

Разработка системы метрологического обеспечения измерений параметров микроэлектронных СВЧ-устройств на подложке

Заместитель генерального директора ФГУП «ВНИИФТРИ»
по радиотехническим и электромагнитным измерениям,
д.т.н., доцент, Малай И.М.

ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ И ЗАДАЧИ РАЗВИТИЯ СИСТЕМЫ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ СОГЛАСОВАНИЯ СВЧ ТРАКТОВ

Измерения в коаксиальных трактах

1. Активное освоение коаксиальных трактов 1,35 и 1,0 мм в диапазоне частот до 110 ГГц.
2. Необходимость совершенствования Государственного первичного эталона единицы волнового сопротивления в коаксиальных трактах (расширение диапазона частот до 110 ГГц).
3. Необходимость совершенствования системы передачи единицы волнового сопротивления (разработка вторичных эталонов).

Измерения в волноводных трактах

1. Создание Государственного первичного эталона единиц ККО и ККП в волноводных трактах в диапазоне частот до 178,4 ГГц.
2. Совершенствование системы передачи единиц ККО и ККП в волноводных трактах.
3. Развитие и поддержание системы передачи единиц ККО и ККП в волноводных трактах для существующих эталонов и СИ.

Измерения параметров микроэлектронных структур на пластине

1. Рост потребностей в измерениях микроэлектронных структур на пластине.
2. Необходимость создания системы обеспечения единства измерений ККО и ККП микроэлектронных структур на пластине и соответствующей нормативно-технической документации.
3. Необходимость создания Государственного специального эталона единиц ККО и ККП микроэлектронных структур на пластине.



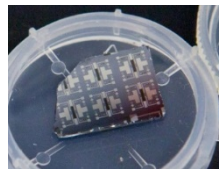
ИЗМЕРЕНИЯ НА ПОДЛОЖКЕ

В настоящее время измерения на подложке выполняются на целом ряде предприятий, занятых производством современной СВЧ электроники. Это такие предприятия как: НПП «Исток» им. Шокина, АО «НИИПП», НПП «Салют», АО «НПП «Алмаз», ОАО «РТИ», ФГУП «ПО «Старт» им. М.В. Проценко», ЗАО «Светлана-Рост», ФГУП СКБ ИРЭ РАН, НИЦ «Курчатовский институт», ИСВЧПЭ РАН, АО «НПФ «Микран», АО «НПП «Пульсар», РАДИС Лтд, АО «ЗНТЦ» и др.

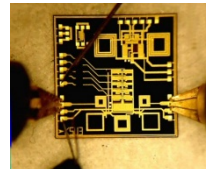
Количество зондовых станций, используемых отечественными предприятиями микроэлектронной промышленности, **превышает 150 шт.**

Калибровочные пластины, зонды и зондовые станции, эксплуатируемые отечественными предприятиями, произведены за рубежом.

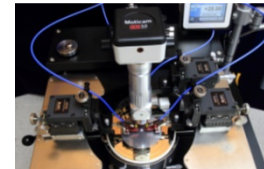
Транзисторы,
диоды



Функциональные
устройства



Средства
измерений

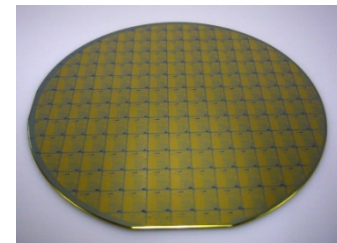


Изделия СВЧ микроэлектроники



РАЗРАБОТКА ЭТАЛОННЫХ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ КОМПЛЕКСНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ОТРАЖЕНИЯ И ПЕРЕДАЧИ МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ СТРУКТУР НА ПЛАСТИНЕ В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ ДО 110 ГГц

Цель работы: Разработка исходного эталона единиц комплексных коэффициентов передачи и отражения для линий передачи на пластине в интересах метрологического обеспечения разработки и производства современных изделий СВЧ микроэлектроники.



Ожидаемые результаты:

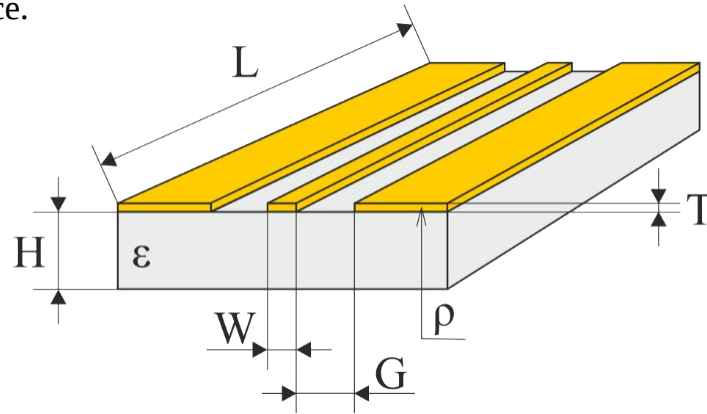
- создание научно-методической базы, учитывающей особенности распространения поля в копланарном волноводе;
- создание исходного эталона единиц комплексных коэффициентов передачи и отражения для линий передачи электромагнитной энергии на пластине диапазоне частот до 110 ГГц.
- разработка калибровочных мер на пластине;
- разработка измерительных зондов.



