

**Бочаров Е.И., Кондрашова М.А., Ракова К.А.,
Седышев Э.Ю., Тарасик Е.Э.**
Санкт-Петербургский государственный университет
телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича

Кольцевые эллиптические резонаторы для СВЧ-устройств

В работе описаны новые элементы интегральной схемотехники: плоский и объемный кольцевые резонаторы на полосковой линии, объемный кольцевой резонатор на компланарной линии. Рассмотрены их основные геометрические и электротехнические параметры. Представлено устройство частотной селекции на предложенных резонаторах.

Ключевые слова: СВЧ, резонатор, кольцевые резонаторы, резонатор на полосковой линии, резонатор на компланарном волноводе.

Одним из важнейших элементов интегральной схемотехники СВЧ является резонатор. Существует множество резонаторов разных форм и размеров, многие из них широко используются, а некоторые представляют особый интерес в виду низкой степени изученности. Разработка различных конструкций резонаторов является весьма перспективной областью, так как на основе явления резонанса возможно проектирование различных функциональных узлов устройств СВЧ диапазона. Например, резонаторы могут использоваться в устройствах фильтрации, в устройствах частотной селекции и в устройствах генерации СВЧ-сигнала.

В данном докладе рассмотрены три вида резонаторов, представленных в таблице 1.

Таблица 1. Исследуемые резонаторы.

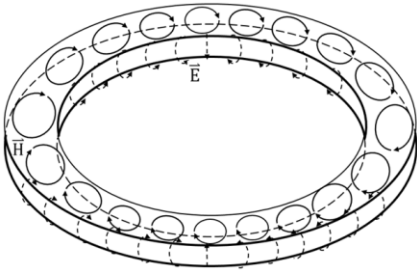
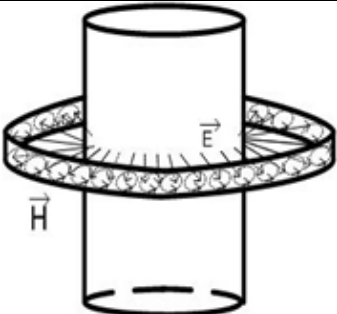
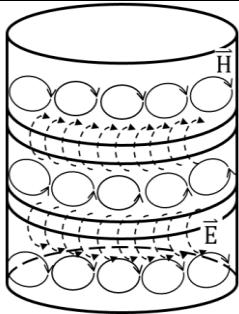
а) Плоский кольцевой резонатор на полосковой линии	б) Объемный кольцевой резонатор на полосковой линии	в) Объемный кольцевой резонатор на компланарной линии
		

Конструкции представляют собой замкнутые в кольцо полосковые или компланарные волноводы. Форма окружности может быть заменена на эллиптическую, так как любая плавно-гладкая поверхность для волны предпочтительнее, чем конструкция с наличием изломов. В качестве основы для резонатора должен быть использован

высокодобротный диэлектрик, который хорошо обрабатывается и имеет низкие потери. При макетировании мы ограничимся материалами, которые просто легко обрабатываются.

В резонаторах на полосковых линиях волна распространяется в диэлектрике между полоском и «землей», которая расположено на другой стороне диэлектрика. В компланарном резонаторе заземленный и токнесущий проводник расположены в одной плоскости – волна распространяется в щелях, между этими полосками.

Таблица 2. Распределение полей E и H.

а) Плоский кольцевой резонатор на полосковой линии	б) Объемный кольцевой резонатор на полосковой линии	в) Объемный кольцевой резонатор на компланарной линии
		

Исследуемые структуры являются резонаторами бегущей волны. Из этого следует, что основным параметром, влияющим на их резонансную частоту, является длина окружности резонатора. А от способа включения в тракт будет зависеть качество резонанса. Чтобы избежать расфазирования волны, место соединения устройства с линией должно быть точечным.

Условие резонанса с точки зрения геометрии структуры:

$$l = n\lambda, \text{ где } n = 1, 2, 3 \dots,$$

где l :

- длина окружности по средней линии (табл. 1а);
- длина внешнего кольца (табл. 1б);
- длина центрального полоска (табл. 1в).

Исходя из этого условия, частоту резонанса в макетах следует рассчитывать по следующей формуле при $n = 1$:

$$f = \frac{c}{\lambda\sqrt{\epsilon}}, \text{ - для полосковых резонаторов;}$$

$$f = \frac{c}{\lambda\sqrt{\epsilon + 1}}, \text{ - для компланарного резонатора.}$$

Для достижения резонанса на рассчитанной частоте необходимо определенное соотношение волновых сопротивлений резонатора и линии, к которой он подключается.

