

КОЭФФИЦИЕНТЫ СВЯЗИ МИКРОПОЛОСКОВЫХ ЧЕТВЕРТВОЛНОВЫХ ШПИЛЬКОВЫХ РЕЗОНАТОРОВ

А.М. Сержантов, Б.А. Беляев (научный руководитель)

Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН
660036, Красноярск, Академгородок

E-mail: belyaev@iph.krasn.ru

Микрополосковые частотно-селективные устройства и, в частности, фильтры получили достаточно широкое распространение в СВЧ технике благодаря своей миниатюрности, надежности и технологичности в производстве. Такие устройства, как правило, представляют собой систему из взаимодействующих резонаторов, коэффициенты связи которых зависят от множества конструктивных параметров. Принимая во внимание тот факт, что селективные свойства устройств во многом определяются частотными зависимостями коэффициентов связи [1], изучение этих коэффициентов для различных конструкций резонаторов является важной и актуальной задачей. В настоящей работе исследуются селективные свойства и частотные зависимости коэффициентов связи двух-

звенных фильтров на микрополосковых четвертьволновых шпильковых резонаторах кондуктивно подключенных к линиям передачи.

Топология проводников исследуемых двухзвенных фильтров на сонаправленных четвертьволновых шпильковых резонаторах показана на рис.1. Длина шпильковых резонаторов l_r , и они кондуктивно подключены к внешним линиям передачи с волновым сопротивлением 50 Ом смежно на расстоянии l_c от концов проводников. Величина зазора между проводниками внутри каждого резонатора S , а между резонаторами S_e , при этом ширина полосковых проводников на всех участках одинакова и равна w .

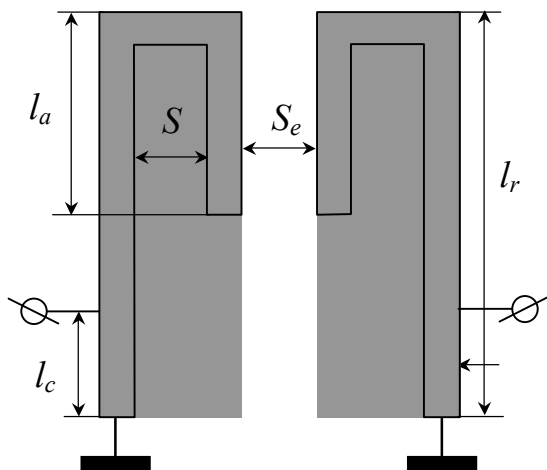


Рис. 1

Численный анализ рассматриваемых конструкций проводился на одномерных моделях, состоящих из последовательно соединенных регулярных отрезков одиночных и связанных микрополосковых линий. Эти регулярные отрезки получаются разбиением конструкции горизонтальными и вертикальными сечениями по изгибам и концам проводников, а также по точкам подключения линий передачи. Погонные параметры одиночных и связанных участков линий, необходимые как для расчета амплитудно-частотной характеристики (АЧХ), так и для получения распределения токов и напряжений в проводниках, вычислялись в квазистатическом приближении с учетом концевых емкостей. Потери СВЧ мощности учитывались введением собственной добротности микрополосковых резонаторов Q_0 , взятой из эксперимента.

Для количественного описания взаимодействия микрополосковых резонаторов (МПР) рассмотрим упрощенную модель конструкции, в которой на участке четырех связанных линий будем учитывать связь лишь между отрезками проводников, разделенных зазором S_e . Частотно-зависимые коэффициенты емкостной $k_C(f)$, индуктивной $k_L(f)$ и полной связи $k(f)$ определим, используя модифицированный энергетический подход [2]. В нем магнитные (индуктивные) и электрические (емкостные) энергии, запасаемые резонаторами отдельно ($E_{1,2L}$, $E_{1,2C}$) и совместно (E_{12L} , E_{12C}) вычисляются из распределений по длине полоско-

вых проводников комплексных токов $I_{1,2}(x)$ и напряжений $U_{1,2}(x)$. Распределение этих токов и напряжений нетрудно найти для любой заданной частоты в квазистатическом приближении [3].

