

Синтез устройства частотной селекции на кольцевых эллиптических резонаторах в объёмном интегральном исполнении

А.С. Леонтьев, Э.Ю. Седышев

СПбГУТ им. проф. М.А. Бонч-Бруевича

Аннотация: работа посвящена вопросам проектирования устройств частотной селекции на основе кольцевых эллиптических резонаторов, выполненных в объёмном интегральном исполнении. В работе описаны основные особенности функционирования кольцевых эллиптических резонаторов, произведён краткий обзор исследуемой проблематики. Разработаны и исследованы несколько устройств частотной селекции на кольцевых эллиптических резонаторах, проведён эксперимент.

Ключевые слова: ОИС СВЧ, фильтры, кольцевые резонаторы, топология

Современная микроволновая электроника идет по пути увеличения степени интеграции объёмных интегральных схем, эта тенденция стала логическим продолжением развития гибридно-интегральных схем. Современные объёмные интегральные схемы СВЧ могут включать в себя диэлектрические, резистивные, полупроводниковые и проводящие слои. В этих слоях могут находиться соединенные между собой навесные и конструктивные элементы схем. Многообещающе выглядят новые технологии производства такие как SIW, MEMS, LTCC, которые позволяют добиваться требуемых характеристик устройств с меньшими габаритными показателями.

Освоение новых диапазонов частот устройств побуждает искать новые конструктивы для синтеза техники микроволнового диапазона. За счёт использования особых конструкций распределённых компонентов в толще диэлектрической подложки, создаются устройства, способные выполнять функционал более сложных устройств, выполненных в планарном варианте или из навесных компонентов. В отличие от планарных гибридных устройств, где развязка между узлами и компонентами схемы достигается за счёт экранирующих элементов, в ОИС СВЧ необходимо организовывать связь между слоями структуры гальванически или же посредством поля.

Наиболее распространёнными конструктивными элементами для синтеза ОИС СВЧ являются различного рода линии связи, устройства распределения мощности [1] и резонаторы. Классическими линиями связи, используемыми в ОИС СВЧ, являются несимметричная и симметричная полосковые линии, копланарный волновод, а также щелевая линия.

В последнее время разработчики ИС СВЧ проявляют интерес к устройствам, построенным на кольцевых эллиптических резонаторах. Полосковая линия, замкнутая сама на себя, питаемая линией передачи, выполняет роль резонатора. Резонансная частота такой системы напрямую зависит от геометрии используемой линии, учитывающей количество длин волн, укладываемых в кольцо. Резонансная частота первой гармоники находится по следующей формуле:

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

где c – скорость света в вакууме, m/c ; λ – длина волны, укладываемой в резонаторе, m ; ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость подложки, $f_{\text{рез}}$ – резонансная

частота.

Также выделяют резонансную частоту, обусловленную эквивалентными параметрами кольцевого резонатора, которая рассчитывается по формуле:

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

где L и C – эквивалентные индуктивность и ёмкость эллиптического резонатора.

В работах, посвященных синтезу устройств частотной селекции на эллиптических резонаторах, рассматриваются по большей части ППФ на их основе [2], [3]. Изменяя геометрию и добавляя согласующие элементы можно добиться изменения частотных характеристик конструкции, тем самым получив и другие типы фильтров: ФНЧ, ФВЧ и ПЗФ.

Частотная избирательность резонансных фильтров описывается таким параметром как крутизна фильтра, который показывает, как резко изменяется амплитуда входного сигнала на выходе при изменении его частоты. В свою очередь крутизна характеристики фильтра зависит от собственной добротности эллиптического резонатора, а также внешней добротности. Для нахождения добротности фильтра можно воспользоваться следующими формулами:

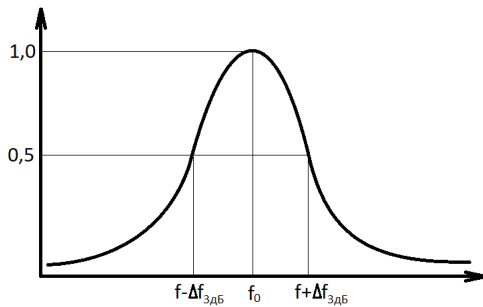


Рисунок 1. Определение добротности фильтра по уровню -3 дБ

$$Q_0 = \frac{w_0}{2 \cdot \Delta w_{-3\text{дБ}}} = \frac{f_0}{2 \cdot \Delta f_{-3\text{дБ}}} \quad (3)$$

$$\frac{1}{Q_L} = \frac{1}{Q_0} + \frac{1}{Q_l} \quad (4)$$

$$Q_0 = 2\pi n \cdot \frac{\left(\frac{\lambda_r}{\lambda_0}\right)^2}{1 - e^{-2\alpha L_{\text{cp}}}} \quad (5)$$

$$\lambda_0 = \lambda_r \cdot \sqrt{\varepsilon_r} \quad (6)$$

где Q_0 – собственная добротность резонатора, Q_l – внешняя добротность, Q_L – нагруженная добротность, λ_0 – длина волны в вакууме, λ_r – длина волны в резонаторе, α – постоянная затухания, L_{cp} – длина эллиптического резонатора по центральной линии, ε_r – относительная диэлектрическая проницаемость.

Таким образом, чем выше добротность резонатора, тем меньше Δf , и тем больше крутизна фильтра и выше его избирательная способность.

Также отметим, что в предыдущих работах, посвященных кольцевым эллиптическим резонаторам [2, 3, 4], рассматриваются фильтры, выполненные в планарном варианте. Дополнительные возможности открываются при использовании эллиптических резонаторов как связующих устройств – переходов между различными слоями ОИС СВЧ, которые выглядят как несколько планарных колец расположенных друг над другом.

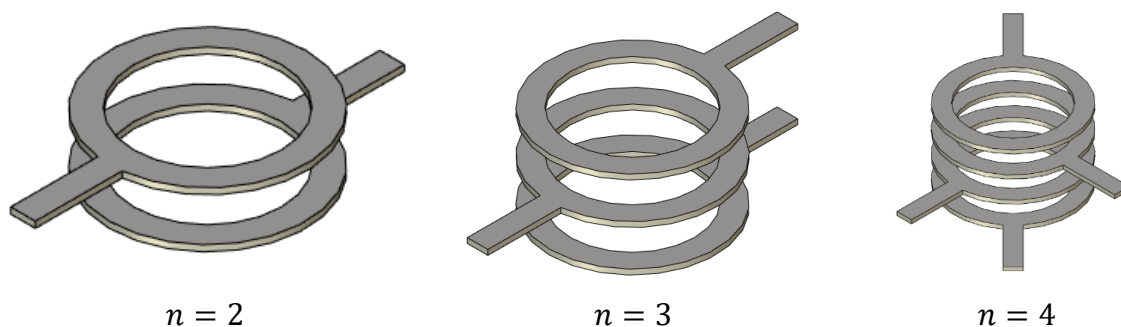


Рисунок 2. Эллиптические конструкции с разным количеством n

При достаточно большом n – количестве колец, и малом расстоянием между ними, образуется цилиндрическая волноводная структура со множеством источников ввода/вывода сигнала, например, как на рисунке 2. В качестве примера рассмотрим несколько микроволновых устройств выполненных на эллиптических резонаторах с количеством эллиптических элементов $n_1 = 2$ и $n_2 = 3$. Расчёт модифицированных линий передач для ОИС СВЧ описан в [5].

Первое – устройство частотной селекции, образованное эллиптическим резонатором, выполненным из двух полосковых колец, расположенных на разных слоях ОИС СВЧ. К кольцам подведены МПЛ линии связи, инвертированные относительно друга для разных слоёв, трёхмерная модель предложенного устройства и фотография изготовленного макета представлены на рисунке 3.