МОДЕЛИ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ КОПЛАНАРНОЙ ЛИНИИ

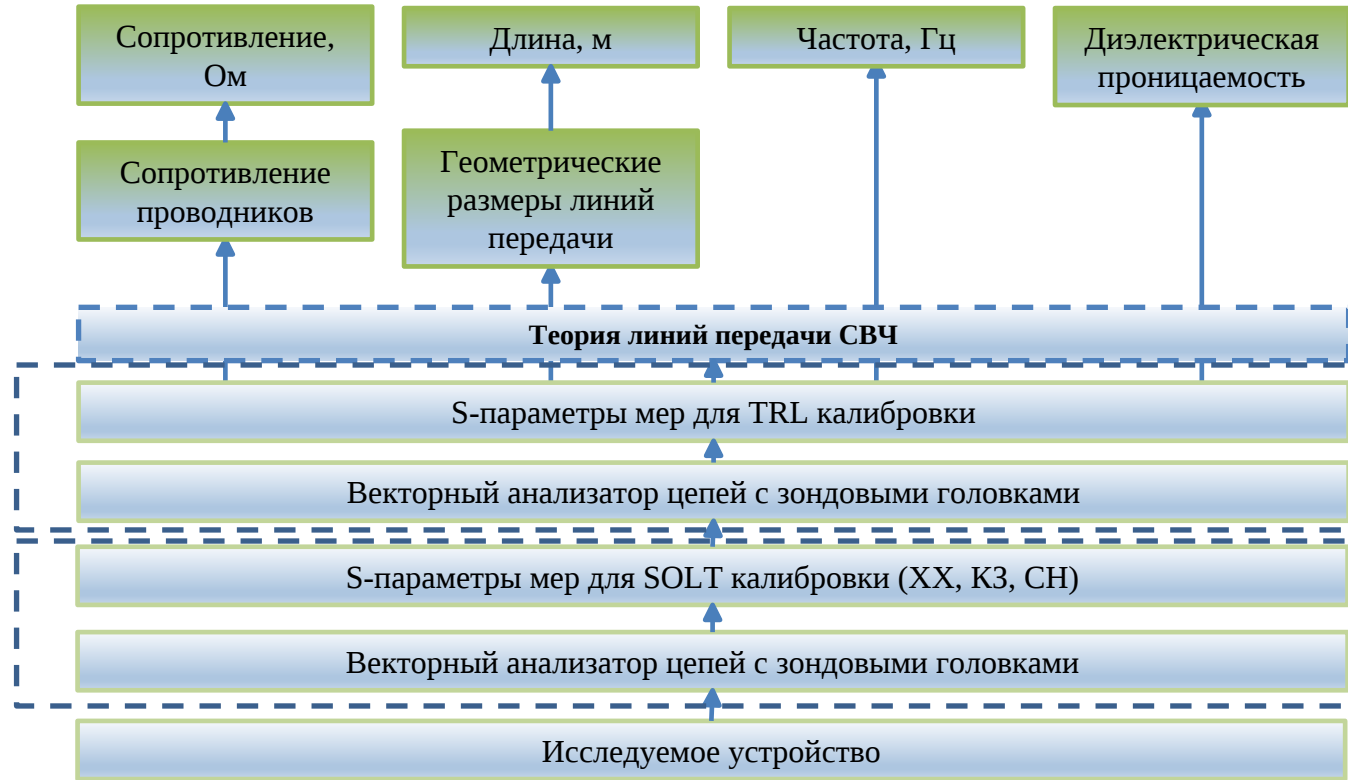
Методики определения действительных значений калибровочных мер, реализованных на подложке, включают операции расчёта с применением известных моделей таких как:

- квазистатическая модель копланарной линии,
- квазианалитическая модель Беркеля,
- аналитическая модель Вольфганга Хайнриха,
- параметрическое электромагнитное моделирование в специальных программных пакетах, таких как CST, HFSS, Microwave Office.



Входными параметрами этих моделей являются: длина линии L , ширина центрального проводника W , толщина проводников T , ширина промежутков между центральным и боковыми проводниками G , толщина подложки H , относительная диэлектрическая проницаемость материала подложки ϵ , удельное сопротивление проводников ρ , погонные ёмкость и индуктивность проводников.

МЕТРОЛОГИЧЕСКАЯ ПРОСЛЕЖИВАЕМОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ

