

# Микроволновые кольцевые эллиптические резонаторы в устройствах интегральной схемотехники

А.С. Леонтьев, Э.Ю. Седышев

СПбГУТ им. проф. М.А. Бонч-Бруевича

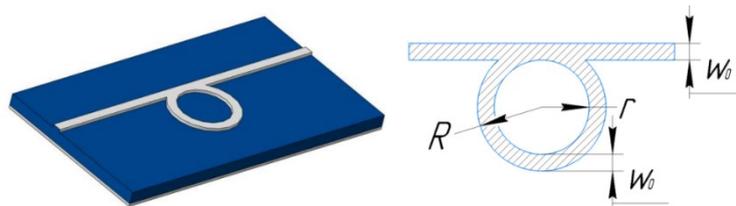
**Аннотация:** В работе рассматриваются кольцевые эллиптические резонаторы СВЧ диапазона для интегральных схем, а также устройства на основе кольцевых эллиптических резонаторов (КЭР). Анализируются конструкции с применением КЭР в микроволновых устройствах, сравниваются некоторые характеристики устройств на КЭР и традиционных шлейфных структур. Целью работы является систематизация материалов посвященных КЭР.

**Ключевые слова:** СВЧ, эллиптический резонатор, бегущая волна, кольца, усилители, генераторы, фильтры, делители, сумматоры, МПЛ, КПЛ, КЭР.

## 1. Введение

Для исследования, проектирования и производства современных микроволновых устройств всё чаще используются объемные интегральные технологии. В устройствах СВЧ особое значение придается конструктивным элементам интегральных схем (ИС). Конструктивные элементы изготавливаются единым технологическим циклом при создании проводящих, полупроводниковых и диэлектрических пленок. Различные топологические решения для конструктивных элементов зависят не только от частотного диапазона, но и от материалов. Традиционные топологические решение могут быть неприменимы в различных частотных диапазонах из-за технических ограничений производства, особых требований на разрешение того или иного элемента или узла конструкции, поэтому поиск новых конструктивов в микроволновой технике никогда не прекращается.

В качестве резонансных конструктивных элементов интегральных схем СВЧ в основном используются шлейфы, представляющие собой отрезки полосковых линий. Шлейфы используются для создания фильтров разных типов, для настройки и согласования различных узлов, блокировки и развязки различных трактов, а также для создания наведенной «земли». На их основе создаются устройства распределения энергии за счёт ёмкостной связи между линиями [1, 2]. Основным типом линии для создания шлейфа является МПЛ. Эта линия обладает низкой добротностью, что ограничивает возможности её применения, а для достижения требуемых характеристик тех же самых фильтров требуется создавать структуры высокого порядка. Стоит также отметить, что с ростом частоты длины шлейфов, особенно на подложках с высокой проницаемостью, становятся очень малыми (мкм), что затрудняет их использование в традиционных интегральных схемах сантиметрового и миллиметрового диапазона.



**Рисунок 1.** Модель КЭР на микрополосковой линии.

В качестве альтернативы шлейфным резонаторам могут использоваться кольцевые эллиптические резонаторы (КЭР), представляющие собой замкнутые металлизированные полосковые линии, связанные с основной линией передачи (рисунок 1). Структура элемента кольцевого эллиптического резонатора проста, что позволяет создавать на его основе множество различных типов конструктивных элементов.

## 2. Устройства частотной селекции

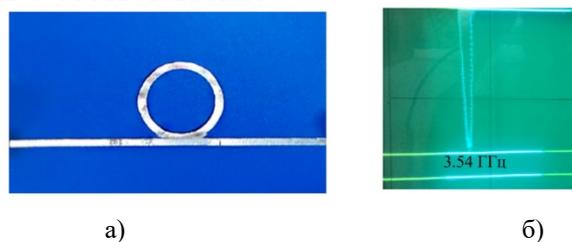
Размер кольца и резонансная частота напрямую зависят друг от друга, зависимость геометрии и резонансной частоты колец ранее была исследована в работе [3]:

