

Управляемые кольцевые резонаторы с различными типами связи

В. О. Бобровская, Д. М. Альжанов, С. П. Зубко

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

E-mail bobrovskaaa937@gmail.com

Аннотация. В данной работе представлены результаты исследования планарных перестраиваемых кольцевых резонаторов с использованием сегнетоэлектриков в качестве управляющих элементов. Проведено численное моделирование резонансных структур для различных конфигураций и способов передачи энергии.

Ключевые слова: управляемый резонатор, СВЧ, сегнетоэлектрик

I. ВВЕДЕНИЕ

Резонаторы находят широкое применение в различных системах и устройствах обработки сигналов таких как фильтры, фазовращатели и др. К особенностям рассматриваемого в данной работе кольцевого резонатора можно отнести широкий диапазон частот, относительно низкие потери, простоту изготовления, устойчивость к шумам и, как следствие, стабильность работы. Также к особенностям кольцевого резонатора можно отнести то, что он является резонатором бегущей волны. Использование управляемых элементов в конструкции резонатора позволяет осуществить перестройку его резонансной частоты и использовать его как основной компонент электронно-управляемых устройств и систем микро- и нанoeлектроники. Одним из эффективных способов управления является использование сегнетоэлектриков благодаря их нелинейным свойствам. В данной работе будут рассмотрены два варианта реализации управляемых сегнетоэлектрических кольцевых резонаторов: в интегральном исполнении и с использованием навесного монтажа [1, 2].

II. ВЫБОР ТИПА СВЯЗИ

Прежде всего, были проанализированы способы возбуждения кольцевых резонаторов. Было проведено электродинамическое моделирование резонатора, возбуждаемого с помощью сосредоточенных элементов (емкостная связь) и с помощью распределенных линий (индуктивно-емкостная связь), расположенных симметрично (рис.1 а, б, г) и асимметрично (рис. 1 в) относительно друг друга. Моделирование показало, что использование асимметричного расположения подводящих линий предпочтительно только в том случае, когда резонатор не перестраиваемый, а при введении в конструкцию резонатора управляемого элемента лучше себя показала симметричная запитка. При дальнейшем моделировании был выбран симметричный способ передачи энергии с таким положением портов, чтобы расстояние между ними

составляло половину длины волны и передача энергии происходила наиболее эффективно.

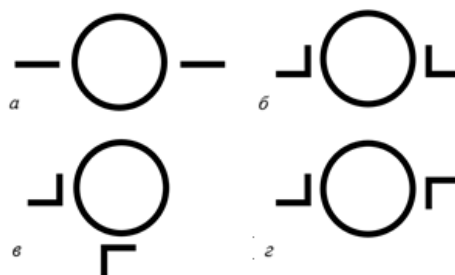


Рис. 1. Топологии с разными типами связи

III. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

A. Кольцевой резонатор с управляемыми элементами в виде сосредоточенных конденсаторов

Рассмотрим кольцевой микрополосковый перестраиваемый резонатор с управляемым элементом в виде планарного навесного сегнетоэлектрического конденсатора. Используемый при моделировании конденсатор представляет собой две последовательно соединенные встречно-штыревые структуры (рис. 2). Экспериментально полученная вольт-фарадная характеристика (ВФХ) исследуемого конденсатора представлена на рис. 3. Полная емкость такого конденсатора при 0 В и при подаче управляющего напряжения $U_{упр} = 300$ В на частоте 2 ГГц составила $C_1 = 0.27$ пФ и $C_2 = 0.13$ пФ соответственно, а тангенс угла диэлектрических потерь $tg\delta_1 = 0.03$ и $tg\delta_2 = 0.02$. Управляемость, т. е. отношение ёмкостей в двух состояниях:

