

**Бочаров Е.И., Рыбалко И.А., Седышев Э.Ю.,
Селиверстов Л.А., Сикора Г.Р.**
Санкт-Петербургский государственный университет
телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича

Микроволновые фильтры на эллиптических резонаторах в объёмном интегральном исполнении

Работа посвящена новому типу фильтров микроволнового диапазона на эллиптических резонаторах. Рассмотрены топологии, некоторые физические характеристики и особенности применения данных устройств.

Ключевые слова: эллиптические резонаторы, планарные резонаторы, микроволны, фильтры, частотная селекция.

В современной радиотехнике прослеживается тенденция роста частоты устройств с уменьшением рабочей мощности. Эффективно использовать радиочастотный спектр без узкополосных устройств невозможно. Решение этой задачи предполагает появление резонансных элементов с высокой добротностью в новой конструктивной среде – среде объёмных интегральных схем СВЧ.

Объёмные интегральные схемы (ОИС) СВЧ используют определенные коммутационные линии, как правило, это несимметричная полосковая линия (НПЛ, полный аналог микрополосковой линии (МПЛ) в гибридных интегральных схемах), щелевая линия и копланарный волновод.

На сегодняшний день нашли применение различные типы микроволновых резонаторных фильтров, среди них: шлейфные, гребенчатые, встречно-штыревые. В этих фильтрах используются элементы (шлейфы, штыри) соизмеримые с длиной волны. При переходе на частоты порядка десятков ГГц возникают технологические проблемы при реализации таких фильтров. Вследствие уменьшения размеров элементов фильтра их становится очень трудно изготовить и настроить. **Получить высокую точность** изготовления элементов с помощью инновационных технологий **возможно**, но настроить устройство **оказывается нельзя**, так как все параметры в нем связаны конкретными геометрическими размерами. Использование эллиптических резонаторов в фильтре позволяет увеличить размеры (частота кратна длине эллипса), упростить схему и увеличить добротность, а также, в некотором смысле, сделать резонатор независимым от соединительных линий.

Рассматриваемые конструкции фильтра предлагается реализовать в виде ОИС СВЧ. При синтезе ОИС СВЧ просто переделать устройство с МПЛ на НПЛ невозможно. Это обусловлено тем, что дисперсионная характеристика МПЛ резко отличается от НПЛ, последняя оказывается предпочтительнее, так как распространение волны происходит в однородной изотропной среде. Простые фильтры в составе ОИС представляют собой объёмные конструкции с огромным количеством схемотехнических и конструктивных проблем.

Эллиптический резонатор может быть представлен в виде простейшего колебательного контура (рис.1), параметры L и C которого, будут соответствовать в квазистатическом приближении интегралам по контуру погонной индуктивности и погонной ёмкости кольцевого резонатора. В этом случае резонансную частоту эллиптического резонатора и добротность можно рассчитать по формулам (1). Зная характеристики эллиптического резонатора, возможно построение любых частотно-селективных устройств, среди которых на первом месте полосно-пропускающие (ППФ) фильтры. Рассмотрим реализацию ППФ подробно.

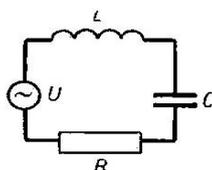


Рис. 1. Резонансный контур.

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad Q = R\sqrt{\frac{C}{L}} \quad (1)$$

Фильтр прототип нижних частот и переход от ФНЧ к ППФ.

Воспользуемся классической процедурой синтеза фильтра, выбираем прототип фильтра низких частот на основании требований технического задания. Переходим от фильтра-прототипа к полосовому фильтру.

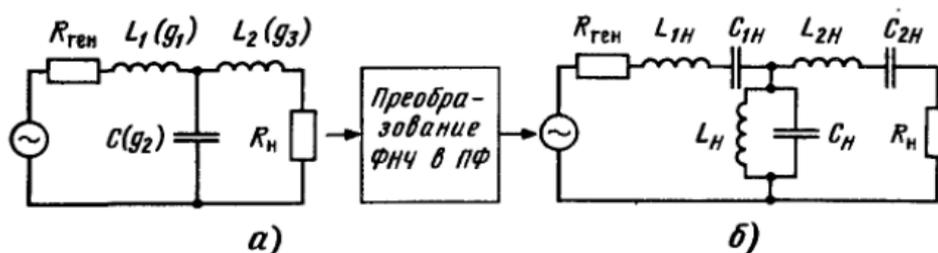


Рис. 2. Схема перехода от ФНЧ к ППФ.

