# ШИРОКОПОЛОСНЫЙ ГИБРИДНЫЙ РАДИОПОГЛОЩАЮЩИЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ ОТ УТЕЧКИ ПО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМУ КАНАЛУ (30 МГц – 100 ГГц)

Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко Белорусского государственного университета

В.П. КНЫШ, Ф.Ф. КОМАРОВ, П.В. КУЧИНСКИЙ, И.Д. ПАРФИМОВИЧ, И.В. ЧИЖОВ

# АКТУАЛЬНОСТЬ

Спектр паразитных излучений средств вычислительной техники охватывает диапазон от единиц мегагерц (наводки на кабели, цепи питания, дисплейные тракты) до десятков гигагерц (излучения высокоскоростных интерфейсов, беспроводных модулей, тактовых генераторов и их гармоник), поэтому эффективное экранирование требует радиопоглощающих покрытий, работающих одновременно в низко- и высокочастотном сегментах, что затруднительно реализовать на основе единственного физического механизма потерь.

## ДВА МЕХАНИЗМА ПОТЕРЬ – ДВА ДИАПАЗОНА ЭФФЕКТИВНОСТИ

### ФЕРРИТОВЫЕ ПОГЛОТИТЕЛИ

Гистерезисные и релаксационные потери

Высокая эффективность на низких частотах

Верхняя граница диапазона определяется частотной дисперсией проницаемости и вихревыми токами.

### ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОГЛОТИТЕЛИ (ПОЛИМЕР/МУНТ)

Перколяционные диэлектрические потери в проводящей сети нанотрубок

Высокая эффективность на высоких частотах

На низких частотах ограничены малой электрической толщиной структуры, что дополняет ферритовые поглотители

# ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ РАБОТЫ

Цель: Разработка и экспериментальное подтверждение характеристик гибридного двухслойного радиопоглощающего материала, обеспечивающего эффективное ослабление отражённого сигнала в диапазоне 30 МГц – 100 ГГц за счёт частотного разделения функций слоёв

Разработка конструкции двухслойного покрытия с частотным разделением функций слоев

Моделирование структуры пирамидального поглотителя

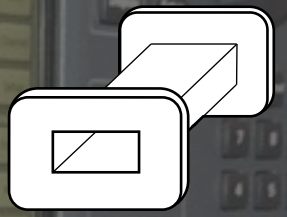
Изготовление пирамидального слоя, модифицированного углеродными нанотрубками

Обеспечение измерений крупногабаритных панелей поглотителя на низких частотах

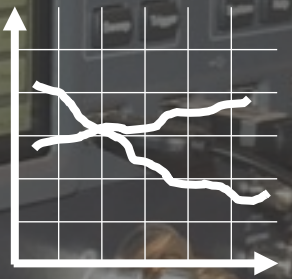
Характеризация поглотителя в широком диапазоне частот от 30 МГц до 100 ГГц

## МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ:

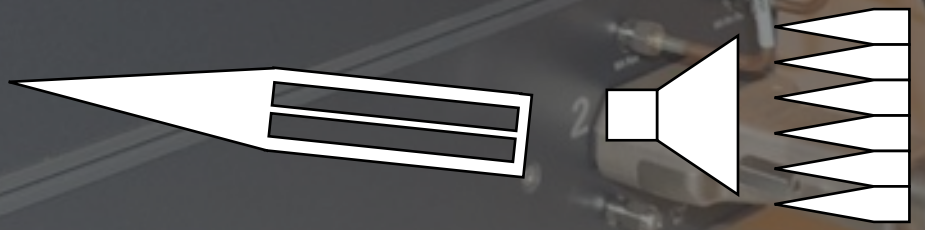
РЕГИСТРАЦИЯ S-ПАРАМЕТРОВ В ВОЛНОВОДНОЙ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧ



