



Монолитный фильтр на полосковых резонаторах, изготовленный по технологии многослойных печатных плат

докладчик: к.ф.-м.н. Бальва Ярослав Федорович (ИФ СО РАН)



СВЧ-фильтры – важнейшие элементы различных радиосистем, обеспечивающие частотную селекцию сигналов



Основные требования, предъявляемые к современным СВЧ-фильтрам

Электрические

Высокая избирательность

Высокая дальняя режекция

Высокие обратные потери (низкий КСВН)

Низкие вносимые потери

Высокая равномерность АЧХ и ГВЗ

Высокая эффективность экранирования

Работа при повышенной мощности

Технические

Миниатюрность

Технологичность в производстве

Удобство монтажа

Надежность: способность сохранять характеристики

- В широком диапазоне температур
- При высоких механических нагрузках
- И пр.

Экономические

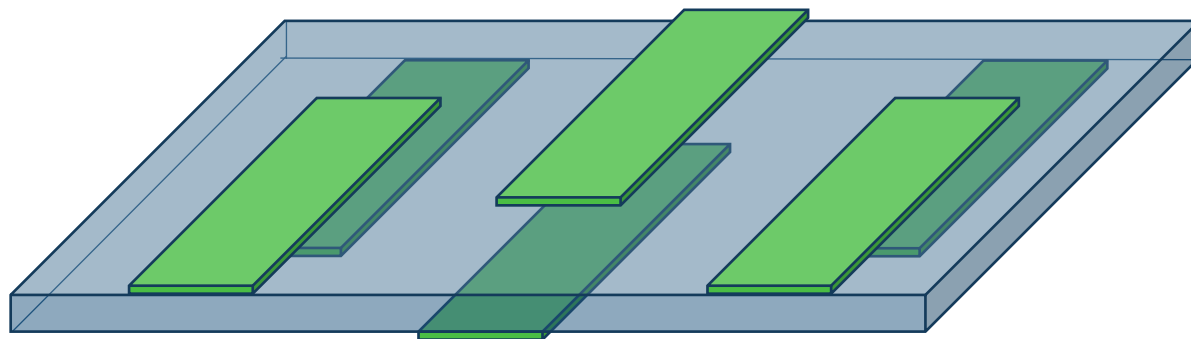
Низкая стоимость

В некоторых случаях к одному частотно-селективному устройству может применяться 30 и более требований только к электрическим характеристикам!



Традиционные принципы построения СВЧ-фильтров

- Активные СВЧ-фильтры
- СВЧ-фильтры на поверхностных акустических волнах
- СВЧ-фильтры на основе коаксиальных резонаторов
- СВЧ-фильтры на основе диэлектрических резонаторов
- СВЧ-фильтры на основе волноводных резонаторов, включая SIW
- СВЧ-фильтры на основе сосредоточенных LC -элементов
- СВЧ-фильтры на основе микрополосковых и полосковых резонаторов



СВЧ-фильтры на основе микрополосковых и полосковых резонаторов представляют собой металло-диэлектрические структуры в виде плоских проводников, разделенных слоями диэлектриков



Доступные технологии для изготовления СВЧ-фильтров на основе микрополосковых и полосковых резонаторов

Трафаретные технологии

- LTCC – низкотемпературная совместно обжигаемая керамика
- HTCC – высокотемпературная совместно обжигаемая керамика

Комбинирование технологий фотолитографии и нанесения диэлектрических слоев методом осаждения

- PECVD – осаждение диэлектрических слоев из газовой фазы
- ALD – атомно-слоевое осаждение диэлектрических слоев

Традиционные технологии

- Использование жестких металлизированных подложек, монтируемых в корпус (микрополосковые конструкции и конструкции на подвешенной подложке)
- PCB – технология печатных плат



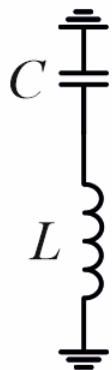
Понизить частоту рабочей моды резонатора,
не меняя его размеры, значит уменьшить его
размеры на исходной частоте



Многорезонаторные системы

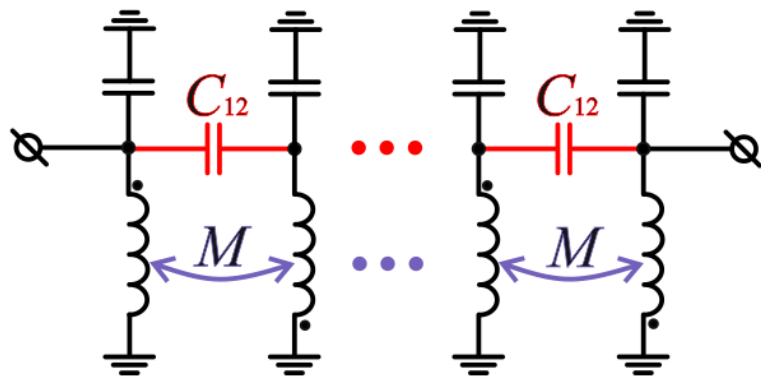
Резонатор

Много связанных резонаторов



$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{CL}}$$

$$Q_0 = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$$

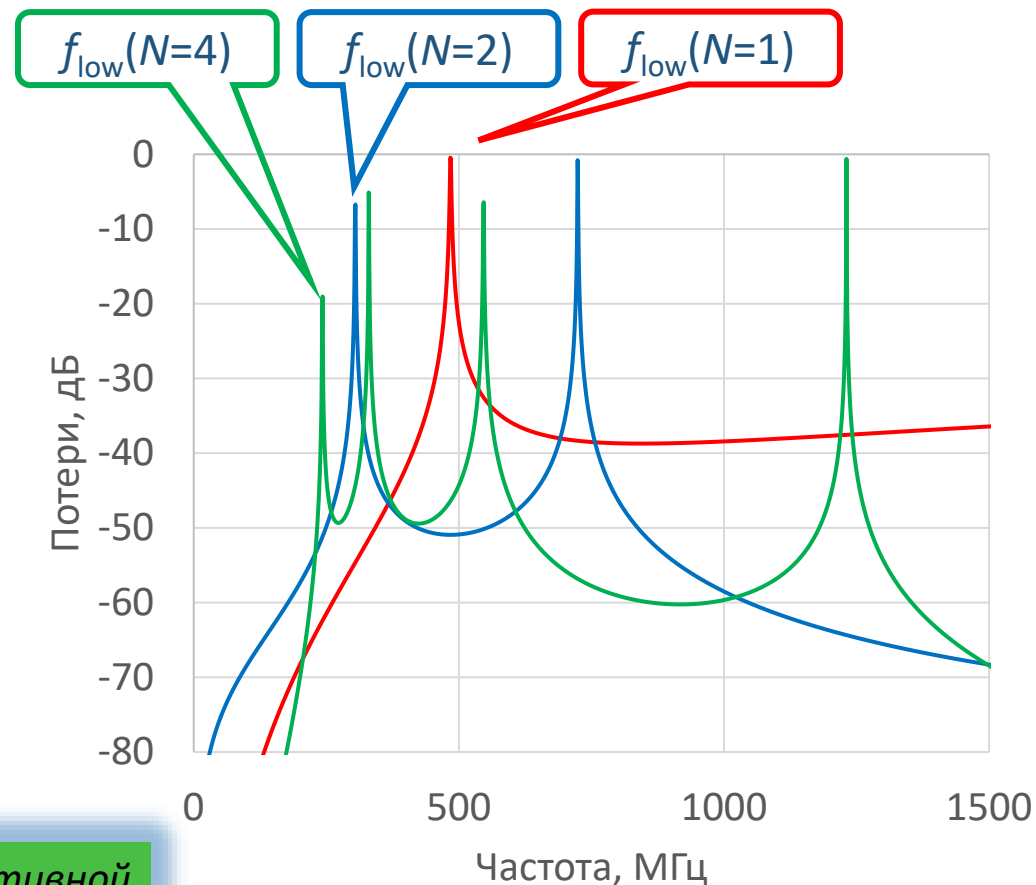


$$f_{\text{low}} = \frac{1}{\sqrt{N}} f_0$$

$$Q_{\text{low}} = \sqrt{N} Q_0$$

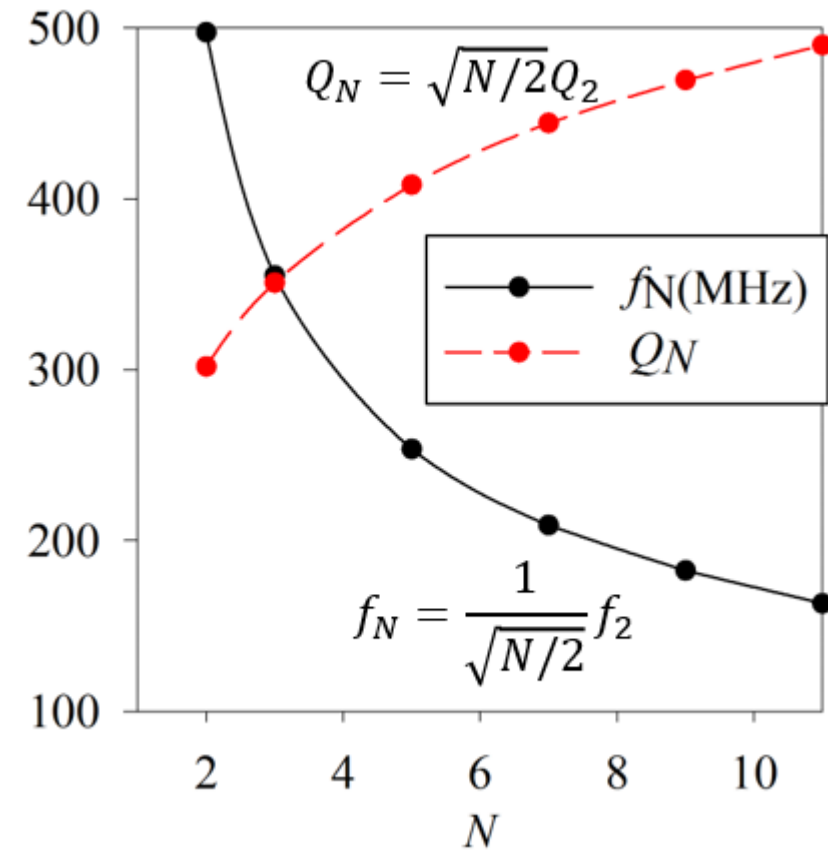
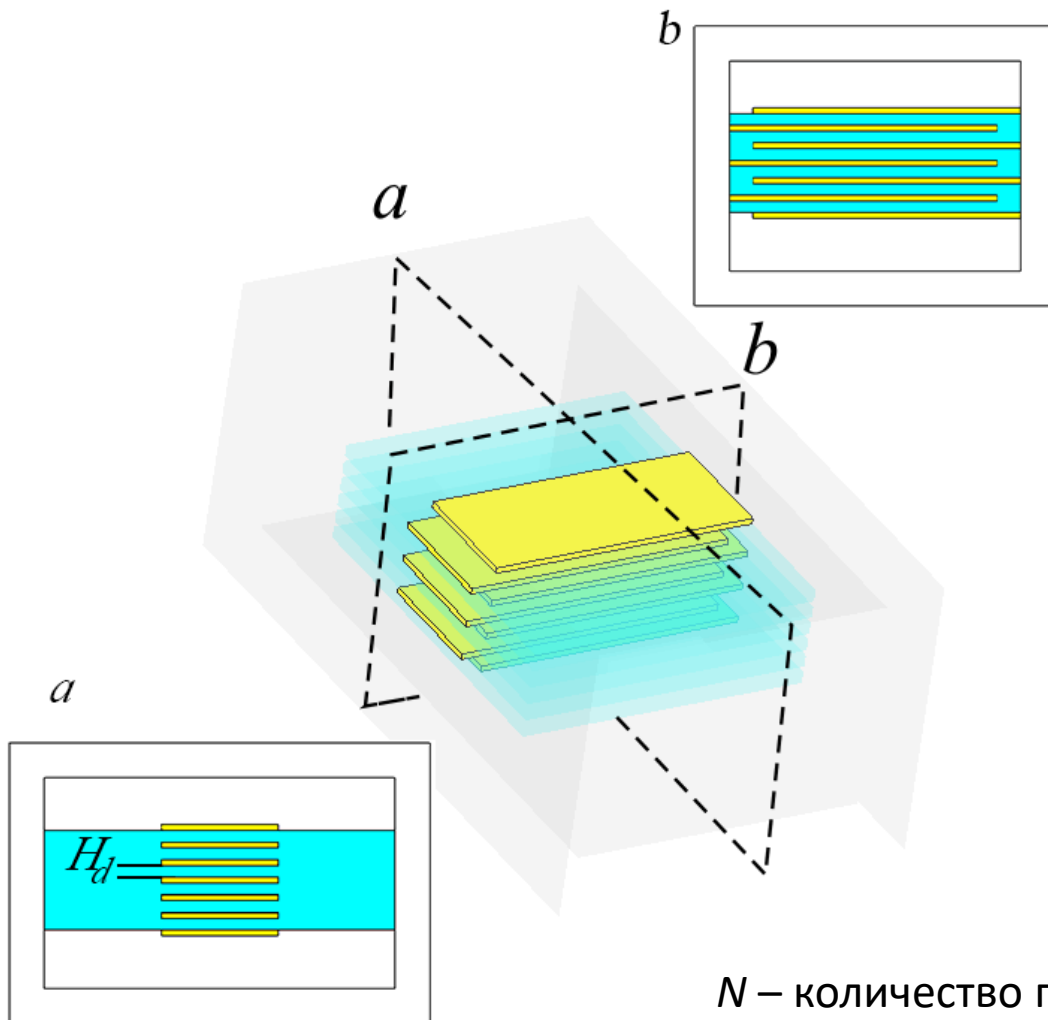
N – количество связанных резонаторов