$$f_{\text{рез1}} = \frac{c}{\lambda\sqrt{\varepsilon}}, \quad (1)$$

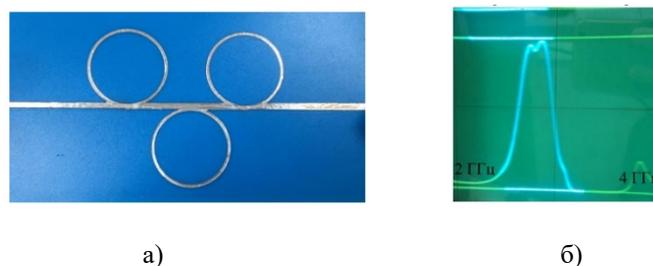
$$l_{\text{ср}} = n\lambda, \quad (2)$$

$$f_{\text{рез2}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad (3)$$

где  $c$  – скорость света в вакууме, м/с;  $\lambda$  – длина волны, которая зависит от длины кольца, м;  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость подложки,  $l_{\text{ср}}$  – длина кольца по средней линии, м;  $n = 1, 2, 3, \dots$ ,  $L$  и  $C$  – эквивалентные индуктивность и ёмкость эллиптического резонатора, Гн и Ф соответственно.



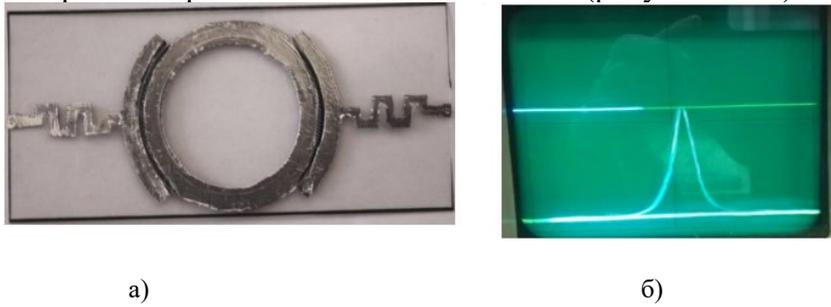
**Рисунок 2.** Макет КЭР на микрополосковой линии (а) и АЧХ резонатора (б).



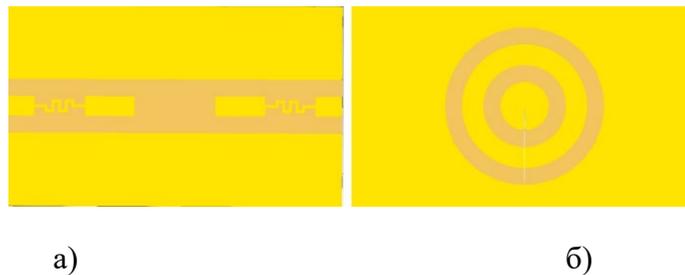
**Рисунок 3.** Макет ППФ на КЭР (а) и АЧХ резонатора (б).

По результатам макетирования (рисунки 2 и 3) были сделаны выводы о работоспособности КЭР и возможности построения на его основе фильтров различных типов.

В работе [4] рассмотрены несколько способов интеграции кольцевых резонаторов в структуры фильтров без прямой гальванической связи (рисунки 4 и 5).



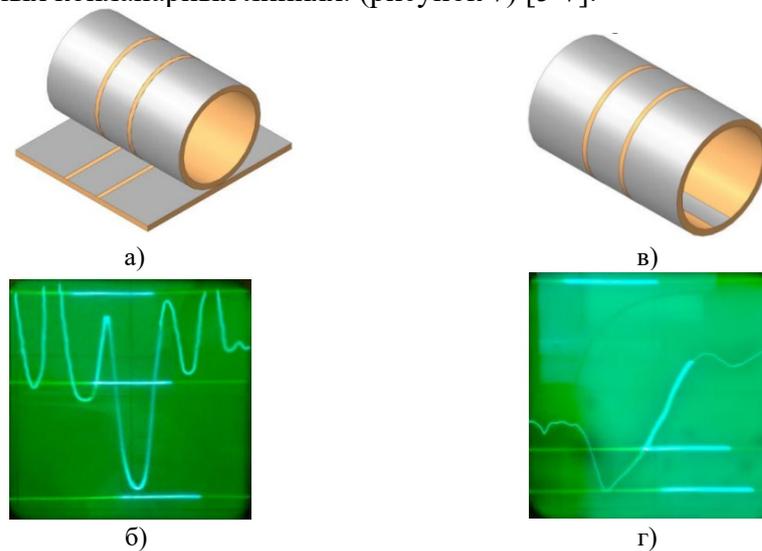
**Рисунок 4.** Макет КЭР на МПЛ (а) и АЧХ резонатора (б)



**Рисунок 5.** Модель КЭР на КПЛ нижний (а) и верхний (б) слои.

Данное исследование показало возможность построения КЭР на разных типах линий.

