

МИКРОПОЛОСКОВЫЕ ФИЛЬТРЫ НА ДВУХМОДОВЫХ РЕЗОНАТОРАХ

Ходенков С. А.,

научный руководитель д-р техн. наук Беляев Б. А.

Сибирский государственный аэрокосмический университет
имени академика М. Ф. Решетнева

При создании и исследовании новых конструкций частотно-селективных СВЧ устройств, в том числе и микрополосковых полосно-пропускающих фильтров, разработчики традиционно стараются увеличить их селективные свойства, повысить технологичность изготовления, уменьшить габариты, а также снизить себестоимость готовых изделий в производстве. Особое внимание в настоящее время уделяется конструкциям фильтров на двухмодовых и многомодовых микрополосковых резонаторах и полосковых резонаторах на подвешенной подложке. В таких резонаторах, используя определенную форму полосковых проводников, удается сблизить собственные частоты нижайших двух или более мод колебаний. В результате фильтр на двухмодовых резонаторах имеет порядок, которым, как известно, определяются его частотно-селективные свойства, в два раза превышающий число резонаторов в нем, что позволяет уменьшать габариты устройств без ухудшения их селективных свойств.

Конструкция микрополоскового двухмодового резонатора, имеющая расщепленный с одной стороны полосковый проводник имеет ряд достоинств. Во-первых, она обладает высокой миниатюрностью, а, во-вторых, в отличие от традиционных резонаторов со скачком волнового сопротивления, допускает независимое изменение резонансных частот двух нижайших мод колебаний в широких пределах (рис. 1, б), включая их полное совпадение.

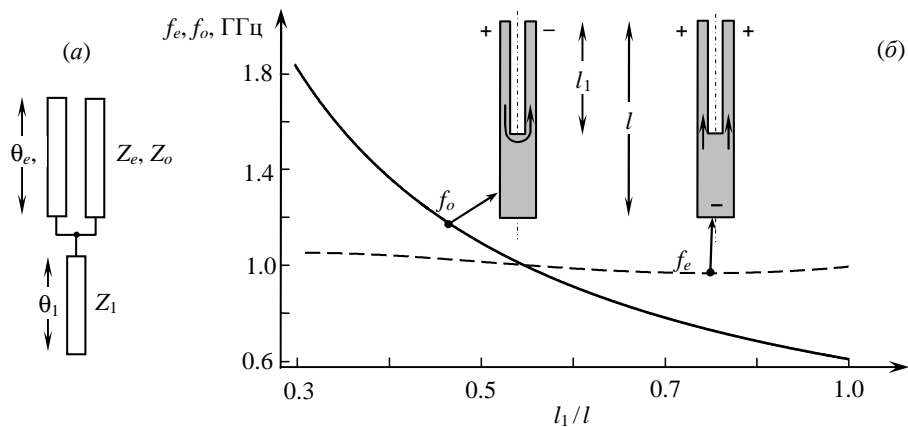


Рис. 1. Эквивалентная схема микрополоскового двухмодового резонатора с расщепленным полосковым проводником – (а), и зависимости частот четной – f_e и нечетной – f_o мод колебаний от длины щели – (б)

Моды, для которых токи и напряжения на полосковом проводнике резонатора по обе стороны щели имеют одинаковые знаки, называют четными, а моды, для которых токи и напряжения имеют противоположные знаки – нечетными [4, 5]. Собственные частоты всех четных мод колебаний f_e являются решениями уравнения

$$Z_e \operatorname{tg} \theta_1 + 2Z_1 \operatorname{tg} \theta_e = 0,$$

а частоты всех нечетных мод f_o являются решением уравнения

$$\cos \theta_o = 0.$$

Здесь Z_1 и θ_1 – волновое сопротивление и электрическая длина отрезка одиночной микрополосковой линии на нерасщепленном участке резонатора (рис. 1а), а Z_e , Z_o , θ_e , θ_o – волновые сопротивления и электрические длины отрезка связанных микрополосковых линий на расщепленном участке для четных (e) и нечетных (o) волн.