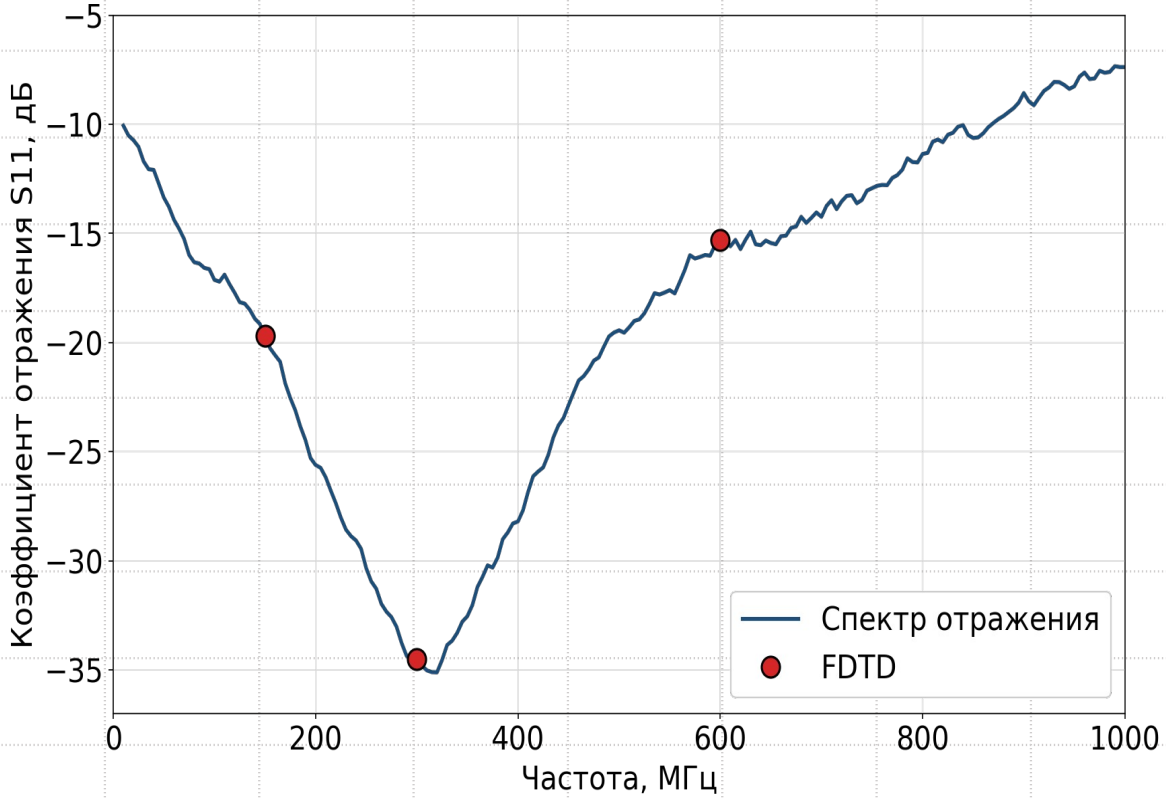
РАСЧЕТ КОМПЛЕКСНЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ И МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ



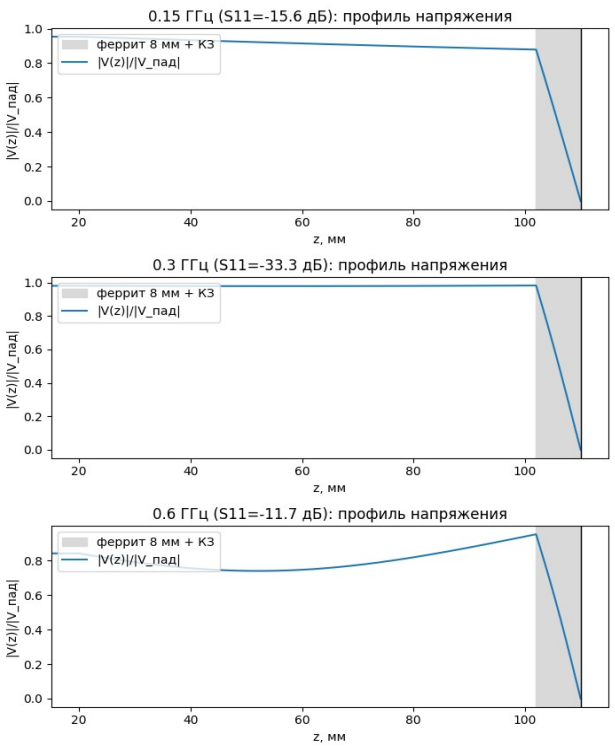
ИЗМЕРЕНИЯ В СВОБОДНОМ ПРОСТРАНСТВЕ И В ПОЛОСКОВОЙ ЛИНИИ



# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ФЕРРИТОВОГО СЛОЯ




*Коэффициент отражения S11 ферритового кольца в коаксиальной линии (10–1000 МГц)*



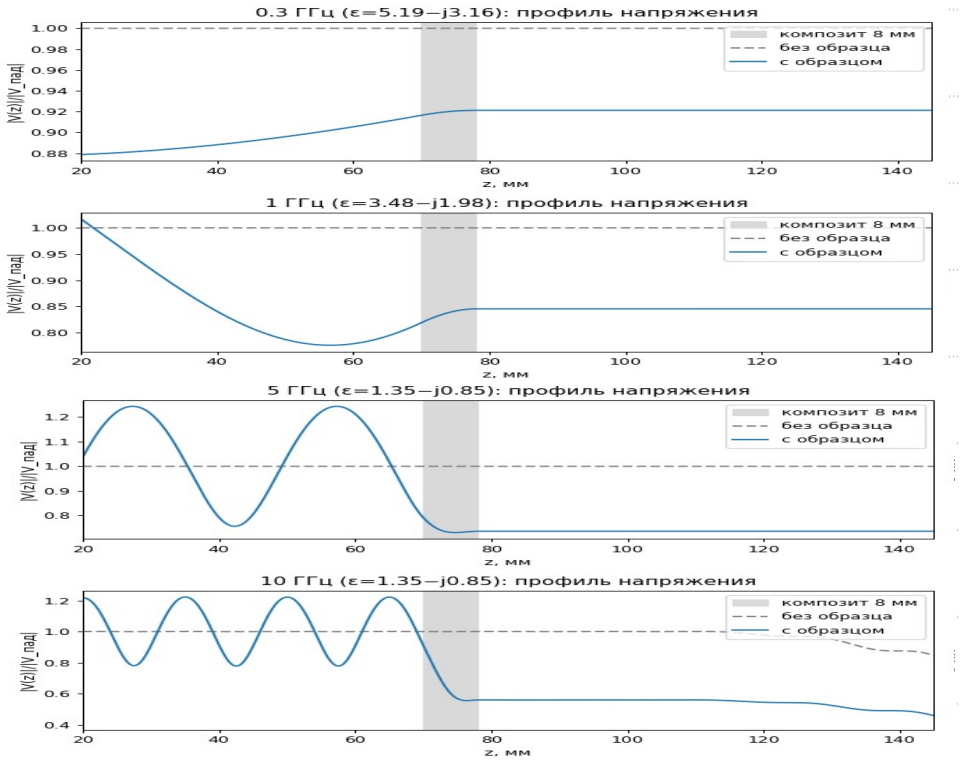

*Профиль |V(z)| на 150, 300 и 600 МГц (серая область — феррит, справа от неё — КЗ)*