При увеличении количества связанных резонаторов в схеме с индуктивной связью выше критической происходит понижение резонансной частоты низжайшей моды колебаний и повышение ее добротности





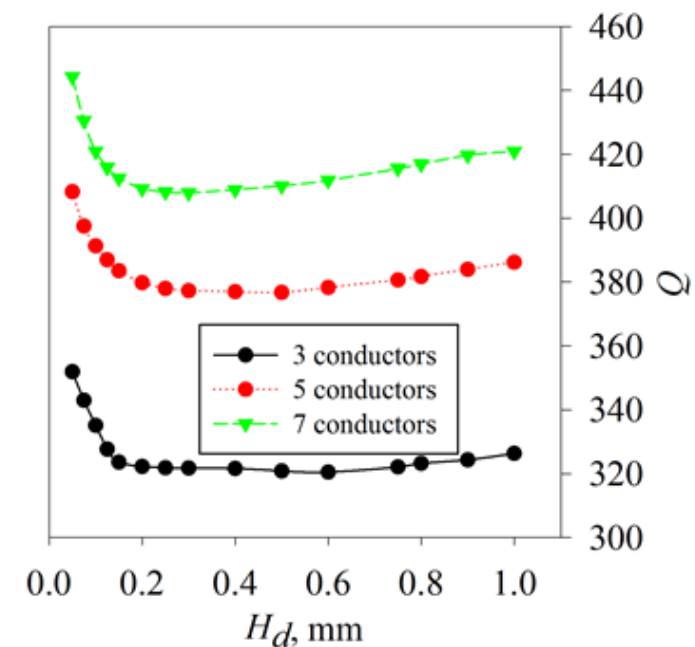
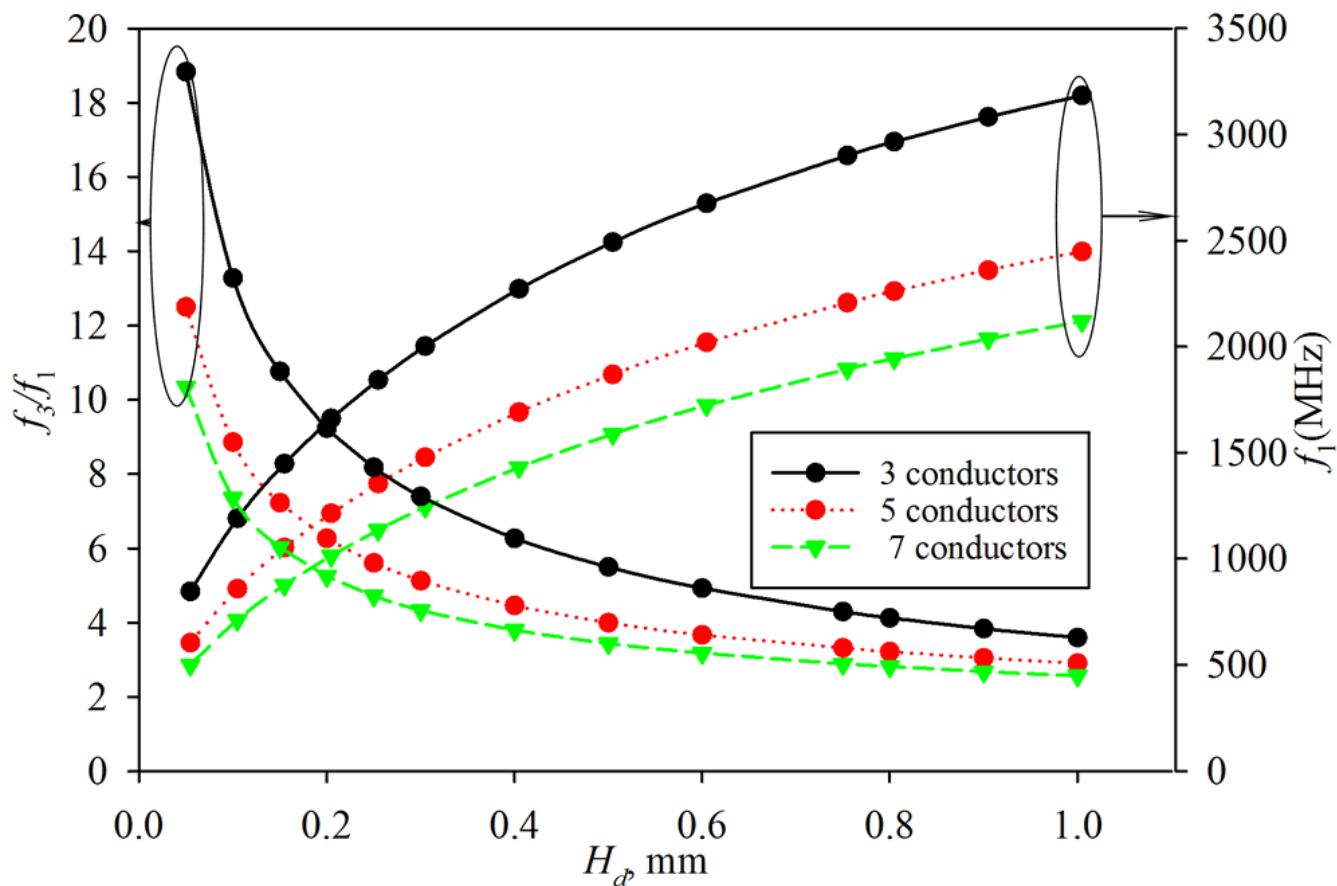
Полосковый многопроводниковый резонатор со встречно-штыревой структурой (ВШС) проводников



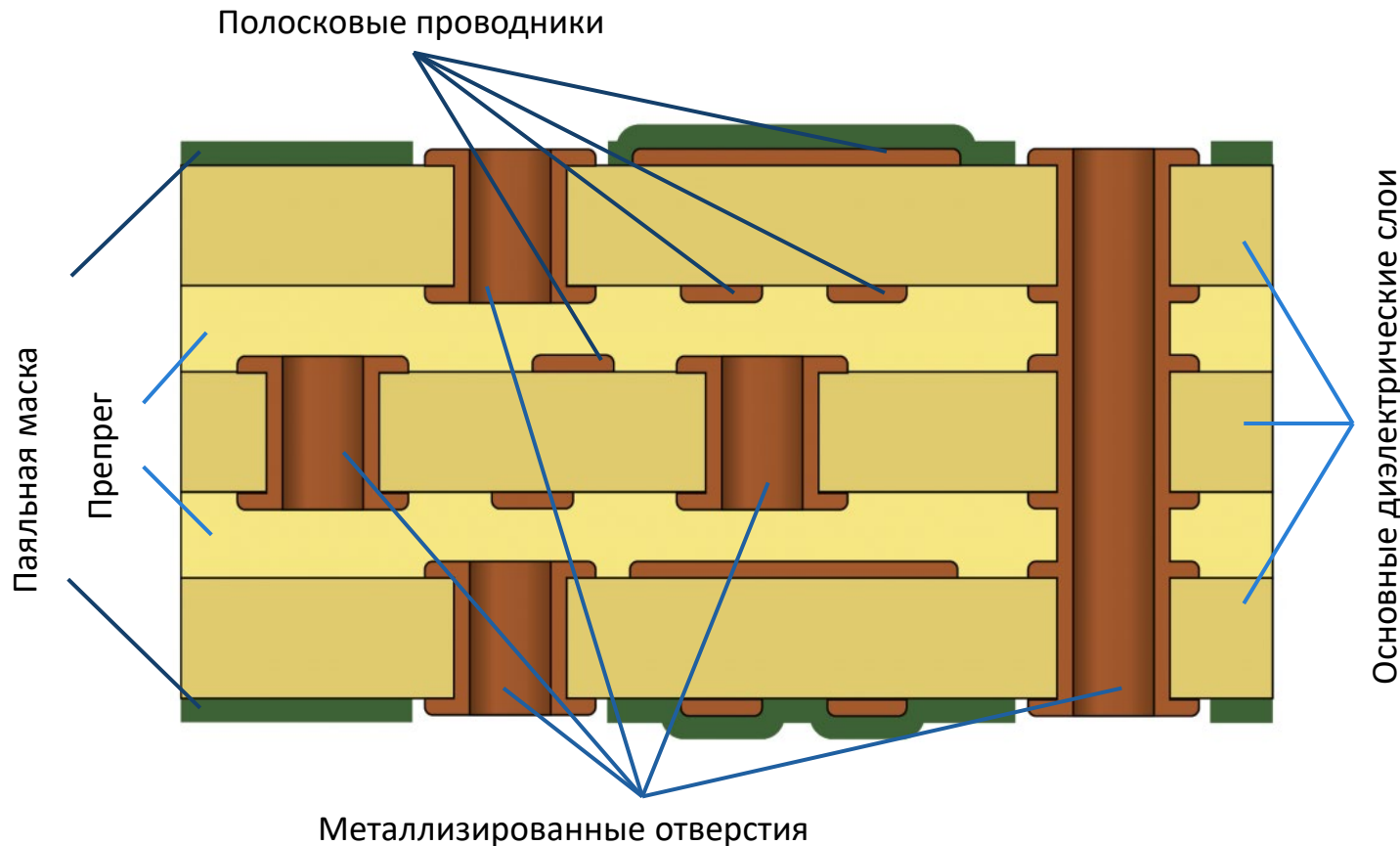
N – количество проводников в ВШС-резонаторе