$$n = \frac{C_1}{C_2} = 2.015.$$

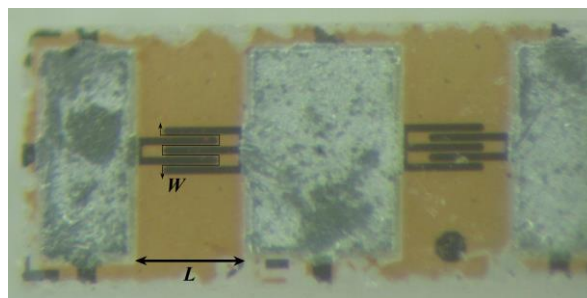


Рис. 2. Топология конденсатора с сегнетоэлектриком

В качестве универсальной характеристики управляемого элемента удобно использовать такой параметр, как коммутационное качество. Для сегнетоэлектрического конденсатора данный параметр можно определить по формуле [3]:

$$K = \frac{(n-1)^2}{n(\operatorname{tg}\delta_1 \operatorname{tg}\delta_2)} \quad (1)$$

Используя экспериментальные данные, был рассчитан коэффициент качества для сегнетоэлектрического конденсатора, представленного на рис. 2, который составил $K = 997$, что является приемлемым для его применения в управляющих устройствах.

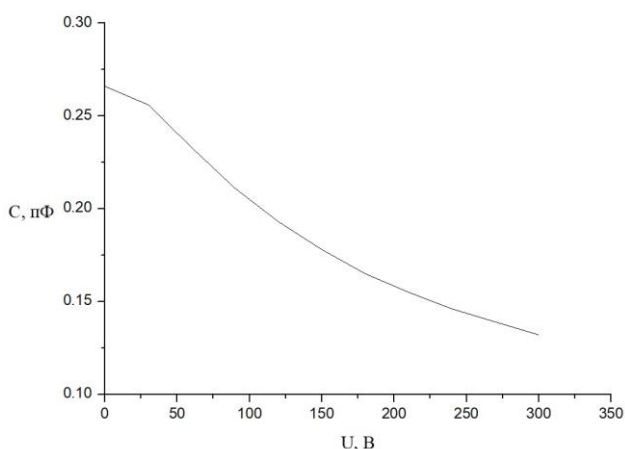


Рис. 3. Измеренная ВФХ сегнетоэлектрического конденсатора

Разработанный резонатор представляет собой кольцо с двумя зазорами, на которые навесным монтажом монтируются сегнетоэлектрические планарные конденсаторы.

Было выбрано симметричное расположение подводящих линий относительно резонатора. Моделирование проводилось для емкостного и индуктивно-емкостного типа связи.

Исследование показало, что конфигурация с емкостной связью представляет собой двухзвенный фильтр на удвоенной частоте, а не резонатор бегущей волны, поэтому дальнейшее моделирование проводили только для симметричной индуктивно-емкостной связи.

Топология резонатора с индуктивно-емкостной связью представлена на рис. 4. Резонатор выполнен на отрезках микрополосковых линий передачи на подложке из поликора толщиной 1 мм. Габаритные размеры структуры составили $8.5 \times 6 \text{ мм}^2$.

Частотные зависимости коэффициента передачи и коэффициента отражения в двух состояниях сегнетоэлектрического конденсатора представлены на рис. 5.

При подаче управляющего напряжения на обкладки конденсатора центральная частота резонатора сдвинулась на 1.21 ГГц.

