

*Алексеев К.А., Коровкин Е.Н., Арыков В.А.
АО «НПФ «Микран»*

Полосно-пропускающий фильтр в монолитно-интегральном исполнении

Представлены расчетные и практические частотные характеристики полосно-пропускающего фильтра, работающего в Q-диапазоне частот, описан процесс моделирования фильтра. Обозначены преимущества и недостатки проектирования монолитно-интегральных схем (МИС) фильтров.

Ключевые слова: МИС, фильтр, арсенид галлия, поликор, групповое время задержки, полоса пропускания, полоса заграждения.

При формировании и обработке сигналов в электронных системах широко используются методы их фильтрации. Полосно-пропускающие фильтры (ППФ) эффективно выполняют функцию подавления нежелательных сигналов за пределами полосы пропускания (ПП).

В идеальном случае ППФ не вносит потери и имеет линейную фазочастотную характеристику в пределах ПП, а ослабление в полосе заграждения (ПЗ) должно стремиться к бесконечности, но, так как характеристики идеального фильтра получить невозможно, приходится идти на некоторые компромиссы между крутизной частотной характеристики заграждения и потерями в ПП.

Сегодня известно множество различных способов реализации фильтров. В зависимости от технологии производства можно получить фильтры с необходимым сочетанием характеристик (значения рабочих частот, добротность, максимальное затухание в полосе заграждения и т. д.). В данной статье приведена информация о разработке микрополосковых фильтров.

Микрополосковые фильтры, по сравнению с другими типами фильтров, обладают небольшими геометрическими размерами, что позволяет применять их в составе более сложных микрополосковых СВЧ модулей, однако данные фильтры имеют небольшую добротность. Для исключения возникновения высших мод необходимо использовать подложку толщиной не более 200 мкм. Под это условия попадают две возможные технологии изготовления: МИС и ГИС. Обе технологии имеют небольшие различия по толщине и диэлектрической проницаемости подложки.

При значительном тираже изделия важна технологичность производства (сложность изготовления и последующая настройка). Фильтры, изготовленные по технологии ГИС, обладают погрешностью напыления металла 5 мкм, что достаточно сильно влияет на повторяемость характеристик. Обычно в топологию фильтра закладывают подстроечные площадки для ручной корректировки характеристик. Изготовление микрополосковых фильтров в монолитно-интегральном исполнении позволяет получить высокий выход годных кристаллов, не требующих дальнейшей ручной настройки. Это объясняется более точной технологией изготовления: погрешность составляет 0,5 мкм. Кроме того, процесс разбраковки с пластины легко автоматизируется и требует малых временных затрат. Однако недостатком интегрального исполнения является большая стоимость первого запуска пластины (приблизительно в 10 раз больше, чем на технологии ГИС). Стоит

обратить внимание на то, что за счет большего диаметра пластины и меньшей погрешности изготовления конечный выход годных кристаллов по технологии МИС значительно больше, чем по технологии ГИС. Исходя из этого, изготовление фильтров в монолитно-интегральном исполнении оправдано только при больших объемах производства.

Далее представлен разработанный ППФ на полуволновых резонаторах (в качестве материала подложки используется арсенид галлия, $\epsilon = 12,9$).

В общем случае синтез фильтров делится на два основных этапа: на первом этапе по исходным данным синтезируют эквивалентную схему фильтра, состоящую из реактивных элементов с сосредоточенными параметрами; на втором этапе проводят реализацию синтезированной эквивалентной схемы, т. е. заменяют сосредоточенные индуктивности и емкости отрезками линий передачи, реактивными стержнями и диафрагмами, а также другими неоднородностями в линии передачи.

В данном исследовании синтез фильтра проводился непосредственно в электромагнитном симуляторе. По предварительным расчетам для получения необходимого ослабления на заданной частоте (37,5 ГГц) был определен порядок фильтра ($n = 4$). На рис. 1 представлена зависимость АЧХ идеального ППФ от количества резонаторов в данном фильтре.