Это включение фактически определяет нагруженную добротности системы. Ниже приведены формулы для расчета волновых сопротивлений:

$$Z_{\text{в}} = 75 * \frac{\ln\left(\frac{6h}{0.75w + t} + 0.075 \frac{w}{h}\right)}{\sqrt{\epsilon}}, \text{ - для полосковой линии [8];}$$

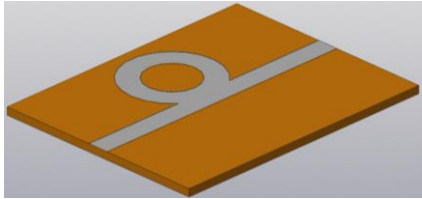
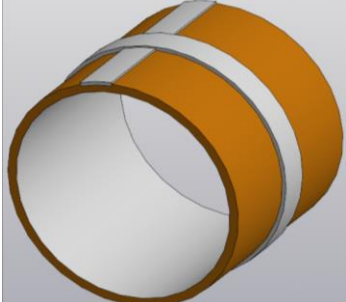
$$Z_{\text{в}} = \frac{30\pi}{\sqrt{\epsilon_{\text{эф}}}} * \frac{K'(k_3)}{K(k_3)}, \text{ - для компланарной линии [2];}$$

где h – толщина диэлектрика, w – ширина полоскового проводника, t – толщина полоскового проводника, $K'(k)$ и $K(k)$ – эллиптические интегралы первого рода.

На частоту резонанса также оказывают влияние погонные параметры. Погонная индуктивность во всех случаях зависит от длины проводящей пластины. Погонная емкость зависит от толщины и материала диэлектрика. В полосковых резонаторах емкость зависит от ширины проводящей пластины. В компланарном резонаторе при малом диаметре возникает емкостная связь между стенками цилиндра, так же изменение ширины зазора, щелевой емкости, влияет на частоту резонанса.

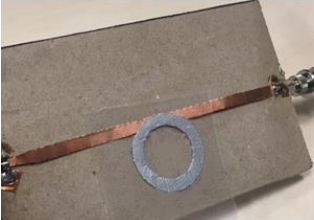

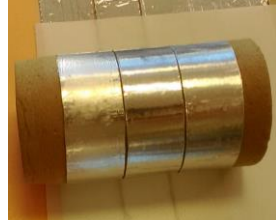

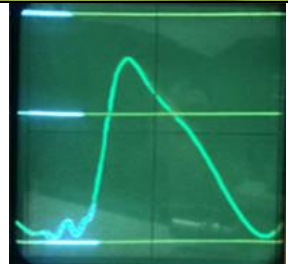
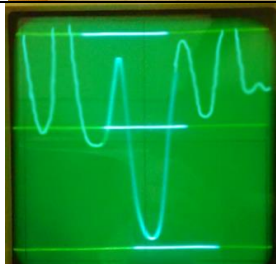
Как говорилось ранее, от способа подключения зависит качество резонанса. Гальваническое соединение более подходит для объемного полоскового резонатора. При подключении гальванически плоского полоскового резонатора, либо значительно меняется волновое сопротивление в точке включения, либо возникает паразитная емкость. В случае компланарного резонатора, довольно сложно достичь минимальной площади соприкосновения устройства с линией, что ведет к расфазированию волны.

Таблица 3. Гальванический способ подключения резонаторов.

а) Плоский кольцевой резонатор на полосковой линии	б) Объемный кольцевой резонатор на полосковой линии	в) Объемный кольцевой резонатор на компланарной линии
		

Для проведения эксперимента были синтезированы масштабные модели резонаторов. Диэлектриком является технический картон, в качестве проводящего материала выбран алюминий. Устройства подключались к линии гальванически.

Таблица 4. Макеты резонаторов и их АЧХ, полученные в результате эксперимента.

Название резонатора	а) Плоский кольцевой резонатор на полосковой линии	б) Объемный кольцевой резонатор на полосковой линии	в) Объемный кольцевой резонатор на компланарной линии
Макет резонатора			
Характеристика передачи резонатора			

В таблице 4 представлены рабочие макеты резонаторов. Как видно из передаточных характеристик исследуемых устройств во всех трех случаях наблюдается резонанс. Искажение кривых связано с неоднородностями, которые возникли вследствие макетирования и несовершенства конструкций.

На основе рассмотренных резонаторов был смоделирован полосно-пропускающий фильтр. На рисунке 1 представлена экспериментальная модель. В качестве диэлектрика был выбран материал - пластмасса, который располагается между центральным (заземленным) цилиндром и «внешними кольцами».

