

11;13

Новая конструкция миниатюрного микрополоскового резонатора на основе встречно-штыревой структуры

© Б.А. Беляев¹⁻³, А.М. Сержантов^{1,2}, Я.Ф. Бальва^{1,3},
А.А. Лексиков¹⁻³, Р.Г. Галеев⁴

¹ Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, Красноярск

² Сибирский федеральный университет, Красноярск

³ Сибирский государственный аэрокосмический университет
им. академика М.Ф. Решетнева, Красноярск

⁴ ОАО НПП „Радиосвязь“, Красноярск

E-mail: belyaev@iph.krasn.ru

Поступило в Редакцию 9 июля 2014 г.

Исследована новая конструкция микрополоскового резонатора на основе встречно-штыревой структуры, отличающаяся высокой степенью миниатюрности. Показаны возможности значительного уменьшения длины резонатора и существенного повышения его собственной добротности в случае увеличения количества штырей у встречно-штыревой структуры без изменения зазоров между ними. Изготовлен макет резонатора на подложке с диэлектрической проницаемостью 80, имеющего резонансную частоту 817 МГц, добротность 100 и размеры по контуру полосковых проводников 1×5.5 мм. Теоретически и экспериментально доказано, что собственная добротность такого резонатора значительно выше, чем у известных микрополосковых аналогов при прочих равных условиях.

Одной из самых актуальных задач, стоящих перед разработчиками современных систем связи, радиолокации, радионавигации, радиоэлектронной борьбы является проблема уменьшения размеров частотно-селективных или фильтрующих устройств, которыми, как известно, насыщена радиоаппаратура. Однако кроме самой проблемы миниатюризации фильтров важно учитывать и непрерывно повышающиеся требования к их амплитудно-частотным характеристикам, надежности, технологичности в производстве и, конечно, стоимости. Широко распространенные в настоящее время традиционные конструкции микрополосковых фильтров на подложках с высокой диэлектрической про-

нищаемостью [1] во многом удовлетворяют этим требованиям, однако они имеют слишком большие габариты в дециметровом и особенно в метровом диапазоне длин волн.

Для миниатюризации микрополосковых конструкций фильтров используют несколько известных подходов, например, сворачивают регулярные полосковые проводники резонаторов в форму шпильки [2], в форму буквы „С“ [3] или в форму прямоугольной спирали [4]. С этой же целью используют скачки ширины полосковых проводников резонаторов, уменьшая тем самым их длину, а соответственно и размеры фильтра [5]. При сочетании этих двух подходов габариты микрополосковых фильтров становятся приемлемыми уже в дециметровом диапазоне длин волн [6,7]. Наиболее существенная миниатюризация микрополосковых фильтров достигается при использовании в них элементов, представляющих собой планарные квазисосредоточенные емкости и индуктивности [8–10]. Однако важно отметить, что почти все перечисленные выше способы миниатюризации приводят к существенному уменьшению собственной добротности резонаторов, образующих фильтры, а значит, и к ухудшению частотно-селективных свойств последних. Рекордную добротность микрополосковые резонаторы имеют, если их проводники изготовлены из пленок высокотемпературных сверхпроводящих материалов [11], но высокая стоимость и работоспособность устройств только при криогенных температурах ограничивают их широкое применение.

В данной работе исследована новая конструкция микрополоскового резонатора, которая, как будет показано ниже, по совокупности таких характеристик, как миниатюрность и величина собственной добротности, значительно превосходит известные аналоги. С точки зрения физики принцип построения рассматриваемого резонатора уже использовался в микрополосковой структуре [12], представляющей собой три кондуктивно связанных регулярных резонатора. Собственные частоты взаимодействующих резонаторов в такой структуре за счет огромной кондуктивной связи сильно расталкиваются. В результате частота первой, рабочей моды колебаний существенно понижается, при этом длина его полоскового проводника оказывается примерно в 2 раза меньше, чем у регулярного полуволнового резонатора, настроенного на такую же рабочую частоту. Тем не менее площадь подложки по контуру проводников такой структуры несколько больше, чем у регулярного

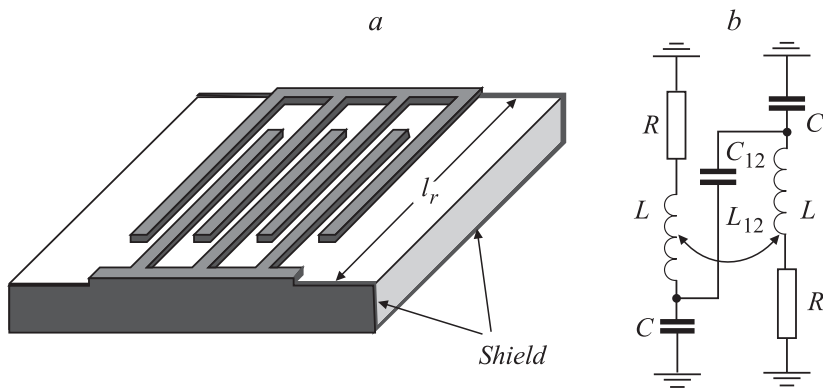


Рис. 1. Топология проводников исследуемого микрополоскового резонатора (а) и эквивалентная схема для пары элементов его встречно-штыревой структуры (b).

