

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.

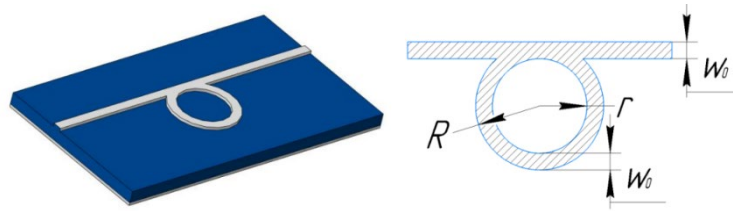


Рисунок 1. Модель КЭР на микрополосковой линии.

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; λ – длина волны, которая зависит от длины кольца, м; ε – 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.

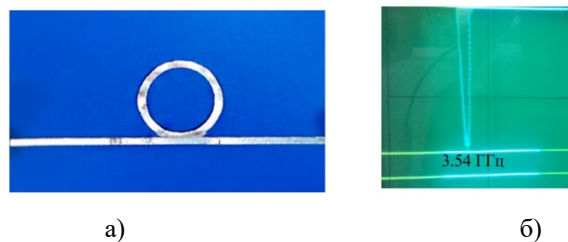


Рисунок 2. Макет КЭР на микрополосковой линии (а) и АЧХ резонатора (б).

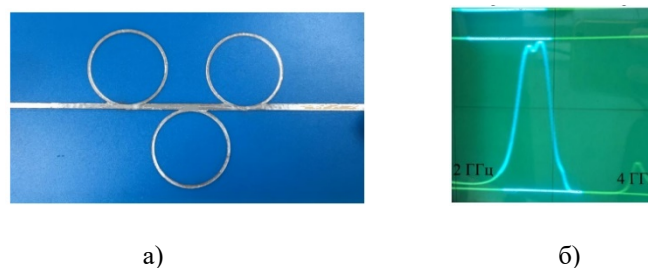


Рисунок 3. Макет ППФ на КЭР (а) и АЧХ резонатора (б).

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).

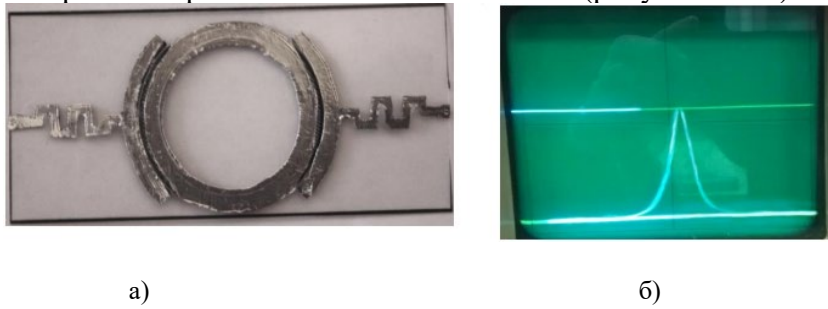


Рисунок 4. Макет КЭР на МПЛ (а) и АЧХ резонатора (б)

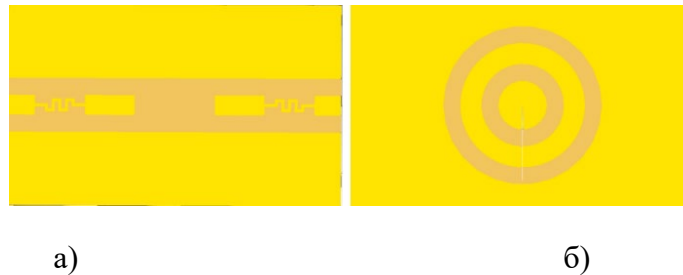


Рисунок 5. Модель КЭР на КПЛ нижний (а) и верхний (б) слои.

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].

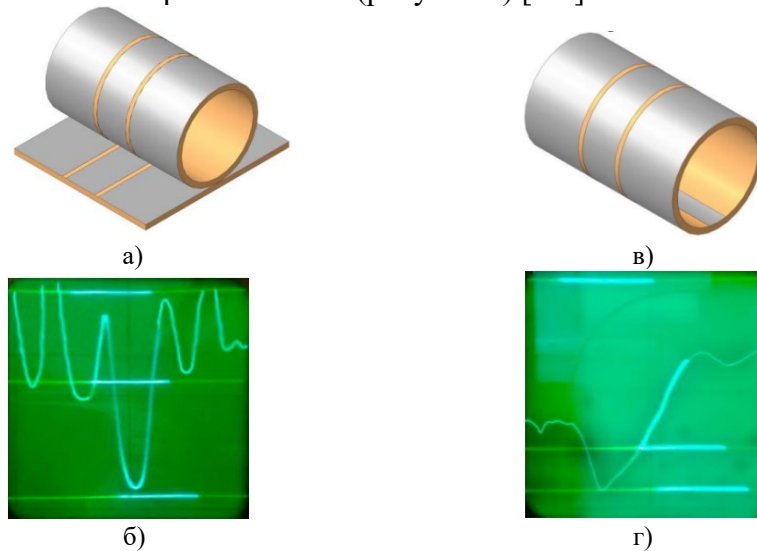


Рисунок 6. Модели КЭР на копланарном волноводе с питанием от КПЛ с АЧХ (а, б) и МПЛ с АЧХ (в, г).

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.