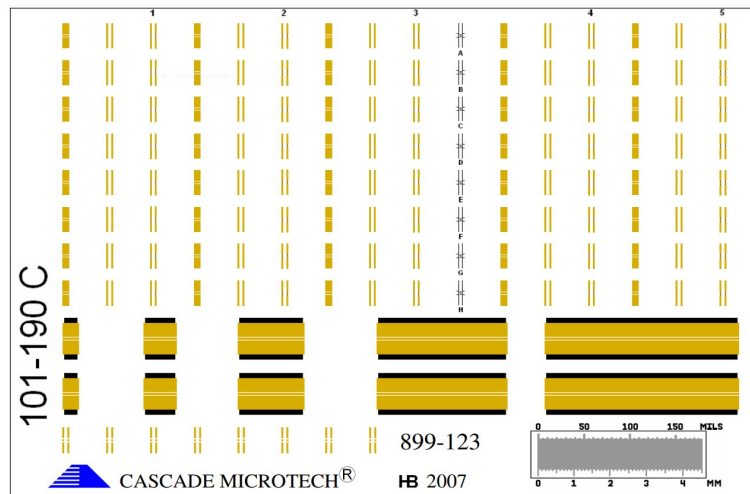


КАЛИБРОВОЧНАЯ ПЛАСТИНА

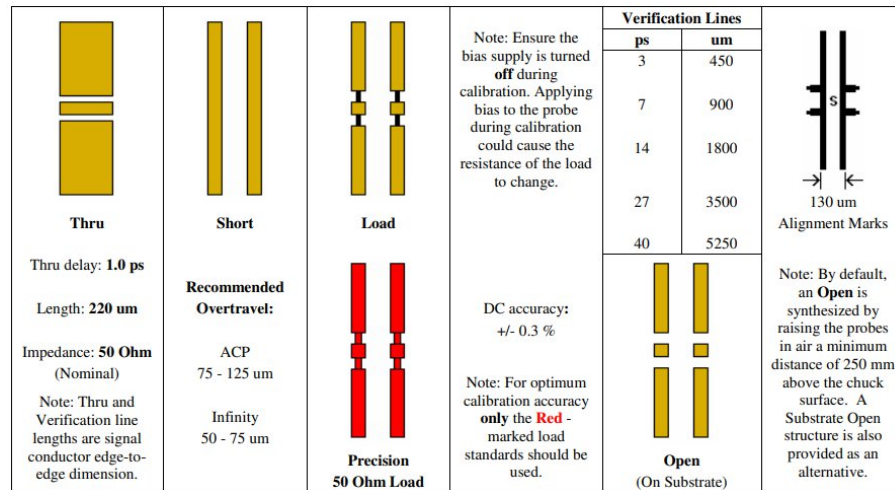
Одной из важнейших операций, проводимых при измерениях СВЧ микроэлектронных структур на подложке, является калибровка измерительной установки.

Калибровка проводится с целью переноса плоскости измерений с выхода волновода или коаксиального соединителя на линию контакта зондов к контактным дорожкам исследуемой структуры на подложке. Реализация такой калибровки предполагает использование мер комплексных коэффициентов отражения и передачи, реализованных на пластине (калибровочных пластин) с известными характеристиками.

Набор мер на пластине 101-190 C



Типы и характеристики мер



ОБОБЩЕНИЕ СВЕДЕНИЙ О ТИПАХ ИСПОЛЬЗУЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ И РАЗМЕРАХ КОПЛАНАРНЫХ ЛИНИЙ В РФ

Диапазон частот	Материал Подложки						Металлизация				Шаг зонда						
	Al ₂ O ₃	GaAs	GaN	SiO ₂	Si	AlN	Au	Ag	Al	Cu	100	125	150	200	250	400	500
0,01 - 50	●	●	●				●				●		●	●	●		●
0,01 - 50	●	●	●				●						●				●
0,01 - 67	●	●	●				●				●	●	●		●	●	
0,01 - 67		●					●						●		●		
0,01 - 70	●						●	●			●			●			
0,01 - 110		●	●				●				●		●	●			
0,01 - 110	●	●	●				●		●		●		●	●	●		●
0,01 - 110	●	●	●		●	●	●	●	●				●				
0,01 - 110	●	●	●	●	●		●		●				●				●
0,01 - 110	●	●	●		●		●					●	●	●			●



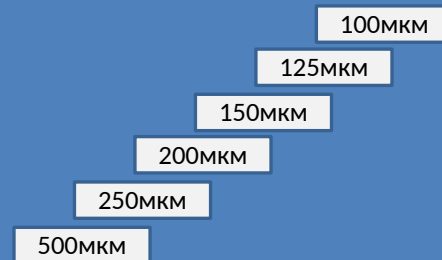
РАЗРАБОТКА ЭТАЛОННЫХ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ КОМПЛЕКСНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ОТРАЖЕНИЯ И ПЕРЕДАЧИ МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ СТРУКТУР НА ПЛАСТИНЕ В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ ДО 110 ГГц

Специальный эталон единиц комплексного коэффициента отражения (далее – ККО) и комплексного коэффициента передачи (далее – ККП) микронных структур на пластине в диапазоне частот до 110 ГГц

Набор измерительных зондов в диапазоне частот до 110 ГГц

Волнов.	WR-10	100мкм
	WR-15	125мкм
Коакс.	1,85мм	150мкм
	2,92мм	200мкм
		250мкм
		500мкм

Набор калибровочных подложек в диапазоне частот до 110 ГГц



Единичное изготовление

Серийное производство

В качестве основных материалов для создания калибровочных пластин в эталоне с учетом опроса предприятий рассматриваются поликор и сапфир, а также GaAs.

ОБОБЩЕНИЕ СВЕДЕНИЙ ОБ ИССЛЕДОВАННЫХ КАЛИБРОВОЧНЫХ ПЛАСТИНАХ

Наименование пластины	Материал подложки	Ширина центрального проводника, мкм	Ширина зазора, мкм	Толщина проводника, мкм	Толщина подложки мм.
AC2 v2	Al ₂ O ₃	51	23	5.3	0.635
AC2 ALLSTRON	Al ₂ O ₃	45	30	3.2	0.623
Cascade Microtech P/N 101-190	Al ₂ O ₃	48	25	4.2	0.643
Nist RM Water 8. Cal Set 1	GaAs	64	42	0,3	0.517
Пластина Салют	Al ₂ O ₃	66	35	3	0.232
Пластина Исток	Сапфир	100/50	50/45	3	0.8
Пластина С-компонент	Al ₂ O ₃	140/100	75/50	5	1

