

*Седышев Э.Ю., Селиверстов Л.А.
Санкт-Петербургский государственный университет
телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича*

Микроволновый фильтр на кольцевом эллиптическом резонаторе

Статья посвящена кольцевым эллиптическим резонаторам на копланарном волноводе и устройствам на них. Предлагается новая конструкция устройств частотной селекции микроволнового диапазона в виде объемных интегральных схем. Представлена методика расчета устройств.

Ключевые слова: эллиптические резонаторы, планарные резонаторы, микроволны, фильтры, частотная селекция, стабилизация частоты, фильтры высокого порядка

Целью данной работы является создание методики проектирования устройств частотной селекции на кольцевых эллиптических резонаторах. Внимание к этим структурам обусловлено ростом частоты в радиоэлектронике, и, как следствие, уменьшением линейных размеров элементов, чья длина должна быть кратна длине волны (например, $\lambda/4$ -волновых шлейфов). Данная работа посвящена синтезу фильтров на симметричном копланарном волноводе. Ранее рассматривались и другие типы линий для построения кольцевых резонаторов [1, 2]. Предлагаемые устройства синтезированы в виде объемных интегральных схем. Сразу же оговоримся, что применение резонаторов такого типа открывает широкие перспективы в области синтеза устройств частотной селекции, согласования и стабилизации частоты. Их основные достоинства – удобная и простая конструкция, а также большая добротность резонаторов при их правильном включении в устройства. Также возможно получение более высокой степени интеграции при размещении их (резонаторов) в разных слоях интегральной схемы.

Кольцевой эллиптический резонатор представляет собой замкнутое по эллипсу токонесущее полотно, которое в совокупности с заземляющими пластинами образует свернутый волновод на планарных линиях. Этот резонатор может быть представлен в виде простейшего колебательного контура, параметры L и C которого, будут однозначно связаны с погонной индуктивностью и погонной ёмкостью линии, на которой выполнен кольцевой резонатор. Известно также, что резонанс можно получить в направляющей системе, свернутой в кольцо, если длина кольца по средней линии кратна длине волны в этой системе на данной частоте.

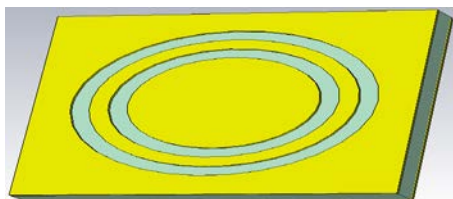


Рис. 1. Копланарный резонатор.

Таким образом, конструктивная реализация этой модели представляет собой замкнутую компланарную линию, или по сути кольцо, в центре и снаружи которого находятся области заземления, отделенные зазорами. Реализация этого устройства показана на рис. 1. Эквивалентная принципиальная схема предложенного резонатора представлена на рисунке 2, параллельный резонансный контур дает первую основную частоту резонанса.

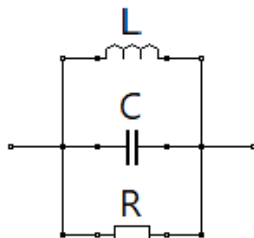


Рисунок 2. Эквивалентная схема кольцевого эллиптического резонатора.

На основании общепринятых положений о резонансе в контурах, мы можем предположить, что параметры предлагаемого резонатора определяются его геометрией и погонными характеристиками линии, на которой он построен:

$$L = \int_l L_p dl \quad (1)$$

$$C = \int_l C_p dl \quad (2)$$

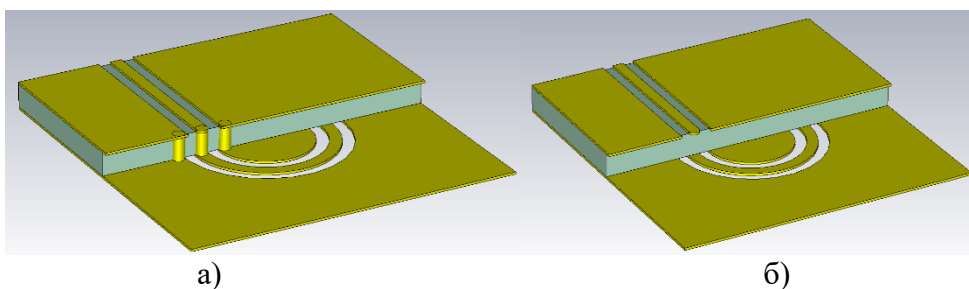
$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (3)$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (4)$$

В результате работы нами были рассмотрены различные способы интеграции резонатора в устройства частотной селекции, выполненные в виде объемных интегральных схем. Мы рассматривали только классические фильтровые структуры.

