

УДК 621.382.386

Б.Б. Працюк, А.А. Волошин, Ю.В. Прокопенко, канд. техн. наук

Перестраиваемый кольцевой металлодиэлектрический резонатор

Предложен метод перестройки резонансных частот кольцевого металлодиэлектрического резонатора. Предлагаемый метод пригоден для электромеханической перестройки резонансных частот при помощи пьезоэлектрических актюаторов или микроэлектромеханических систем (МЭМС). Приведены зависимости нормированного резонансного волнового числа от нормированных геометрических размеров и диэлектрической проницаемости резонатора. Разработан двухрезонаторный фильтр с перестройкой центральной частоты на основе металлодиэлектрических резонаторов.

The frequency retuning method for a ring metal-dielectric resonator is proposed. The method is suitable for electromechanical tuning by piezoelectric actuator or MEMS. Dependences of normalized resonant wavenumber versus normalized geometrical parameters and permittivity are presented. The tunable filter based on ring metal-dielectric resonators is developed.

Вступление

Появление новых стандартов беспроводной связи привело к стремительному развитию коммуникационных технологий и созданию новых компонент для сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона. Фильтры на основе диэлектрических резонаторов 1 широко применяются в приемно-передающей аппаратуре 2. Создание фильтров с перестраиваемыми амплитудно-частотными характеристиками (АЧХ) является актуальной задачей.

В работе 3 был предложен метод электромеханической перестройки частоты составного диэлектрического резонатора, основанный на перемещении составных частей резонатора. Аналогичный метод был применен в работе 4 для перестройки вырожденных колебаний диэлектрических резонаторов для создания многорезонаторных фильтров СВЧ 5. Применение данного метода позволило обеспечить перестройку центральной частоты до 20%.

Пьезоэлектрические актюаторы или МЭМС обеспечивают перемещения на десятки, сотни микрометров. Для того, чтобы столь малые перемещения вызывали заметную перестройку частоты резонатора, необходимо, чтобы диэлектрическая неоднородность, образованная воздушной щелью между составными частями резонатора, была рас-

положена перпендикулярно электрической составляющей поля 6. Этот принцип может быть расширен на случай металлодиэлектрического резонатора (МДР) 7, представляющего собой диэлектрический цилиндр, расположенный между металлическими плоскостями.

Особенность низших типов колебаний МДР состоит в ориентации вектора электрического поля перпендикулярно металлическим плоскостям. Поэтому для перестройки резонансных частот можно использовать воздушный зазор между диэлектриком и металлической плоскостью либо диэлектрическими частями резонатора. Интерес к кольцевым МДР вызван их расширенным спектром собственных частот.

Частотные характеристики кольцевого металлодиэлектрического резонатора

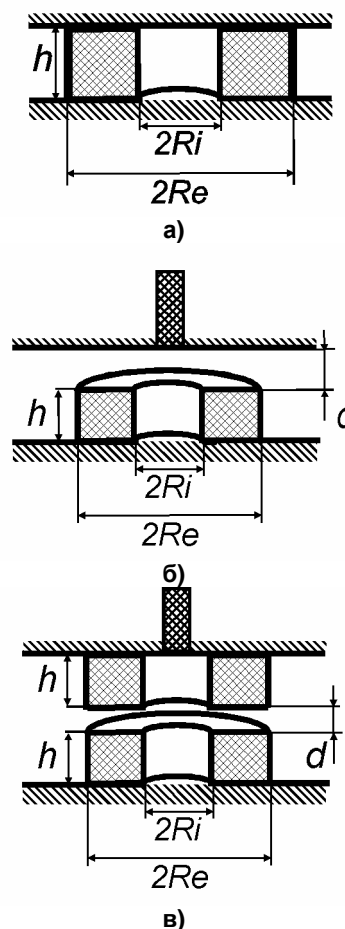


Рис. 1. Кольцевой металлодиэлектрический резонатор: а) не перестраиваемый; б) с перестройкой частоты при помощи металлической пластины; в) перестраиваемый составной МДР

Перестройка резонансной частоты металлодиэлектрического резонатора обеспечивается внесением диэлектрической неоднородности перпендикулярно линиям электрического поля. В качестве неоднородности выступает воздушный зазор между металлической пластиной и торцевой поверхностью резонатора (рис. 1б) или воздушный зазор между частями составного МДР (рис. 1в).