РАЗРАБОТКА КАЛИБРОВОЧНОЙ ПЛАСТИНЫ: СОСТАВ ТОПОЛОГИИ

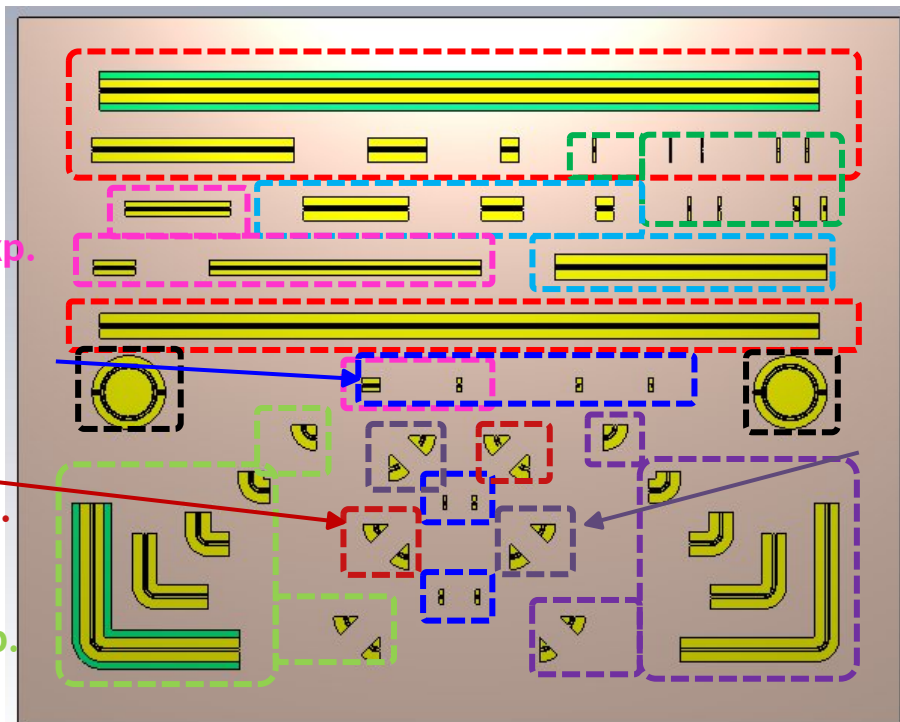
TRL калибровочный набор №1

TRL калибровочный набор №3. Зазор 50 мкр.

SOLT калибровочный набор. Зазор 50 мкр.

Правый SOLT калибровочный набор.

Правый TRL калибровочный набор.



SOLT калибровочный набор

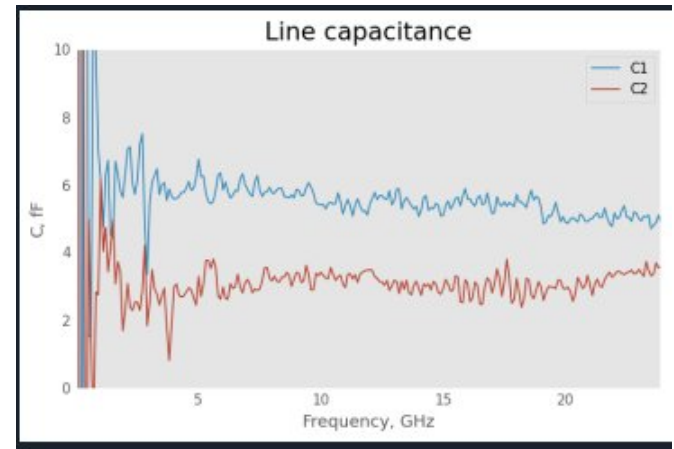
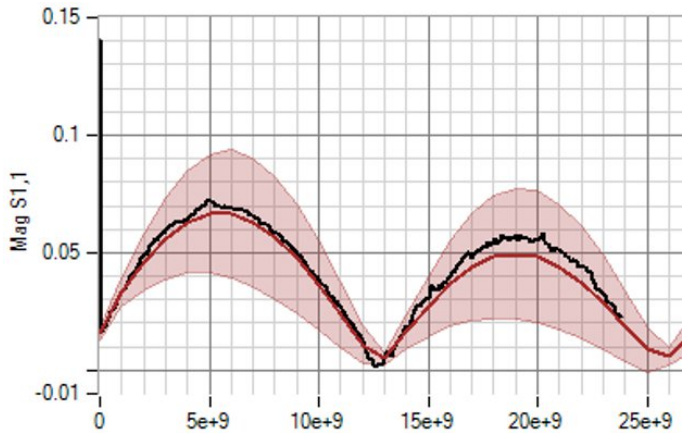
TRL калибровочный набор №2

Кольцевой резонатор
Левый SOLT калибровочный набор.

Левый TRL калибровочный набор.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДО 20 ГГц

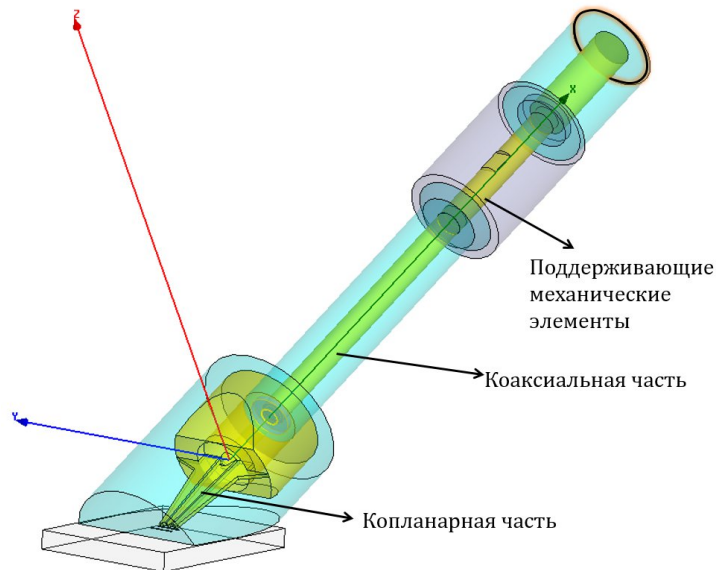
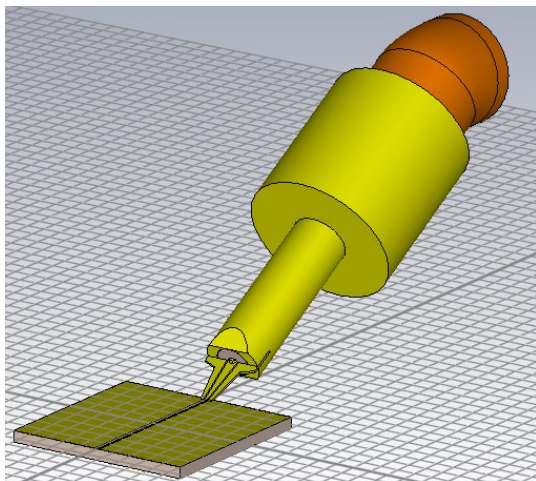
Погрешность «эталонной» подложки	Погрешность определения шунтирующей емкости	Погрешность метода калибровки	Случайная погрешность	Суммарная погрешность
0,03	0,03	0,005	0,003	0,05 (КСВН 2,0+/-0,2)