Хорошие результаты можно получить при гальваническом соединении кольца резонатора с компланарной линией (рис. 2, а), удовлетворительно зарекомендовала себя и емкостная связь в толще диэлектрика между компланарной линией и резонатором (рис. 2, б). Для емкостной связи довольно удачно вписывается емкость межслойного перехода в номинал емкости самого устройства частотной селекции.

В процессе создания устройств более технологичным для объемных интегральных схем является второй вариант. Хотя не стоит забывать и про индуктивные связи, которые очень хорошо зарекомендовали себя в устройствах на щелевой линии.



а) б)

Рис. 3. Связь резонатора с линией:
а) гальваническая; б) емкостная связь.

Проиллюстрируем синтез фильтра на эллиптических кольцах по техническому заданию, которое носит иллюстративный характер. В процессе работы стало очевидно, что по произвольному ТЗ возможное построение устройства.

Рассмотрим в качестве примера полосовой фильтр со следующими характеристиками: центральная частота полосы пропускания фильтра 2,25 ГГц, пульсации в полосе пропускания не более 0,2 дБ. Относительная ширина полосы пропускания 22,2(2)%, переходная область 0,55 ГГц, ослабление в полосе загира не менее 20 дБ. Сопротивление тракта 50 Ом.

При определении количества элементов фильтра и их номиналов воспользуемся литературой [1, 8], целесообразно использовать полосовой фильтр Чебышева 3 порядка. Синтез фильтра проведем по стандартной методике через фильтр-прототип.

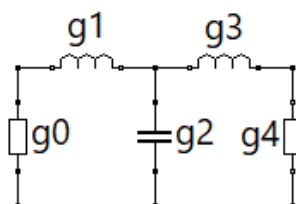


Рис. 4. Схема фильтра-прототипа.

Сам фильтр представляет собой также Т-образную цепь, элементы которой легко рассчитать с помощью g-параметров, однозначно связанных с передаточной функцией устройства. Таблица g-параметров для Т03-20 приведена ниже [8].

Таблица 1.

g_0	g_1	g_2	g_3	g_4
1	1.1893	1.1540	1.1893	1

С помощью коэффициентов трансформации и преобразования полосы частот можно перейти от g-параметров к реальным значениям элементов синтезируемого фильтра.

Таблица 2.

L_1	C_1	L_2	C_2	L_3	C_3
19.53 нН	0.259 пФ	0.69 нН	7.34 пФ	19.53 нН	0.259 пФ

Основным элементом, который нас интересует, является кольцо резонатора. Его эквивалентная схема вписывается в принципиальную схему фильтра, с учетом его характеристик. Процесс приведения в соответствие параметров кольца и номиналов элементов схемы полностью определяется выбором геометрии кольца.

Межслойные переходы (емкости C_1 , C_3) созданы в пространстве между линиями ввода сигнала в резонатор и центральной токопроводящей полоской кольца (совместно они выступают в роли обкладок). Зная емкости фильтра и характеристики подложки диэлектрика, можно легко осуществить расчёт геометрии элемента связи.

$$S = \frac{C \cdot d}{\epsilon \cdot \epsilon_0} \quad (5)$$

В принципиальной схеме фильтра также есть индуктивности, расчет для них сложнее, так как они расположены последовательно в компланарной линии. Такие индуктивности не описаны в литературе, но нами сделан ряд удовлетворительных моделей, которые показали свою работоспособность.

На рисунке 6 показана принципиальная схема фильтра и его характеристики (S11, S12), полученные при проверке синтезированной схемы устройства. Для элементов фильтра заданы рассчитанные описанным выше методом значения, получена передаточная характеристика, которая изображена справа.

