

Электронные системы

УДК 537.876.42

Ю.В. Прокопенко, канд. техн. наук, П.Ю. Сергиенко

Кольцевой микрополосковый резонатор с микромеханической перестройкой частоты

Разработан метод электромеханической перестройки кольцевого микрополоскового резонатора. Предложен способ по изменению силы возбуждения кольцевого микрополоскового резонатора. Проведено исследование влияния физико-топологических характеристик кольцевого резонатора на перестройку. Предложена модель неоднородного кольцевого резонатора в виде каскадного соединения однородных линий передач, позволяющая рассчитать резонансные частоты кольцевого резонатора. Значения рассчитанных резонансных частот, хорошо согласуются с результатами, полученными методами конечных элементов и конечных разностей во временной области.

An electromechanical tuning method of the inhomogeneous microstrip ring resonator is proposed. A method for the microstrip ring resonator excitation power changing was proposed. The influence of physical and topological characteristics of the ring resonator on its frequency characteristics is discussed. Model of the ring resonator for the calculation of the resonant frequencies is presented as a cascade connection of uniform transmission lines, which allows calculating of the ring resonator resonant frequency. Calculated resonant frequencies are in good agreement with the results obtained by finite element method (FEM) and finite difference method in time domain (FDTD).

Ключевые слова: *кольцевой резонатор, резонансная частота, микрополосковый резонатор, микроэлектромеханическая перестройка, фильтр СВЧ.*

Введение

В СВЧ технике наиболее развитым экономически направлением является микрополосковая техника. Хорошо освоенные технологические циклы позволяют поставить на поток миллионы приборов в короткие сроки. Именно поэтому разработка приборов в этой области является до сих пор актуальной. Микрополосковая технология обеспечивает передачу, фильтрацию, преоб-

разование СВЧ сигналов и решение других задач. В современных условиях часто требуется компактные и недорогие селективные устройства, работающие в широком диапазоне частот, с возможностью перестройки рабочей частоты. Например, широкое применение такие устройства находят в области беспроводных коммуникаций, таких как Bluetooth, Wi-Fi и другие.

Полосно-пропускающие фильтры, используемые в оборудовании беспроводной связи, должны иметь компактные размеры и низкий уровень потерь. При использовании материалов подложки с высоким значением диэлектрической проницаемости можно уменьшить размеры резонатора в $\sqrt{\varepsilon_{эф}}$ раз, где $\varepsilon_{эф}$ – эффективная диэлектрическая проницаемость, зависящая от диэлектрической проницаемости подложки, на которую нанесен резонатор.

Электромеханическая перестройка, в отличие от остальных методов перестройки, дает высокую эффективность управления без потери добротности [1]. Метод электромеханической перестройки резонаторов на основе микрополосковых линий рассматривался ранее в работах [2, 3]. Перестройка резонансной частоты резонатора осуществлялась посредством перемещения управляющего электрода над подложкой, что приводило к изменению эффективной диэлектрической проницаемости. В данной статье этот метод применен для перестройки микрополоскового кольцевого резонатора.

Кольцевой микрополосковый резонатор широко используется в разработке и конструировании СВЧ фильтров, ответвителей, смесителей, генераторов и антенн. Анализ подобной структуры проводился ранее с помощью теории линии передачи [4], модели магнитной стенки [5] и метода конечных разностей во временной области [6]. Кольцевой резонатор обладает рядом достоинств, таких как малое излучение, высокая добротность, компактный размер, физическое разделение мод, а так же резкие спуски АЧХ [7]. Известно, что в микрополосковом кольцевом резонаторе могут одновременно распространяться две моды, которые разнесены физически и не влияют друг на друга за счет конструкции самого

резонатора [8]. Предложенная в данной работе конструкция резонатора обладает технологической простотой, а также может использоваться для создания двухмодовых четырех портовых устройств с разделенными на 90° модами [9,10].