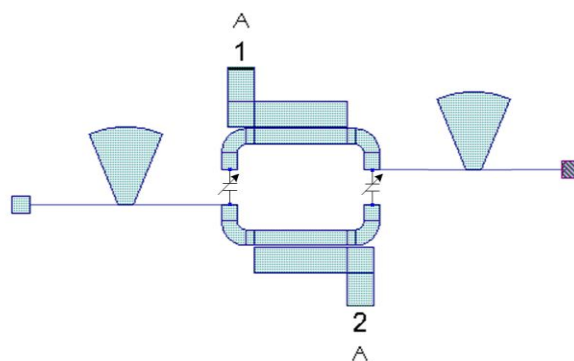


Рис. 4. Топология кольцевого резонатора с индуктивно-емкостной связью

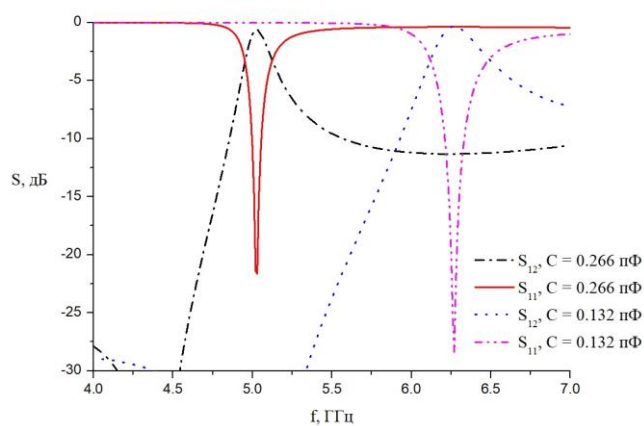


Рис. 5. АЧХ при 0 и 300 В

Было рассмотрено влияние расстояния между связанными линиями (S) на управляемость и добротность. Результаты приведены в табл. I.

ТАБЛИЦА I. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

S , мкм	C , пФ	f , ГГц	Δf , ГГц	S_{11} , дБ	S_{12} , дБ
30	0.266	5.00	1.26	-21.64	-0.62
	0.132	6.26		-28.38	-0.36
70	0.266	5.00	1.21	-20.88	-0.69
	0.132	6.21		-26.61	-0.38
100	0.266	5.08	1.11	-21.86	-0.74
	0.132	6.19		-24.68	-0.47

Нельзя не отметить влияние этой величины на коэффициент связи и, как следствие, на общую добротность [4]. Коэффициент полной связи – это алгебраическая сумма коэффициентов индуктивного и емкостного взаимодействия. В статье [5] рассмотрена их дисперсионная характеристика. Опираясь на исследование, приведенное в данной работе, можно сделать вывод, что при относительно больших расстояниях между связанными линиями влияние емкостного коэффициента связи на частотах порядка 5 ГГц гораздо меньше влияния индуктивного взаимодействия. Как следствие, коэффициент полной связи с ростом расстояния уменьшается, а добротность как мера рассеивания энергии увеличивается, что можно увидеть в табл. 1. Однако стоит учитывать, что при слишком большом расстоянии между связанными

линиями связь станет недостаточной, и передача энергии будет происходить неэффективно.

В. Кольцевой планарный резонатор с подслоем сегнетоэлектрика

Рассмотрим планарную структуру кольцевого резонатора с емкостным и индуктивно-емкостным способом связи, изображенную на рис. 6.

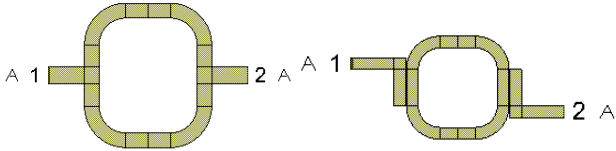


Рис. 6. Топологии рассматриваемых резонаторов

Обе структуры являются интегральными, и каждая представляет собой кольцевой резонатор, состоящий из проводящего медного полоска шириной 0.8 мм, нанесенного на слой сегнетоэлектрика толщиной 1 мкм на подложке из поликора толщиной 1 мм с проницаемостью 9.8. Диэлектрическую проницаемость сегнетоэлектрика определим ниже. Габаритные размеры структур на рис. 6 составили 8×11 мм² и 7×15 мм².