Полосковый многопроводниковый резонатор со встречно-штыревой структурой (ВШС) проводников



Уменьшение толщины диэлектрических слоев H_d понижает частоту рабочей моды колебаний f_1 и одновременно повышает частоту первой паразитной моды f_3

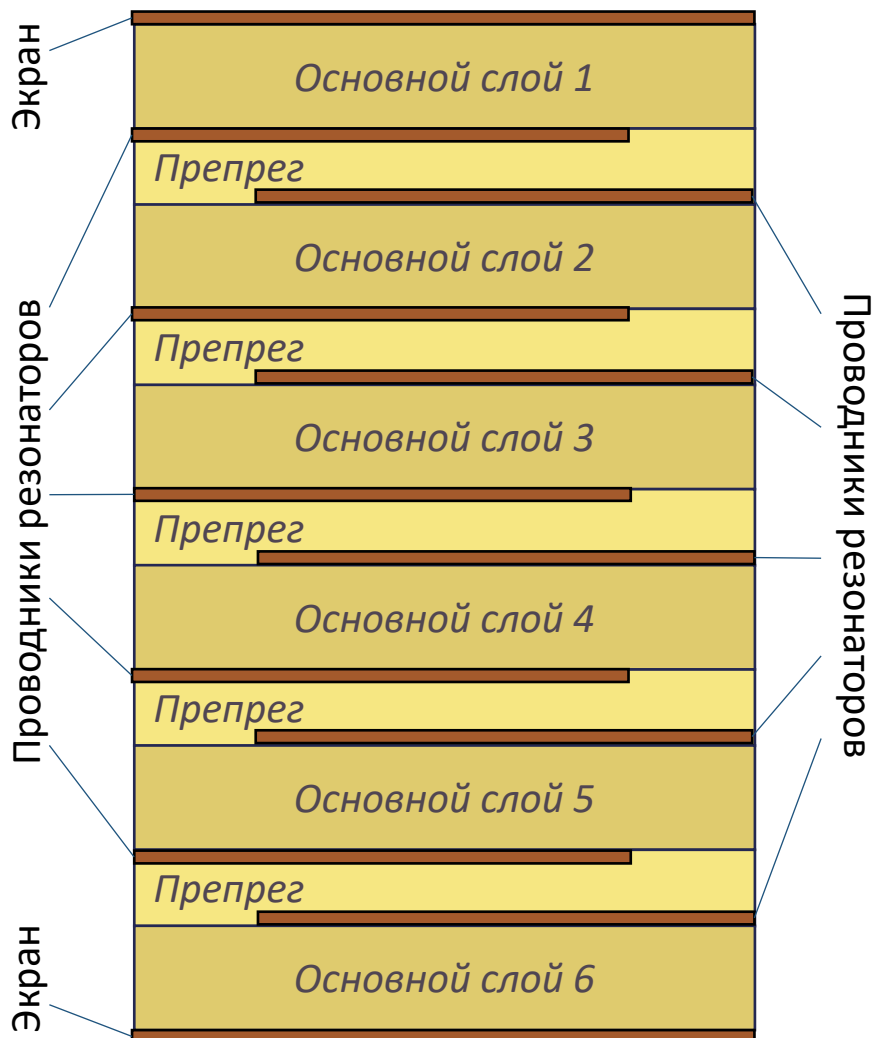


- Для соединения диэлектрических пластин (основных слоев) применяется прессование.
- В качестве связующего элемента используется специальный материал – препрег, диэлектрические потери которого как правило выше диэлектрических потерь основных слоев.
- В процессе прессования толщина препрега значительно изменяется по площади в соответствии с рисунком и толщиной полосковых проводников, приводя к изменению не только резонансных частот, но и величины связей между резонаторами.
- Внешние металлические слои стека выполняют роль экранов.



Особенности технологии РСВ

Использование препрега в качестве основного слоя



Материалы

Основные слои 1 и 6 – F4BM255 ($\epsilon_r = 2.55$, толщина 2 мм)

Основные слои 2-5 – RO4003C™ ($\epsilon_r = 3.38$, толщина 0.203 мм)

Препрег – RO4450B™ ($\epsilon_r = 3.30$, толщина 0.091 мм)

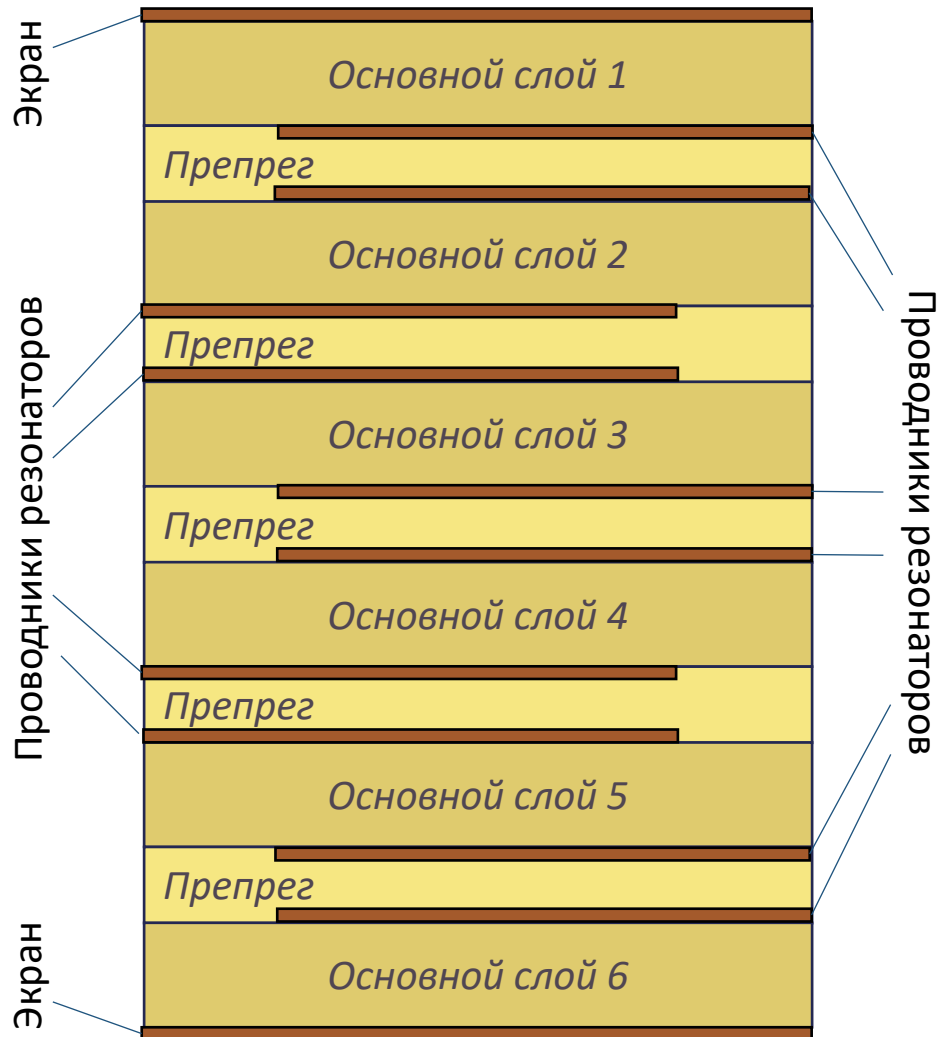
Значения частот первой моды колебаний 10-проводникового ВШС-резонатора в МГц

Расчеты	Измерения		Среднее отклонение от расчета
	Среднее	Разброс	
501.6	537.0	3.0 (0.6%)	35.8 (7.1%)
1037.8	1121.5	11.0 (1.0%)	83.7 (8.1%)
2061.6	2287.2	19.3 (0.8%)	225.6 (10.9%)
3900.0	4480.0	63.7 (1.4%)	580 (14.9%)



Особенности технологии РСВ

Концепция двойных проводников



Материалы

Основные слои 1 и 6 – F4BM255 ($\epsilon_r = 2.55$, толщина 2 мм)
 Основные слои 2-5 – RO4003C™ ($\epsilon_r = 3.38$, толщина 0.203 мм)
 Препрег – RO4450B™ ($\epsilon_r = 3.30$, толщина 0.091 мм)

Значения частот первой моды колебаний 5(x2)-проводникового ВШС-резонатора в МГц

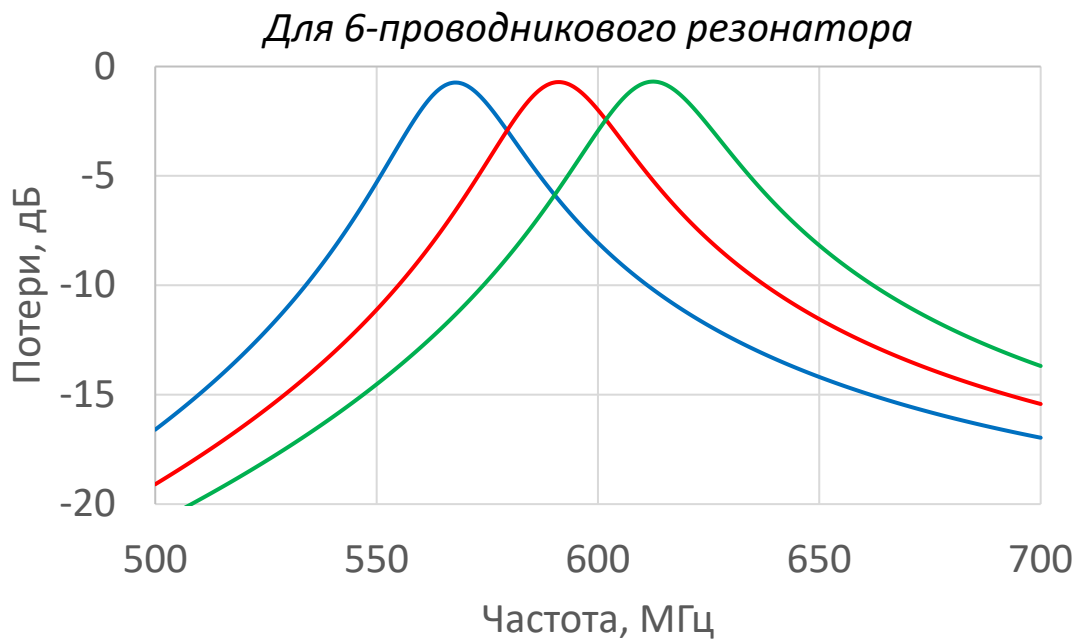
Расчеты	Измерения		Среднее отклонение от расчета
	Среднее	Разброс	
535.4	522	1.5 (0.3%)	-13.9 (2.6%)
942.6	927.6	3.9 (0.4%)	-15.0 (-1.6%)
1943.1	1924.8	4.1 (0.2%)	-18.3 (-0.9%)
4070.9	4104.5	26.8 (0.7%)	33.6 (0.8%)



