

# Особенности распространения волны в кольцевом эллиптическом резонаторе

Е.Ф. Иванищева, А.С. Леонтьев, Э.Ю. Седышев, С.И. Федоров

СПбГУТ

**Аннотация:** Исследования кольцевых резонирующих структур вызывает интерес у ряда разработчиков СВЧ устройств, некоторые особенности кольцевых эллиптических резонаторов приводят к возникновению уникальных свойств передаточных характеристик. Особое значение при синтезе данных резонаторов имеет способ их возбуждения. При определенных условиях в данных структурах возможно получение режима бегущей волны. Исследованию способов возбуждения и оценки режима волнового процесса в структуре посвящена данная работа.

**Ключевые слова:** микроволны, кольцевые эллиптические резонаторы (КЭР), вентиль, направленный ответвитель, полосковая линия, интегральная схема СВЧ

## 1. Введение

Современная микроволновая техника в настоящее время испытывает некоторый дефицит конструктивных элементов для проектирования устройств в сантиметровом и миллиметровом диапазонах. В этих диапазонах интегральная СВЧ техника теряет привычную геометрию и становится полноценной микроэлектроникой. Резонаторы классической конфигурации в диапазонах выше (15 – 20) ГГц приобретают крайне малые размеры.

Обычный планарный шлейфный фильтр в диапазоне (10 – 12) ГГц практически невозможно настроить, так как элементы настройки имеют размеры микрометров. В данной ситуации необходимо предложить в качестве резонирующих структур многорезонансные системы, которые имеют первый резонанс в области сантиметров, а далее сохраняют добротность и на более высоких частотах. К сожалению, обычный шлейф в полосковом исполнении дает очень скромные результаты по селекции в сантиметровом диапазоне.

Кольцевые эллиптические резонаторы (КЭР) за последние (5 – 7) лет нашли свое место в микроволновой микроэлектронике [1, 3], с ними работают некоторые университеты в Российской Федерации [5 – 8]. Также в сети появляются работы зарубежных коллег, посвященные исследованию кольцевых эллиптических резонаторов (КЭР).

Данное обозначение «КЭР» этим конструкциям было предложено нами в 2018 году, чтобы подчеркнуть их принципиальное отличие от классических кольцевых резонаторов, описанных в работах [2] проектировщиков интегральных устройств СВЧ до 2018 года.

Особенно интересными результатами, полученными экспериментально, являются огромные значения режекций при включении КЭР в линию на прохождение (более 60 дБ). В этой связи было проведено несколько исследований, которые посвящены способам питания КЭР и созданию монорежимов (режим бегущей, режим стоячей) волны в резонаторе.

## 2. Введение в КЭР вентиля

Для создания монорежима бегущей волны, исключение смешанного режима, в резонатор вводится вентиль. Для достижения монорежима бегущей волны в кольцевом эллиптическом резонаторе, необходимо ограничить направления распространения

электромагнитной волны. Инженерам и исследователям давно известен такой элемент как вентиль. Ферритовый вентиль – это устройство с односторонним прохождением электромагнитной волны, мощность сигнала проходит с минимальным ослаблением в прямом направлении и в большей части рассеивается в обратном.

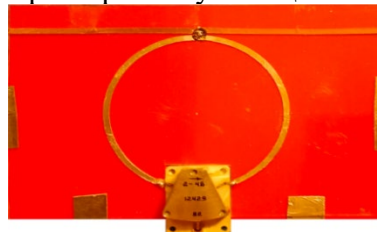
В рамках исследования были изготовлены и исследованы несколько макетов кольцевых эллиптических резонаторов с интегрированным вентиляем в структуру резонатора (рисунки 2 и 3). Макеты изготовлены аппликационным методом на органической подложке с диэлектрической проницаемостью 2,2 – 2,4. Расчётная резонансная частота 3 ГГц.



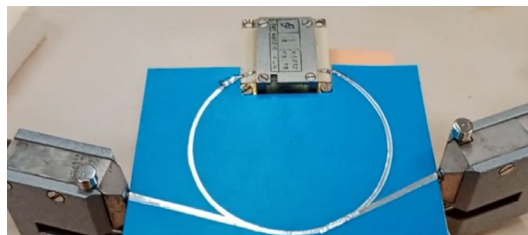
**Рисунок 1.** Включение вентиля в прямом и обратном направлениях.

Исследование проводилось на панорамном измерителе ослабления и КСВН состоящем из генератора качающейся частоты Р2-52 и индикатора КСВН и ослабления Я2Р-67 в частотном диапазоне 1-4 ГГц

В ходе эксперимента изучалось влияние направления включения вентиля (рисунок 1) на резонансную характеристику кольцевого эллиптического резонатора.



**Рисунок 2.** Изображение первого макета.



**Рисунок 3.** Изображение второго макета.

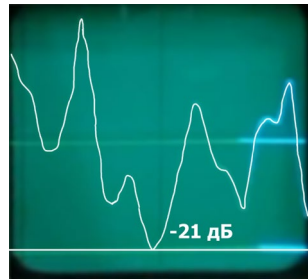
Первый макет (рисунок 2) представляет собой кольцевой эллиптический резонатор с интегрированным вентиляем, подводящая и отводящая линии передачи расположены вдоль одной оси. Эксперимент с первым макетом показал неоднозначные результаты, а именно не удалось достичь требуемого уровня ослабления на резонансной частоте.

Выдвинуто предположение о неправильном выборе способа питания кольца, при котором не получилось достичь хорошего согласования из-за множественных переотражений волны в точке соединения кольца с основным трактом, также не удалось обеспечить прохождения волны в кольцо. Далее был изготовлен второй макет, отличающийся способом питания (рисунок 3).