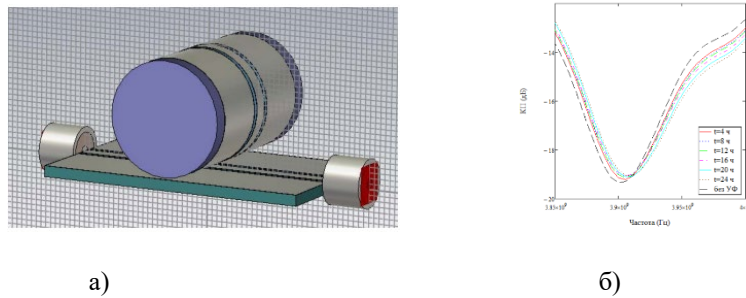


Рисунок 8. Модель (а) и зависимость резонансной частоты датчика от качества масла (б).

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).

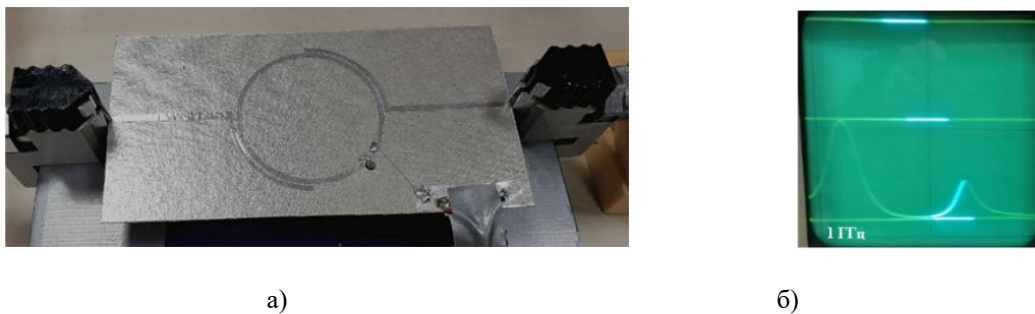


Рисунок 9. Макет усилителя на активном двухполюснике (а) и его АЧХ (б).

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

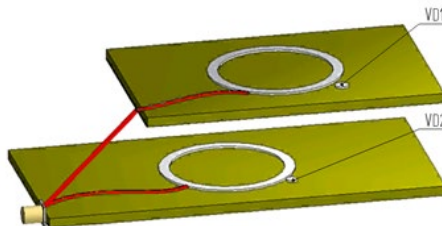


Рисунок 10. Модель включения активных двухполюсников для сложения мощности.

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).

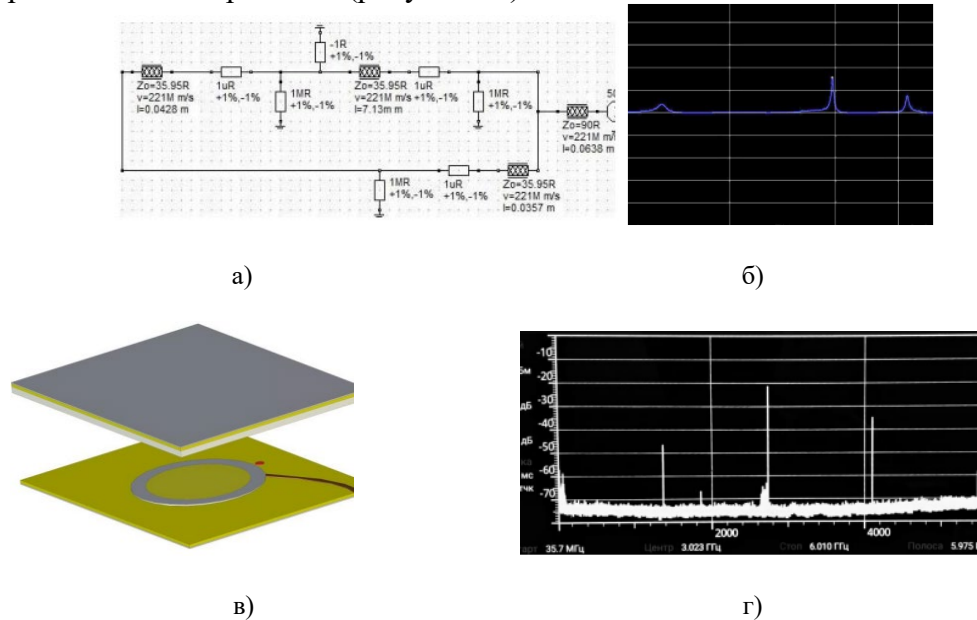


Рисунок 11. Модель (а) и расчёт (б) в RFSimm, 3D-модель (в) и результаты эксперимента (г) генератора СВЧ на КЭР в ОИС.

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.

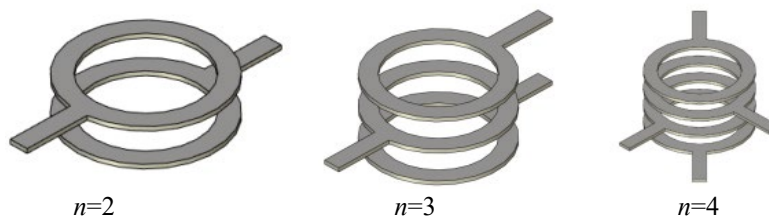


Рисунок 12. Эллиптические конструкции с разным количеством n .

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