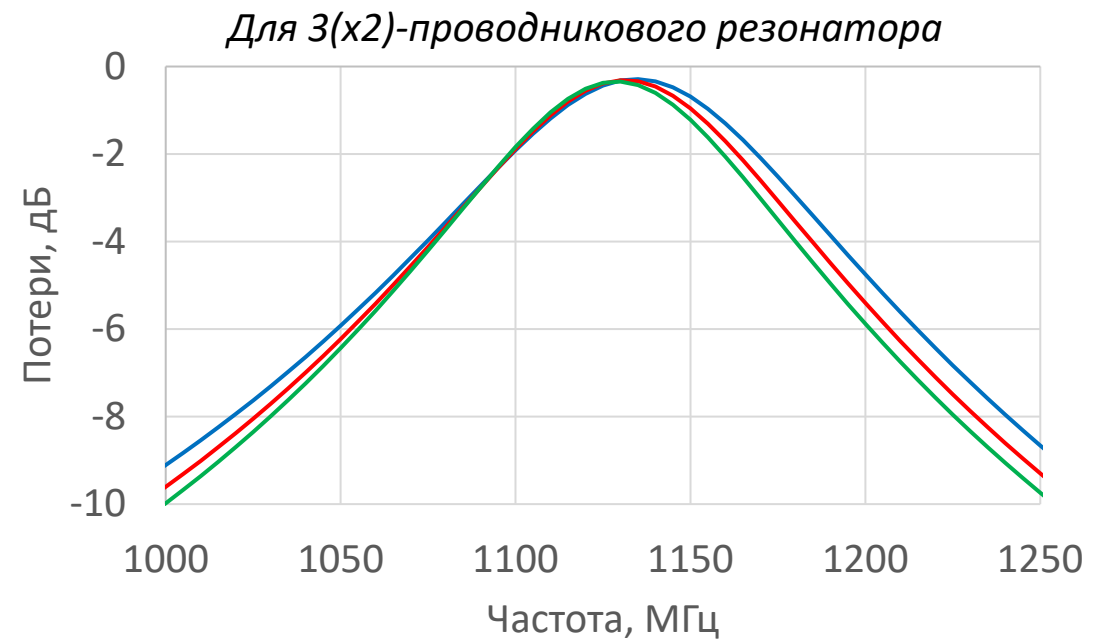
Особенности технологии РСВ

Концепция двойных проводников

*Зависимость частоты первой моды колебаний резонаторов
от толщины препрега в стеке из 4 основных слоев
(Параметры проводников и пр. одинаковы для обоих резонаторов)*



— Номинал - 10% — Номинал — Номинал + 10%



— Номинал - 50% — Номинал — Номинал + 50%

Номинальное значение толщины препрега 0.091 мм

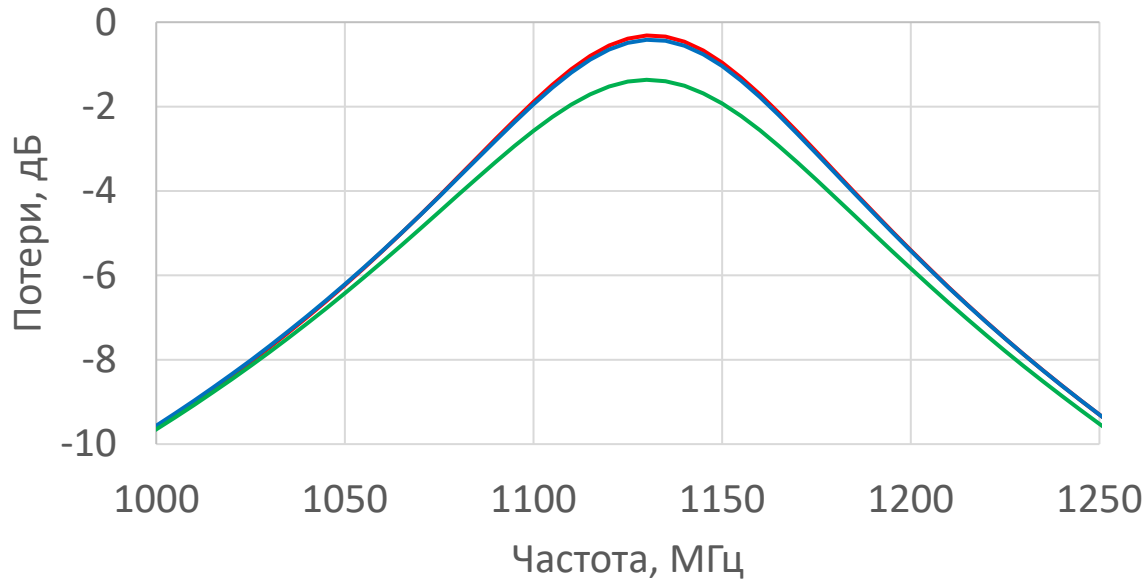


Особенности технологии РСВ

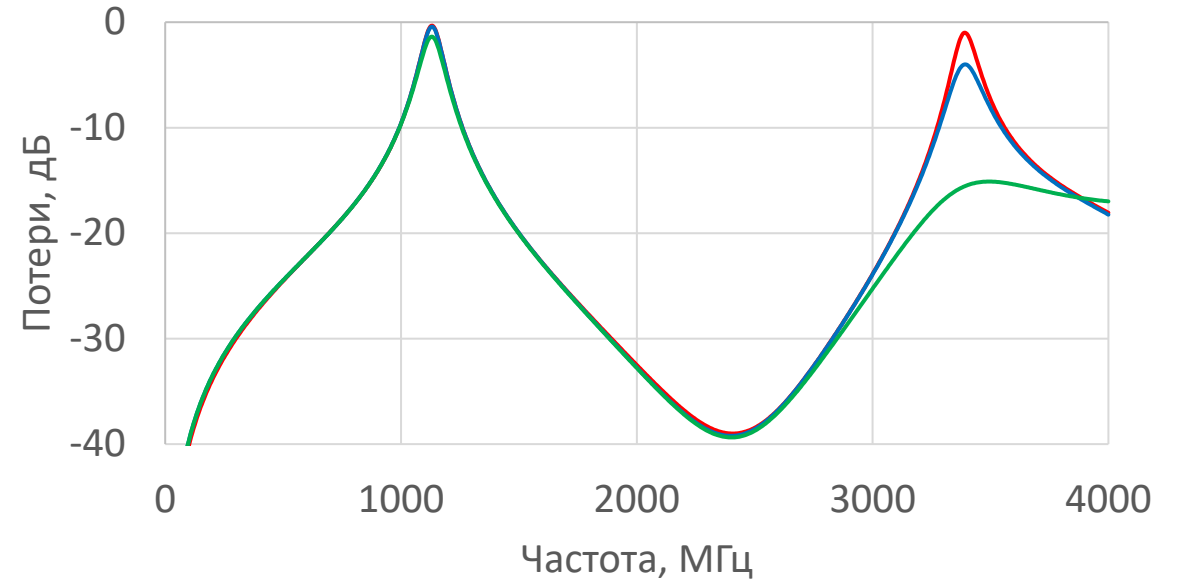
Концепция двойных проводников

Зависимость потерь на частоте первой моды колебаний
3(x2)-проводникового резонатора *от $\tan\delta$ препрега* в стеке из 4 основных слоев