Предварительное тестирование ферритового материала проводилось на измерительной ячейке на основе отрезка 50-омной коаксиальной линии (диаметр центрального проводника 3 мм, наружного – 7 мм) в диапазоне 10–1000 МГц на векторном анализаторе цепей Keysight N5290A.

На 150 и 600 МГц перед ферритом видна заметная стоячая волна — часть мощности отражается. На резонансной частоте 300 МГц профиль перед образцом почти без пульсаций: большая часть падающей волны поглощается в феррите.

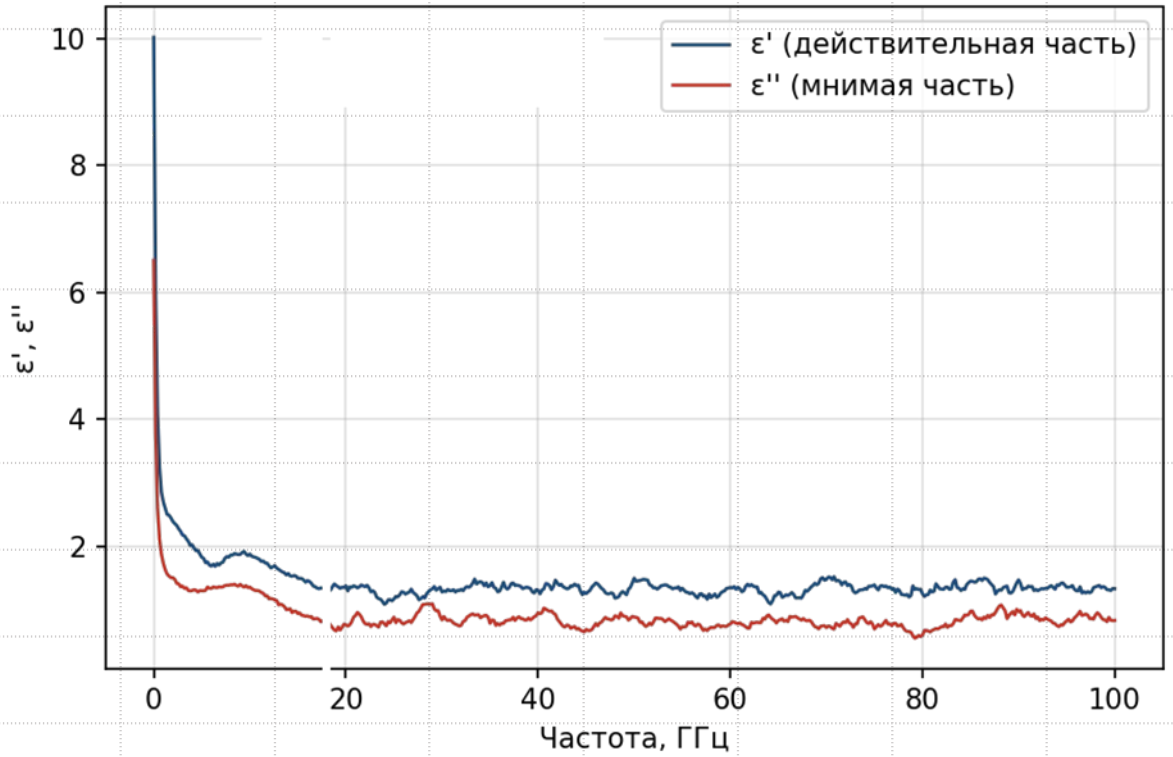
# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОЗИТНОГО СЛОЯ

Комплексная диэлектрическая проницаемость композита определялась методом линии передачи в коаксиальном волноводе по зарегистрированным S-параметрам. Параметры материала рассчитывались по методике NIST в диапазоне 10 МГц – 100 ГГц.



