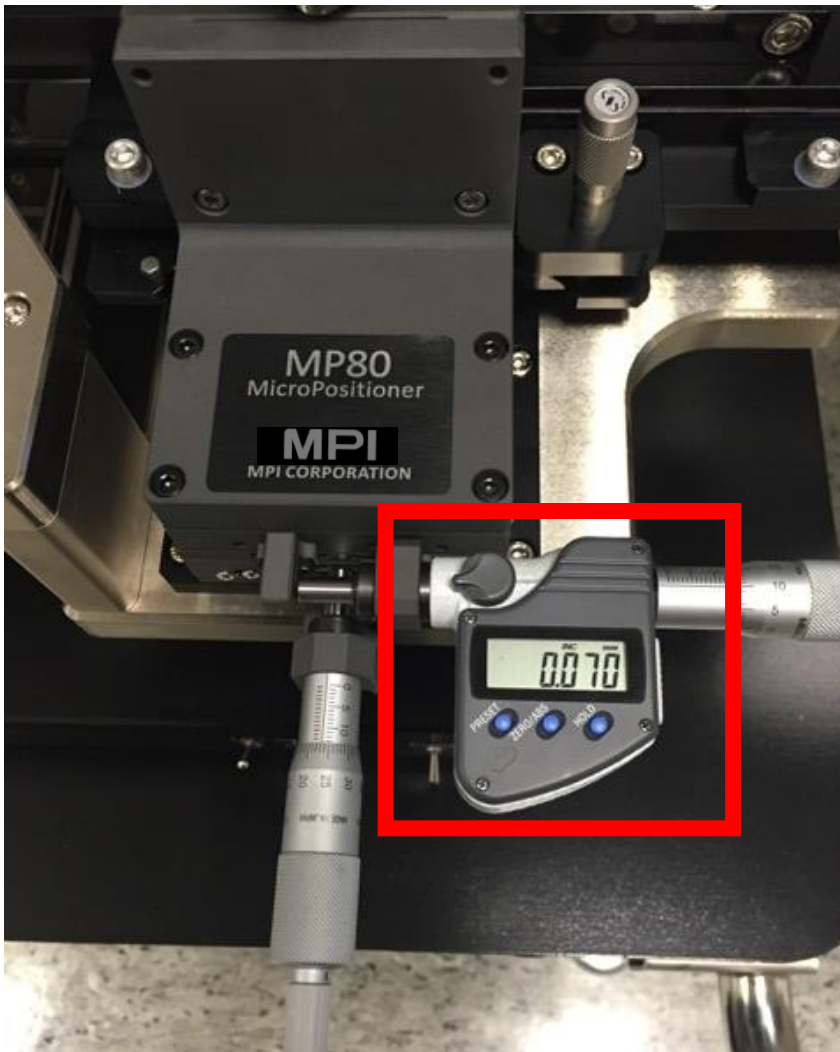
NIST mTRL в QAlibria: Законченная цепь

The screenshot displays the QAlibria software interface in Expert Mode. The main window shows the following configuration:

- SYSTEM - MANUAL:** VNA - DEMO
- VNA - DEMO Parameters:**
 - Start Frequency, Hz: 10M
 - Stop Frequency, Hz: 5G
 - Frequency Points: 201
 - Power, dBm: 0
 - IFBW, Hz: 10
- CALIBRATION METHOD - TOSM(SOLT):**
 - Substrate: AC-2
 - Calibration Tier: First
 - Reference Impedance, Ohm: 50
 - Reference Plane, um: -75
- PROBE C:** T-150-GSG

A secondary window titled "Statistical Plus VNA Calibration Software" is overlaid on the right, showing a "Calibrate!" button and a photograph of a device under test. A large green arrow points from the main interface to this window, indicating the transition to the calibration process.

MPI MP80-DX для точной mTRL калибровки



Заключение

- Планарные линии – опорные элементы для точной калибровки зондовых измерений
- Важно понимать явление дисперсии, определение бегущей волны и псевдо параметров
- Доступны методы и инструменты для моделирования, измерения и калибровки
- Метрологическое обеспечение в разработке

**THANK YOU
FOR YOUR ATTENTION**

MPICORPORATION

**For more information, please visit:
www.mpi-corporation.com**