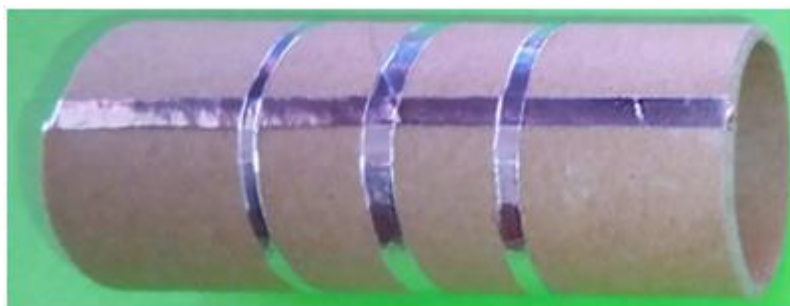
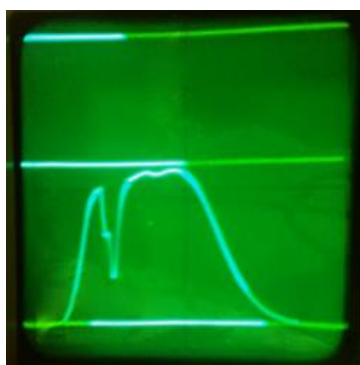
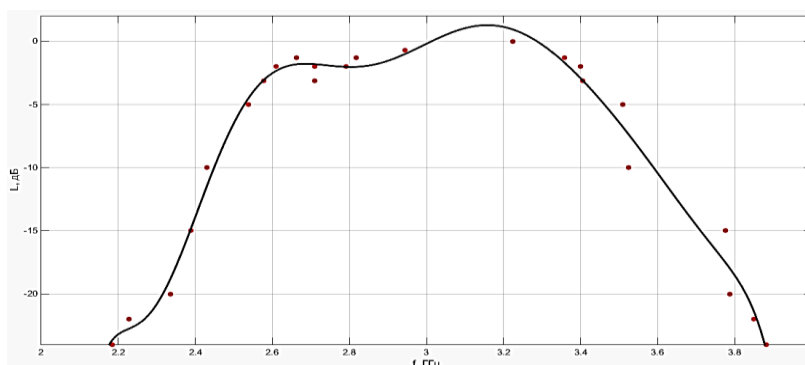


Рис. 1. Макет фильтра на основе трех объемных полосковых резонаторов.

Фильтр, на основе объемных кольцевых резонаторов, обладает хорошей крутизной и минимальными потерями. Как видно из передаточной характеристики (рисунок 2) на частоте 2,71 ГГц есть небольшой провал. Он обусловлен недостаточно точной настройкой макета. Но в целом эта характеристика близка к идеалу. Хотелось отметить также, что расчет подобных фильтров по классической методике не вызывает никакого труда.



а



б

Рис. 2. Характеристика передачи представленного фильтра:

а – полученная на панораме;

б – построенная по экспериментальным данным.

Таблица 5. Точки передаточной характеристики фильтра.

f , ГГц	2,184	2,227	2,336	2,388	2,431	2,538	2,578	2,609
L , дБ	-24	-22	-20	-15	-10	-5	-3,1	-2
f , ГГц	2,662	2,709	2,710	2,792	2,818	2,945	3,224	3,359
L , дБ	-1,3	-2	-3,1	-2	-1,3	-0,7	-0,2	-1,3
f , ГГц	3,399	3,405	3,509	3,525	3,776	3,788	3,850	3,881
L , дБ	-2	-3,1	-5	-10	-15	-20	-22	-24

Представленный фильтр обладает огромным потенциалом. Увеличивая или же уменьшая расстояния между кольцами, добавляя новые кольца или же уменьшая, или увеличивая ширину самих внешних колец, можно изменять характеристики устройства, которое, безусловно, найдет свою нишу в интегральной схемотехнике СВЧ.

В дальнейшем исследовании резонаторов планируется разработать устройства на основе плоского полоскового и объемного компланарного резонаторов, рассмотреть емкостной способ подключения к линии, максимально исключить влияние паразитных параметров на характеристики резонаторов.

В данной работе подтверждено наличие резонансных свойств у кольцевых эллиптических структур. Экспериментально доказана не только работоспособность кольцевых резонаторов на основе планарных линий, но и возможность создания на их основе устройств частотной селекции. Характеристики макета превзошли все ожидания разработчиков и по ряду параметров превосходят промышленные образцы.

Библиографический список

1. Бахараев С.И., Вольман В.И., Либ Ю.Н. Справочник по расчету и конструированию СВЧ полосковых устройств. М.: Радио и связь, 1982. 328 с.
2. Боброва К. В., Булатова И. А., Иванова Е. А., Седышев Э. Ю. Расчёт модифицированных линий передач для объёмных интегральных схем СВЧ. СПб.: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), 2015. С. 161–170.
3. Бочаров Е.И., Рыбалко И.А., Седышев Э.Ю., Селиверстов Л.А., Сикора Г.Р. Устройства частотной селекции и стабилизации частоты на эллиптических резонаторах // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. VI Международная научно-техническая и научно-методическая конференция: сб. науч. ст. в 3 т. СПб.: СПбГУТ, 2017. С. 426–431.
4. Гвоздев В. И., Нефедов Е. И. Объемные интегральные схемы СВЧ. М.: Наука, 1985. 256 с.
5. Григорьев А.Д., Янкевич В.Д. Резонаторы и резонаторные замедляющие системы СВЧ. М.: Радио и связь, 1984. 248 с.
6. Маттей Г.Л., Янг Л., Джонс Е.М.Т. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи: в 2 т. М.: Связь, 1971. Т.1. 440 с.
7. Фальковский О.И. Техническая электродинамика. М.: Связь, 1978. 431 с.
8. Ред Э. Справочное пособие по высокочастотной схемотехнике. М.: Мир, 1990. 256 с.