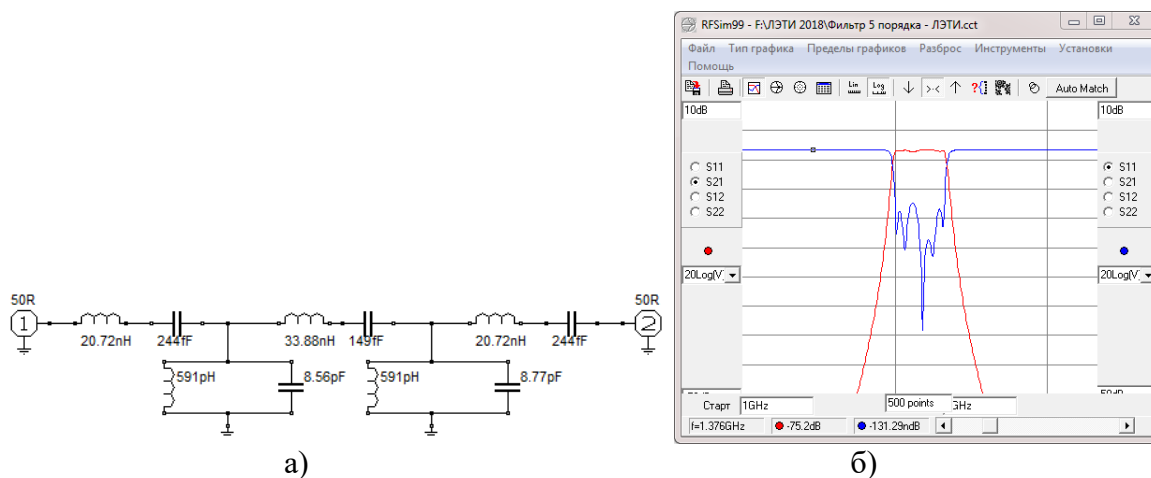


Рис. 6. а) ПС фильтра; б) передаточная характеристика фильтра.

Ввод сигнала осуществляется с одной стороны схемы, резонатор расположен с другой (таким образом, нам необходима двухслойная интеграция элементов, как минимум). Диэлектриком емкости связи является сам слой подложки, при этом его обкладками с одной стороны выступают сегменты кольца резонатора, с другой – сужающийся участок компланарной линии. Радиус кольца было решено взять меньше, чем ширина компланара. Это позволило, во-первых, нивелировать возможное смещение резонансной частоты, а во-вторых, увеличить длину участка ввода, переходящего в емкость связи, дабы обеспечить постепенный переход волны из компланарной линии в резонатор.

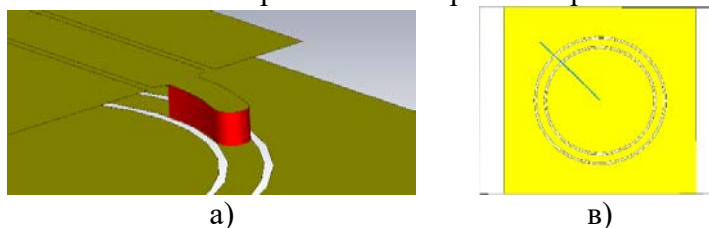


Рис. 7. а) Область связи, в) Резонатор.

Материалом подложки, как уже было сказано, является стеклотекстолит, материал – медь. Травление проводилось в лабораторных условиях, точность исполнения элементов была достаточной для их оценочной реализации.

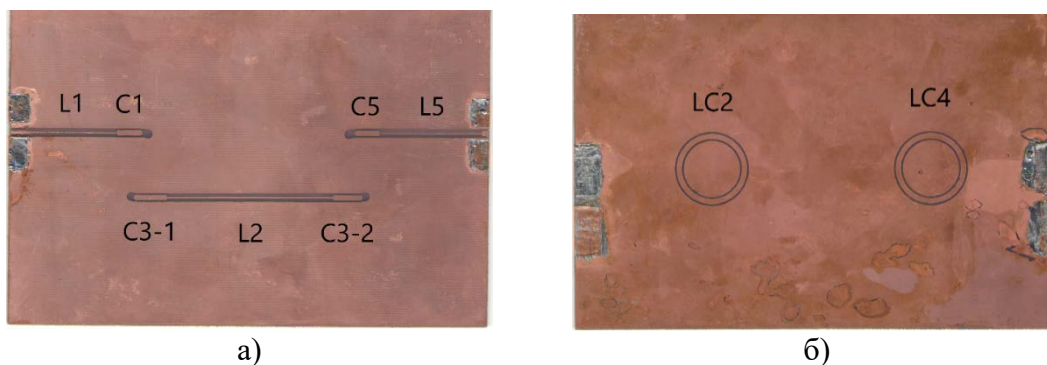


Рис. 10. а) лицевая сторона макета, ввод/вывод сигнала, индуктивности и обкладки емкостей; б) обратная сторона, содержащая резонаторы