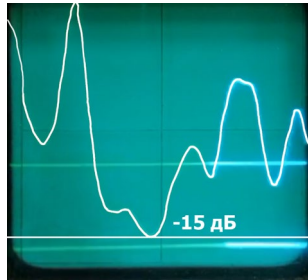
У второго макета подводящая и отводящая линии передачи расположены под углом таким образом, чтобы увеличить степень согласования кольца с основной линией передачи. Второй макет также исследовался с включением вентиля в оба направления.

В результате эксперимента установлено, что изготовленный макет обладает невзаимными характеристиками передачи в прямом и обратном направлениях. При

включении вентиля в обратном направлении обнаружился резонанс (рисунок 4) на частоте 3073 МГц (при расчётной 3000 МГц), ослабление составляет порядка минус 21,5 дБ.



**Рисунок 4.** Характеристика ослабления обратного включения вентиля.



**Рисунок 5** Характеристика ослабления прямого включения вентиля.

После смены направления включения вентиля на прямое произошло незначительное смещение частоты резонанса (рисунок 5), но при этом уровень ослабления изменился до минус 15 дБ. Наблюдается влияние вентиля на добротность резонатора.

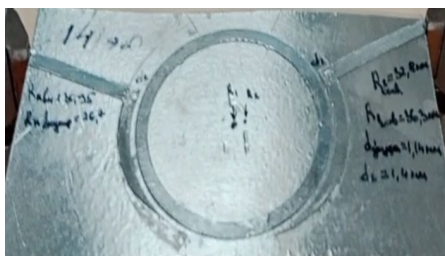
Таким образом, в ходе эксперимента подтверждено влияние невзаимных свойств ферритового вентиля на распространение электромагнитной волны в кольцевом резонаторе

### **3. Питание КЭР через направленный ответвитель**

Рассмотрим кондуктивный способ возбуждения волны в резонаторе, который обладает своей спецификой. Уровень волны в резонаторе на порядок отличается от уровня волны при гальваническом возбуждении. На рисунке 6 представлен исследуемый макет. Структура на рисунке представляет собой КЭР с двумя направленными ответвителями на связанных линиях. Так как данный тип ответвителей является «противонаправленным» [8], расположение питающих отрезков и отрезков с согласованной нагрузкой на конце выбрано именно таким образом.



**Рисунок 6.** Макет КЭР с возбуждением через направленный ответвитель.



**Рисунок 7.** Макет КЭР с возбуждением через направленный ответвитель на нерегулярных линиях.

Питая данную структуру справа налево, в кольце возникает бегущая волна, направленная против часовой стрелки. Уровень мощности, ответвляемой в кольцо, определяется из характеристик делителя (уровня связи, направленности и ослабления в самой линии). Для предотвращения возникновения переотражения в первичной линии передачи на её конце расположена согласованная нагрузка.

Следующий шаг – исследование конструкции с заменой шлейфов с согласованными нагрузками на шлейфы с переменным волновым сопротивлением линии. Также была исследована зависимость частотных характеристик данной конструкции от длин первичных линий.

Эксперимент показал, что подобный масштабный макет обладает большим ослаблением (порядка минус 25 дБ) что непременно связано с показателем переходного ослабления делителей, также было замечено, что данная конструкция обладает различным ослаблением в зависимости от способа питания.

В случае макета с отрезками связи разной длины, эксперимент продемонстрировал меньшее ослабление при питании со стороны отрезка большей длины (порядка 12 дБ).

В эксперименте с конструкцией, отрезки линий связи которой обладали одинаковой длиной, результаты оказались абсолютно идентичными независимо от способа питания.

Также стоит отметить, что частота, на которой было замечено наилучшее прохождение, в каждом из случаев определялась лишь длиной кольца и не зависела от длины отрезков питания или отрезков линий связи.

#### 4. Выводы

В работе были рассмотрены несколько способов возбуждения КЭРа и оценены волновые процессы при каждом из них. Отмечено влияние стороны включения вентиля при сохранении направления сигнала, что говорит о неравномерном распространении волны в КЭРе.

В случае питания КЭРа при помощи связанных линий стоит подчеркнуть, что точный расчёт взаимного влияния связанных линий — это достаточно трудоёмкая задача, которая лучше всего решается методами ЭД моделирования. Подобную проблему можно решить и более простыми расчётными пакетами, в которых не происходит физического моделирования структуры, однако подобная задача потребует строгого решения телеграфных уравнений для связанных (и в нашем случае) нерегулярных линий.

#### Список литературы

1. Леонтьев А.С., Седышев Э.Ю., Синтез устройств 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. Справочник по расчету и конструированию СВЧ полосковых устройств / [С. И. Бахарев, В. И. Вольман, Ю. Н. Либ и др.]; под ред. В. И. Вольмана. - Москва : Радио и связь, 1982. - 328 с.: ил.

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. Кондрашова М.А., Сазоненко Н.Ю., Селиверстов Л.А., Улитина А.С., Седышев Э.Ю., Частотно-селективные 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.
5. 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.
6. Коркина А.Р., Насыбулина А.Р., Фархутдинов Р.В., СВЧ-датчик на основе объемнокопланарного 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.
7. 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.
8. Малорацкий Л. Г. Микроминиатюризация элементов устройств СВЧ. – М.: Советское радио, 1976, 216 с.
9. Vyacheslav Lobekin, Alexandr Tatarenko, Andrei Belyshev, Mirza Bichurin Resonator for MICRO-WAVE MAGNETOELECTRIC EFFECT, The Yaroslav-the-Wise Novgorod State University, B.St.-Peter-burgskaya str., 41, 173003, Veliky Novgorod, Russia