Конструкция резонатора

Структура микрополоскового кольцевого резонатора представлена на рис.1. Размеры резонатора выбраны таким образом, что бы рабочие частоты попадали в ISM диапазон (2,4 ... 2,8 ГГц). Другой диапазон СВЧ может быть обеспечен путем изменения геометрических размеров резонатора и диэлектрической проницаемости подложки. Толщины возбуждающих микрополосковых линий, равные $W=1,12$ мм, подобраны так, чтобы входное и выходное сопротивление линии составляло 50 Ом. В кольцевой резонатор внесены неоднородные перестраиваемые участки для частотной селекции ортогональных мод. Резонатор сформирован на диэлектрической подложке размерами $32 \times 1,6 \times 50$ мм, относительной диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 9,9$ и тангенсом диэлектрических потерь $tg\delta = 0,001$. Внешний радиус кольца составляет $r_0 = 8,95$ мм, а внутренний радиус равен $r_i = 7,83$ мм. Внутренний радиус неоднородных частей кольца выбран как разность внешнего радиуса и половины толщины неоднородного участка, чтобы обеспечить неизменность эффективной электрической длины резонатора. Зазор между резонатором и возбуждающими электродами $g = 0,75$ мм, а величина на которую надо увеличить (для сильного возбуждения), либо уменьшить (для слабого возбуждения) возбуждающие электроды $v = 4,475$ мм. Для перестройки резонансной частоты изменялся воздушный зазор d между подложкой и отрывающимися электродами.

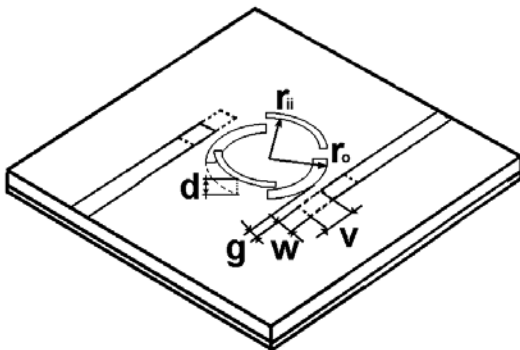


Рис. 1. Структура микромеханически-перестраиваемого кольцевого полоскового резонатора

Несмотря на то, что в кольцевом резонаторе возбуждаются одновременно две ортогональные моды, его можно использовать и в одно-

довом режиме. В этом случае целесообразно располагать вход и выход диаметрально противоположно относительно друг друга. Для ослабления влияния одной моды на другую стоит разнести их центральные частоты. Так как предполагалась перестройка в область более высоких частот, то неоднородные участки кольца делались заведомо тоньше, чем основные участки, чтобы сместить центральную частоту неосновной ортогональной моды в область более низких частот. Разделение мод возникает из-за наличия двух типов связи: через магнитное и через электрическое поле. Для ослабления влияния этого эффекта, были введены неоднородные участки в кольцевой резонатор.

Входная и выходная полосковые линии подведены к резонатору так, что бы обеспечить максимальное возбуждение, но при этом сохранить полосу пропускания с относительно резкими спусками АЧХ. В работе [6] описаны два метода возбуждения кольцевого резонатора. В зависимости от типа возбуждения в кольцевом резонаторе по-разному распространяются электромагнитные волны. Был выбран способ боковой связи кольца и возбуждающих микрополосковых линий для обеспечения широкой полосы пропускания и низкого уровня потерь в полосе пропускания. Но у авторов работы [6] при использовании данного метода возникло наложение высших мод при увеличении частотного диапазона, что неприемлемо для перестройки. При возбуждении микрополоскового кольцевого резонатора таким методом в нем распространяется две электромагнитные волны навстречу друг другу.

Что бы получить более сильное или слабое возбуждение резонатора, возбуждающие микрополосковые линии увеличивались или уменьшались на отрезок длиной в v . Изменение формы кривой модуля коэффициента передачи показано на рис.2.

В случае сильного возбуждения ($v = r_0 / 2$), когда площадь взаимодействия резонатора с возбуждающими микрополосковыми линиями увеличивается, наблюдается увеличение полосы пропускания, затягивание спусков АЧХ, а также понижение общего уровня затухания. В большинстве случаев это негативные факторы, поэтому площадь взаимодействия возбуждающих микрополосковых линий с резонатором не стоит делать слишком большой. С другой стороны, если возбуждение будет недостаточным ($v = -r_0 / 2$), наблюдается противоположная картина. Спуски АЧХ становятся более крутыми, уменьшается полоса пропускания, но так же и

увеличивается общий уровень затухания. Поэтому получение требуемых характеристик это всегда компромисс между шириной полосы пропускания и более высокой крутизной спусков АЧХ.