Резонансная частота четной моды колебаний f_e , очевидно, определяется длиной полоскового проводника l , и она практически не зависит от длины щели l_1 . Резонансная частота для нечетной моды колебаний f_o , напротив, зависит только от длины щели в полосковом проводнике, поэтому теоретически она может изменяться от бесконечности, когда длина щели близка к нулю, и до частоты примерно в два раза ниже частоты f_e , когда щель имеет длину, близкую к длине самого полоскового проводника. Важно отметить, что эти моды колебаний не взаимодействуют друг с другом, т. к. ортогональны, поэтому их частоты совпадают при определенной длине щели (рис. 1, б).

В настоящей работе с целью уменьшения габаритов устройств и улучшения селективных свойств, исследовались двухзвенные конструкции полосно-пропускающих фильтров на таких двумодовых резонаторах с использованием подложек с высокой диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 80$ и толщиной $h = 1$ мм. Были рассмотрены конструкции, обладающие осевой симметрией, реализованные на встречно-направленных резонаторах (рис. 2, а, в) и аналогичные – на сонаправленных резонаторах (рис. 2, б, г).

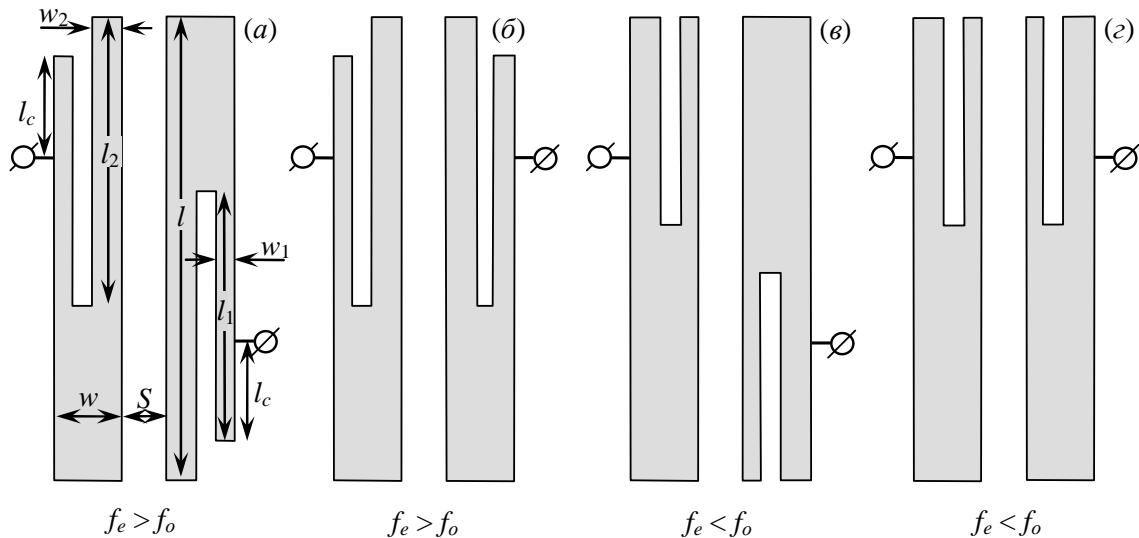


Рис. 2. Топологии проводников двухзвенных полосно-пропускающих фильтров

С помощью программы электродинамического численного анализа 3D моделей было установлено, что настроить фильтры с относительной шириной полосы пропускания $\Delta f/f_o \approx 20\%$, сформированной четырьмя резонансами, можно так в случае, когда частоты четных мод колебаний f_e превосходят нечетные f_o , что реализуется при отношении