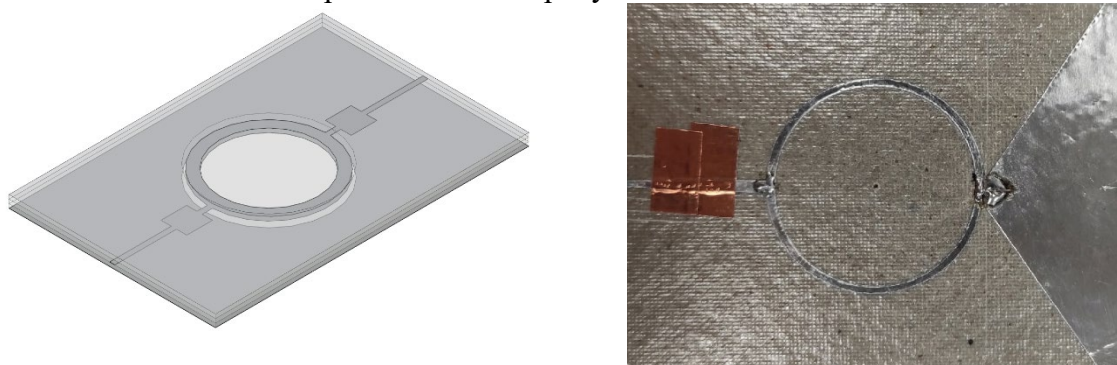


Рисунок 3. Модель и фотография макета эллиптического резонатора с $n = 2$

Первый макет изготовлен аппликационным методом на слюдяном диэлектрике с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 5,6$, металлизация выполнена алюминием. Образованный эллиптический резонатор соединён с двумя микрополосковыми линиями, расположенными по разные стороны подложки, а также короткозамкнут через индуктивные перемычки на экранирующие пластины. Макет был изготовлен в Лаборатории синтеза СВЧ устройств на кафедре Электроники и Схемотехники СПбГУТ имени проф. М.А. Бонч-Бруевича.

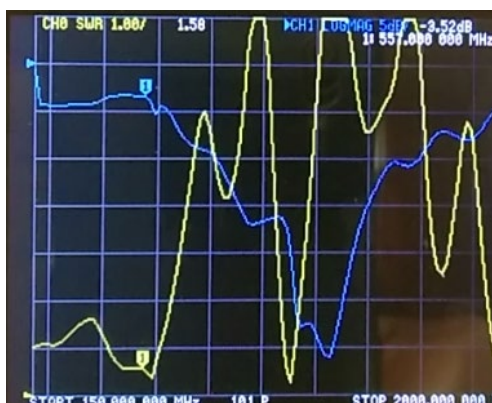


Рисунок 4. Результаты эксперимента эллиптического резонатора с $n = 2$

Исследование устройства в частотном диапазоне (150...2000) МГц (рисунок 4) показывает ослабление порядка 3 дБ и КСВН 1,5 на частоте 557 МГц (в полосе пропускания), и ослабление порядка 31 дБ на частоте 1241 МГц (полоса запирающая). Таким образом, граничная частота полосы пропускания фильтра зафиксирована на частоте 560 МГц, а его характеристики соответствуют характеристикам ФНЧ. Поскольку фильтр выполнен на распределенных элементах, имеет место повторяемость частотной характеристики с ростом частоты, что можно наблюдать в правой части экрана, однако ослабление в диапазонах не основной гармоники больше, и КСВ превышает допустимое значение 3. Поэтому диапазоны высших гармоник не рассматриваются.

Второе – устройство деления мощности, представляет собой три расположенных друг над другом связанных кольцевых полосковых кольца, фидерные линии которых расположены в разных слоях ОИС СВЧ. Центральное кольцо имеет вывод через СПЛ с передней стороны устройства, а верхнее и нижнее кольца выведены через МПЛ в разные слои ОИС, разделённые центральным слоем металлизации, трёхмерная модель и фотография макета представлены на рисунке 5.

Второй макет также изготовлен аппликационным методом на полиуретановом диэлектрике с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 2,4$, металлизация выполнена алюминием.