В узком диапазоне частот



В широком диапазоне частот



— Номинал — Номинал x10 — Номинал x100

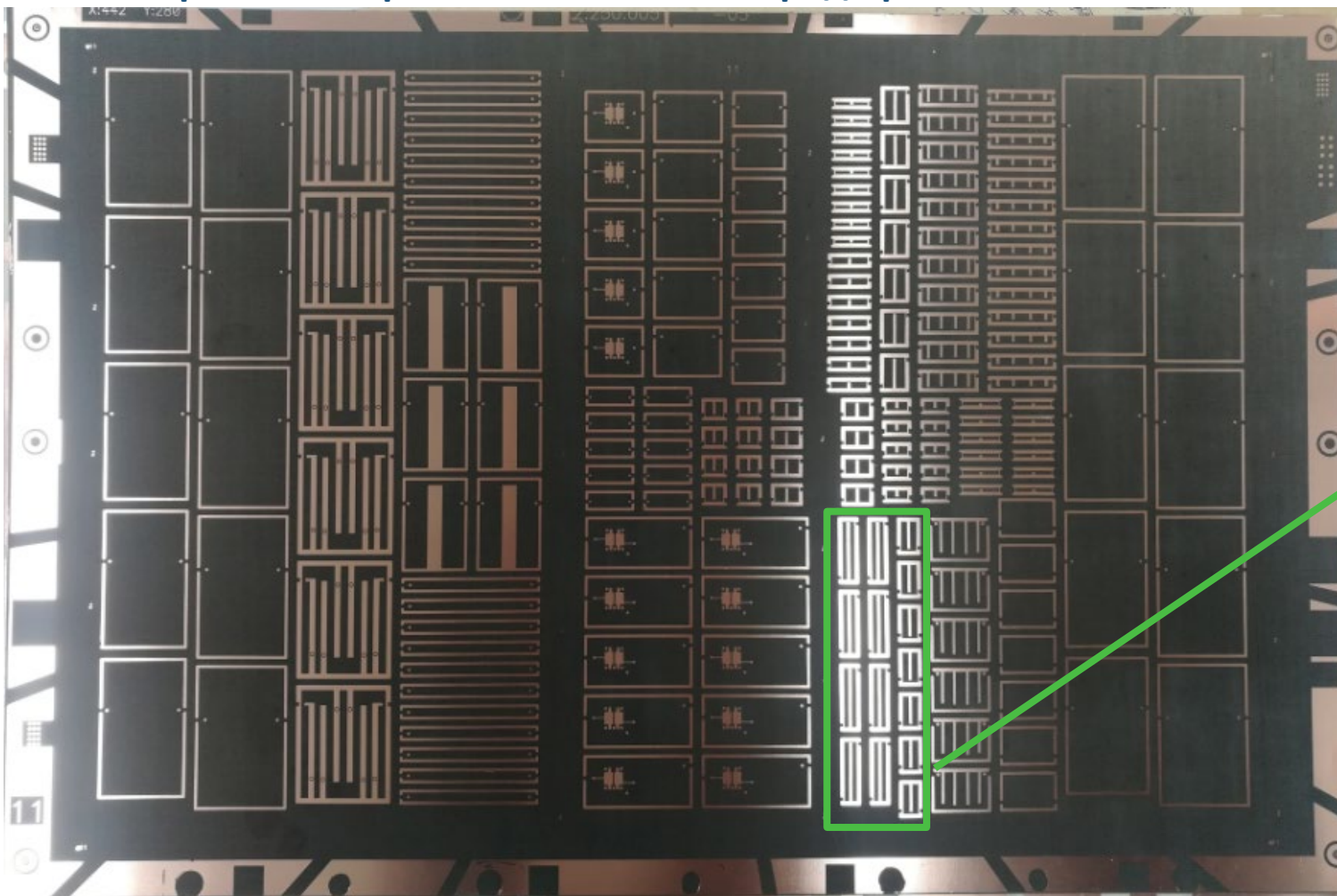
— Номинал — Номинал x10 — Номинал x100

Номинальное значение $\tan\delta = 0.0043$

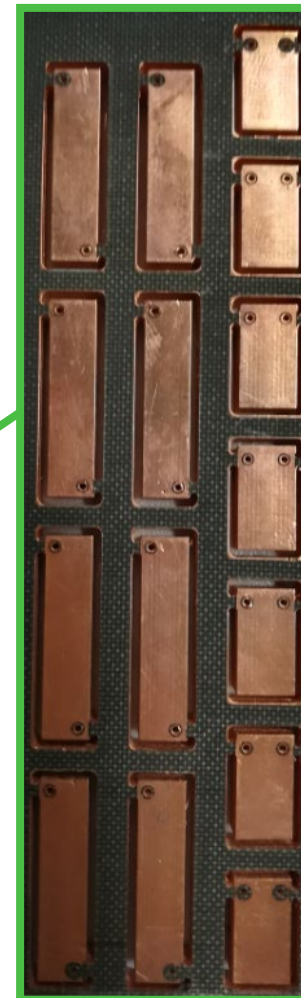


Стадии изготовления многослойной печатной платы

Фрагмент верхнего листа стека перед прессованием

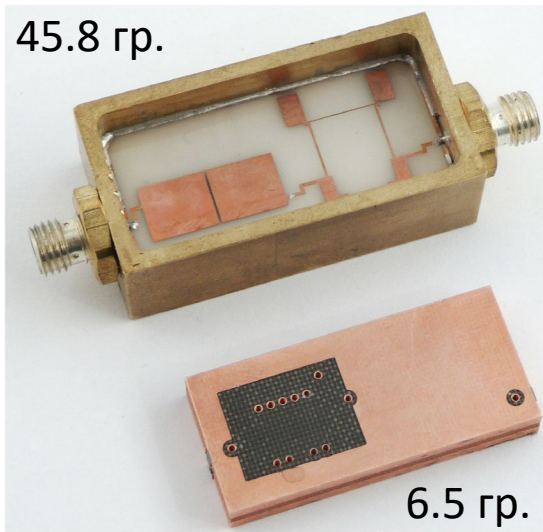


Фрагмент готового стека



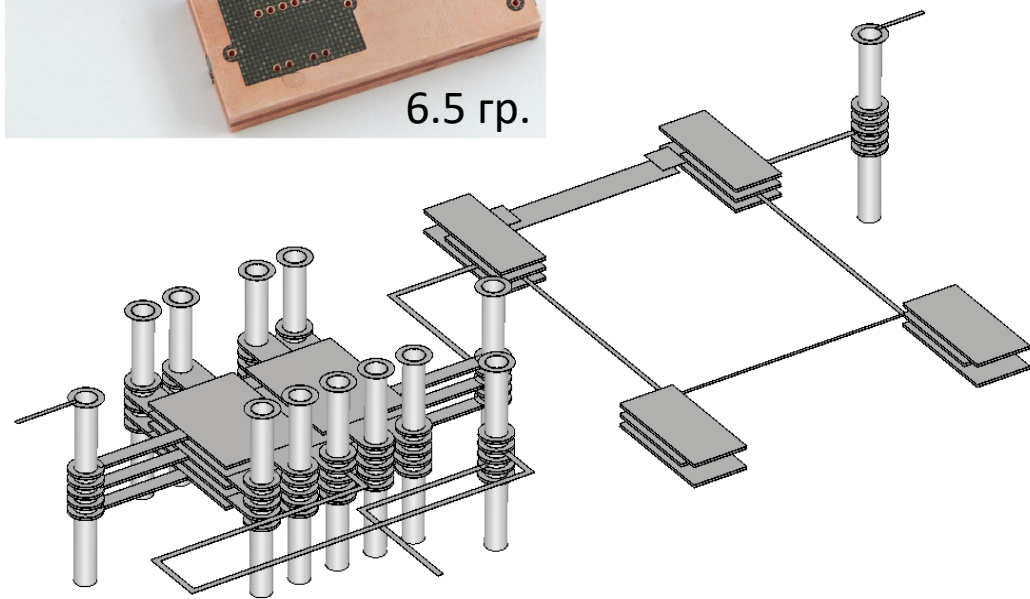


Монолитный широкополосный фильтр L-диапазона

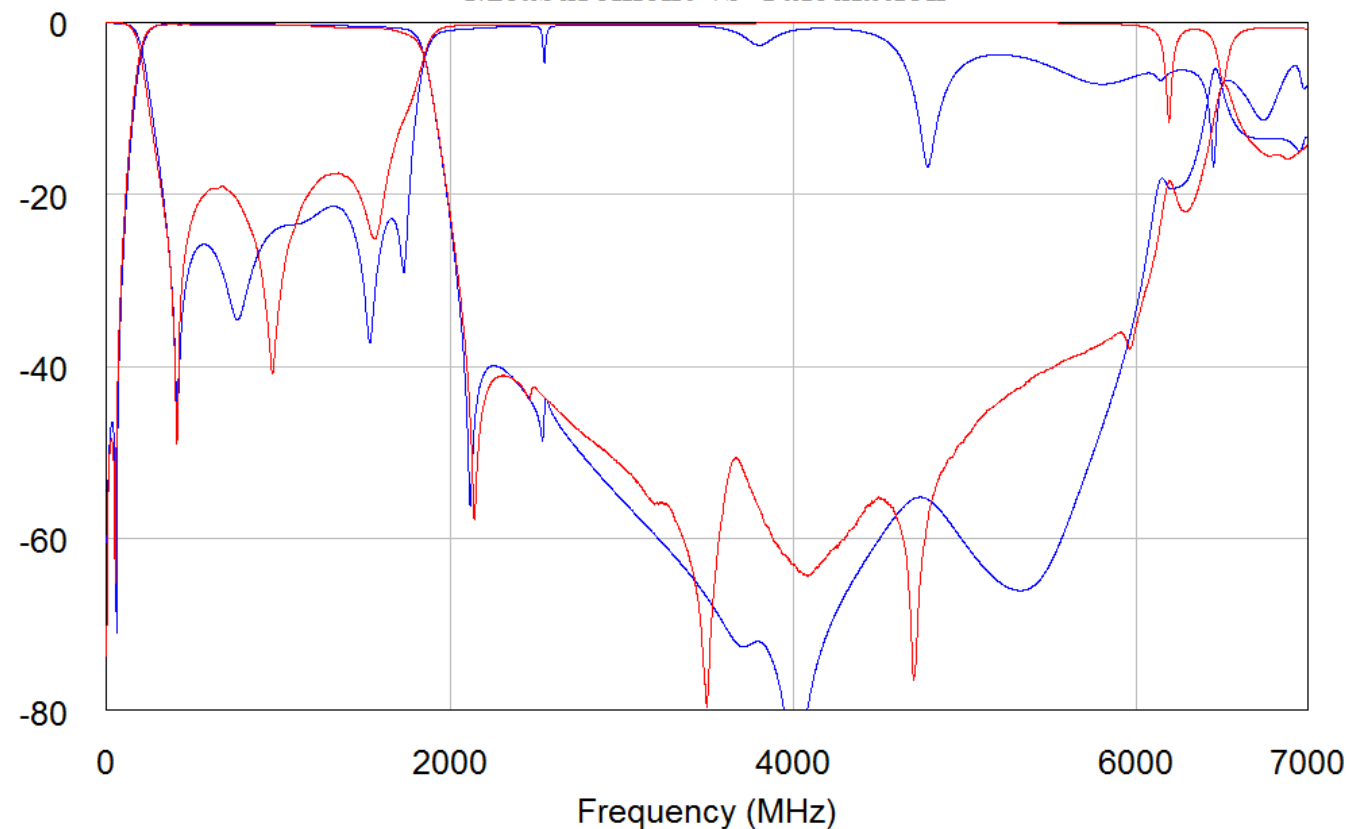


45.8 гр.

6.5 гр.



Measurement vs Calculation



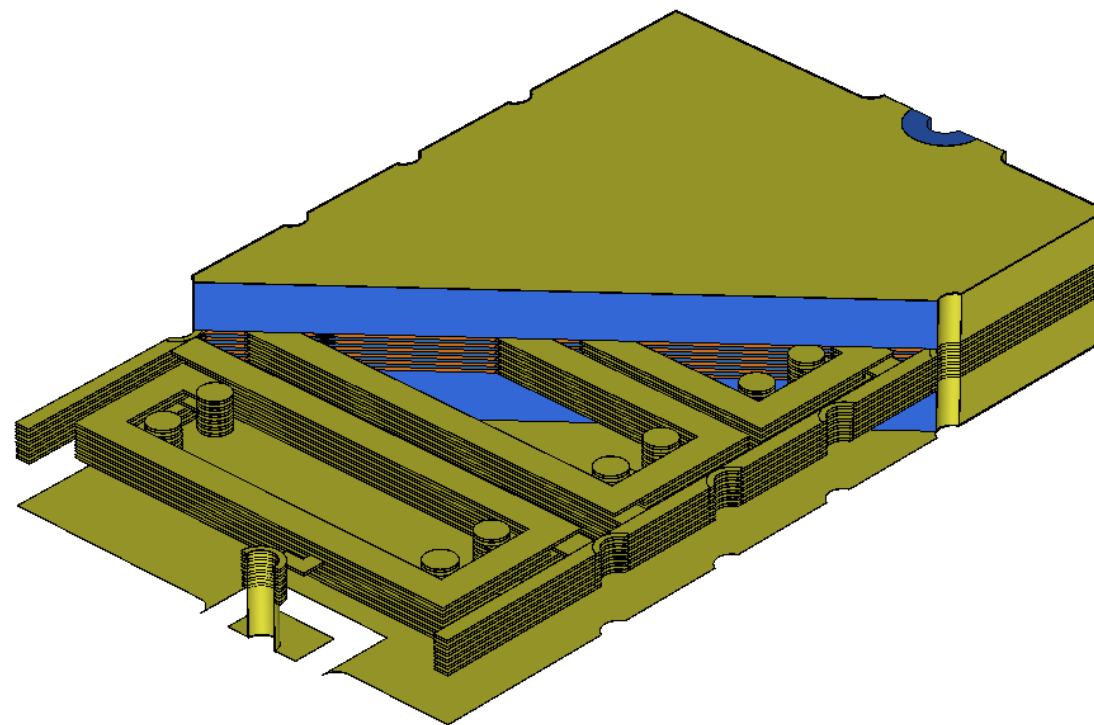
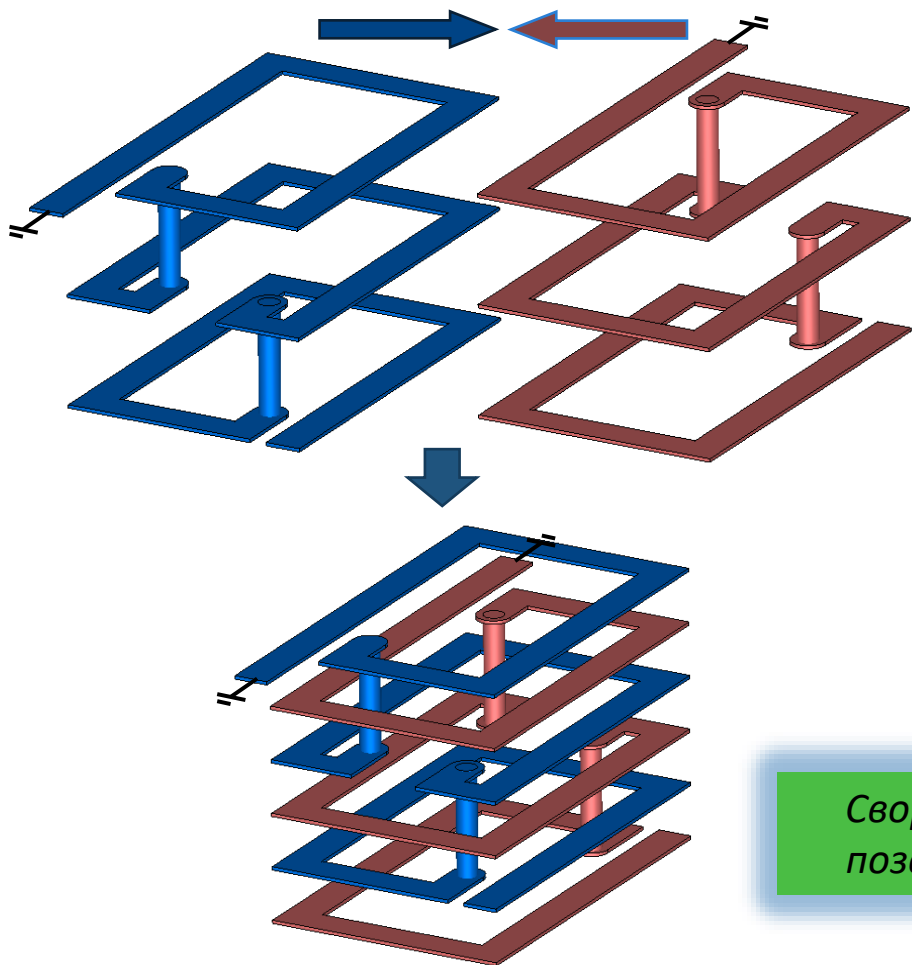