физических длин отрезков резонатора равном $l_2/l = 62\%$ (рис. 2, *a, б*), так и в случаи, когда частоты уже нечетных мод колебаний превосходят четные, ($f_e < f_o$), что реализуется при отношении $l_2/l = 47\%$ (рис. 2*в,г*). Отметим, что длина резонаторов l во всех четырех случаях настройки фильтров оставалась одинаковой. Укажем размеры параметров фильтров, реализованных на встречно-направленных резонаторах в мм. Конструкция (рис. 2*а*) имела следующие размеры – $l = 18.8$, $l_1 = 10.1$, $l_2 = 11.8$, $l_c = 5.5$, $w = 3.0$, $w_1 = 0.8$, $w_2 = 1.3$, $S = 1.2$, конструкция (рис. 2*б*) – $l = 18.8$, $l_1 = l_2 = 8.9$, $l_c = 3.5$, $w = 3.0$, $w_1 = 1.5$, $w_2 = 1.0$, $S = 1.2$. Фильтр на сонаправленных резонаторах (рис. 2, *б*) отличается от фильтра на встречно-направленных резонаторах только тем, что второй резонатор развернут на 180° , а диагональное расположение точки кондуктивного подключения изменено на смежное. Аналогично, развернут на 180° резонатор в фильтре, приведенном на рисунке 4, *з*, его размеры идентичны фильтру, приведенному на рисунке 4, *в*.

Приведем АЧХ фильтров. Конструкции с топологиями отображенными на рисунках 2*а,б* и 2*в,г* имеют АЧХ представленные на рисунках 3*а* и 3*б*, соответственно.

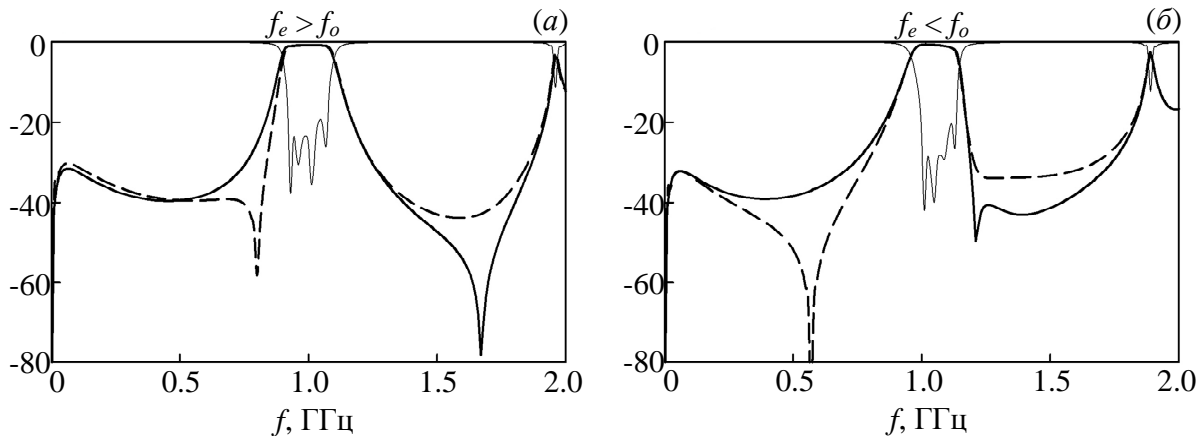


Рис. 3. Теоретические АЧХ фильтров. Сплошные линии – фильтры на встречно-направленных резонаторах, штриховые линии – на сонаправленных резонаторах

Отметить следующие закономерности селективных свойств фильтров: АЧХ настроенного фильтра на встречно-направленных резонаторах, в котором частоты четных мод колебаний f_e превосходят нечетные f_o , аналогична АЧХ настроенного фильтра на сонаправленных резонаторах, в котором частоты нечетных мод колебаний f_o превосходят четные f_e , с тем различием, что полюс затухания, находящейся в центре высокочастотной полосы заграждения перемещается в центр низкочастотной полосы заграждения. АЧХ настроенного фильтра на сонаправленных резонаторах, в котором частоты четных мод колебаний f_e превосходят нечетные f_o , аналогична АЧХ настроенного фильтра на встречно-направленных резонаторах, в котором частоты нечетных мод колебаний f_o превосходят четные f_e , с тем различием, что полюс затухания, находящейся рядом с низкочастотным склоном полосы пропускания наблюдается уже рядом с высокочастотным склоном полосы пропускания. Таким образом, реализуя различную настройку одних и тех же резонаторов можно управлять расположением полюсов затухания в таких двухзвенных конструкциях, и, следовательно, селективными свойствами микрополосковых полосно-пропускающих фильтров.