Влияние электрического поля на диэлектрическую проницаемость сегнетоэлектрика рассмотрено в статье [6]. Для сравнения двух резонансных структур при моделировании планарного резонатора в интегральном исполнении использовалась сегнетоэлектрическая пленка, параметры которой соответствуют параметрам сегнетоэлектрической пленки конденсатора из п. А данной статьи. Они извлекались из измеренной ВФХ конденсатора (рис. 3) и его геометрических размеров. Для определения реальной диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика в конденсаторе, воспользуемся формулой для расчета емкости планарного конденсатора, учитывающей емкость сегнетоэлектрика, диэлектрика и воздуха:

$$C = w \left[\begin{aligned} &\varepsilon_0 \left[\frac{2}{\pi} \ln \left(4 \frac{L}{s_g} \right) + (\varepsilon_s - 1) \frac{1}{\pi} \ln \left(\frac{16 H}{\pi s_g} \right) \right] + \\ &+ \varepsilon_0 \frac{\varepsilon_f - \varepsilon_s - 1}{\left(\frac{s_g}{h} + \frac{4}{\pi} \ln(2) \right)} \end{aligned} \right] \quad (2)$$

где $\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная; ε_s и H , ε_f и h – диэлектрические проницаемости и толщины слоев диэлектрика и сегнетоэлектрика соответственно; L – длина рассматриваемой области; w и s_g – длина и ширина зазора (рис. 2).

Параметры, использованные при расчете: $\varepsilon_s = 9.8$, $H = 1$ мм, $h = 0.5$ мкм, $L = 325$ мкм, $w = 580$ мкм и $s_g = 5$ мкм.

Подставив экспериментально измеренное удвоенное значение емкости C в (2), определим диэлектрическую

проницаемость сегнетоэлектрического слоя ε_f : при $C = 0.266$ пФ $\varepsilon_f = 911$, а при $C = 0.132$ пФ $\varepsilon_f = 342$.

Чтобы добиться такого изменения диэлектрической проницаемости пленки сегнетоэлектрика толщиной 1 мкм на подложке из поликора толщиной 1 мм требуется подать управляющее напряжение 10 В.

Для расчета коэффициента качества коммутации в случае сегнетоэлектрической пленки используем формулу, аналогичную (1), с той разницей, что управляемость задается как отношение диэлектрических проницаемостей в двух состояниях: $n = \frac{\varepsilon_f(0)}{\varepsilon_f(U_{упр})} = 2.6$.

$tg\delta_1 = 0.027$ и $tg\delta_2 = 0.019$ тангенсы диэлектрических потерь в двух состояниях соответственно.

Получили $K = 1939$.

Рассмотрим влияние длины связи (l) на потери в резонаторе. Итоги моделирования сведены в табл. II.

ТАБЛИЦА II. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

l	ε_f	f , ГГц	Δf , ГГц	S_{11} , дБ	S_{21} , дБ
$\lambda/8$	911	4.73	0.21	-31.2	-0.38
	342	4.94		-27.88	-0.52
$\lambda/4$	911	5.22	0.16	-26.38	-0.59
	342	5.38		-29.55	-0.48

Далее рассмотрим влияние расстояния между подводящими линиями (S_1) при индуктивно-емкостной связи. Длина связи была выбрана $\lambda/8$. Результаты приведены в табл. III.

ТАБЛИЦА III. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

S_1 , мкм	ε_f	f , ГГц	Δf , ГГц	S_{11} , дБ	S_{21} , дБ
30	911	4.73	0.21	-31.2	-0.38
	342	4.94		-27.88	-0.52
50	911	4.77	0.22	-28.51	-0.49
	342	4.99		-24.16	-0.55
100	911	4.86	0.23	-24.12	-0.66
	342	5.09		-21.34	-0.71

Также было рассмотрено влияние расстояния между подводящими линиями при емкостной связи (S_2) на управляемость и добротность. Результаты приведены в табл. IV.