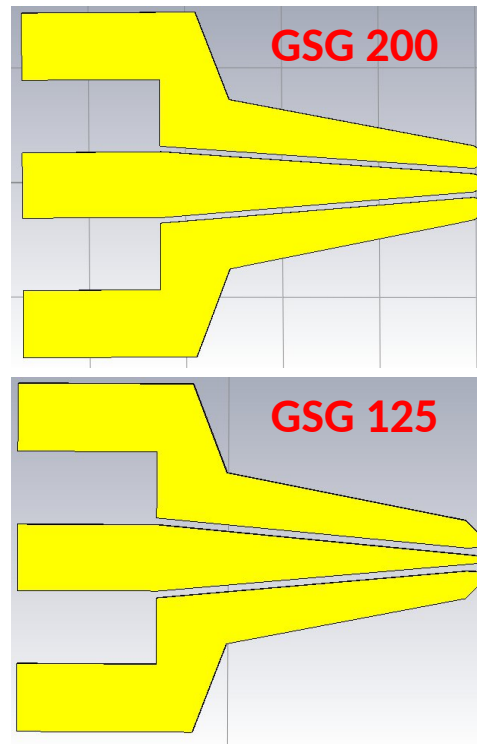
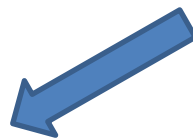
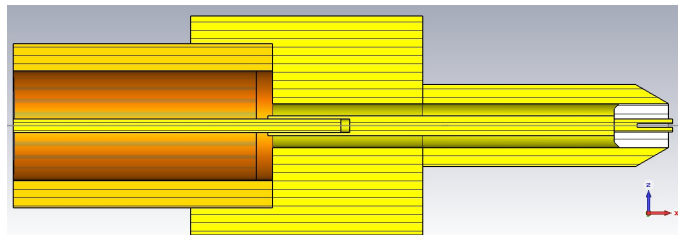
РАЗРАБОТКА ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ЗОНДА

Важной особенностью измерений на подложке является использование специальной оснастки - зондов, которые обеспечивают возможность подключения стандартного коаксиального или волноводного тракта к контактными площадкам микроэлектронных структур на подложке.

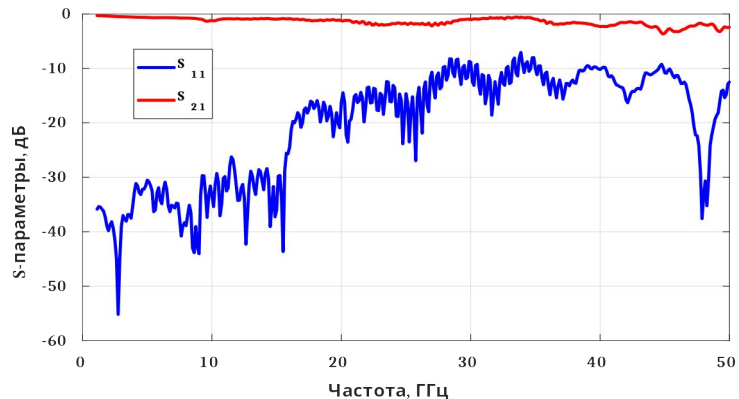
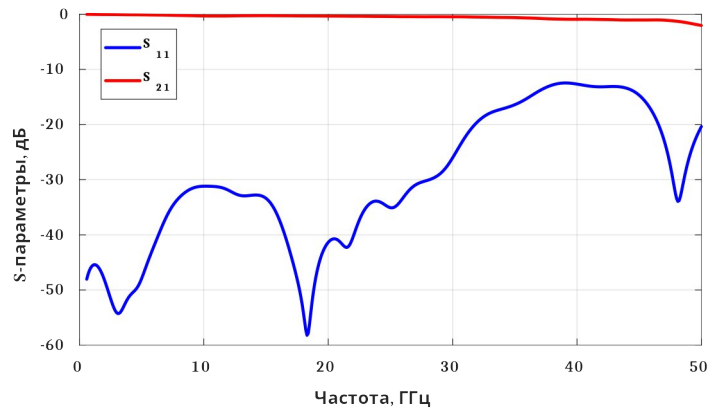
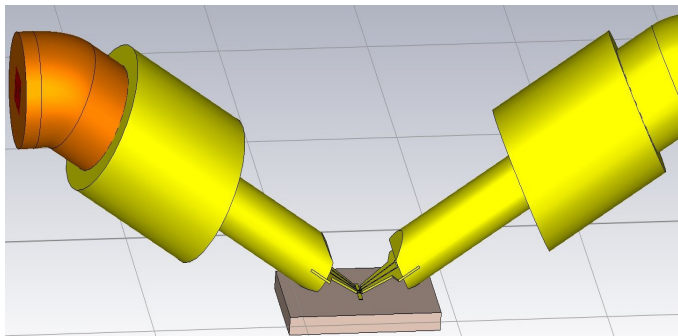
В настоящее время совместно с технологическими партнерами ведется разработка измерительных зондов.