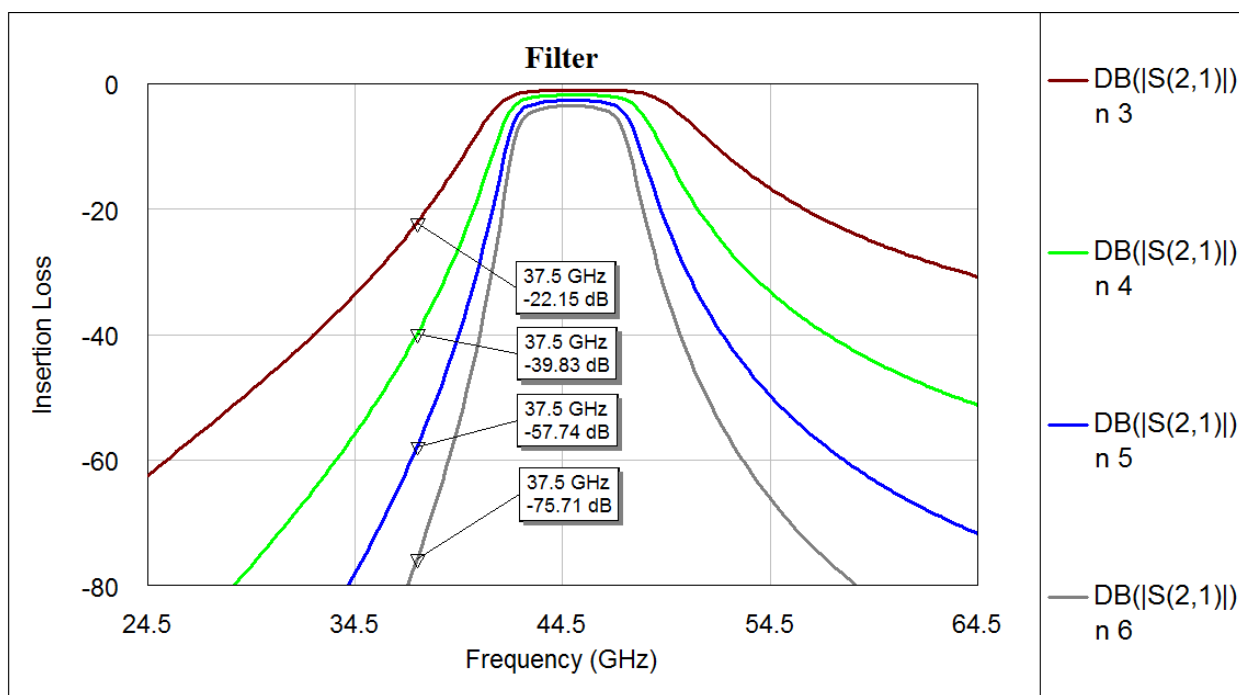


Рис. 1. Амплитудно-частотные характеристики ППФ с различным числом звеньев

Как видно из рис. 1, увеличение крутизны частотной характеристики и потерь в ПП прямо пропорционально количеству резонаторов в цепи. С учетом изменения крутизны характеристики за счет возможной неточности производства, а также дополнительного влияния внешних цепей, для получения более крутой характеристики было определено оптимальное число резонаторов $n = 5$. На рис. 2 показана разработанная модель фильтра в электромагнитном симуляторе.

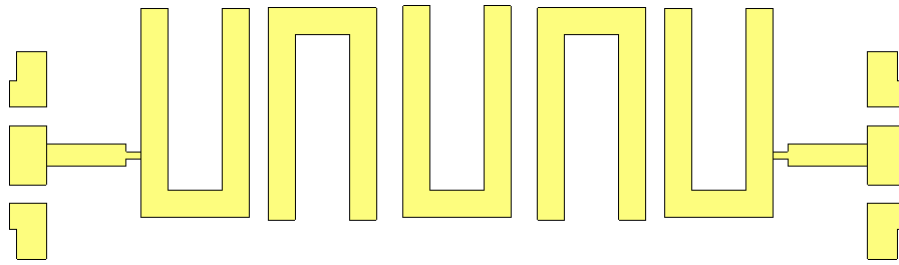


Рис. 2. Модель фильтра пятого порядка

При проектировании фильтров в современных системах автоматизированного проектирования используется большое число варьируемых параметров модели, при этом снижается степень контроля влияния каждого из параметров в отдельности на результирующие электрические характеристики, что, в свою очередь, приводит к увеличению времени на разработку устройства.

В целях минимизации времени разработки синтез фильтра выполнялась по характеристике группового времени задержки (ГВЗ) коэффициента отражения [1]. Суть данного метода состоит в последовательном определении значений ГВЗ коэффициента отражения на центральной частоте фильтра. Это наглядно продемонстрировано на рис. 3. Значения ГВЗ рассчитаны заранее [2], и они непосредственно связаны с коэффициентами отражения и передачи фильтров [3]. За счет изменения связи между двумя соседними резонаторами достигается необходимый уровень ГВЗ и симметричность характеристики относительно центральной частоты. В результате получается настроенный фильтр с центральной частотой ω_0 .