ТАБЛИЦА IV. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

S_2 , мкм	ε_f	f , ГГц	Δf , ГГц	S_{11} , дБ	S_{21} , дБ
30	911.2	4.35	0.29	-24.13	-0.75
	342.5	4.64		-17.1	-1.17
50	911.2	4.45	0.25	-20.22	-1.13
	342.5	4.7		-15.56	-1.53
100	911.2	4.55	0.24	-15.3	-1.64
	342.5	4.79		-11.9	-2.25

Влияние ширины зазора при емкостной связи оказалось ожидаемо: чем шире зазор, тем меньше управляемость характеристик резонатора.

Стоит отметить, что наименьшая ширина зазора была выбрана из-за разрешения оборудования, с помощью которого планируется изготовить структуру.

Также была исследована управляемость зазоров связи, которая оказалась относительно невелика в пределах 35 % – 65 %, при этом наиболее управляемым является наименьший зазор. Таким образом, можно дать рекомендацию к использованию малых зазоров.

Полученные АЧХ для структуры с емкостной связью с шириной зазора 30 мкм представлены на рис. 7.

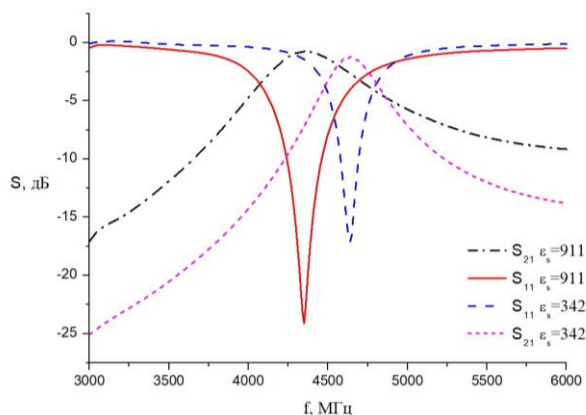


Рис. 7. АЧХ

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе данного исследования были исследованы два варианта управляемых кольцевых резонаторов: в интегральном исполнении и с использованием навесного монтажа. Предложены их конструкции и построены амплитудно-частотные характеристики.

Моделирование показало возможность эффективного управления резонансной частотой обеих конструкций при изменении напряжения смещения.

Наибольший сдвиг частот у кольцевого резонатора с навесными элементами составил 1.26 ГГц, добротность при подаче управляющего напряжения возросла в 1.5 раза. У резонатора в интегральном исполнении с емкостной связью сдвиг частоты составил 290 МГц, добротность при подаче управляющего напряжения увеличилась в 2 раза.

Любой навесной монтаж усложняет процесс изготовления, в то время как создание интегрального планарного резонатора технологически проще.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают благодарность А.Г. Гагарину за предоставленные экспериментальные данные о сегнетоэлектрических конденсаторах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Kee C.-S., Jang M.-Y., Park I., Lim H., Kim J.-E., Park H.-Y., Lee J.-I. Photonic band gap formation by microstrip ring: A way to reduce the size of microwave photonic band gap structures // *Appl. Phys. Lett.* 2002. Т. 80. № 9. С. 1520–1522.
- [2] Kim S.-I., Jang M.-Y., Kee C.-S., Park I., Lim H. Characteristics of microwave filters based on microstrip photonic bandgap ring structures // *Current Applied Physics*. 2005. Т. 5. № 6. С. 619–624.
- [3] Плескачѳ В.В. Исследование и разработка перестраиваемых свч фильтров на основе сегнетоэлектрических конденсаторов: дис. ... канд. техн. наук / СПб. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2004.
- [4] Pozar D.M. *Microwave engineering*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc, 2012. Вып. Fourth Edition. 732 с.
- [5] Беляев Б.А., Сержантов А.М. Исследование коэффициентов связи шпильковых резонаторов // *Радиотехника и электроника*. 2004. Т. 49. №1. С. 24-31.
- [6] Vendik O.G., Zubko S.P. Ferroelectrics as constituents of tunable metamaterials, in "Theory and Phenomena of Metamaterials (Handbook of Artificial Materials)". CRC Press, 2009.