полуволнового резонатора, поэтому резонатор на рассмотренной в [12] структуре нельзя считать миниатюрным.

Рассмотрим микрополосковый резонатор (рис. 1, а), содержащий диэлектрическую подложку, нижняя сторона которой полностью металлизирована и служит экраном, а на верхнюю сторону подложки нанесены полосковые металлические проводники, образующие встречно-штыревую структуру. Оба основания встречно-штыревой структуры по всей своей ширине соединены с экраном, что является важной конструктивной особенностью резонатора, отличающей его от известных аналогов.

Очевидно, что в рассматриваемом резонаторе каждый элемент встречно-штыревой структуры сам является четвертьволновым резонатором. Как и в [12], собственные частоты этих взаимодействующих резонаторов сильно расходятся за счет огромной электромагнитной связи, обусловленной малыми зазорами между полосковыми проводниками и их малой шириной. Поэтому число мод колебаний основного типа (т.е. таких, у которых наблюдается только один максимум высокочастотного электрического напряжения на длине каждого полоскового проводника) равно числу элементов у встречно-штыревой структуры. Важно отметить, что для первой, рабочей моды колебаний,

обладающей самой низкой резонансной частотой f_1 , высокочастотные токи во всех проводниках встречно-штыревой структуры текут в одну сторону, а напряжения на смежных проводниках имеют противоположные знаки, что приводит к суммированию индуктивного и емкостного взаимодействия проводников.

Для простоты анализа основных характеристик предложенного резонатора удобно привлечь его эквивалентную схему на сосредоточенных индуктивных и емкостных элементах, которую несложно построить из одномерной модели структуры, традиционно используемой для квазистатического расчета подобных конструкций [10]. На рис. 1, *b* показана эквивалентная схема резонатора для простейшего случая, когда он образован всего двумя проводниками, каждый из которых представляется колебательным контуром, образованным индуктивностью L , емкостью C и сопротивлением R для учета потерь в контуре. Индуктивное взаимодействие контуров характеризуется взаимной индуктивностью L_{12} , а емкостное — взаимной емкостью C_{12} . Как известно, резонансная частота уединенного колебательного контура будет равна $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$, а его собственная добротность $Q_0 = \frac{1}{R}\sqrt{\frac{L}{C}}$.

Решая уравнения Кирхгофа для схемы (рис. 1, *b*), несложно вычислить нижнюю f_1 и верхнюю f_2 резонансные частоты двух связанных контуров

$$f_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L+L_{12})(C+2C_{12})}}, \quad f_2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L-L_{12})C}}. \quad (1)$$

Отметим, что токи в индуктивностях на частоте f_1 имеют одинаковое направление, а потенциалы на обкладках конденсатора C_{12} имеют противоположные знаки, но на частоте f_2 — наоборот. Легко показать, что на частоте первой моды колебаний эквивалентной схемы резонатора, образованного двумя полосковыми проводниками, пару связанных контуров можно заменить одним контуром с индуктивностью L_1 , емкостью C_1 и сопротивлением R_1 :

$$L_1 = \frac{1}{2}(L+L_{12}), \quad C_1 = 2(C+2C_{12}), \quad R_1 = \frac{R}{2}. \quad (2)$$

Используя квазистатическое приближение для расчета погонных параметров связанных микрополосковых линий на подложке с высокой

диэлектрической проницаемостью, можно показать, что $C_{12} \ll C$, а при ширине полосковых проводников и расстоянии между ними намного меньше толщины подложки с достаточно хорошей точностью выполняется приближенное равенство $L_{12} \approx L$. В результате эквивалентная индуктивность для контура, отвечающего резонатору на основе двух встречных проводников, близка к индуктивности одиночного проводника, в то время как эквивалентная емкость увеличивается в 2 раза, а сопротивление в 2 раза уменьшается.