Для фильтра-прототипа существуют стандартные полиномы, которые позволяют получить фильтр с требуемой характеристикой, а далее с помощью процедуры перехода от ФНЧ к ППФ получим эквивалентную принципиальную схему, от которой потом перейдем к элементам микроволновой техники.

Для синтеза был выбран полосно-пропускающий фильтр Чебышева третьего порядка, с полосой пропускания $\{2...2.5\}$ ГГц, ослаблением в полосе заграждения 20 дБ (минимум на частотах 1.5 и 3.0 ГГц), с пульсациями в полосе пропускания 0.2 дБ и сопротивлением нагрузки 50 Ом.

Были рассчитаны коэффициенты значения элементов фильтров прототипов g_i , которые составили соответственно $g_1=1.2275$, $g_2=1.1525$, $g_3=1.2275$. Получена следующая принципиальная схема фильтра и значения его элементов.

$C1=0.2593$ пФ
 $L1=19.54$ нГн
 $C2=7.337$ пФ
 $L2=0.6905$ нГн
 $C3=0,2593$ пФ
 $L3=19.54$ нГн

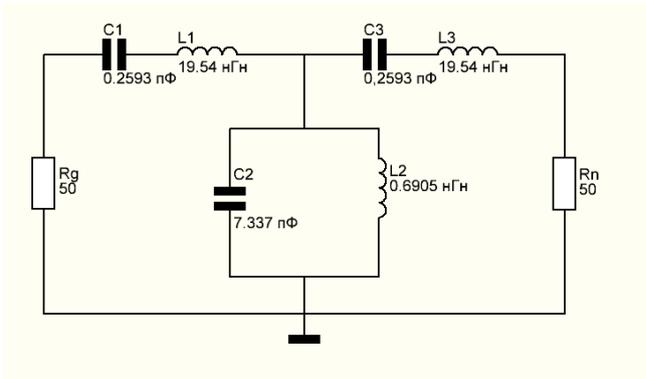


Рис. 3. Принципиальная схема ППФ с номиналами.

На кафедре Электроники и Схемотехники СПбГУТ разработана оригинальная конструкция фильтра с реализацией на эллиптическом резонаторе в полосковом исполнении, она представлена на рисунке 3.

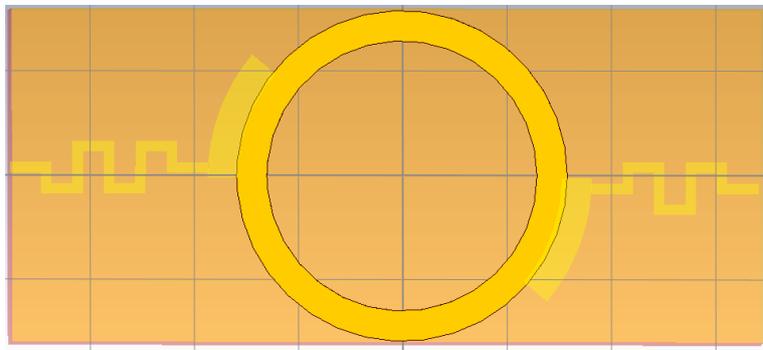


Рис. 3. Эпюр ППФ реализованного в виде ОИС на НПЛ (верхний слой полупрозрачный).

В данной структуре связь резонатора с другими элементами фильтра реализована с помощью плоских конденсаторов, которые образуются за счёт двух пластин и слоя диэлектрика. Дуги конденсатора сдвинуты на некоторую часть радиуса кольца для достижения необходимой ёмкости. Индуктивности выполнены в форме меандров. Длина кольца по средней линии выбирается кратной λ с учётом сжатия волны в диэлектрике, где n (количество длин волн, помещающихся в кольцо) выбирается исходя из необходимых размеров. Данная конструкция полностью соответствует рассчитанному фильтру.