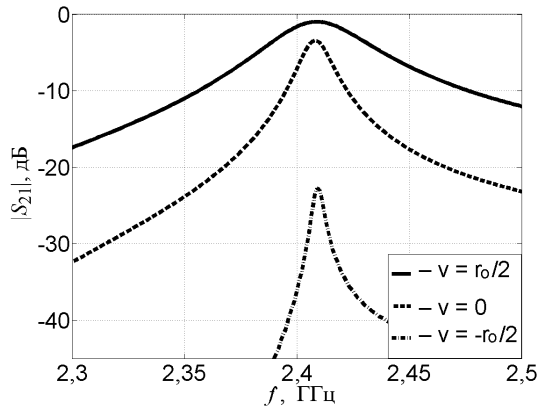


Рис.2. Изменение модуля коэффициента передачи при увеличении ($v = r_0 / 2$) и уменьшении ($v = -r_0 / 2$) длины возбуждающих микрополосковых линий

Для расчета резонансной частоты кольцевого резонатора использована модель в виде каскадного соединения отрезков однородных линий передач, которые описываются различными эффективными диэлектрическими проницаемостями и характеристическими сопротивлениями. Для этого матрица передачи однородного отрезка линии рассчитывалась по формуле:

$$T_u = \begin{bmatrix} e^{j\beta_z l} & 0 \\ 0 & e^{-j\beta_z l} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где β_z – постоянная распространения волны, l – эффективная электрическая длина однородного отрезка линии.

В работе [11] описан метод расчёта эффективной электрической длины однородного участка линии с помощью функций Бесселя первого и второго рода:

$$J'_n(kr_i)Y'_n(kr_o) - J'_n(kr_o)Y'_n(kr_i) = 0, \quad (2)$$

где J'_n и Y'_n – производные функций Бесселя первого и второго рода порядка n , n – порядковый номер резонансной моды, k – волновое число, r_o – внешний радиус кольца, а r_i – внутренний радиус кольца. В случае с неоднородным кольцевым резонатором, предложено разбить его на однородные части, а учет изменения волновых сопротивлений, как при изменении толщины резонатора, так и при перестройке осуществлять с помощью формулы:

$$T_s = \begin{bmatrix} \frac{Z_1 + Z_2}{2Z_2} & \frac{Z_2 - Z_1}{2Z_2} \\ \frac{Z_2 - Z_1}{2Z_2} & \frac{Z_1 + Z_2}{2Z_2} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Результирующая матрица передачи

$$T = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} \\ t_{21} & t_{22} \end{bmatrix} \quad (4)$$

получается путем перемножения матриц всех отрезков однородных линий T_u и матриц переходов изменения характеристического сопротивления T_s .

Требования равенства напряжений и токов на входе и выходе четырехполюсника описываемого матрицей передачи (4) приводит к уравнению относительно резонансной частоты:

$$(t_{11}(f_p) - 1)(t_{22}(f_p) - 1) + t_{12}(f_p)t_{21}(f_p) = 0 \quad (5)$$

Значения резонансных частот, рассчитанных по формуле (5), хорошо согласуются с результатами, полученными методами конечных элементов и конечных разностей во временной области.

Интерпретация результатов моделирования

Перестройка резонансной частоты осуществлялась путем отрыва неоднородных частей кольцевого резонатора от подложки. Суть метода перестройки заключается во внесении управляемой неоднородности между подложкой и неоднородными частями кольцевого резонатора. Это приводит к изменению эффективной диэлектрической проницаемости [1], и как следствие к перестройке резонансной частоты кольцевого резонатора. Эффективность перестройки резонансной частоты зависит от значения относительной диэлектрической проницаемости подложки и от соотношения ширины микрополосковых линий к толщине подложки.