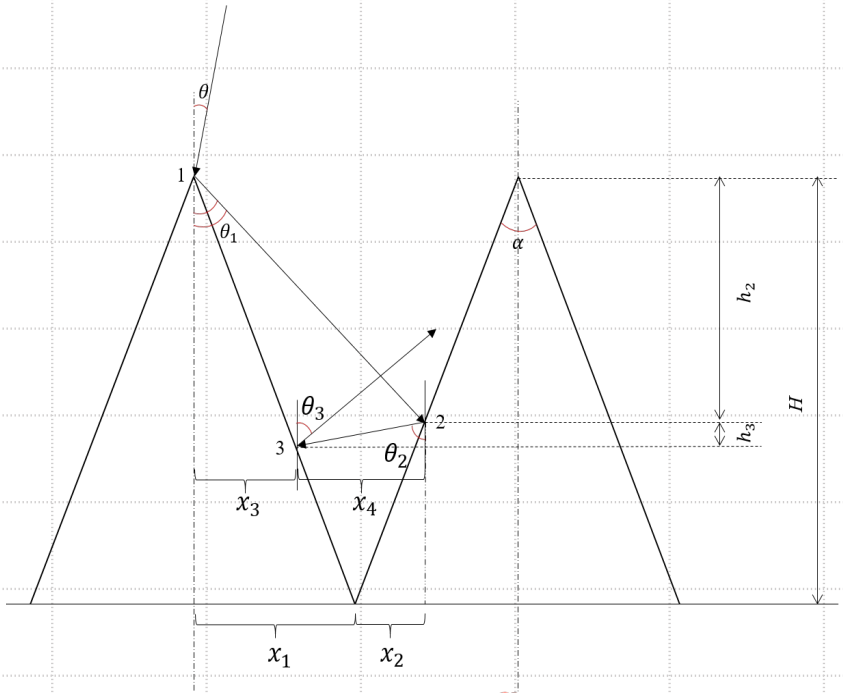

*Профиль напряжения |V(z)| вдоль линии на 0,3–10 ГГц. Серая полоса — образец композита.*

S11, S12, S21, S22 ⟶ ε’, ε’’




*Комплексная диэлектрическая проницаемость МУНТ-композита (10 МГц – 100 ГГц)*

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ПИРАМИДАЛЬНОГО ПОГЛОТИТЕЛЯ

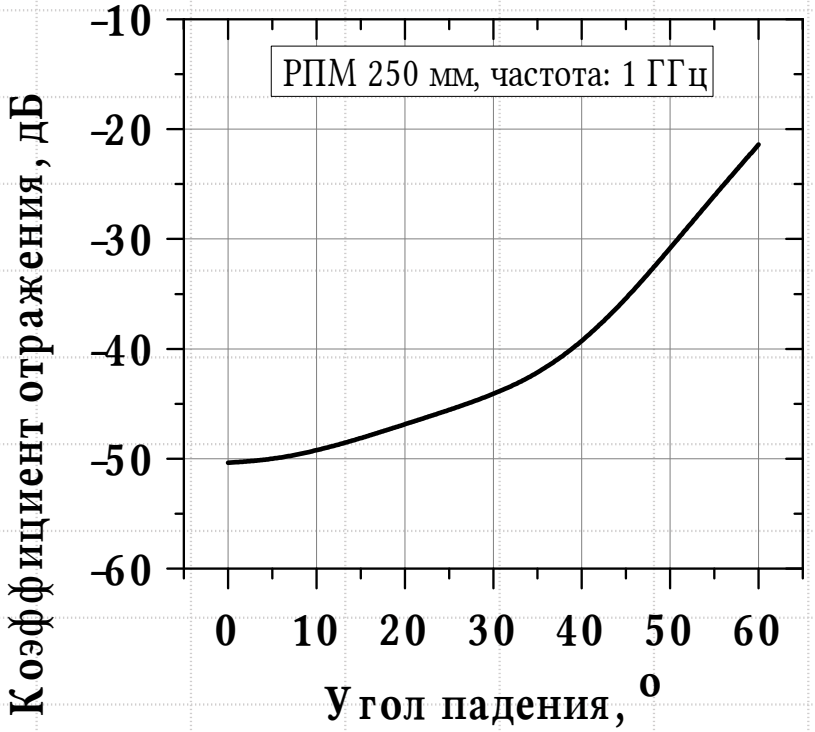



$$h_n = \frac{2\left(H - \sum_{i=1}^{n} h_i\right) \cdot tg\frac{\alpha}{2}}{\left(tg\theta_{n-1} + tg\frac{\alpha}{2}\right)}$$

где $\theta_{n-1} = \alpha(n-1) + \theta$

**Условие выхода луча:** $\sum_{i=1}^{N+1} h_n < 0$

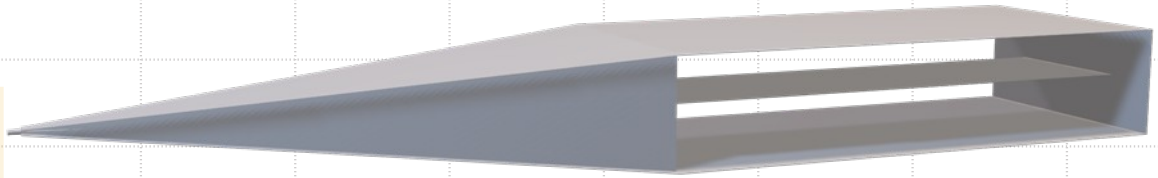
*Определение точек отражения пирамидального радиопоглощающего материала*




*Расчётная зависимость коэффициента отражения от угла падения при частоте 1 ГГц для радиопоглощающего покрытия (*высота пирамиды – 190 мм, длина основания – 60 мм, толщина подложки – 60 мм*)*

# РАЗРАБОТКА МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ОБРАЗЦОВ НА НИЗКИХ ЧАСТОТАХ

Для измерений на частотах до 300 МГц реализована измерительная ячейка размерами 500×205×1000 мм³ с шириной центрального проводника 280 мм, соединённая с 50-омным разъёмом переходом длиной 1050 мм на основе короткозамкнутой симметричной полосковой линии.