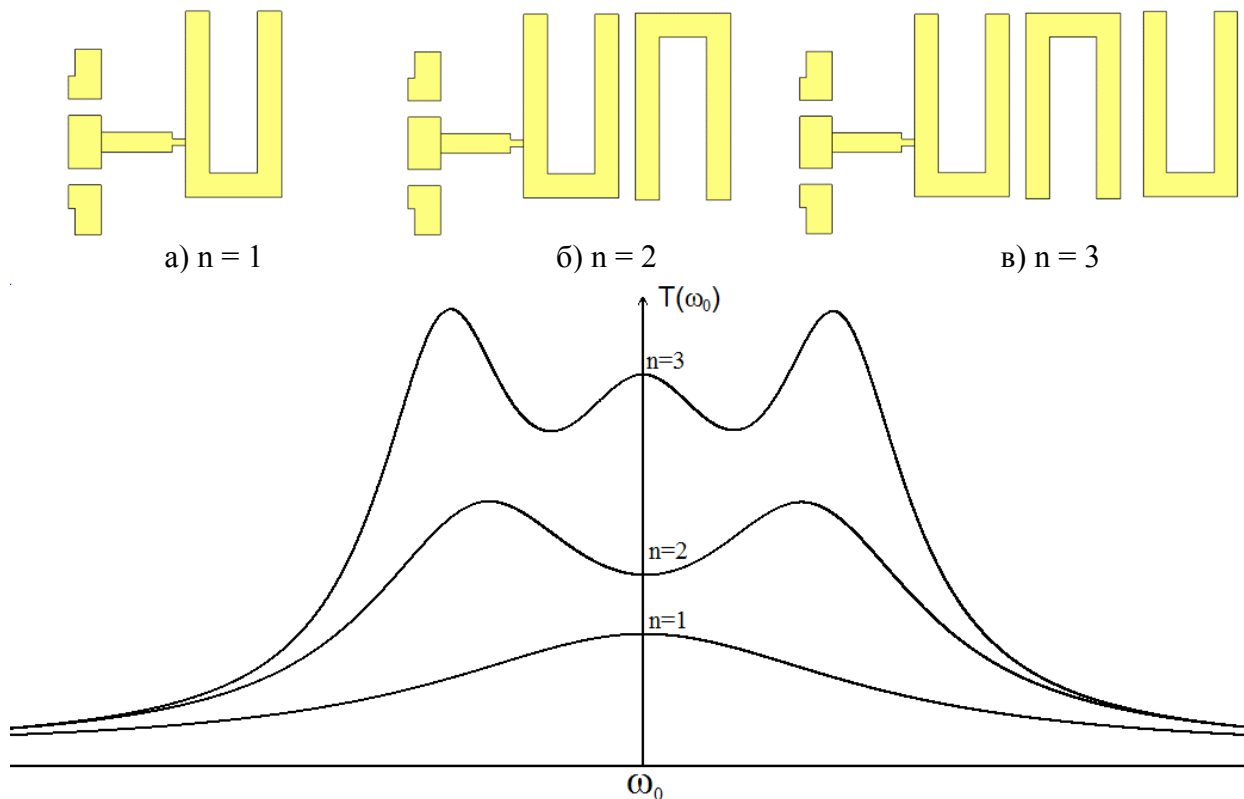


Рис. 3. Вид характеристики ГВЗ от количества резонаторов в структуре

На рис. 4 представлены расчетные и измеренные результаты для двух типов фильтров. Оба фильтра рассчитаны на один и тот же рабочий диапазон и изготовлены на одной пластине. Единственное различие между ними – это количество резонаторов в их структуре.

Семейство характеристик, изображенное сплошными линиями, отображает измеренные результаты, пунктирная линия – расчетные.

При сравнении результатов измерения двух фильтров (рис 4а и 4б) четко видно различие в крутизне спадов частотной характеристики. Добавление в структуру одного резонатора привело к увеличению подавления на частоте 37,5 ГГц почти на 16 дБ, а потери на центральной частоте в ПП увеличились с 1.9 дБ до 2.9 дБ.