Резонансные частоты МДР удобно представить в виде нормированного резонансного волнового числа $\sqrt{\epsilon}kR_e$, где ϵ — диэлектрическая проницаемость материала диэлектрика, $k = \frac{2\pi f_0}{c}$, f_0 — резонансная частота, c — скорость света в вакууме, R_e — внешний радиус резонатора. Значение нормированного резонансного волнового числа не зависит от абсолютных значений геометрических параметров МДР и частотного диапазона.

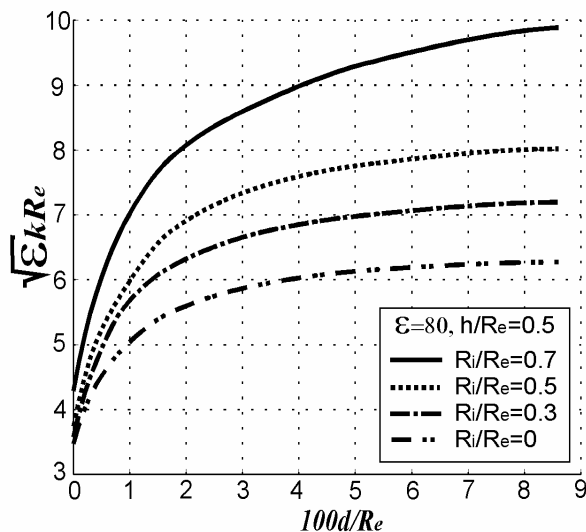


Рис. 2. Зависимость нормированного резонансного волнового числа от нормированного расстояния между металлом и диэлектрическим кольцевым диском

На рис. 2-4 показаны зависимости нормированного резонансного волнового числа для низшего типа колебаний от нормированного расстояния между частями МДР, соотношения внутреннего и внешнего радиусов, нормированной толщины и диэлектрической проницаемости, рассчитанные методом конечных элементов.

Изменение расстояния между металлом и поверхностью резонатора на несколько процентов от внешнего радиуса приводит к перестройке частоты на десятки процентов и может достигать 100% и более в зависимости от соотношений геометрических размеров резонатора и диэлектрической проницаемости материала (рис. 2). Тре-

буемые абсолютные перемещения частей резонатора составляют десятки, сотни микрометров в сантиметровом диапазоне длин волн.

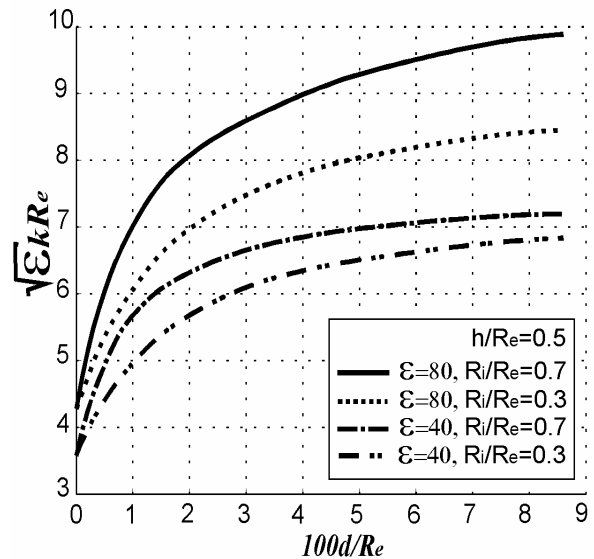


Рис.3. Зависимость нормированного резонансного волнового числа от нормированного расстояния между металлом и диэлектрическим кольцевым диском

Крутизна зависимости нормированного резонансного волнового числа кольцевого МДР от нормированного расстояния между частями резонатора зависит от соотношения внутреннего радиуса к внешнему. Как видно из рис. 2, увеличение отношения R_i/R_e позволяет увеличивать крутизну перестройки. Эта особенность может быть использована для синхронизации перестройки частот резонаторов во многорезонаторных фильтрах. 8

Из рис. 3 и рис. 4 видно, что крутизна перестройки резонансной частоты МДР увеличивается с ростом диэлектрической проницаемости материала и уменьшением толщины резонатора.