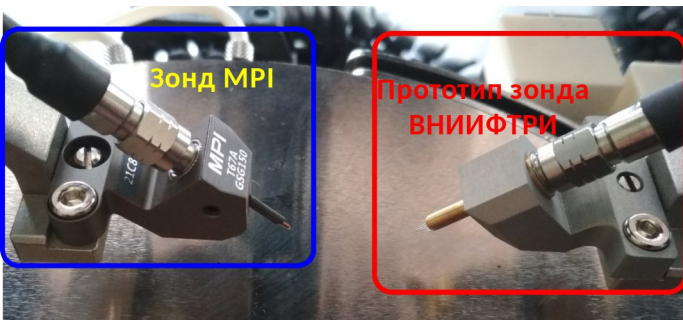
ПРОТОТИП ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ЗОНДА



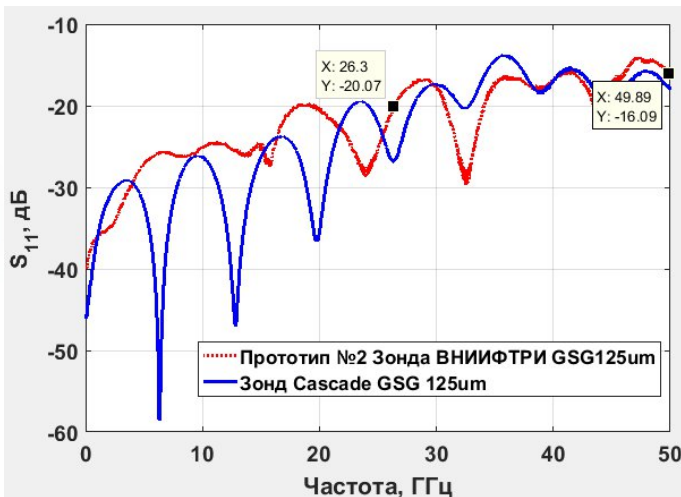
СРАВНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МОДЕЛИ И ПЕРВОГО ПРОТОТИПА



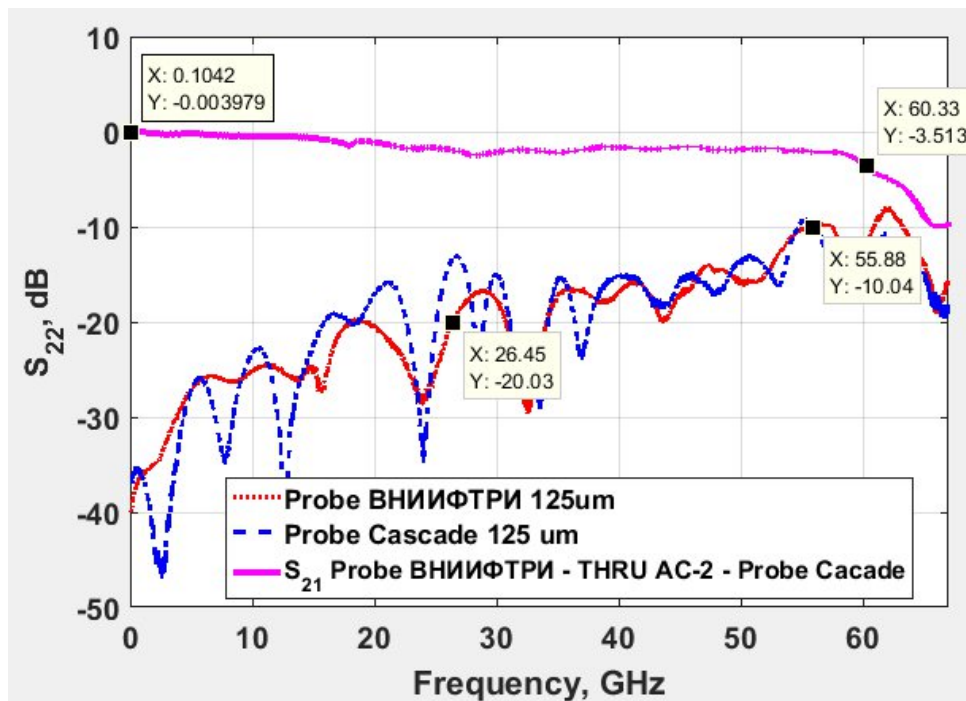
РАЗВИТИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОТОТИПА И СРАВНЕНИЕ С ИНОСТРАННЫМИ АНАЛОГАМИ