Сворачивание проводников резонаторов в двойные спирали позволяет существенно уменьшить размеры резонаторов



Монолитный фильтр VHF-диапазона четвертого порядка с шириной полосы заграждения по -38 дБ более $16 f_0$

Двухспиральный полосковый резонатор



Сворачивание проводников резонаторов в двойные спирали позволяет существенно уменьшить размеры резонаторов



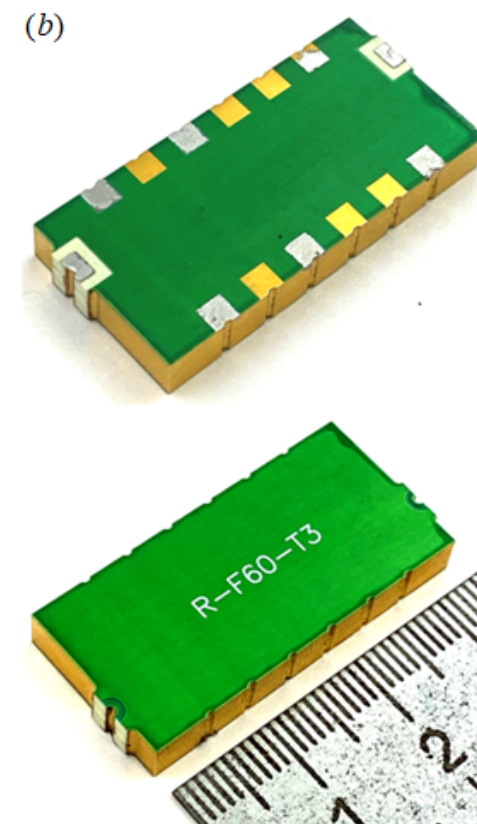
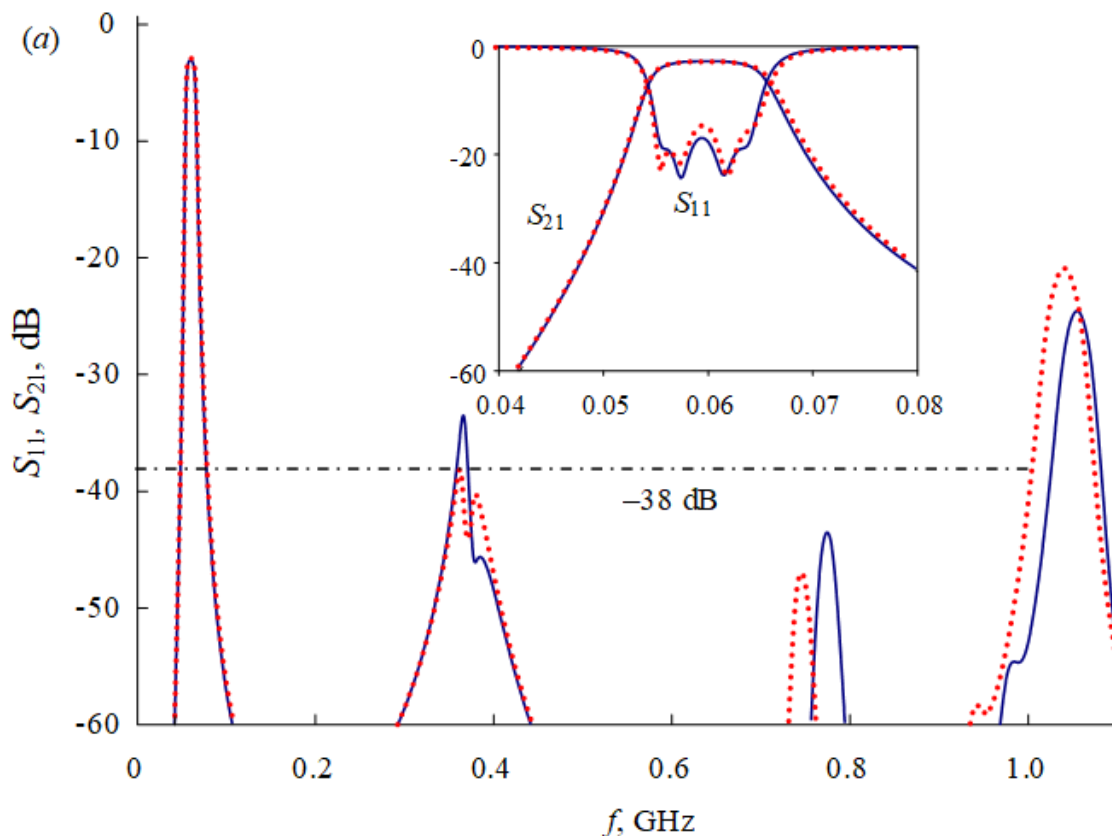
Монолитный фильтр VHF-диапазона четвертого порядка с шириной полосы заграждения по -38 дБ более $16 f_0$

Параметры полосы пропускания

- Центральная частота: **60 МГц**
- Относительная ширина по -3 дБ: **18%**
- Минимальные прямые потери: **3 дБ**
- Максимальные обратные потери: **14 дБ**

Технические параметры

- Габариты: **34×16.5×4.3 мм**
- Масса: **5 г**
- Предельная мощность: **10 Вт**





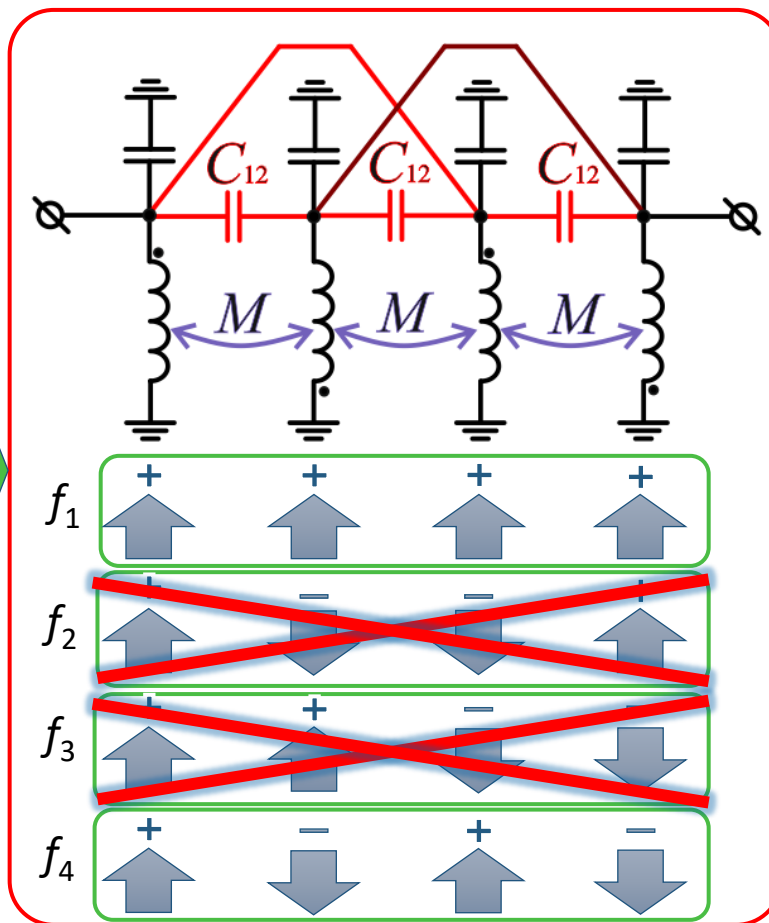
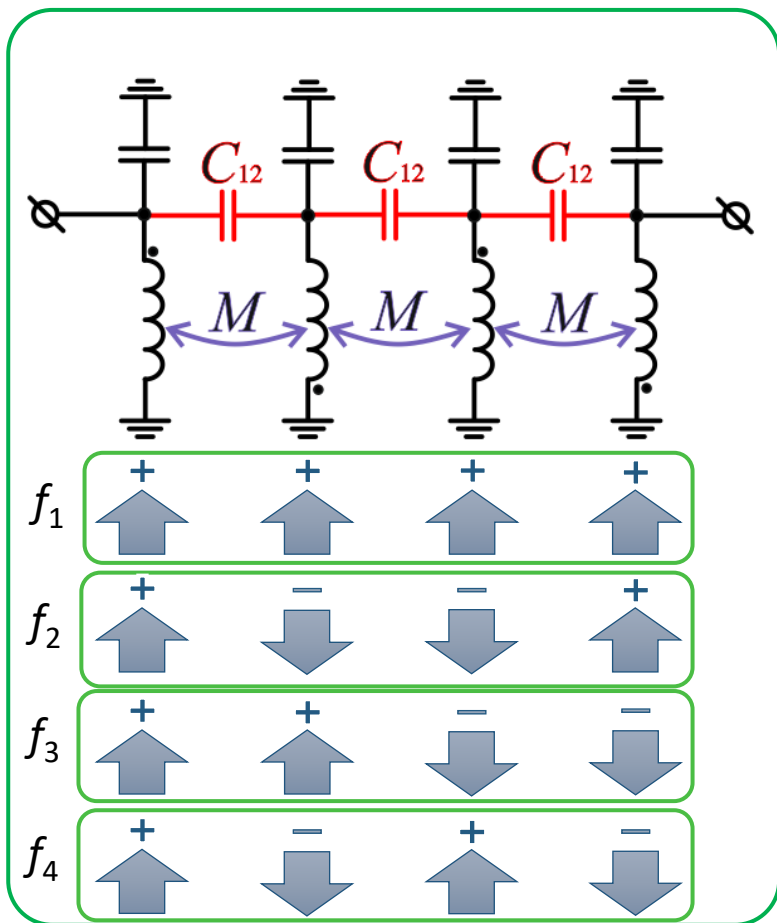
Максимально удалить следующую за
рабочей модой колебаний, значит повысить
дальнюю режекцию