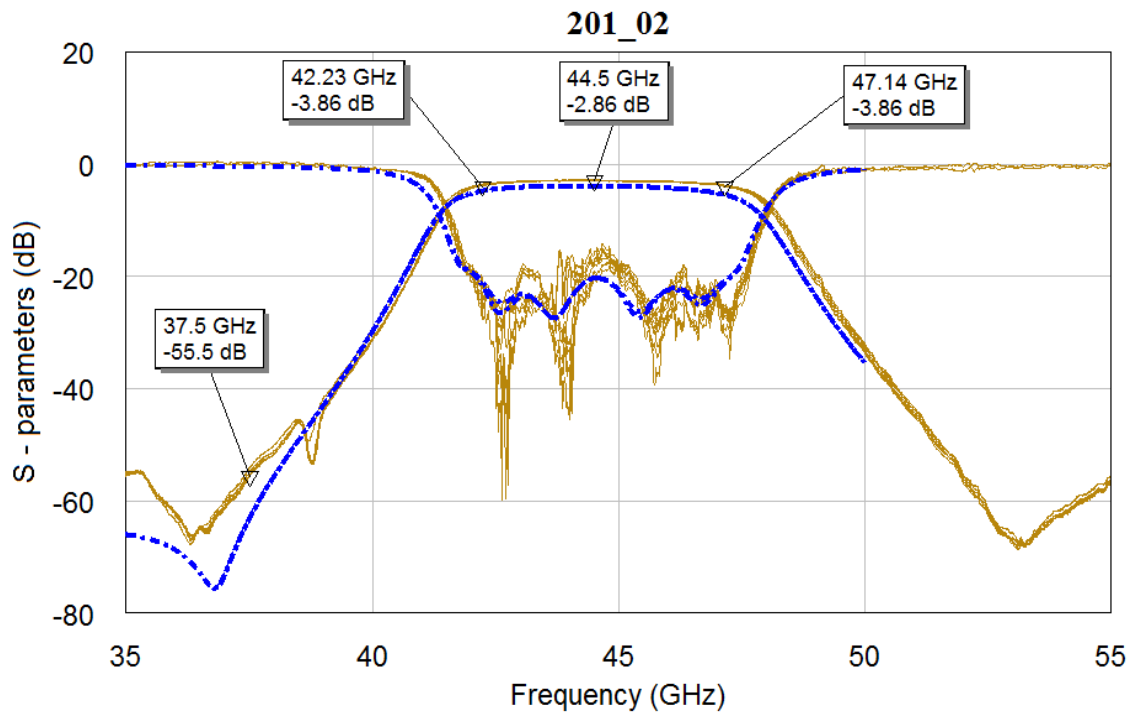
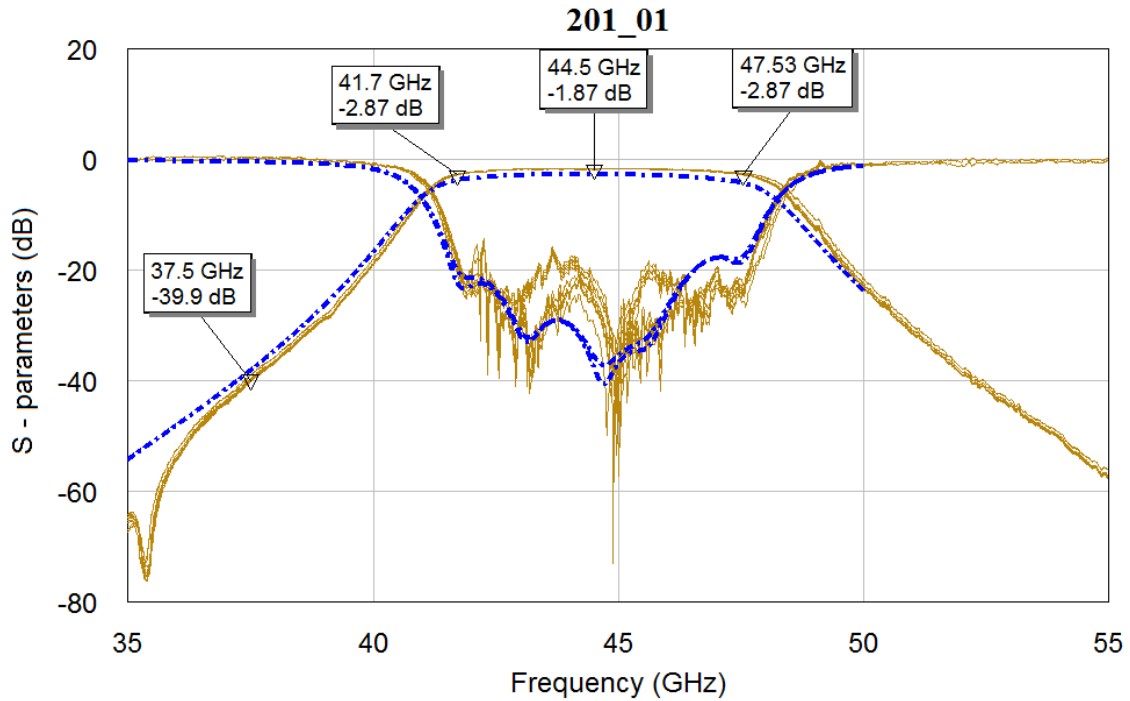