При проведении измерений устройство продемонстрировало свою полную работоспособность, его АЧХ точно попала в заданные техническим условием частотные границы. К сожалению, нельзя не отметить, что потери в подобных макетах значительны, добротность материалов невысока. Но авторы не ставили своей задачей полное совпадение результатов эксперимента (по ослаблению) с техническим заданием, а лишь создали рабочий макет, чем доказали правильность предположений и возможность синтеза подобных устройств на СВЧ материалах. (Для справки уточним, что порядок потерь в полосе пропускания у нас около 5 дБ, потери в полосе запираания порядка 25 дБ, то есть + 5 дБ на диссипативные потери в диэлектрике, что полностью соответствует характеристикам материала макета). Расчет, макетирование и эксперимент доказали работоспособность устройства в заданной полосе частот, поэтому было принято решение попробовать синтезировать фильтр более высокого порядка уже на более чистых материалах.

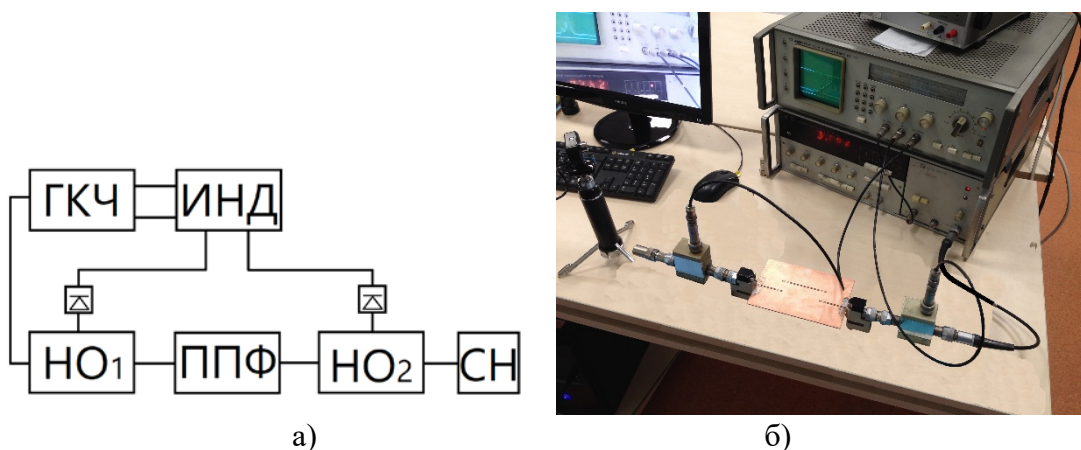


Рис.11. а) структурная схема измерений, б) стенд с фильтром во время измерений.

Результаты измерений показаны на осциллограммах рисунка 12, становится ясно, что структура рабочая и на высоком порядке.

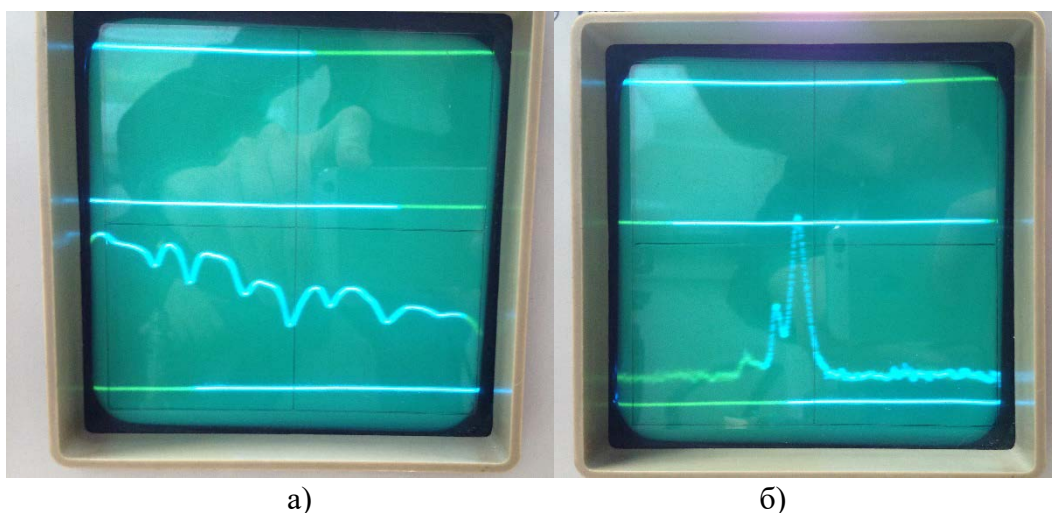


Рис. 12. а) Калибровочная АЧХ, б) АЧХ макета.