Также рассматривались КЭР на копланарных волноводах (рисунок 6) и модифицированных копланарных линиях. (рисунок 7) [5-7].

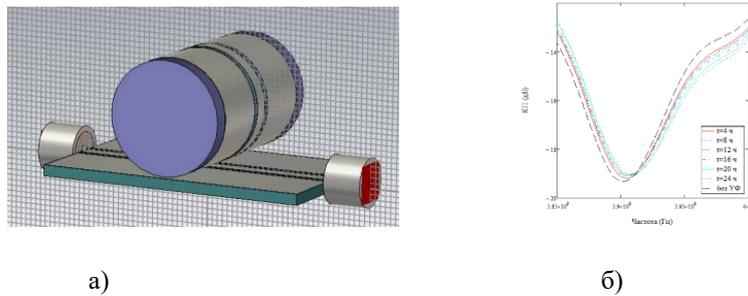


**Рисунок 6.** Модели КЭР на копланарном волноводе с питанием от КПЛ с АЧХ (а, б) и МПЛ с АЧХ (в, г).

В работах [8, 9] была исследована зависимость изменения резонансной частоты от изменений диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь жидкости, проходящей через КЭР, вызванные изменением состава жидкости, а на её основе создан микроволновый датчик для анализа качества масла (рисунок 8).



**Рисунок 7.** Макет КЭР на модифицированном копланарном волноводе.



**Рисунок 8.** Модель (а) и зависимость резонансной частоты датчика от качества масла (б).

Результаты этих исследований показывают возможности применения КЭР в разных областях инженерии.

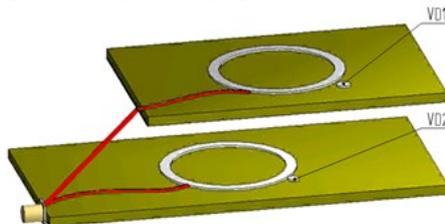
### 3. Усиление и сложение мощности активных двухполюсников

Помимо устройств частотной селекции КЭР нашли применение в качестве элемента для построения усилителей частоты. В работе [10] КЭР объединили с туннельным полупроводниковым диодом, такая конструкция позволила добиться усиления до 14 дБ на требуемой частоте, обеспеченной КЭР (рисунок 9).



**Рисунок 9.** Макет усилителя на активном двухполюснике (а) и его АЧХ (б).

Исследованию одновременного включения нескольких активных двухполюсников посвящены работы [11, 12] (рисунок 10).



**Рисунок 10.** Модель включения активных двухполюсников для сложения мощности.

Главным результатом которых является постановка задачи синхронизации работы активных двухполюсников для повышения эффективности сложения их мощностей.

#### 4. Генерация СВЧ на КЭР в ОИС

Резонансный характер АЧХ КЭРа также можно использовать для построения нового типа генераторов на КЭР. Решению этой задачи посвящены работы [13, 14]. В данных исследованиях удалось добиться хорошей сходимости результатов моделирования и эксперимента (рисунок 11).