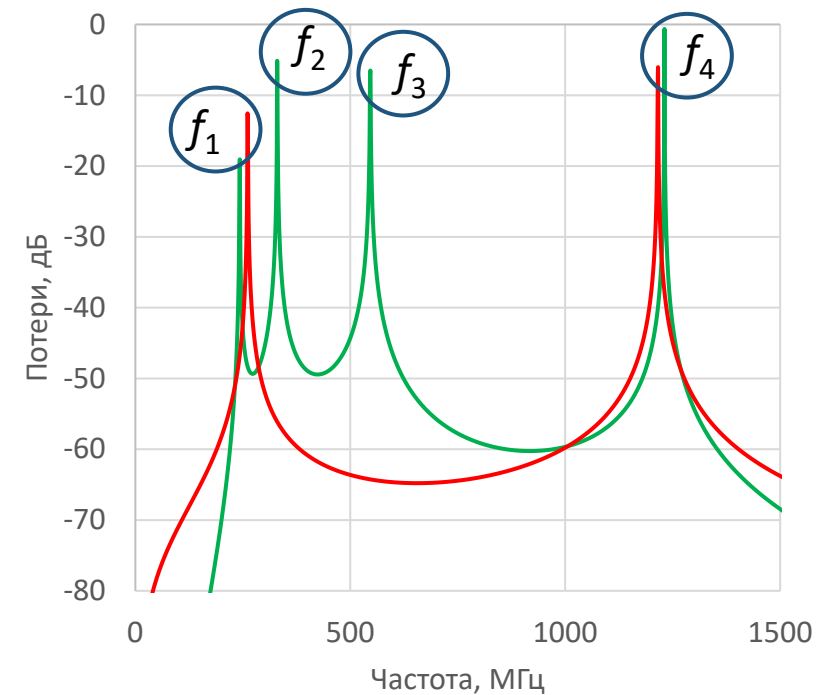
Многорезонаторные системы

4 связанных резонатора

4 связанных резонатора с гальваническими перемычками



Выравнивая потенциалы емкостей резонаторов можно удалить часть паразитных мод





Монолитный фильтр Р-диапазона четвертого порядка с шириной полосы заграждения по -30 дБ более $10 f_0$

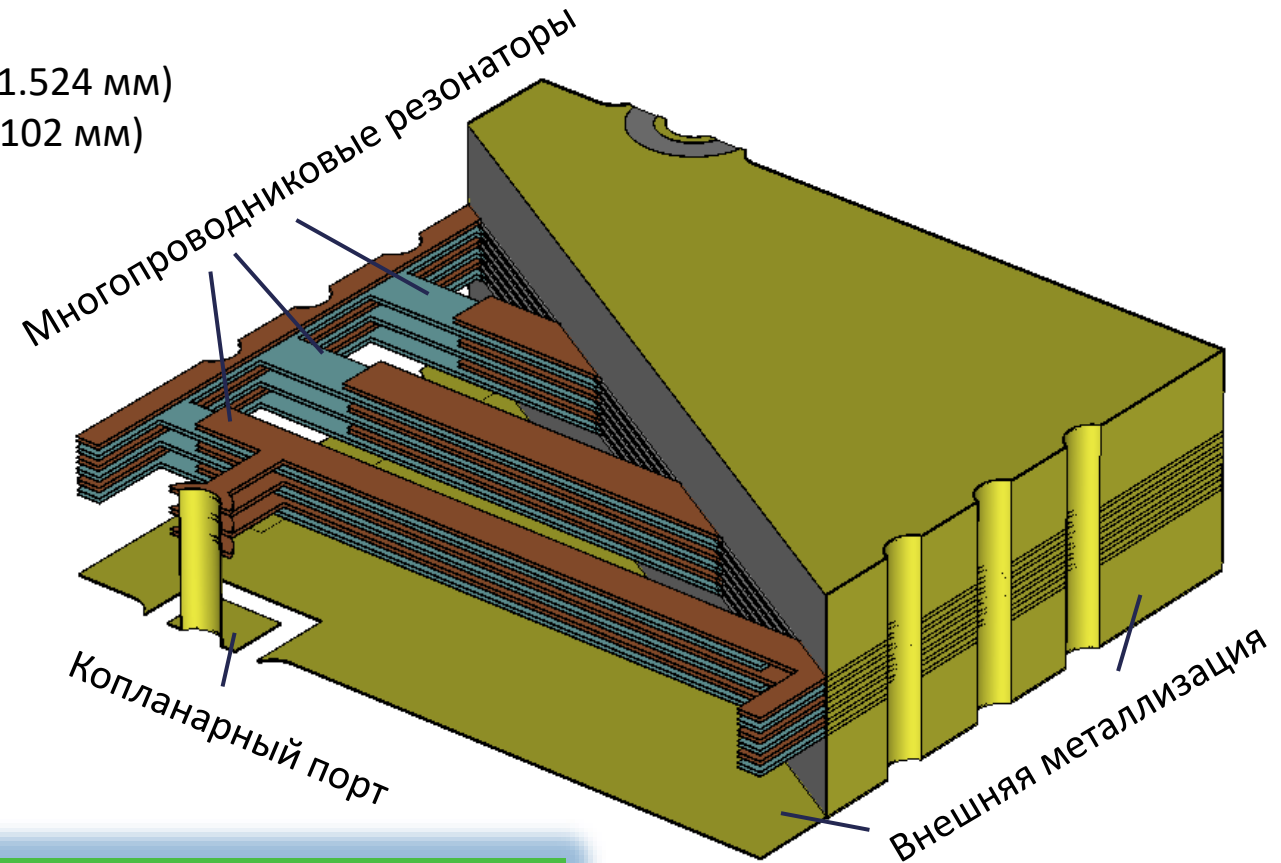
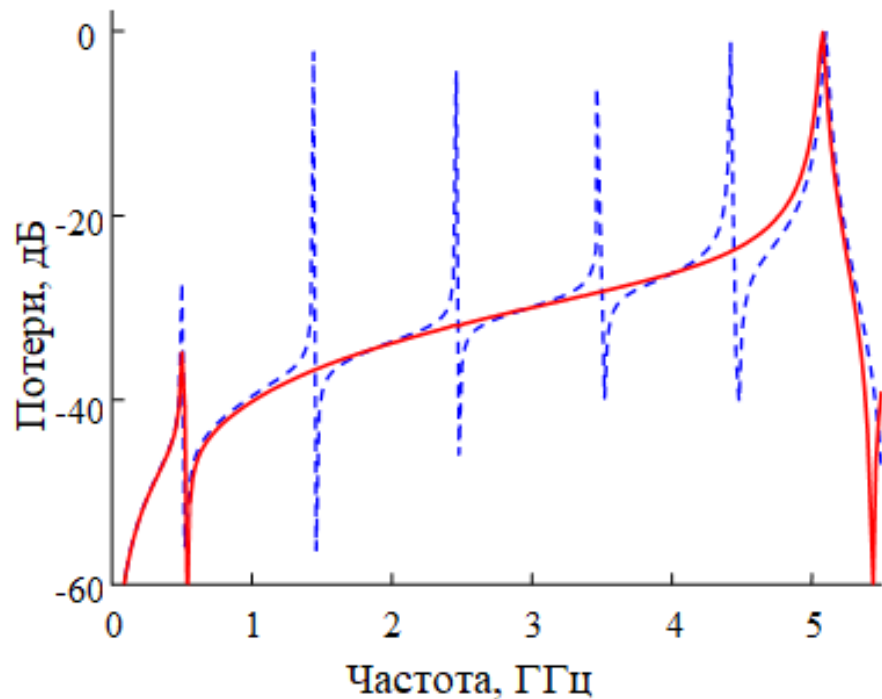
Материалы

Основные диэлектрические слои 1 и 7 – RO4350B™ ($\epsilon_r = 3.66$, $t = 1.524$ мм)

Основные диэлектрические слои 2-6 – RO4350B™ ($\epsilon_r = 3.66$, $t = 0.102$ мм)

Препрег – RO4450F™ ($\epsilon_r = 3.52$, $t = 0.102$ мм)

Проводящие слои – медь ($t = 18$ мкм)



Подавить паразитные резонансы можно за счет выравнивания потенциалов проводников входных резонаторов



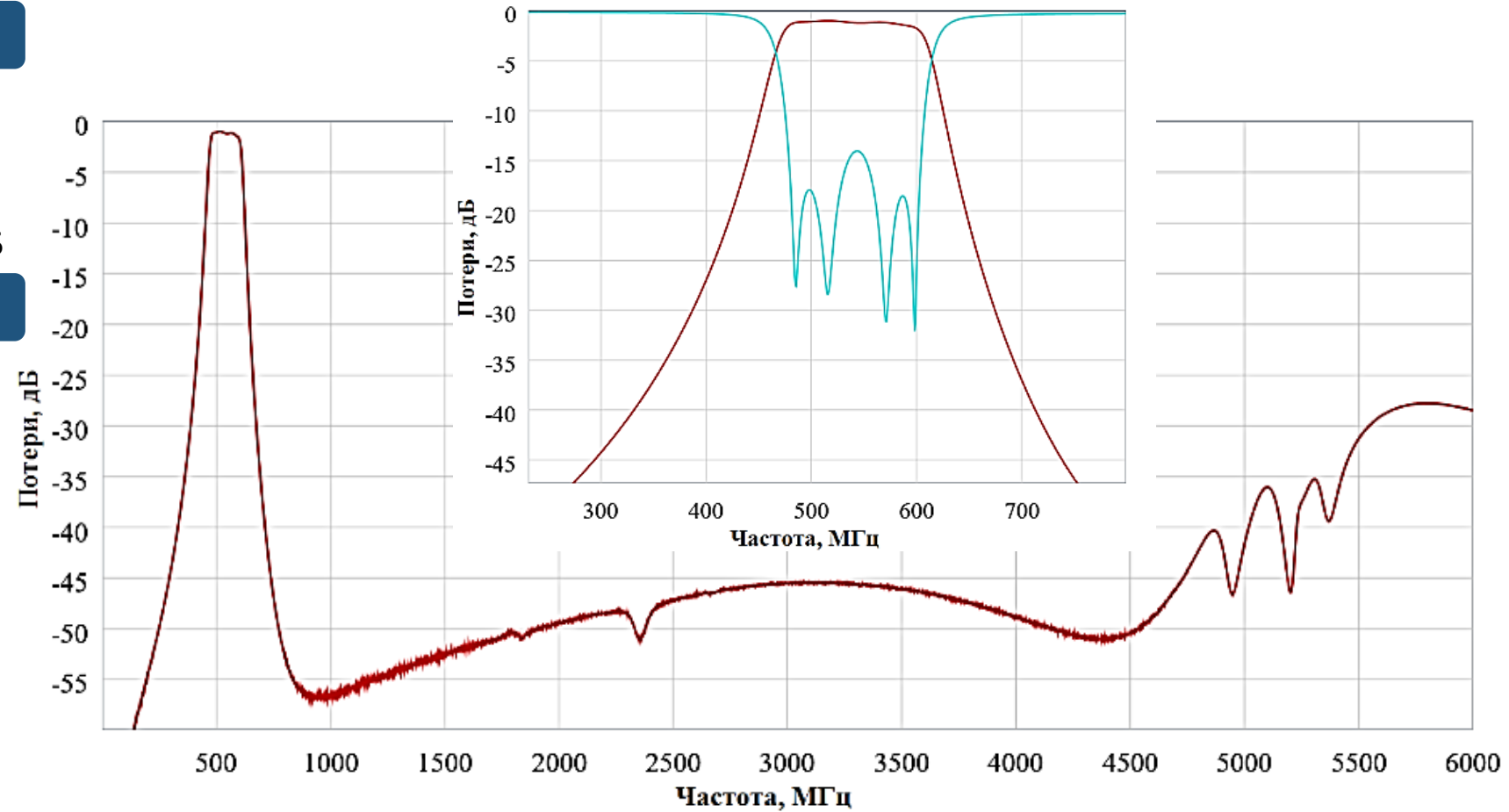
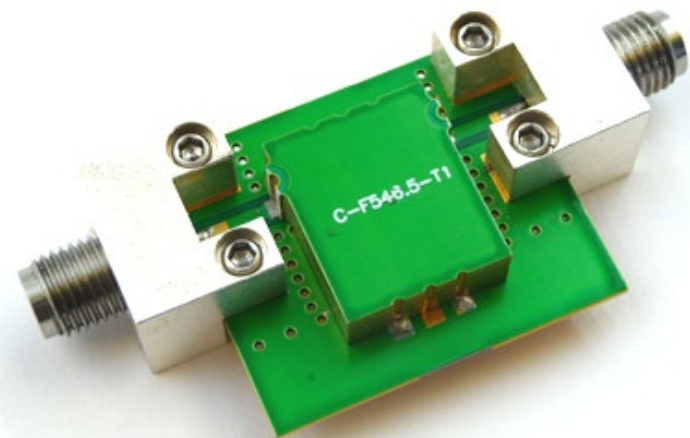
Монолитный фильтр Р-диапазона четвертого порядка с шириной полосы заграждения по -30 дБ более $10 f_0$