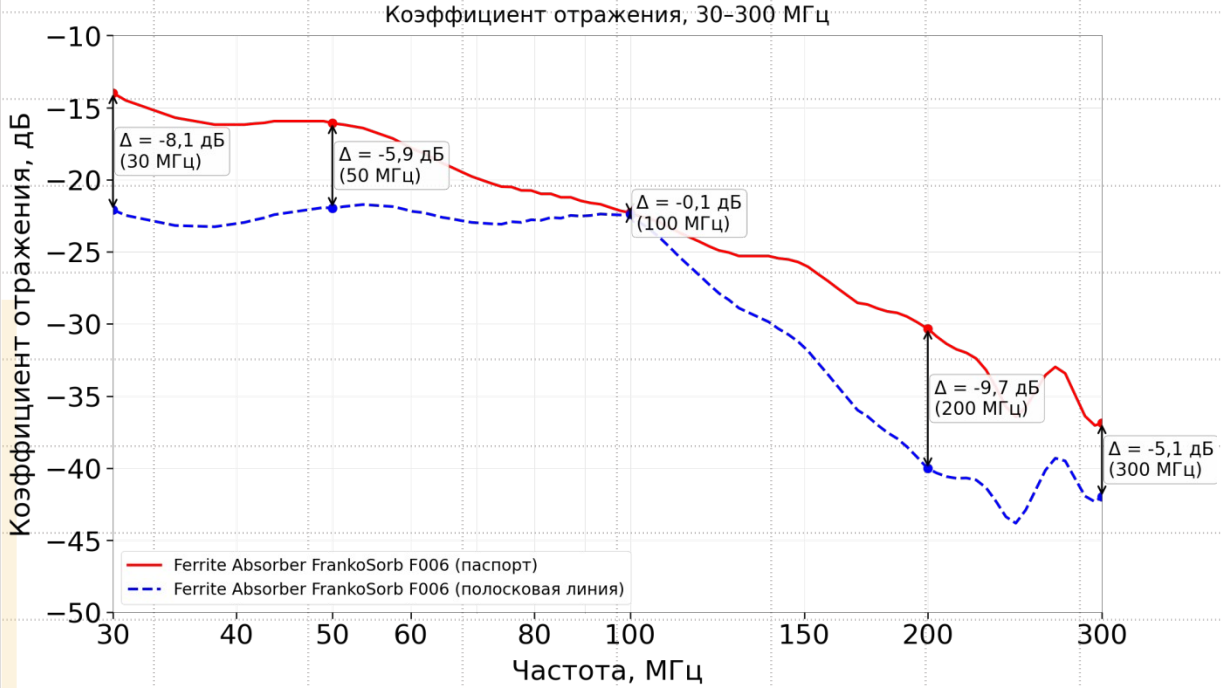
*Модель измерительной ячейки для измерения на низких частотах (30 МГц – 300 МГц)*

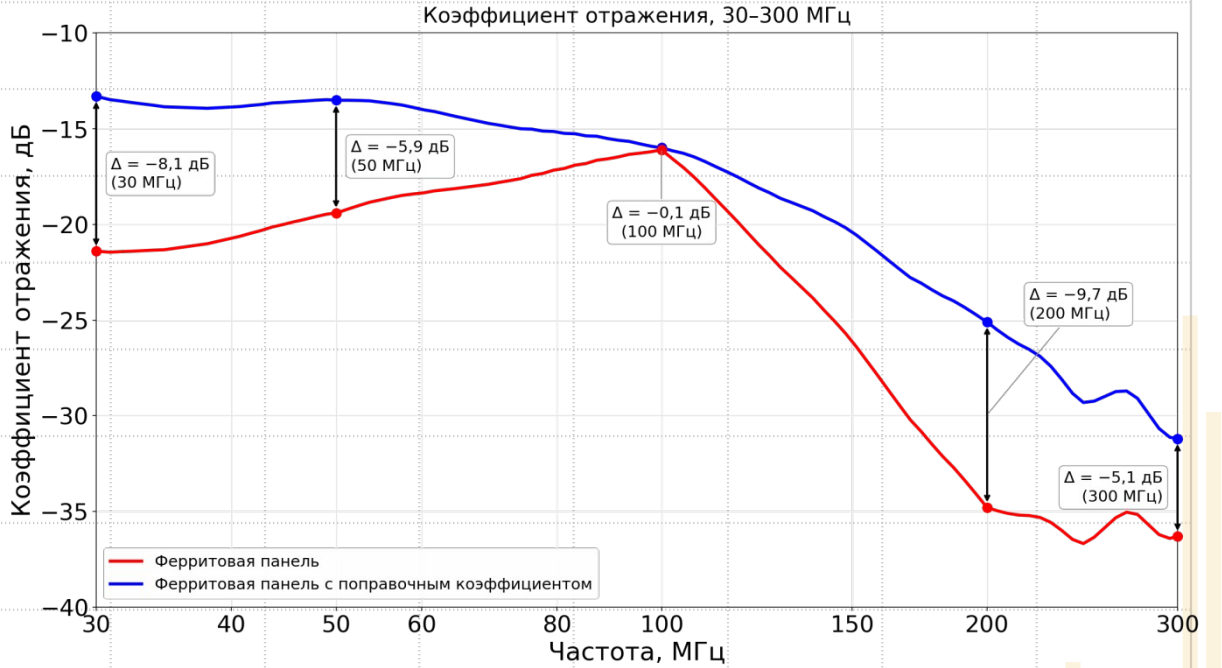
| *Модовый анализ поперечного сечения* | | |
|---|---|---|
| *Мода* | *$f_c$, МГц* | *Симметрия (по y/ по z)* |
| *Т-волна* | *0* | — |
| *Первая высшая, TE-тип (≈c/2W)* | *299,8* | *нечётная / чётная* |
| *Вторая высшая, TE-тип* | *386,6* | *чётная / нечётная* |
| *Первая высшая, возбуждаемая симметричным питанием* | *≈600* | *чётная / чётная* |
| *Первая TM-мода (оценка сверху)* | *≈1460* | — |