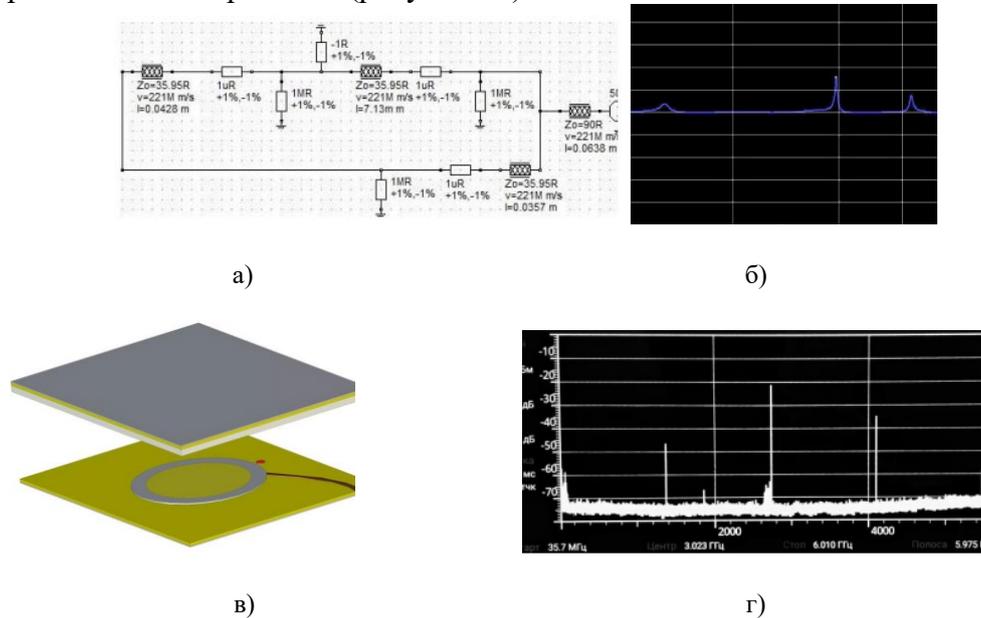


Рисунок 11. Модель (а) и расчёт (б) в RFSimm, 3D-модель (в) и результаты эксперимента (г) генератора СВЧ на КЭР в ОИС.

#### 5. Распределение мощности

Не смотря на узкую полосу рабочей частоты кольцевые резонаторы можно использовать для передачи и распределения мощности между различными каналами в устройстве. Данный способ коммутации описывается в [15], где предлагается совмещать некоторое количество  $n$  КЭР разных диаметров друг над другом связывая их, при этом каждое плечо обладает своей АЧХ. При достаточно большом  $n$  и малом расстоянии между КЭР, образуется цилиндрическая волноводная структура со множеством источников ввода и вывода сигнала, как на рисунке 12.

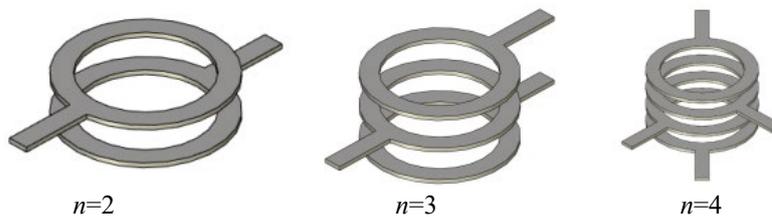


Рисунок 12. Эллиптические конструкции с разным количеством  $n$ .

#### 6. Заключение

Для построения КЭР можно выбирать различные типы линий: МПЛ, КПЛ, щелевые линии и т.д. КЭР нашла множество применений в устройствах частотной селекции, конструкции усилителей, генераторов на КЭР, устройств распределения мощности и даже создания невзаимных устройств [16]. Большинство макетов изготовлено аппликационным методом на органических диэлектриках, экспериментально доказана их работоспособность. Применение промышленных материалов и промышленных технологий изготовления однозначно улучшат характеристики устройств на КЭР. Результаты множества исследований и

проведенных экспериментов позволяют говорить о дальнейшем развитии целого класса устройств построенных с применением кольцевых эллиптических резонаторов.

