

Малогобаритные добротные фильтры С-диапазона частот на диэлектрических резонаторах с улучшенными параметрами

М.И. Мартынов

ОАО «Завод Магнетон»

Аннотация: в работе представлены результаты макетирования малогабаритных фильтров, предназначенных для работы в системах связи и обнаружения. Реализован высокий уровень термостабильности центральной частоты фильтра. Обеспечено подавление высших мод в С-диапазоне частот. Рассмотрена конструкция с включением пары вентиляей на вход и выход фильтра.

Ключевые слова: фильтр, ППФ, диэлектрический резонатор, ТК-40, ТК-70, ТК-80, добротность

1. Введение

Миниатюризация добротных полосно-пропускающих фильтров (с полосой менее 1,5%) всегда была и остается одной из основных задач СВЧ приборостроения. Снижение массогабаритных характеристик позволяет увеличивать рабочую частоту, количество каналов в блоках приема/передачи и использовать приборы в аппаратах с ограниченной грузоподъемностью.

Существует несколько основных способов уменьшения габарита фильтра относительно классических исполнений, но все они обладают своими недостатками.

Для фильтров на металлических коаксиальных резонаторах таким способом является возбуждение гибридного 2-х или 4-х модового колебания в одной резонансной камере [1], что позволяет значительно снизить габарит фильтра с сохранением добротности резонатора. При этом, количество звеньев фильтра фактически увеличивается в 4 раза для 4-х модового режима, что создает большие трудности для реализации в «железе» и настройке, начиная с С-диапазона частот. Термостабильность фильтра такой конструкции будет определяться коэффициентом линейного расширения металла корпуса, возбуждающих элементов и крепежных элементов. Другими словами, такие фильтры чувствительны к температурному воздействию.

СВЧ-фильтры на диэлектрических резонаторах можно условно разделить на металлокерамические фильтры и фильтры на изолированных диэлектрических резонаторах.

Металлокерамические фильтры сами по себе миниатюрны за счет возбуждения TE_{δ} -мод [2,3]. Помимо миниатюрности, такие фильтры обладают высокой термостабильностью центральной частоты, которая определяется стабильностью диэлектрической проницаемости керамики. Существенным недостатком является ограничение добротности отдельного звена фильтра. Для керамик с собственной добротностью $\sim 3000 \div 5000$, добротность звена ограничена в пределах $300 \div 500$ за счет экранирования поверхности керамического резонатора металлом. Другой немаловажной проблемой является способ настройки, при помощи удаления металлизации или ее добавления в необходимых местах. Осуществляется либо вручную, либо при помощи лазерного станка с одновременным измерением S-параметров. В совокупности, реализация металлокерамического фильтра с полосой менее 1,5% на частотах выше 4-5 ГГц сопровождается рядом проблем, связанных с

точностью изготовления заготовки, допуском позиционирования отверстий и взаимного допуска металлизации.

Фильтры на диэлектрических дисковых резонаторах, описанные в данной статье, позволяют уменьшать габарит за счет применения керамик с высокой диэлектрической проницаемостью. Проблемой таких фильтров является температурная нестабильность, которая зависит как от линейного коэффициента расширения металла, так и от стабильности проницаемости керамики. Настройка таких фильтров выполняется подстроечными винтами в довольно широком диапазоне, что позволяет с легкостью нивелировать допуски изготовления деталей.

2. Термостабильные фильтры с полосой 0,5%.

В продолжении работы над переключаемым банком фильтров С-диапазона [4], были разработаны макеты фильтров с уменьшенными габаритами на основе керамики ТК-80, производимой ОАО «Завод Магнетон». Трехзвенные фильтры были выполнены на основе керамики двух разных партий, с различным температурным коэффициентом диэлектрической проницаемости, а их корпуса из латуни. Размеры макетов составили 41,5x13,5x14 мм. Фото макетов представлено на рисунке 1.

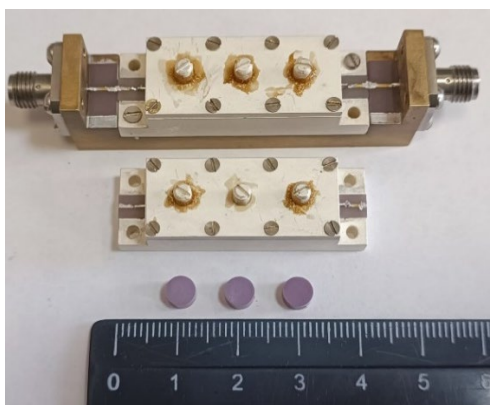


Рисунок 1. Фото макетов фильтров С-диапазона на основе керамики ТК-80.