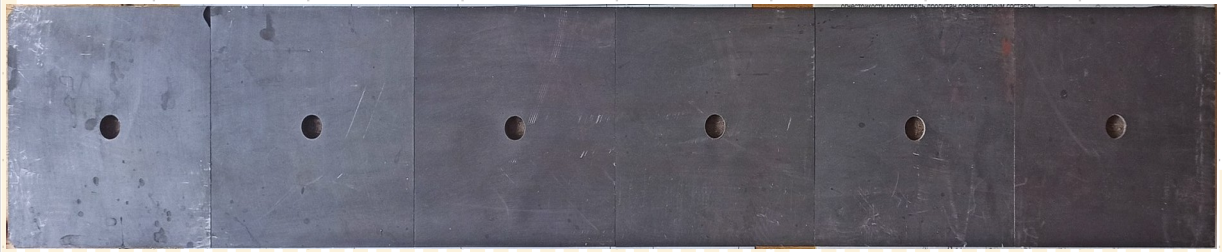
На 30 МГц все высшие моды далеко за отсечкой. На 300 МГц мода с $f_c$=299,8 МГц находится на границе, но нечётна по y и не возбуждается симметричным питанием; мода на 386,6 МГц нечётна по z и также не возбуждается симметричным центральным проводником. Первая возбуждаемая мода начинается около 600 МГц, вдвое выше верхней рабочей частоты.

# ВЕРИФИКАЦИЯ ИЗМЕРЕНИЙ НА НИЗКИХ ЧАСТОТАХ

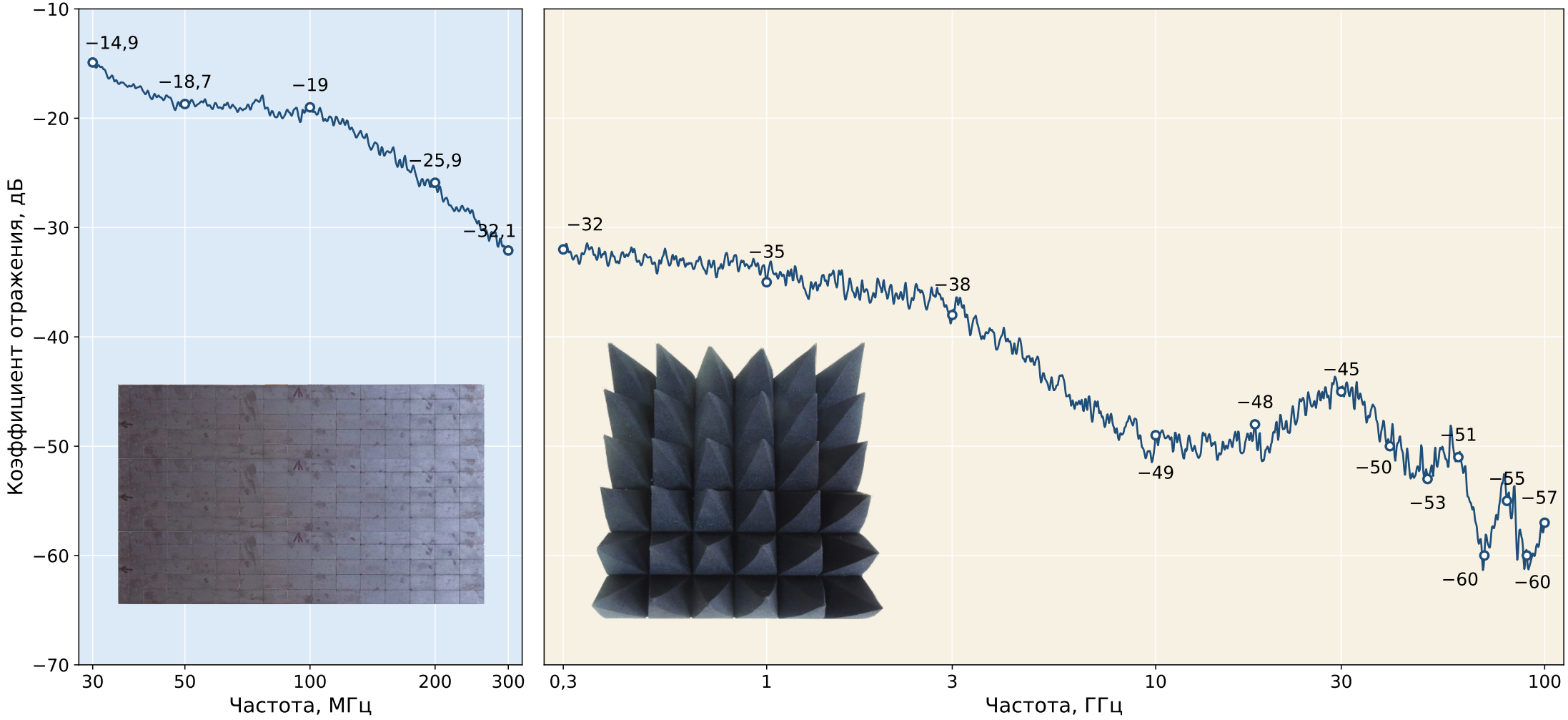
Измерения на расстояниях, малых по сравнению с длиной волны (30 МГц), имеют значительную погрешность из-за отличия фронта падающей на РПП волны от плоского, поэтому была выполнена калибровка измерительного канала по сертифицированной панели F006 (Frankonia, размер 100×500 мм) с последующим учётом поправочного калибровочного коэффициента при обработке данных.