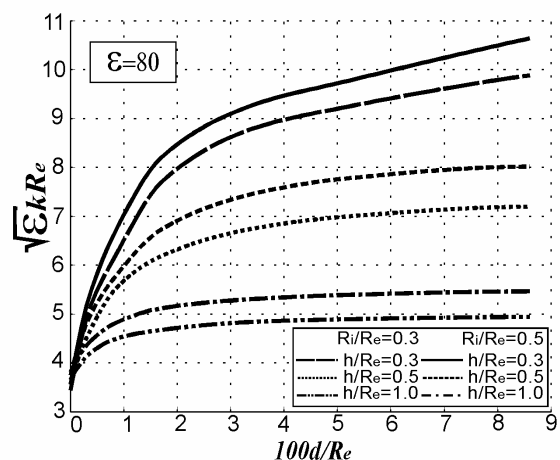


Рис.4. Зависимость нормированного резонансного волнового числа от нормированного расстояния между металлом и диэлектрическим кольцевым диском

Чувствительность перестройки резонансной частоты к изменению взаимного расстояния между частями МДР зависит от диэлектрической проницаемости резонатора, соотношений внутреннего и внешнего радиуса и толщины МДР. Чем выше ϵ , соотношение внутреннего и внешнего радиусов, тем выше чувствительность МДР к перемещению составных частей. Перестройка резонансной частоты максимально эффективна при изменении воздушного зазора в пределах 2-3% относительно размеров кольца. Полученные результаты могут быть использованы для расчета резонансной частоты кольцевого МДР с произвольно выбранными параметрами.

Двухрезонаторный полосно-пропускающий фильтр на кольцевых МДР

В работе 9 был предложен трехрезонаторный фильтр с перестраиваемой АЧХ. Перестройка осуществляется с помощью МЭМС движителей, которые, перемещаясь на десятые доли миллиметра, обеспечивают перестройку резонансной частоты на 3%. При этом происходит деградация формы АЧХ из-за изменения взаимных связей между резонаторами. В работе 8 предложен метод синхронизации перестройки резонансных частот отдельных резонаторов для сохранения формы АЧХ. Используя данный метод для кольцевых МДР, построен двухрезонаторный полосно-пропускающий фильтр (рис. 5), в котором резонаторы МДР1 и МДР2 располагаются в запердельном волноводе на расстоянии L друг от друга.

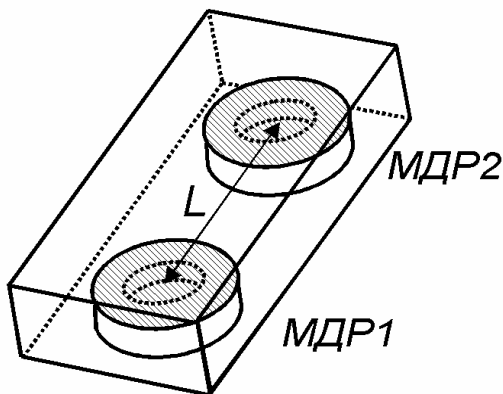


Рис. 5. Структура двухрезонаторного фильтра на кольцевых металлодиэлектрических резонаторах
Перестройка центральной частоты фильтра осуществляется при помощи синхронного перемещения металлических дисков относительно резонаторов. На рис. 6 показана зависимость коэффициента прохождения $|S_{21}|$ от частоты, рассчитанная методом конечных элементов, для резонаторов равного размера с параметра-

ми $\epsilon = 80$, $R_e = 3,6$ мм, $R_i/R_e = 0,5$, $h/R_e = 0,5$, $L = 19$ мм. Полученный фильтр обладает более широким диапазоном перестройки (около 7 %) при перемещении металлического диска на единицы микрометров. При перемещениях величиной порядка десятков микрометров резонансная частота смещается более чем на 20%.

Перестройку центральной частоты фильтра можно также осуществить путем изменения расстояния от не металлизированной торцевой поверхности диэлектрического цилиндра до широкой стенки волновода.

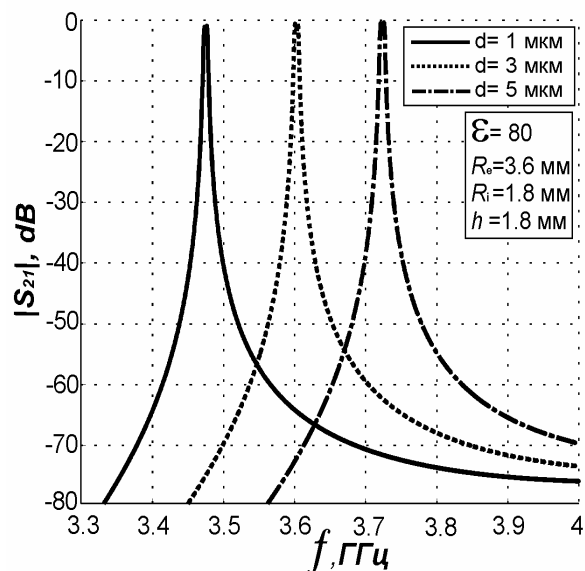


Рис. 6. Зависимость $|S_{21}|$ фильтра на кольцевых металлодиэлектрических резонаторах от частоты