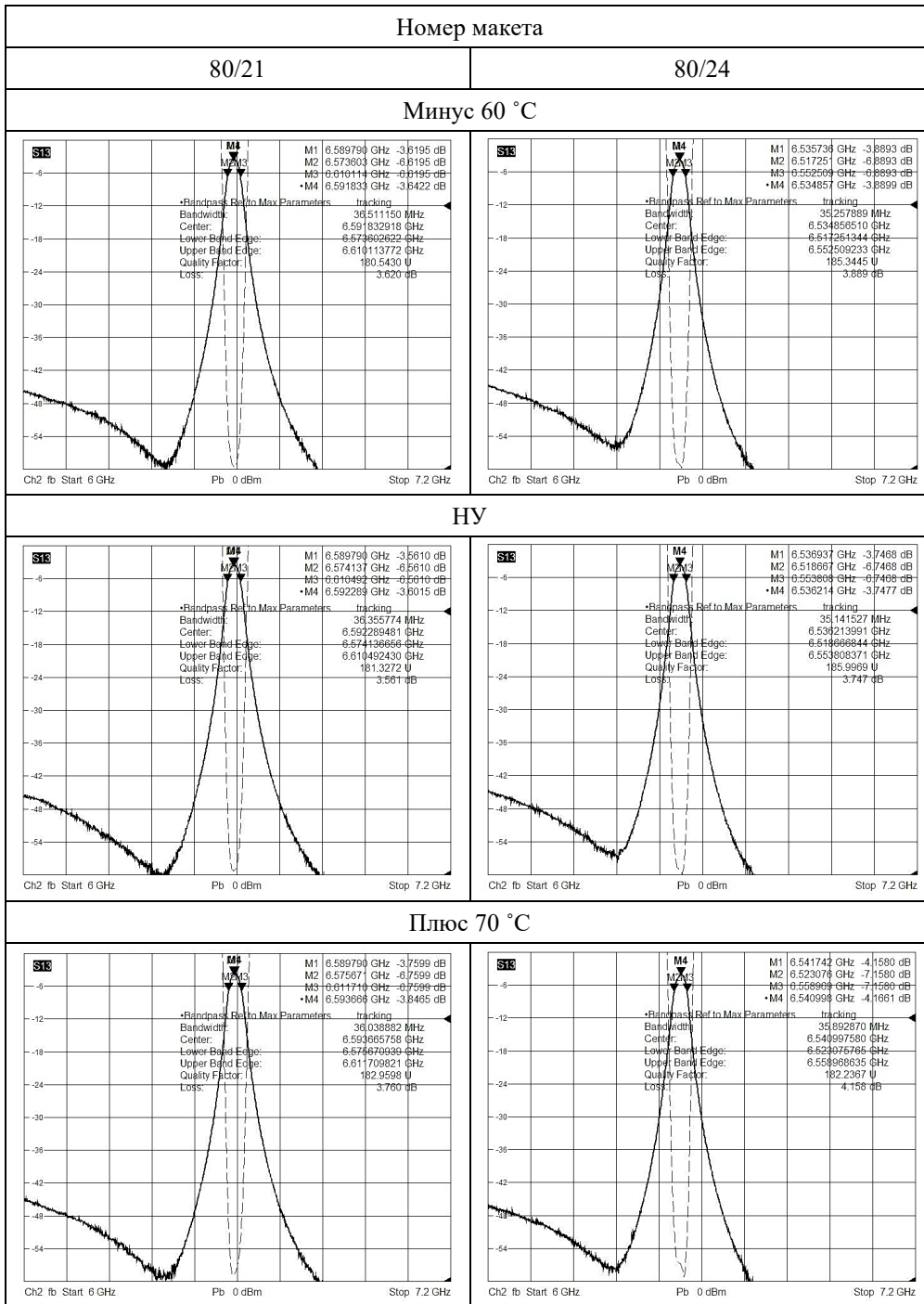
Центральные частоты составили 6590 и 6536 МГц, соответственно. Добротность керамики на частоте 6,5 ГГц составила ~ 1000 , что стало ограничением для уровня минимальных потерь при полосе пропускания $\sim 0,5\%$. Иными словами – фильтры с более широкой полосой пропускания – будут иметь меньшие потери на основе данной керамики.

В таблице 1 приведены параметры макетов фильтров 80/21 и 80/24. Их АЧХ и КСВН приведены в таблице 2 для минус 60 °С, НУ и плюс 70 °С.