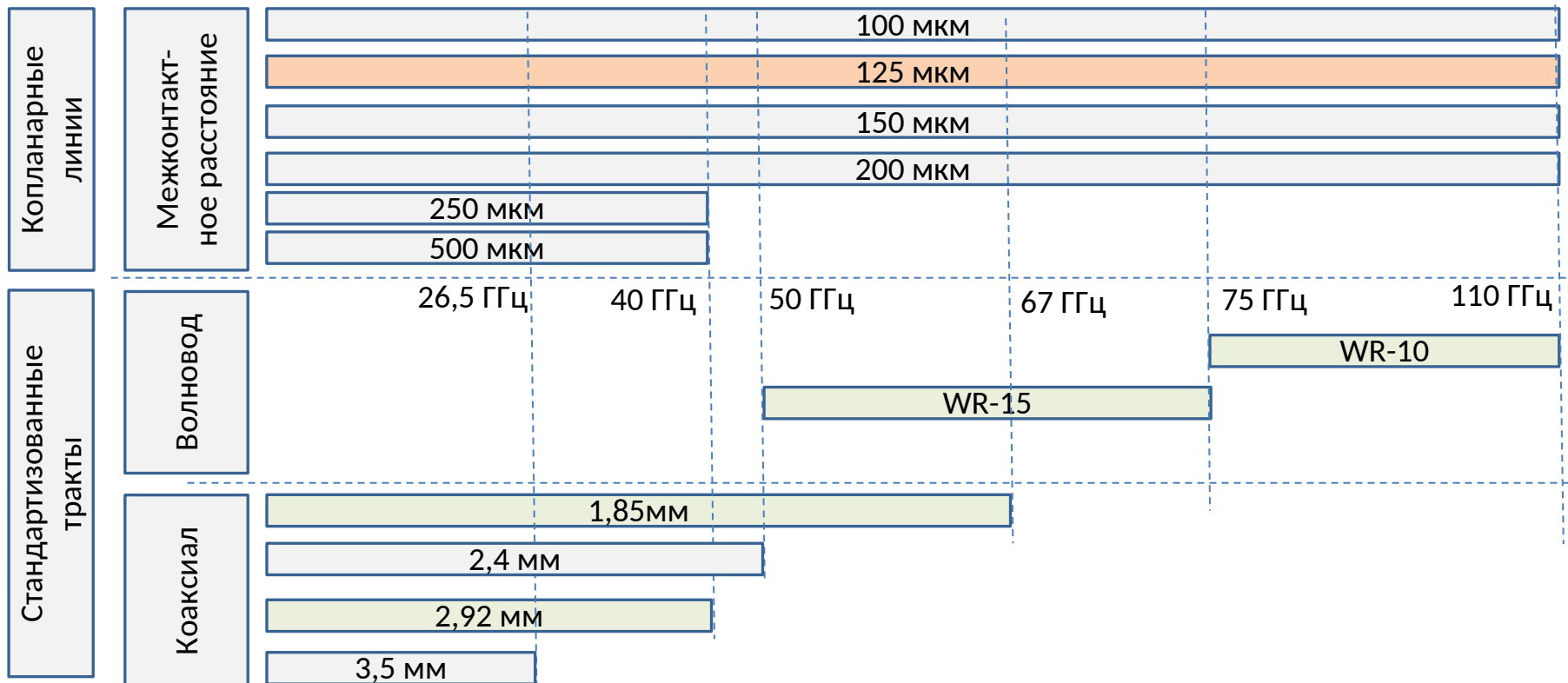
Подключение к согласованной нагрузке



Характеристики соединения Прототип ВНИИФТРИ-мера THRU – Зонд Cascade



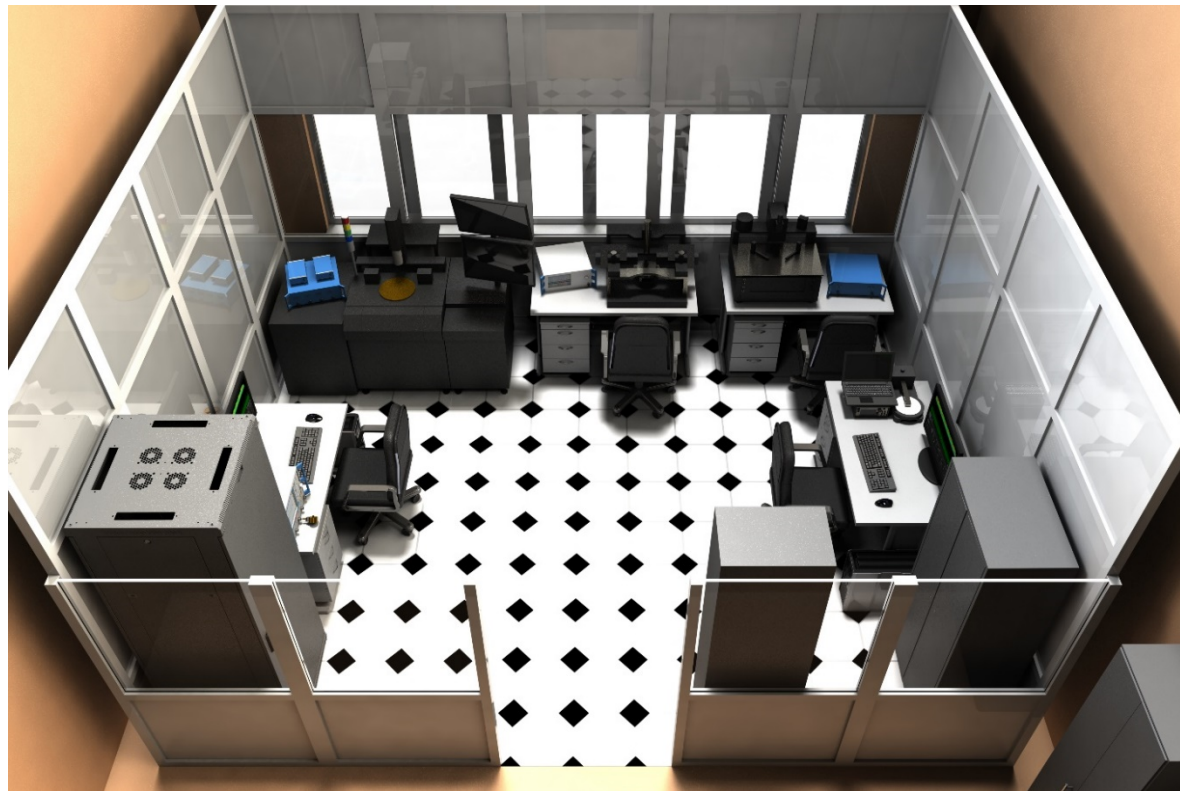
ДИАПАЗОНЫ ЧАСТОТ РАЗРАБАТЫВАЕМЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ЗОНДОВ



ОБЩИЙ ВИД ПОМЕЩЕНИЯ ДЛЯ РАЗМЕЩЕНИЯ ЭТАЛОНА

Установка
компарирующая
(Зондовые
станции и пр.)