Аналогичные вычисления, проведенные с использованием эквивалентной схемы для резонатора на встречно-штыревой структуре, состоящей из N проводников, позволяют получить выражения для собственной добротности резонанса нижней моды колебаний и ее резонансной частоты

$$Q_1 = \sqrt{N} Q_0, \quad f_1 = \frac{1}{\sqrt{N}} f_0, \quad (3)$$

где Q_0 и f_0 — собственная добротность и резонансная частота одиночного элемента встречно-штыревой структуры соответственно. Из формул (3) видно, что при увеличении количества проводников у встречно-штыревой структуры резонатора частота его первой моды колебаний понижается, а добротность растет. Однако важно отметить, что величина эффектов понижения частоты и роста добротности резко падает, если не выполняются условия малости ширины полосковых проводников и зазоров между ними по сравнению с толщиной подложки.

Все выводы, полученные на основе эквивалентной схемы встречно-штыревой структуры, полностью подтверждаются численным электродинамическим анализом 3D моделей рассмотренного микрополоскового резонатора. В частности, анализ показывает, что частота f_1 существенно понижается, а добротность Q_1 растет с увеличением числа проводников N у встречно-штыревой структуры (рис. 2). Представленные зависимости рассчитаны для следующих конструктивных параметров резонатора: диэлектрическая проницаемость подложки $\varepsilon = 80$, ее толщина 1 mm, длина проводников встречно-штыревой структуры 4.4 mm, их ширина 100 μm , зазор между проводниками 40 μm .

Важно заметить, что зависимость резонансной частоты от количества проводников $f_1(N)$ рассчитывалась при фиксированной длине резонатора, равной $l_r = 5$ mm, в то время как аналогичная зависимость добротности вычислялась для фиксированной резонансной частоты

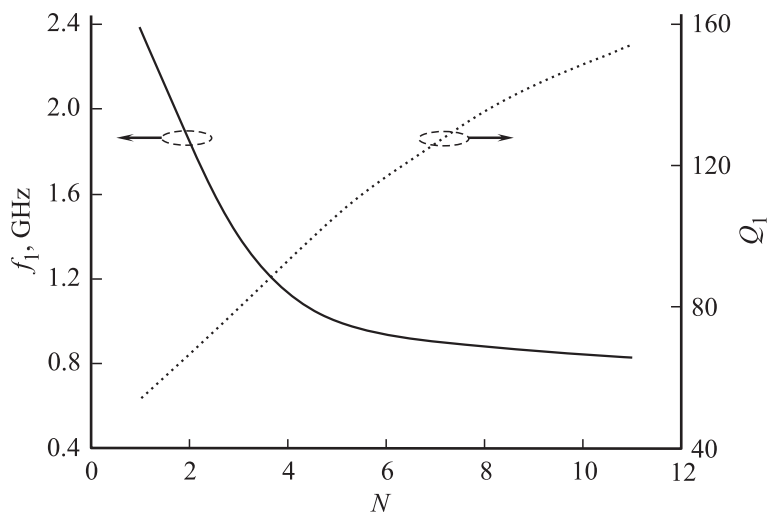


Рис. 2. Рассчитанные в программе электродинамического моделирования зависимости резонансной частоты и собственной добротности исследуемого резонатора от количества проводников у встречно-штыревой структуры.

1 GHz, которая поддерживалась постоянной за счет изменения длины резонатора. Последнее было сделано для того, чтобы исключить влияние на добротность резонатора изменения толщины скин-слоя в проводниках, связанного с изменением частоты.

Для экспериментальной проверки полученных результатов был рассчитан и затем изготовлен резонатор на встречно-штыревой структуре с числом элементов $N = 7$. Фотография изготовленного образца резонатора, припаянного на латунное основание с отверстиями для крепления разъемов измерительного тракта, представлена на рис. 3. Материал подложки резонатора — керамика ТБНС ($\epsilon = 80$) толщиной 1 mm. Длина резонатора составила $l_r = 5.5$ mm при длине проводников встречно-штыревой структуры 4.6 mm. Ширина проводников $100 \mu\text{m}$, зазор между ними $40 \mu\text{m}$. Измеренная частота нижней моды колебаний резонатора составила $f_1 = 817$ MHz при собственной добротности $Q_1 = 100$, что достаточно хорошо согласуется с расчетными значениями: $f_1 = 820$ MHz и $Q_1 = 120$.

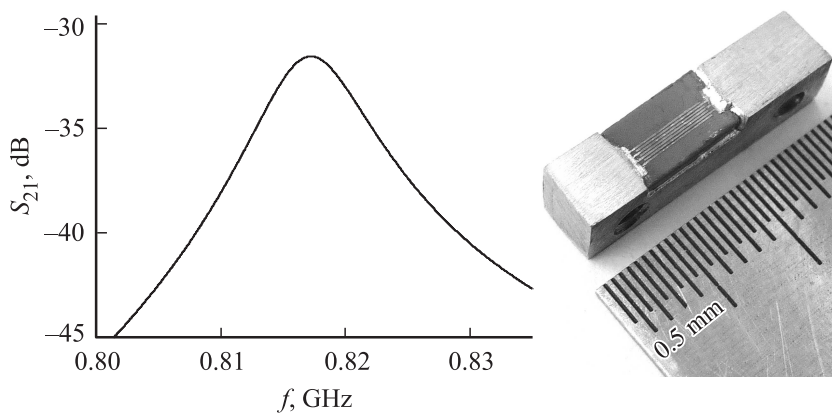


Рис. 3. Измеренная резонансная кривая и фотография макета микрополоскового резонатора.