Таблица 1. Параметры макетов фильтров на ТК-80

Параметр	Номер макета фильтра	
	80/21	80/24
Полоса пропускания, Δf	36 МГц	35
Минимальные потери в полосе пропускания, α	3,7 дБ	3,7 дБ
Прямоугольность по уровням -10/-20 дБ от полосы пропускания (минус 3 дБ)	1,89 Δf / 2,91 Δf	1,91 Δf / 3 Δf
Стабильность центральной частоты, TK_f (минус 60 / плюс 70 °С)	1,4% Δf (0,5 МГц) / 3,6% Δf (1,3 МГц)	3,7% Δf (1,3 МГц) / 13,7% Δf (4,8 МГц)

Таблица 2. АЧХ и КСВН в диапазоне температур



Макет 80/21 показал лучшую температурную стабильность центральной частоты. Высокая стабильность достигнута за счет взаимной компенсации температурных коэффициентов металла и керамики. Стоит отметить, что характер стабильности частоты является постоянным, т.е. выполняется как при равновесной температуре окружающей среды, так и при динамическом температурном воздействии.

Макет 80/24 показал результат стабильности хуже, что говорит о том, что система корпус-резонатор требует точной подгонки суммы параметров для получения высоких показателей стабильности.

3. Фильтры с подавлением высших мод и встроенными ферритовыми вентилями

Существенной проблемой фильтров на диэлектрических резонаторах является возбуждение высших мод резонаторов. В зависимости от размера резонатора и его диэлектрической проницаемости, вторая и третья моды могут располагаться вблизи фундаментальной моды. Близкое расположение полос пропускания является паразитным эффектом для систем, работающих в широкой полосе частот. Для резонаторов С-диапазона из керамики с высокой диэлектрической проницаемостью, вторая мода зачастую располагается на интервале ~ 1 ГГц.

Подавление высших мод возможно осуществить за счет конфигурации межрезонаторных диафрагм, регулирующих коэффициенты связи звеньев фильтра и форм-фактора самих резонаторов.

Для макетов использовалась керамика ТК-70 с собственной добротностью ~ 1300 на частоте 7 ГГц. Также, в корпус фильтра были интегрированы два ферритовых вентиля ФПВН2–385 производства ОАО «Завод Магнетон» для создания развязки между входом и выходом. Помимо общей развязки, применение вентиля на входе и выходе фильтра позволяет избавиться от влияния внешней реактивной нагрузки на коэффициент связи между возбуждающими петлями и крайними звеньями, и упростить интеграцию фильтра без необходимости его подстройки внутри СВЧ-тракта. Фото макета представлено на рисунке 2. Размер макета составил также 41,5x13,5x14 мм.

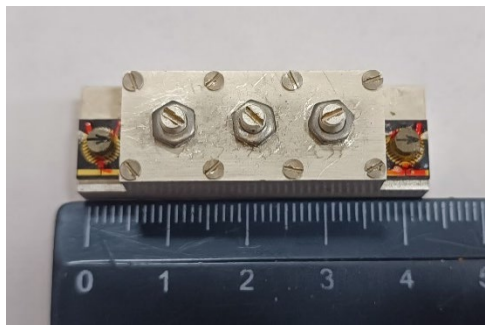


Рисунок 2. Фото макета фильтра С-диапазона на основе керамики ТК-70 с двумя вентилями ФПВН2–385