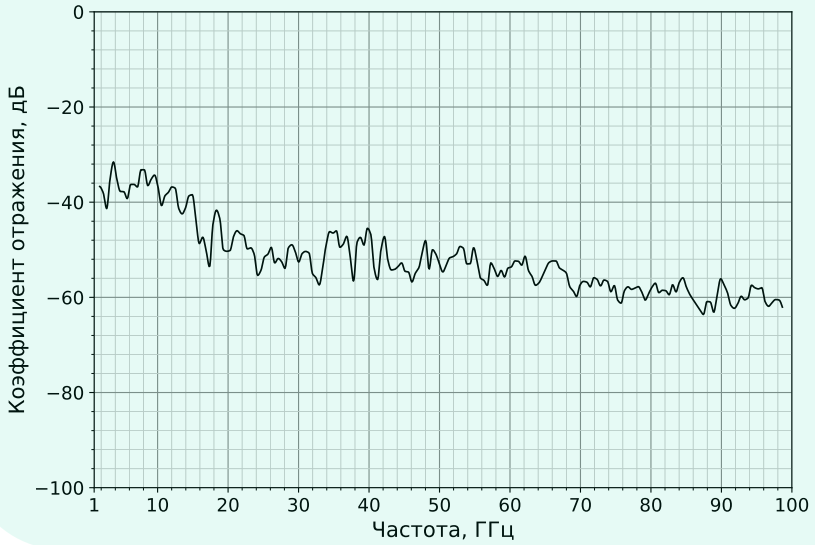
# ГИБРИДНОЕ РАДИОПОГЛОЩАЮЩЕЕ ПОКРЫТИЕ

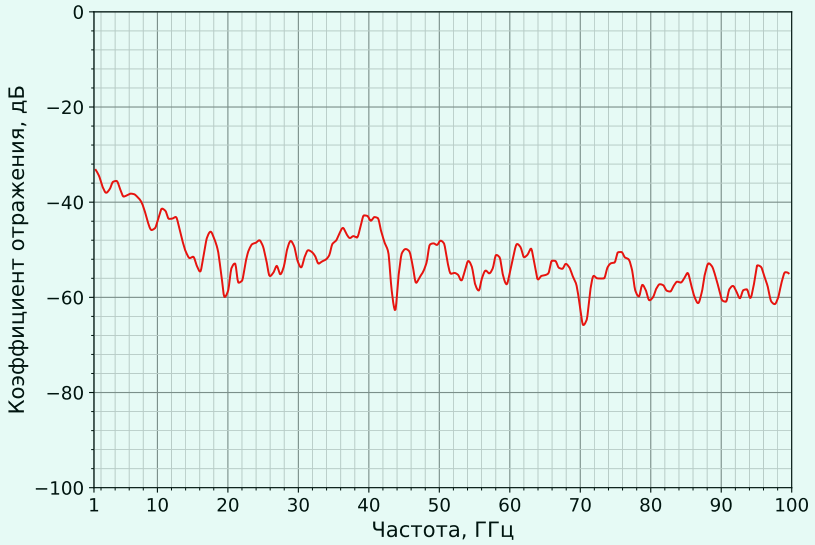


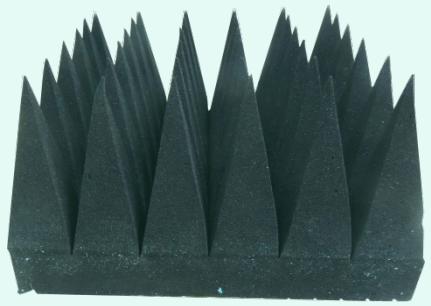

*Зависимость коэффициента отражения гибридного радиопоглощающего покрытия*

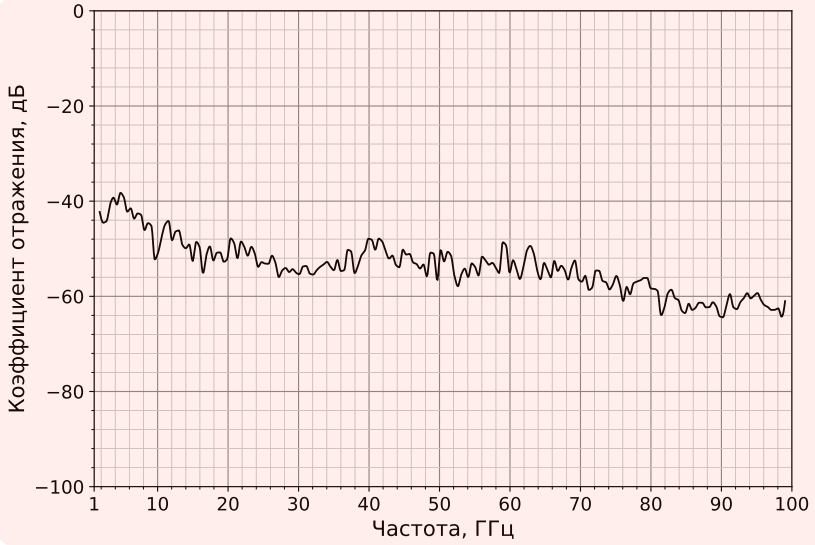
В диапазоне **30–300 МГц** коэффициент отражения изменяется от **−14,9 дБ** на 30 МГц **до −32,1 дБ** на 300 МГц — в этой области основной вклад вносит ферритовый слой. В диапазоне **0,3–3 ГГц** отражение составляет **−21...−38 дБ** — это переходная зона. В диапазоне **10–100 ГГц** коэффициент отражения стабильно не превышает **−45 дБ (от −45 до −60 дБ)**, что достигается за счёт доминирующего вклада диэлектрических потерь МУНТ-слоя и многократных переотражений в пирамидальных полостях.