Рис. 4. Сравнение расчетных и практических характеристик:
 а) 5-резонаторный фильтр MQ 201-01
 б) 6-резонаторный фильтр MQ201-02

Экспериментально, в обоих фильтрах получены потери в ПП на 1 дБ меньше расчетных. Вероятно, это расхождение можно объяснить двумя моментами: во-первых, несоответствием коэффициентов потерь, применяемых по умолчанию в программе расчета, и особенностями технологии производства, во-вторых, не идеальностью поперечного профиля микрополоскового резонатора. По технологии МИС напыление металла и его химическая обработка производится в несколько этапов, в результате проводник не имеет строго прямоугольный профиль, как в электромагнитной модели. Это расхождение влияет на распространение магнитного поля вокруг полоска, что приводит к изменению связи между резонаторами и, как следствие, незначительному уходу частотной характеристики от центральной частоты.

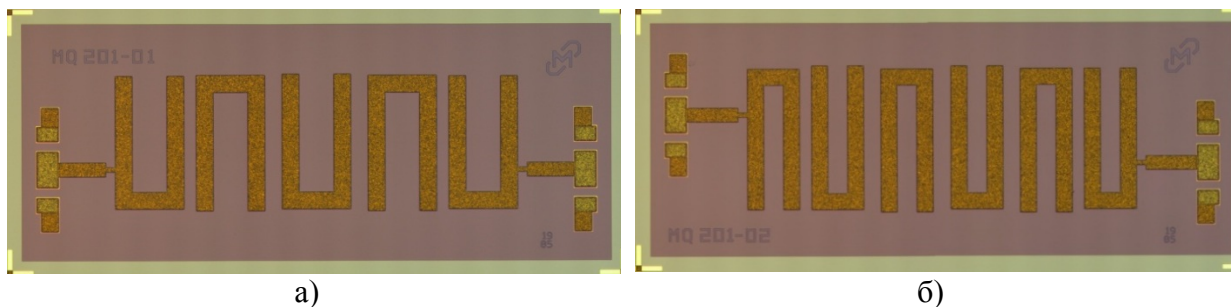


Рис. 5. Фотографии МИС фильтров:
 а) MQ201-01
 б) MQ201-02

На рис. 5 представлены фотографии МИС разработанных фильтров. Размеры кристаллов:

- ширина подложки — 1,1 мм;
- длина подложки — 2,6 мм;
- высота подложки — 0,1 мм.

Подытожив вышеизложенное, можно выделить ряд преимуществ изготовления МИС фильтров перед другими технологиями изготовления ППФ, использующих линии передачи:

- 1) высокий диапазон частот;
- 2) повторяемость характеристик и высокий выход годных кристаллов;
- 3) отсутствие необходимости ручной подстройки;
- 4) малые геометрические размеры;
- 5) удобство разбраковки с пластины.

Также имеется несколько недостатков:

- 1) большая стоимость изготовления МИС;
- 2) большие временные затраты на изготовление.

Однако, данные недостатки компенсируются объемом выпускаемых кристаллов.

Библиографический список

1. Ness J. B. A unified approach to the design, measurement, and tuning of coupled-resonator filters // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. Vol. 46. April 1998.
2. Keysight Разработка СВЧ-фильтра на дискретных элементах и микрополоскового СВЧ-фильтра — руководство с демонстрационными примерами.
3. Кондратенко А. В., Шевляков М. Л., Миллер А. И. Проектирование частотных мультиплексоров на основе характеристики группового времени задержки коэффициента отражения.