Как видно на рис. 3 при увеличении диэлектрической проницаемости подложки, увеличивается и эффективность перестройки. Это объясняется тем, что диапазон изменения эффективной диэлектрической проницаемости растет с ростом диэлектрической проницаемости подложки. Так же с ростом диэлектрической проницаемости подложки, уменьшается диапазон требуемых перемещений электрода, что позволяет применять для решения этой задачи современные MEMS и пьезоэлектрические актюаторы. На рис.3 и рис.4 k – постоянная распространения электромагнитной волны в вакууме,

$l_{\text{эф}}$ – эффективная электрическая длина кольцевого резонатора.

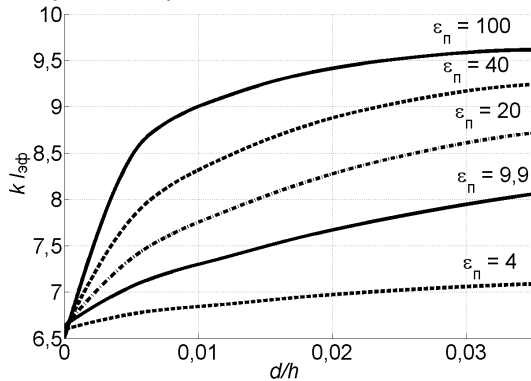


Рис.3. Эффективность перестройки неоднородного кольцевого резонатора для разных значений диэлектрической проницаемости подложки (ϵ_r).

При увеличении ширины кольцевого резонатора на перестройку влияют два конкурирующих процесса. С одной стороны увеличение эффективной диэлектрической проницаемости увеличивает эффективность перестройки, с другой стороны уменьшается эффективная электрическая длина резонатора. Это приводит к уменьшению длины воздушной неоднородности на пути волны и как следствие к ухудшению эффективности перестройки. Поэтому существует оптимальное значение соотношения ширины кольцевого резонатора к высоте подложки, как видно на рис.4. Небольшое отклонение результатов для высоких значений соотношения ширины резонатора к высоте подложки объясняется уменьшением эффективной электрической длины резонатора.

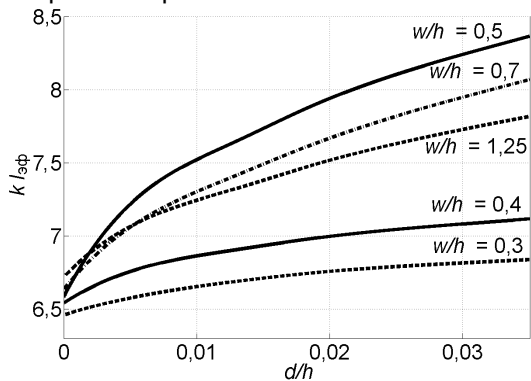


Рис.4. Эффективность перестройки неоднородного кольцевого резонатора для разных соотношений ширины кольцевого резонатора (w) и высоты подложки (h)

Зависимости для модуля коэффициента передачи для различных величин воздушного зазора были рассчитаны с помощью методов конечных элементов и конечных разностей во временной области. Максимальный требуемый отрыв составлял 50 мкм, его значение тесно

связанно со значением диэлектрической проницаемости подложки. Чем выше диэлектрическая проницаемость подложки, тем меньше будет необходим воздушный зазор для наиболее эффективной перестройки. Как видно из рис. 5 отрыв электрода на высоту в 50 мкм приводит к смещению резонансной частоты более чем на 20%. С увеличением воздушного зазора уменьшается уровень потерь в полосе пропускания. Этот эффект объясняется тем, что с увеличением воздушного зазора при перестройке, все большая часть электрического поля находится не в диэлектрике с определенными потерями, а в воздухе где потери значительно меньше.

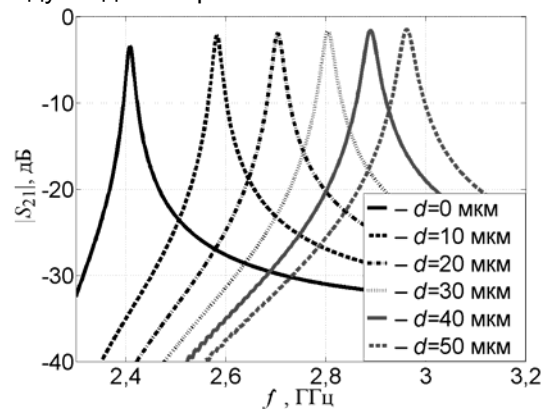


Рис.5. Частотные зависимости модуля коэффициента передачи микромеханически перестраиваемого кольцевого микроструктурного резонатора для разных величин воздушного зазора d между отрывным электродом и подложкой