#### Список литературы

1. Леонтьев А.С., Седышев Э.Ю., Синтез устройства частотной селекции на кольцевых эллиптических резонаторах в объёмном интегральном исполнении, материалы Международной научно-технической конференции «Перспективные технологии в средствах передачи информации», Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, г. Владимир, 2021. С. 390-392.
2. Лебедев Л., Наместников Е., Седышев Э.Ю., Синтез широкополосных переходов для объёмных интегральных схем СВЧ // СВЧ электроника 2019, Т. 2 С. 4-6.
3. Сазоненко Н.Ю., Седышев Э.Ю., Устройства частотной селекции на основе кольцевых эллиптических резонаторов на микрополосковой линии // Электроника и микроэлектроника СВЧ. СПб.: Санкт-петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), 2019. С. 409-411.
4. Бочаров Е.И., Рыбалко И.А., Седышев Э.Ю., Селиверстов Л.А., Сикора Г.Р., Микроволновые фильтры на эллиптических резонаторах в объёмном интегральном исполнении // Электроника и микроэлектроника СВЧ. СПб.: Санкт-петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), 2017 С. 535-538.
5. Кондрашова М.А., Седышев Э.Ю., Эллиптический резонатор на модифицированном копланарном волноводе // Актуальные проблемы инфо-телекоммуникаций в науке и образовании: сборник научных статей VIII Международной научно-технической и научно-методической конференции АПИНО 2019: в 4 томах. 2019. С. 410-418.
6. Кондрашова М.А., Сазоненко Н.Ю., Селиверстов Л.А., Улитина А.С., Седышев Э.Ю., Частотноселективные устройства на кольцевых эллиптических резонаторах // Электроника и микроэлектроника СВЧ. СПб.: Санкт-петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), 2019. Т. 1. С. 417-419.
7. Улитина А.С., Седышев Э.Ю., Синтез кольцевого эллиптического резонатора на несимметричной щелевой линии // Электроника и микроэлектроника СВЧ. СПб.: Санкт-петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), 2019. Т. 1. С. 412-416.
8. Коркина А.Р., Микроволновый датчик для анализа примесей в оливковом масле, статья в сборнике трудов конференции // XXV Туполевские чтения (школа молодых ученых): статья в сборнике трудов конференции. Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева. Казань 2021. С. 166-171.
9. Коркина А.Р., Насыбулина А.Р., Фархутдинов Р.В., СВЧ-датчик на основе объёмного копланарного кольцевого резонатора для анализа качества оливкового масла // Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами // IX Всероссийский научный школа-семинар, сборник статей под ред. Ал.В. Скрипаля, Издательство «Саратовский источник», Саратов. 2022. С. 360-363.
10. Бочаров Е.И., Подольская М.О., Седышев Э.Ю., Усилитель на активном двухполоснике, интегрированный в кольцевой эллиптический резонатор // Актуальные проблемы инфо-телекоммуникаций в науке и образовании: сборник научных статей IX Международной научно-технической и научно-методической конференции АПИНО 2020: сборник научных статей. Санкт-Петербург, 2020. Т.3. С. 408-412.
11. Седышев Э.Ю., Шомин А.Ю., Исследование возможности одновременного использования нескольких активных двухполосников при создании СВЧ генераторов // Актуальные проблемы инфо-телекоммуникаций в науке и образовании: сборник научных статей IX Международной научно-технической и научно-методической конференции АПИНО 2020: сборник научных статей. Санкт-Петербург, 2020. Т.3. С. 514-519.
12. Ларионова А.К., Седышев Э.Ю., Исследование микроволнового генератора на кольцевом резонаторе с учетом эквивалента активного двухполосника // Актуальные проблемы инфо-телекоммуникаций в науке и образовании: сборник научных статей XI Международной научно-

технической и научно-методической конференции АПИНО 2022. Сборник научных статей. Санкт-Петербург, 2022. Т.2. С. 645-651.

13. Шомин А.Ю., Седышев Э.Ю., Генератор свч в интегральном исполнении на кольцевом резонаторе // Подготовка профессиональных кадров в магистратуре для цифровой экономики ПКМ-2020. Региональная научно-методическая конференция магистрантов и их руководителей. Сборник лучших докладов конференции. Сост. Н.Н. Иванов. Санкт-Петербург, 2021. С. 339-343.

14. Каткова Т.О., Седышев Э.Ю., Генератор СВЧ на кольцевом эллиптическом резонаторе в объемном интегральном исполнении // Электроника и микроэлектроника СВЧ. СПб.: Санкт-петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), 2021. Т. 1. С. 430-433.

15. Леонтьев А.С., Седышев Э.Ю. Синтез устройства частотной селекции на кольцевых эллиптических резонаторах в объемном интегральном исполнении // Электроника и микроэлектроника СВЧ. СПб.: Санкт-петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), 2022. С. 382-386.

16. Vyacheslav Lobekin, Alexandr Tatarenko, Andrei Belyshev, Mirza Bichurin Resonator for MICRO-WAVE MAGNETOELECTRIC EFFECT, The Yaroslav-the-Wise Novgorod State University, B.St.-Peterburgskaya str., 41, 173003, Veliky Novgorod, Russia