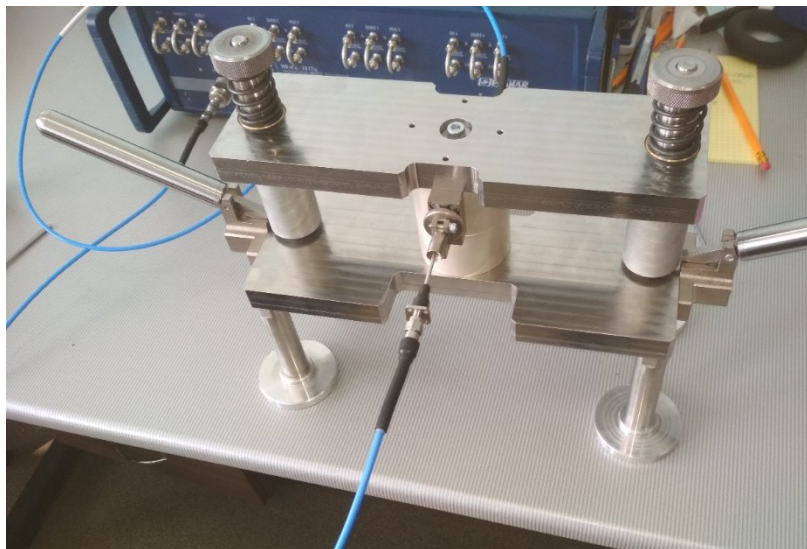
Установка
измерительная
комплексной
диэлектрической
проницаемости
твердых
диэлектрических
материалов на
СВЧ



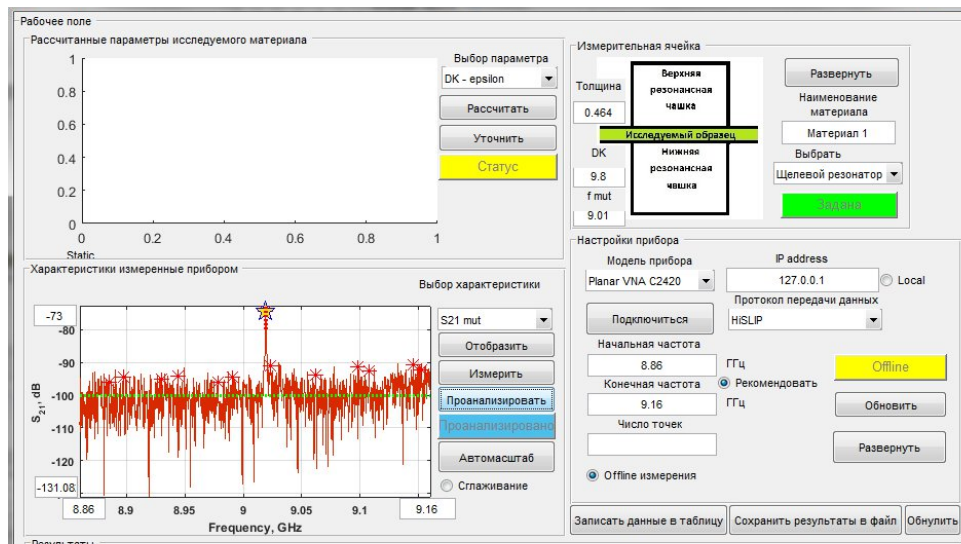
Установка для
измерений
поверхностного
сопротивления

УСТАНОВКА ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ КОМПЛЕКСНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ НА СВЧ

Внешний вид резонатора



Пример обработки результатов измерений



РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ СТАНДАРТНЫХ ОБРАЗЦОВ

Результаты измерений относительной диэлектрической проницаемости

Стандартные образцы	ϵ_{co}	$\epsilon_{и}$	$\Delta, \%$
ВК100-1 (0,5 мм)	9,39	9,363	0,3
ВК100-1 (1 мм)	9,56	9,540	0,2
СТ32-1 (0,5 мм)	9,88	9,796	0,9
СТ32-1 (1 мм)	10,11	10,125	0,1
Стекло С5-1	3,80	3,820	0,5
Полиэтилен	2,29	2,297	0,3
ВК-94	9,44	9,514	0,8
СТ38-1 (0,5 мм)	7,23	7,156	1,0
СТ38-1 (1 мм)	7,42	7,440	0,3

Результаты измерений тангенса угла диэлектрических потерь

Стандартные образцы	$tg\delta_{co}$	$tg\delta_{и}$	$\Delta, \%$
ВК100-1 (0,5 мм)	$0,39 \cdot 10^{-4}$	$0,38 \cdot 10^{-4}$	25,0
ВК100-1 (1 мм)	$0,39 \cdot 10^{-4}$	$0,21 \cdot 10^{-4}$	29,0
СТ32-1 (0,5 мм)	$4,1 \cdot 10^{-4}$	$4,03 \cdot 10^{-4}$	1,7
СТ32-1 (1 мм)	$6,4 \cdot 10^{-4}$	$5,89 \cdot 10^{-4}$	8,0
Стекло С5-1	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$1,14 \cdot 10^{-4}$	4,0
Полиэтилен	$5,5 \cdot 10^{-4}$	$5,95 \cdot 10^{-4}$	8,1
ВК-94	$12 \cdot 10^{-4}$	$11,61 \cdot 10^{-4}$	3,3

**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!
ПРИГЛАШАЕМ К СОТРУДНИЧЕСТВУ!**