Выводы

Предложен метод перестройки неоднородного кольцевого резонатора путем введения воздушной неоднородности между элементами резонатора и подложкой. Приведена модель для расчета резонансных частот неоднородного кольцевого резонатора представляющая собой каскадное соединение однородных линий передач. Построены зависимости эффективности перестройки для разных значений диэлектрической проницаемости подложки, а так же для разных соотношений ширины резонатора к высоте подложки. В результате моделирования были получены частотные зависимости модуля коэффициента передачи $|S_{21}|$ от величины воздушного зазора между подложкой и неоднородными частями кольцевого резонатора. Описанный метод обеспечивает перестройку резонансной частоты более чем на четверть при смещении управляемого электрода на 50 мкм. Регулировка силы возбуждения микроструктурного кольцевого резонатора, осуществляется с

помощью подбора длины возбуждающих микрополосковых линий.

Литература

1. *Поплавко Ю. М.*, Молчанов В. И., Пашков В. М. и др. Перестраиваемые СВЧ устройства с электромеханическим управлением // Техника и приборы СВЧ. – 2009. – № 1. – С. 49–59.
2. *Сергиенко П.Ю.*, Савин К.Г., Працюк Б.Б., Прокопенко Ю.В. Перестраиваемые фильтры СВЧ на основе микрополосковой линии // Электроника и связь. – 2011. – № 4. – С.53–56.
3. *Сергиенко П.*, Савин К., Прокопенко Ю., Поплавко Ю. Перестраиваемые фильтры СВЧ на основе компланарных линий // 21 Международная Крымская конференция «СВЧ и телекоммуникационные технологии» (Крым-МиКо, 12–16 сентября 2011). – Севастополь, Крым, Украина, 2011 год. – Т.2. – С. 616–617.
4. *Chang K.*, Martin T. S., Wang F., Klein J. L. On the study of microstrip ring and varactor-tuned ring circuits // IEEE Trans. Microwave Theory and Tech, Dec. 1987. – V. MTT – 35, P. 1288 – 1295.
5. *Wolff I.*, Knoppik N. Microstrip ring RSOMtOrS and dispersion measurements on microstrip lines // Electron. Lett, Dec. 1971. – V.7. – № 26, P. 779-781.
6. *Semouchkina E.*, Wenwu Cao, Mittra R. FDTD Study of Resonance Processes in microstrip Ring Resonators with Different Excitation Geometries // Microwave Symposium Digest, 2001 IEEE MTT-S International, 20 – 25 May 2001. – V.3. – P. 2055 – 2058.
7. *Sheng Sun*, Lei Zhu. Wideband Microstrip Ring Resonator Bandpass Filters Under Multiple Resonances // IEEE Transactions on microwave theory and techniques, October 2007. – V.55. – №. 10.
8. *Chul-Soo Kim*, Duck-Hwan Kim, In-sang Song, Kevin M. R. H. Leong. A Design of a Ring Bandpass Filters with Wide Rejection Band Using DGS and Spur-line Coupling Structures // Microwave Symposium Digest, June 2005. – IEEE MTT-S International
9. *Matso Michiaki*, Yabuki Hiroyuki, Makimoto Mitsuo. Dual-Mode Stepped-Impedance Ring Resonator Filter Applications // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, July 2001. – V.49. – №. 7.
10. *Makimoto M.*, Yamashita S. Microwave resonators and filters for Wireless communication: theory, design, and application. – 2001. p.cm. – Springer series in advanced microelectronics, 2001. – 162 p.
11. *Hosking M.W.*, Tonkint B.A., Proykovat Y.G., Hewitt A., Alford N.McN., Button T.W., Penn S.J. Measurements of material and circuit properties using a microstrip ring-resonator circuit on zirconia at 77K // Microwave Conference (6–10 September 1993) . – 23rd European, 1993. – p. 558–561