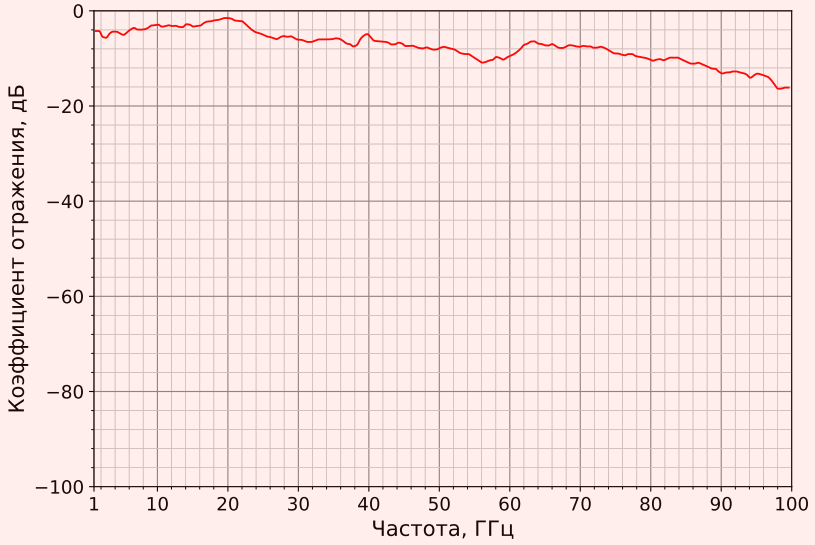
# ПРЕИМУЩЕСТВА РАЗРАБОТАННОГО МУНТ-ПИРАМИДАЛЬНОГО СЛОЯ

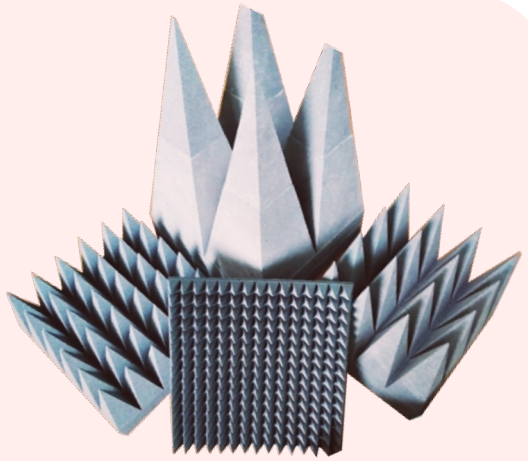




*Частотная зависимость коэффициентов отражения через образцы РПП до (черная линия) и после (красная линия) испытаний на осевое сжатие*

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

РАЗРАБОТАН ГИБРИДНЫЙ ДВУХСЛОЙНЫЙ РПП

30 МГц – 100 ГГц

ПИРАМИДАЛЬНЫЙ СЛОЙ (10 – 100 ГГц)

↓

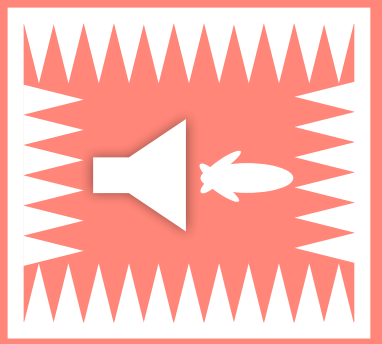
–40 … –60 дБ

ФЕРРИТ (30 – 300 МГц)

↓

–14,9 … –32,1 дБ

ПРИМЕНЕНИЕ:



БЕЗЭХОВЫЕ КАМЕРЫ

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПЛОЩАДКИ

# СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