Аналогично могут быть построены фильтры с числом резонаторов более двух. Однако, с увеличением числа резонаторов необходимо учитывать влияние взаимных связей между резонаторами, приводящих к расстройке АЧХ при смещении центральной частоты фильтра. Это влияние можно компенсировать путем выбора резонаторов с различной крутизной зависимости изменения резонансной частоты от величины взаимного расстояния между частями МДР.

Выводы

Показана возможность перестройки резонансной частоты МДР при внесении диэлектрической неоднородности перпендикулярно линиям электрического поля. Диэлектрическая неоднородность создается при перемещении частей МДР относительно друг друга в виде воздушного зазора. Перестройка частоты резонатора может достигать 100% и более при перемещении частей МДР на десятки, сотни микрометров в сантиметровом диапазоне длин волн. Диапазон

требуемых перемещений позволяет для электромеханической перестройки резонансной частоты использовать пьезоэлектрические актюаторы или МЭМС.

Представлены зависимости нормированного резонансного волнового числа для кольцевого МДР от нормированного расстояния между металлической пластиной и поверхностью резонатора, соотношения внутреннего и внешнего радиуса, толщины резонатора и диэлектрической проницаемости материала. Эффективность перестройки резонансной частоты растет с уменьшением толщины резонатора, увеличением внутреннего диаметра и диэлектрической проницаемости резонатора.

Разработан перестраиваемый двухрезонаторный фильтр на кольцевых МДР с электромеханическим управлением. Показана перестройка частоты на 240 МГц при абсолютном перемещении металлического диска на 4 мкм. Результаты могут быть полезны при построении многорезонаторных фильтров с перестраиваемой АЧХ.

Литература

1. *Безбородов Ю. М.* Фильтры СВЧ на диэлектрических резонаторах / Ю. М. Безбородов, Т. Н. Нарытник, В. Б. Федоров. – К.:Тэхника, 1989. – 184с. – ISBN 5-335-00324-3
2. *R. Mansour* "High-Q Tunable dielectric resonator filters" // IEEE Microwave Magazine, vol. 10, Issue 6, pp. 84–98, October 2009.
3. *Poplavko Yu.M., Prokopenko Yu.V., Molchanov V.I., Dogan A.* Frequency-tunable microwave dielectric resonator // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, June 2001, Vol. 48, N6, pp. 1020 -1027.
4. *B. Pratsiuk, Y. Prokopenko, Y. Poplavko* "Tunable sphere and cubic dielectric resonators" // Microwave, Radar and Wireless Communications, 2008. MIKON 2008, vol. 2, pp. 549–552.
5. *Працюк Б.Б., Прокопенко Ю.В., Поплавко Ю.М.* Перестраиваемые фильтры СВЧ на несвязанных диэлектрических резонаторах // Crimean Conference "Microwave & Telecommunication Technology" (CriMiCo'2009).-2009-ч.2-С.523-524.
6. *Молчанов В. И., Пятчанин С. В., Прокопенко Ю.В.* Составной диэлектрический резонатор с воздушным зазором // Изв. высш. учеб. заведений Радиоэлектроника. – 1987. – Т. 30. – № 1. – С. 31–35.
7. *J. Hattori, H. Wakamatsu, H. Kubo, Y. Ishikawa* "Low profile dielectric band elimination filter using thin film layered electrode for 2GHz band cellular base station" // IEEE MTT-S Digest, pp. 1025–1028, 1999.
8. *Працюк Б.Б., Прокопенко Ю.В., Поплавко Ю.М.* Метод компенсации расстройки перестраиваемого фильтра на диэлектрических резонаторах // Электроника и связь. – 2009 – Вып. 4-5. – ч.2-С.19-22.
9. *W. D. Yan and R. R. Mansour* "Tunable dielectric resonator bandpass filter with embedded MEMS tuning elements" // IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 55, pp. 154–160, Jan. 2007.