Для макетирования использовалась прозрачная пленка из полистирола, диэлектрическая проницаемость которой составляет около 2 (исследовано экспериментальным путём), и алюминиевая фольга. Сам фильтр представляет собой ОИС (несколько слоев) с выводом питающих линий на противоположные кромки подложки. Увеличенный макет фильтра представлен на рисунке 4.

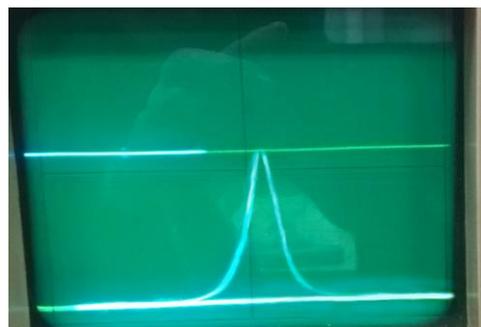


Рис. 4. Макет фильтра и его АЧХ в заданной полосе.

Как видно из рисунка, данная структура полностью соответствует принципиальной схеме. АЧХ полностью подтверждает, что синтезированное устройство представляет собой фильтр. Также из АЧХ видно, что фильтр не имеет паразитных параметров и его характеристика симметрична.

Развитие идеи использования эллиптических резонаторов в устройствах частотной селекции неизбежно приводит к другим типам линий, о которых речь шла выше. Так, например, аналогичный фильтр на копланарном волноводе будет выглядеть следующим образом (см. рис.5).

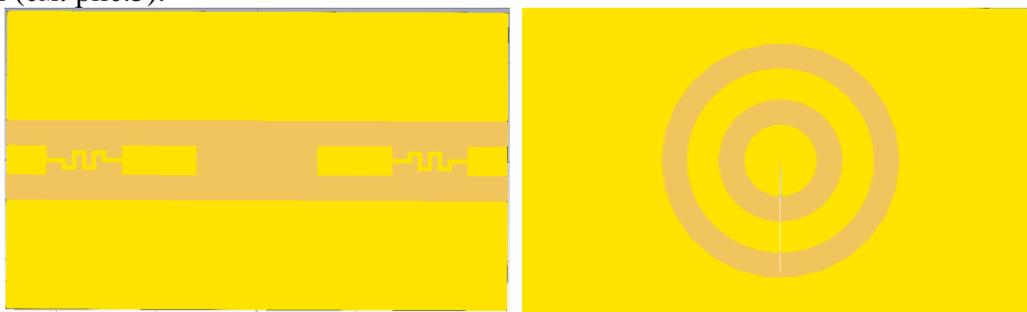


Рис. 5. Устройство частотной селекции на копланарном эллиптическом резонаторе.

Устройство представляет собой копланарную линию с введенными в нее индуктивностями. На обратной стороне находится резонатор. Емкостью связи является сам слой подложки, при этом его обкладками являются участки площади кольца резонатора и копланарной линии, расположенные одна над другой. Заземление центрального участка резонатора выполнено с помощью гальванического соединения. Радиус кольца и копланара соответствует ширине линии.

Выводы: *использование эллиптических резонаторов при синтезе устройств частотной селекции позволяет существенно изменить конструкцию устройств и упростить настройку, а также оптимизировать геометрию устройства в целом.*

Библиографический список:

1. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи / Маттей Г.Л., Янг Л., Джонс Е.М.Т. – Москва: Связь, 1971.
2. Объемные интегральные схемы СВЧ. / Гвоздев В.И., Нефедов Е.И. – 1985.
3. Sheng Sun, Lei Zhu. Wideband Microstrip Ring Resonator Bandpass Filters Under Multiple Resonances / IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES. – 2007. – № 10. – С. 2176-2182.
4. Проектирование СВЧ-устройств для микроволновой радиотермометрии / Л.Г. Стаценко, О.А. Пуговкина. – Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – 15 октября.
5. Расчёт модифицированных линий передач для объёмных интегральных схем СВЧ. / К.В. Боброва, И.А. Булатова, Е.А. Иванова, Э.Ю.Седышев – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина), 2015.
6. Техническая электродинамика / Н.А. Семенов – Москва: Связь, 1973. – с. 270-271.
7. Техническая электродинамика / О.И.Фальковский –Москва: Связь,1978.