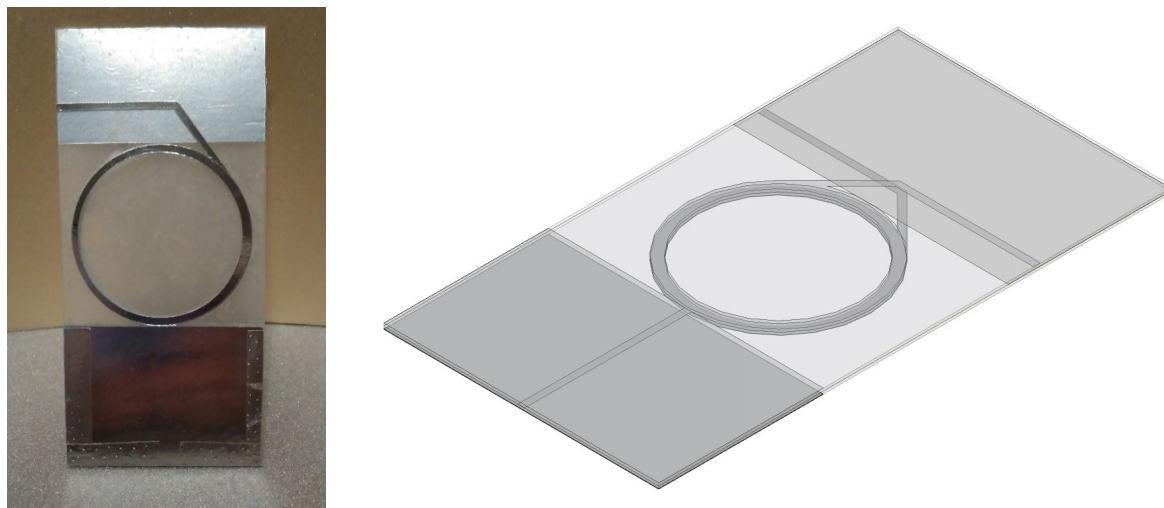


Рисунок 5. Модель и фотография макета эллиптического резонатора с $n = 3$

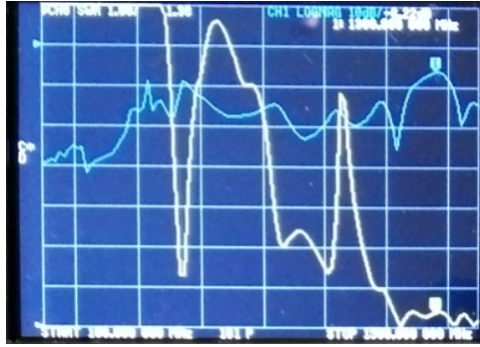


Рисунок 6. Результаты эксперимента эллиптического резонатора с $n = 3$

Макет был исследован в диапазоне (100...1500) МГц, устройство обладает узкой полосой прохождения сигнала (порядка 100 МГц) с центральной частотой 1300 МГц и КСВ 1,3, что характерно для узкополосных фильтров. Конструкция устройства позволяет снимать сигнал с различных слоёв ОИС СВЧ. Фактически сконструирован узкополосный делитель мощности на кольцевом эллиптическом резонаторе в объемном интегральном исполнении.

В работе рассмотрены устройства частотной селекции на кольцевых эллиптических резонаторах, описана структура некоторых устройств на их основе. Разработаны, смонтированы и исследованы два устройства на кольцевых резонаторах: фильтр нижних частот и узкополосный делитель/сумматор мощности с вводом/выводом энергии в разных слоях ОИС СВЧ. Результаты экспериментов позволяют предположить высокую функциональность кольцевых эллиптических резонаторов, которые открывают возможности для исследования их как отдельного класса устройств частотной селекции. Также стоит отметить, что использование промышленных технологий изготовления однозначно улучшит характеристики предлагаемых конструкций.

Список литературы

1. Леонтьев А.С., Седышев Э.Ю. Синтез микроволнового сумматора с вводом/выводом энергии в разных слоях ОИС СВЧ // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании: сборник научных статей X Международной научно-технической и научно-методической конференции. СПб., 2021. Т. 2. С. 513-518.
2. Кондрашова М.А., Сазоненко Н.Ю. Селиверстов Л.А., Улитина А.С., Седышев Э.Ю. Частотно-селективные устройства на кольцевых эллиптических резонаторах // Проектирование и технологии электронных средств. – Владимир., 2019. №2. С. 14-19.
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: тезисы докл. VI Международной научно-технической и научно-методической конференции. -СПб., 2018. С. 426-431.
4. Седышев Э.Ю., Тарасик Е.Э. Исследование зависимости электродинамических свойств эллиптического резонатора на полосковой линии от геометрии структуры // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании: сборник научных статей VII Международной научно-технической и научно-методической конференции. СПб., 2018. Т. 3. С. 444-448.
5. Боброва К.В., Булатова И.А., Иванова Е.А., Седышев Э.Ю. Расчёт модифицированных линий передач для объёмных интегральных схем // Электроника и Микроэлектроника СВЧ. 2015. Т. 2. С. 161-170