Для сравнения в таблице приведены значения собственных добротностей микрополосковых резонаторов различных миниатюрных конструкций, полученные электродинамическим анализом их 3D-моделей. Все резонаторы имеют одинаковую частоту первой моды колебаний $f_1 = 820$ МГц, одинаковые размеры контура полосковых проводников 1×5.5 мм и одинаковые подложки из керамики ТБНС ($\epsilon = 80$) толщиной 1 мм. Видно, что рассмотренный в работе резонатор существенно превосходит по добротности все представленные аналоги.

С физической точки зрения более высокая, по сравнению с известными конструкциями, собственная добротность исследованного микрополоскового резонатора объясняется тем, что во всех проводниках встречно-штыревой структуры высокочастотные токи имеют одинаковое направление. В результате суммарная индуктивность системы проводников остается почти такой же, как у одного уединенного проводника, а ток в резонаторе разделяется равномерно на все проводники, уменьшая тем самым омические потери в резонаторе.

Таким образом, в работе предложена и исследована оригинальная конструкция миниатюрного микрополоскового резонатора на основе встречно-штыревой структуры, замкнутой своими основаниями на экран. Этот резонатор имеет либо значительно более высокую

Сравнение собственной добротности микрополосковых резонаторов различных конструкций, имеющих одинаковую частоту $f_1 = 820$ МГц, одинаковые размеры контура полосковых проводников 1×5.5 мм и одинаковые подложки из керамики ТБНС ($\varepsilon = 80$) толщиной 1 мм.

Резонатор и источник	 рассмотренный	 [4]	 [6,7]	 [9]	 [10]
Добротность	120	33	31	24	48

собственную добротность, либо существенно меньшие размеры, чем у известных конструкций микрополосковых резонаторов при прочих равных условиях. Первое утверждение хорошо доказывает таблица, а второе — очевидно. Например, чтобы нерегулярный шпильковый четвертьволновый резонатор [6,7] имел бы добротность не 31 (см. таблицу), а такую же, как у предложенного резонатора — 120, необходимо его размеры увеличить в 2 раза.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение № 14.607.21.0039.

Список литературы

- [1] Беляев Б.А., Лексиков А.А., Тюрнев В.В. // Радиотехника и электроника. 2004. Т. 49. № 11. С. 1315–1324.
- [2] Беляев Б.А., Сержантов А.М. // Радиотехника и электроника. 2004. Т. 49. № 1. С. 24–31.
- [3] Hung C.-Y., Weng M.-H., Lan S.-W., Huang C.-Y. // J. Electromagnetic Waves and Applications. 2012. V. 26. P. 12–23.
- [4] Lee Y.-T., Lim J.-S., Kim Ch.-S., Ahn D., Nam S.A. // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. 2002. V. 12. N 10. P. 375–377.
- [5] Беляев Б.А., Лексиков А.А., Никитина М.И., Тюрнев В.В., Алексеева Н.В. // Радиотехника и электроника. 2000. Т. 45. № 8. С. 910–917.
- [6] Беляев Б.А., Бутаков С.В., Лалетин Н.В., Лексиков А.А., Тюрнев В.В., Чесноков О.Н. // Радиотехника и электроника. 2004. Т. 49. № 11. С. 1397–1406.
- [7] Беляев Б.А., Бутаков С.В., Лалетин Н.В., Лексиков А.А., Тюрнев В.В., Чесноков О.Н. // Радиотехника и электроника. 2006. Т. 51. № 1. С. 24–36.
- [8] Hong J.S., Lancaster M.J. // Electronics Letters. 1994. V. 30. N 18. P. 1494–1495.
- [9] Zhu J., Feng Zh. // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. 2006. V. 16. N 12. P. 672–674.
- [10] Yang T., Tamura M., Itoh T. // IEEE Transactions on microwave Theory and Techniques. 2010. V. 58. N 2. P. 390–402.
- [11] Вендик И.Б., Вендик О.Г., Земляков К.Н., Колмакова И.В., Ситникова М.Ф., Туральчук П.А., Мастеров Д.В., Павлов С.А., Парафин А.Е. // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. В. 9. С. 64–69.
- [12] Virdee B.S., Grassopoulosf Ch. // IEEE MTT-S Digest. 2003. P. 2161–2164.