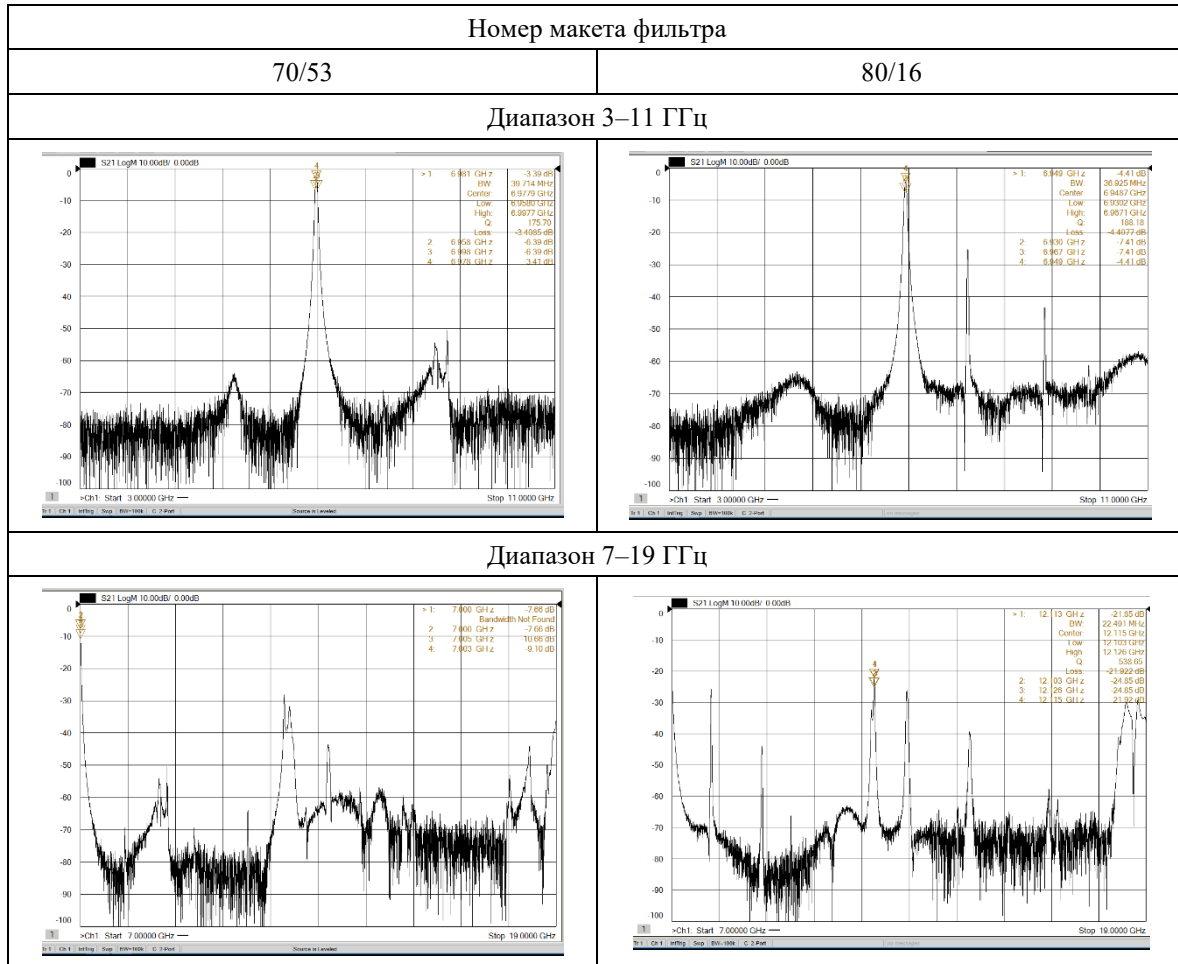
В таблице 3 представлены сравнительные параметры макетов. Макет 80/16 был выполнен в классической конструкции с вентилями, а в макете 70/53 использованы вентили и реализовано подавление второй и третьей моды. По таблице 3 можно заметить, что наличие двух вентиляей практически не оказывает влияние на потери фильтра, которые ограничены добротностью керамики.

Таблица 3. Сравнительные параметры макетов на керамиках ТК-70 и ТК-80

Параметр	Номер макета фильтра	
	70/53	80/16
Центральная частота, f_0	6978 МГц	6949 МГц
Полоса пропускания, Δf	38-40	36 МГц
Минимальные потери в полосе пропускания, α	3,2 дБ	4,4 дБ
Потери второй моды	50 дБ	24 дБ
Развязка	40 дБ	–

В таблице 4 представлены сравнительные АЧХ макетов фильтров с близкими центральными частотами. За счет конструкции, в макете 70/53 явно выражено подавление второй и третьей мод до уровня 50 дБ, когда как в макете с классическим исполнением явно выражено возбуждение данных мод.

Таблица 4. Сравнительные АЧХ макетов фильтров в двух диапазонах частот



4. Заключение

В ОАО «Завод Магнетон» разработаны и исследованы малогабаритные добротные фильтры с полосой 36-40 МГц, предназначенные для работы в трактах приема и селективных блоках. Достигнут высокий показатель термостабильности центральной частоты менее 5% от полосы пропускания фильтра без использования инвара. Реализовано подавление второй и третьей мод резонаторов до уровня минус 50 дБ в таких фильтрах.

Список литературы

1. Wang X. et al. Compact quad-mode bandpass filter using modified coaxial cavity resonator with improved Q-factor //IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2015. – Т. 63. – №. 3. – С. 965-975.
2. Кузьмич Д. В., Нецветаева П. В., Фирсенков А. И. Полосно-пропускающие фильтры L-диапазона на коаксиально-металлокерамических резонаторах из термостабильной керамики //Электроника и микроэлектроника СВЧ. – 2018. – Т. 1. – С. 111-114.

3. Беляков А. Ю. и др. Методика проектирования металлокерамических фильтров СВЧ с применением программ 3d-моделирования //Вестник Новгородского государственного университета им. Ярослава Мудрого. – 2014. – №. 81. – С. 26-30.
4. Мартынов М. И., Козин А. Э., Фирсенков А. А. Электроника и Микроэлектроника СВЧ //Электроника. – 2022. – т. 1. – с. 401-405.