Для проверки точности электродинамического численного анализа 3D моделей методом гравировки по лаку был изготовлен экспериментальный макет фильтра (рис. 4, *a*), состоящий из двух встречно направленных резонаторов, в котором частоты четных мод колебаний f_e превосходят нечетные f_o . В качестве материала подложки была выбрана широко распространенная высокочастотная термостабильная керамика ТБНС. Отметим, что рассчитанные размеры параметров этого фильтров приведены выше. Однако, для корректности сравнения, размеры топологии проводников изготовленного фильтра были определены на измерительном микроскопе, а затем именно эти размеры использовались в расчете для приведенных на рисунке 4, *б* теоретических зависимостей. Сплошными и штриховыми линиями показаны соответственно рассчитанные зависимости прямых и обратных потерь, а точками – измеренные АЧХ.

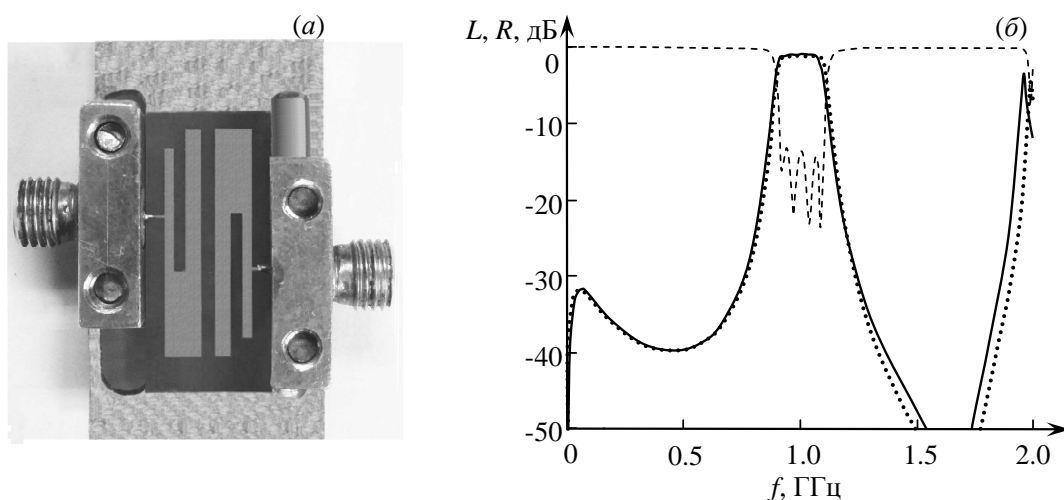


Рис. 4. Фотография экспериментального макет фильтра (*a*) и его амплитудно-частотная характеристика (*б*), линии – расчет, точки – эксперимент

Результаты проведенного эксперимента показывают достаточно хорошее согласие с электродинамическим расчетом 3D моделей. Видно, что полосу пропускания формируют четыре резонанса – по два от каждого резонатора.

Таким образом, исследованы миниатюрные конструкции полосно-пропускающих фильтров четвертого порядка, построенных на микрополосковых двухмодовых резонаторах с расщепленным регулярным полосковым проводником, с использованием подложек с высокой диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 80$. Показана возможность регулировать селективные свойства таких конструкций за счет изменения положения полюсов затухания. Несмотря на то, что фильтры построены на двух резонаторах, они обладают высокими частотно-селективными свойствами благодаря тому, что в формировании полосы пропускания одновременно участвуют резонансы четной и нечетной моды колебаний от каждого резонатора.

Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, грант Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых - кандидатов наук, МК-5942.2014.8 «Исследование и проектирование современных микрополосковых и полосковых устройств частотной селекции, в том числе с использованием активных сред и на основе фотонных кристаллов».