Для того, чтобы избежать синтеза L и C, реализуемых в последовательном контуре с помощью планарной линии, воспользуемся преобразованием последовательного контура с нагруженной добротностью Q в параллельный с двумя трансформирующими линиями.

Первые фильтры, характеристики которых еще не описывались полиномами, были интуитивно построены по схеме «резонатор-связь-резонатор». Нас устраивает, что приведенная схема прототипа совпадает с полиномиальным фильтром Чебышева n -го порядка. Добавляя четвертьволновые отрезки (линии связи), мы получаем схему, которая содержит только параллельные контуры.

Пересчитать последовательный контур в параллельный можно с помощью введения двух основных понятий: ω_0 и нагруженная добротность.

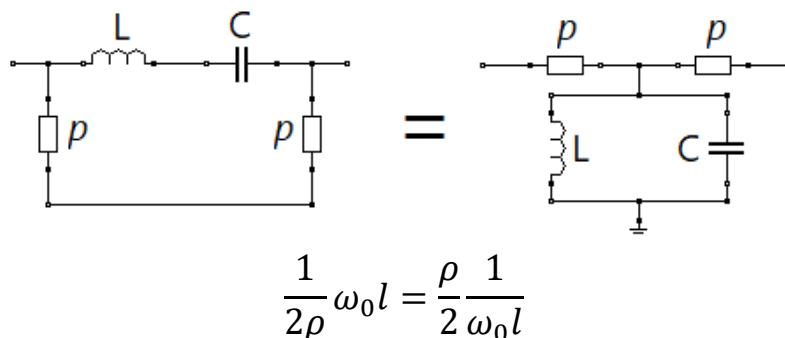


Рис.13 Пересчет последовательного контура в параллельный.

Пересчитав, таким образом последовательные плечи, получим новую принципиальную схему фильтра.

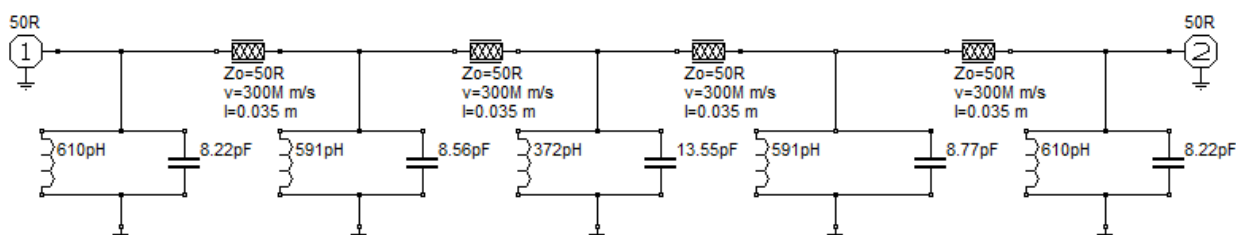


Рис.14. Принципиальная схема устройства частотной селекции без последовательных контуров.

Макетирование данной структуры на данном типе резонаторов еще не проводилось, однако следует отметить, что данная методика великолепно зарекомендовала себя при построении фильтров на полосковых кольцевых структурах.

Библиографический список

1. Маттей Г.Л., Янг Л., Джонс Е.М.Т. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи.
2. Объемные интегральные схемы СВЧ. Гвоздев В.И., Нефедов Е.И. – 1985.
3. Расчёт модифицированных линий передач для объёмных интегральных схем СВЧ. Авторы: К.В. Боброва, И.А. Булатова, Е.А. Иванова, Э.Ю.Седышев.
4. СВЧ Цепи. Анализ и автоматизированное проектирование / В. Фуско / перевод с англ. А.А. Вольман, А.Д. Муравцова, - М. – Радио и Связь, - 1990.
5. Справочник по расчету и конструированию СВЧ полосковых устройств / под ред. В.И. Вольмана, - М. – Радио и Связь, - 1982.
6. Справочник по расчету фильтров / Г. Ханзел / перевод с англ. В.А. Старостина, под ред. А.Е. Знаменского, - М. – Советское радио, - 1974.
7. Новые функциональные элементы схем СВЧ / Э.Ю. Седышев / 60 НТК ППС СПбГУТ, - СПб. – СПбГУТ, - 2008.