Параметры полосы пропускания

- Центральная частота: **546.5 МГц**
- Относительная ширина по -3 дБ: **25%**
- Минимальные прямые потери: **0.8 дБ**
- Максимальные обратные потери: **14 дБ**

Технические параметры

- Габариты: **13×15×4.3 мм**
- Масса: **1.8 г**
- Предельная мощность: **10 Вт**

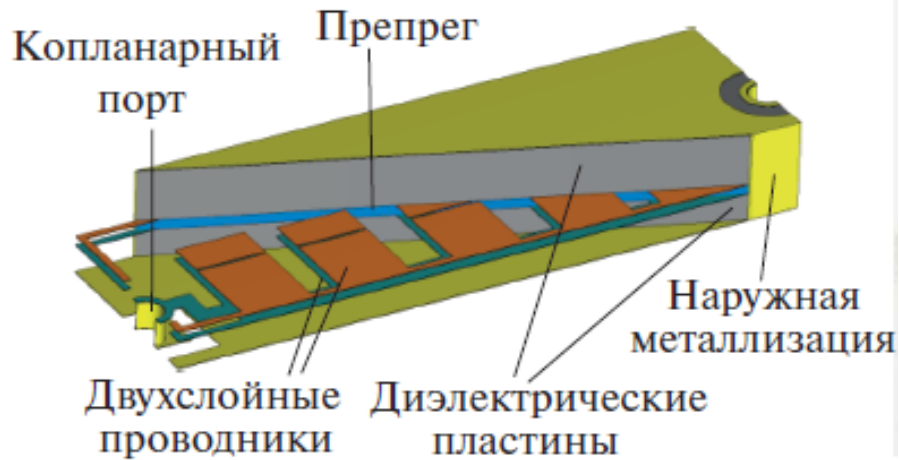




На высоких частотах паразитный резонанс от сонаправленных сдвоенных проводников приближается к рабочей полосе частот. Для его нейтрализации можно выполнить поперечный разрез одного из проводников



Монолитный фильтр X-диапазона пятого порядка

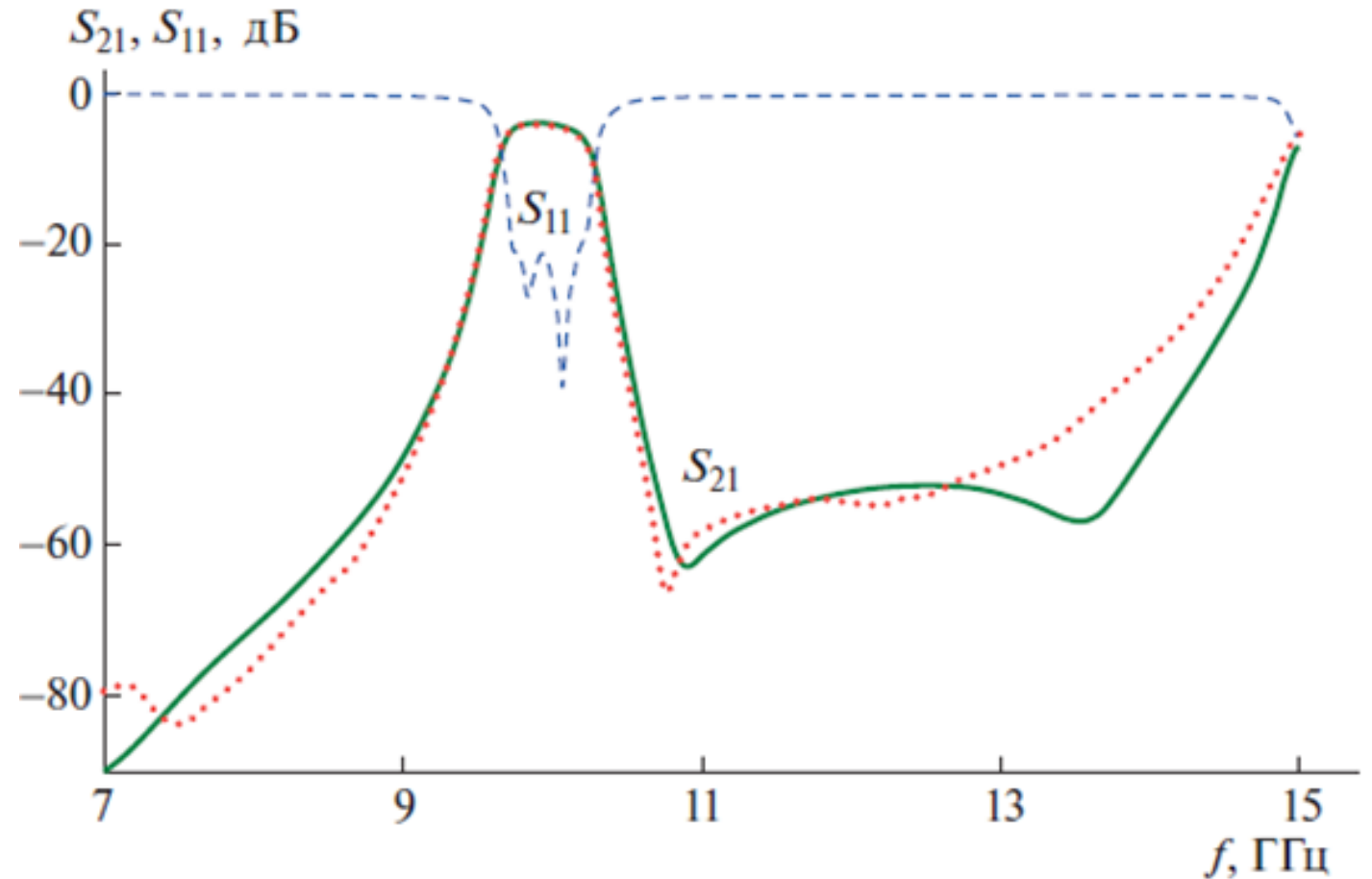


Параметры полосы пропускания

- Центральная частота: **10 ГГц**
- Относительная ширина по -3 дБ: **5.7%**
- Минимальные прямые потери: **4.2 дБ**
- Максимальные обратные потери: **20 дБ**

Технические параметры

- Габариты: **18.0×5.4×2.1 мм**
- Масса: **0.5 г**



АЧХ устройства линии – расчет, точки – эксперимент



Монолитный фильтр X-диапазона пятого порядка

Структура слоев стека

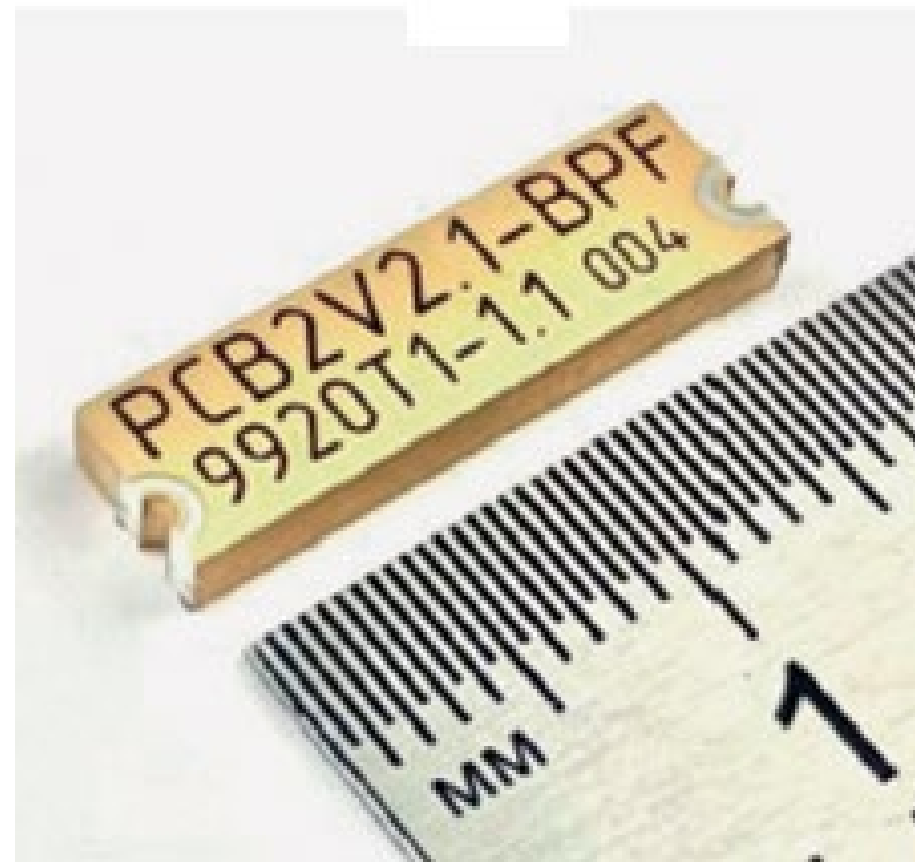
- Медь ($t = 18$ мкм) - **верхний слой**
- RO4350B ($t = 1440$ мкм, $\epsilon_R = 3.66$, $\text{tg}\delta = 0.0037$)
- Медь ($t = 18$ мкм) - **внутренний слой**
- RO4450F ($t = 122$ мкм, $\epsilon_R = 3.52$, $\text{tg}\delta = 0.0041$) - **препрег**
- Медь ($t = 18$ мкм) - **внутренний слой**
- RO4350B ($t = 762$ мкм, $\epsilon_R = 3.66$, $\text{tg}\delta = 0.0037$)
- Медь ($t = 18$ мкм) - **нижний слой**

Параметры стека

- Площадь: **460 × 610 мм**
- Количество размещенных фильтров: **480 штук**
- Количество годных фильтров: **390 штук**

Отклонения параметров у 390 штук

- Центральная частота: **не более ± 25 МГц**
- Ширина полосы пропускания: **не более ± 5 МГц**
- Минимальные прямые потери: **не более ± 0.2 дБ**





Вместо заключения

В ходе выполнения работ в рамках проектов:

- Постановление №218, договор 03.G25.31.0279 (ФИЦ КНЦ СО РАН, СФУ, АО «НПП «Радиосвязь») и
- Соглашение № 470 от 30.08.2022 г. между ИФ СО РАН, Краевым фондом науки и «АО» НПП «Радиосвязь» по конкурсу научно-технических и инновационных проектов в интересах первого климатического Научно-образовательного центра «Енисейская Сибирь»,

получены следующие результаты:

- Отработана технология изготовления полосовых фильтров и направленных ответвителей в рамках технологии многослойных печатных платы. Все материалы переданы заказчику.
- Разработано и передано АО «НПП «Радиосвязь» программное обеспечение, позволяющее синтезировать полосовые фильтры и направленные ответвители с заданной топологией проводников.
- Получены патенты на изобретение на основные технические решения, примененные в разработанных конструкциях.
- Всего в рамках отработки технологии было изготовлено и испытано более 3000 устройств.

Спасибо за внимание