$$E_{1,2L} = \frac{1}{2} \int_0^{l_r+S+l_a} L_1 I_{1,2}(x) I_{1,2}^*(x) dx, \quad (1)$$

$$E_{1,2C} = \frac{1}{2} \int_0^{l_r+S} C_1 U_{1,2}(x) U_{1,2}^*(x) dx + \frac{1}{2} \int_{l_r+S}^{l_r+S+l_a} (C_1+C_{12}) U_{1,2}(x) U_{1,2}^*(x) dx \quad (2)$$

$$E_{12L} = \text{Im} \int_{l_r+S}^{l_r+S+l_a} L_{12} I_1(x) I_2^*(x) dx, \quad (3)$$

$$E_{12C} = \text{Im} \int_{l_r+S}^{l_r+S+l_a} C_{12} U_1(x) U_2^*(x) dx \quad (4)$$

Здесь знак звездочка означает операцию комплексного сопряжения, а L_1 и C_1 , L_{12} и C_{12} – соответственно погонные индуктивности и емкости, взаимные индуктивности и взаимные емкости связанных микрополосковых линий. В выражениях (3-4), в отличие от [1], используется лишь реактивная часть полной энергии.

При этом частотно-зависимые коэффициенты индуктивной и емкостной связи находятся по следующим формулам:

$$k_L(f) = \frac{2E_{12L}}{E_{1L}+E_{2L}+E_{1C}+E_{2C}} \cdot \frac{1}{K}, \quad (5)$$

$$k_C(f) = \frac{-2E_{12C}}{E_{1L}+E_{2L}+E_{1C}+E_{2C}} \cdot \frac{1}{K},$$

где $K=|U_{\text{вых}}|/|U_{\text{вх}}|$ – модуль коэффициента передачи по напряжению с входа микрополосковой структуры на выход. Коэффициент полной связи определяется по известной формуле [4]

$$k = \frac{k_L+k_C}{1+k_L \cdot k_C}. \quad (6)$$

Учитывая, что погонные параметры связанных микрополосковых линий L_1 , C_1 , L_{12} и C_{12} являются константами, зависимость коэффициентов индуктивной и емкостной связи (5) от частоты обусловлена исключительно частотными зависимостями распределения токов и напряжений по длине проводников.

На рис. 2 представлены зависимости коэффициентов емкостного (точки) индуктивного (штриховые линии) и полного (сплошные линии) взаимодействия рассматриваемых шпильковых резонаторов от величины зазора S_e между полосковыми проводниками. Кривые построены для резонансной частоты первой моды колебаний МПР, при этом параметры рассматриваемой конструкции следующие: относительная диэлектрическая проницаемость подложки $\epsilon=40$, ее толщина $h=2$ мм, $l_r=28$ мм, $l_a=3$ мм, $S=1.1$ мм, $w=2$ мм.

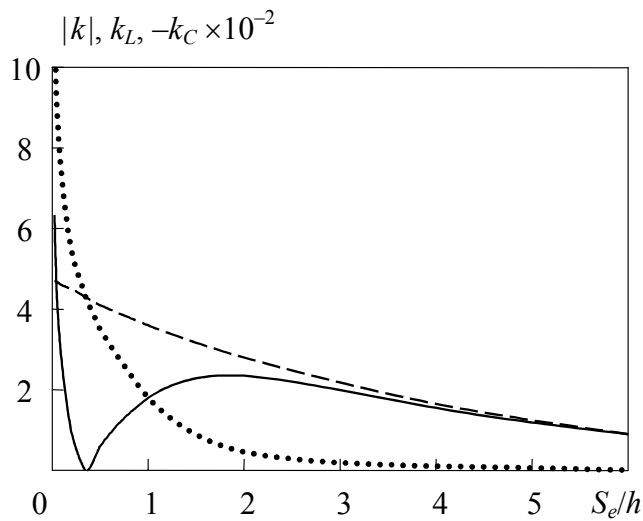


Рис. 2.

Видно, что коэффициенты емкостной и индуктивной связи действуют в противофазе. В результате на резонансной частоте первой моды колебаний наблюдается немонотонное поведение полного коэффициента связи от величины зазора S_e как, например, в полуволновых и четвертьволновых МПР, содержащих нерегулярности в виде скачков ширины полоскового проводника [5-7], а также в полуволновых сонаправленных шпильковых резонаторах [8]. Наблюдаемый эффект обусловлен более сильной зависи-

мостью от S_e коэффициента емкостной связи по сравнению с индуктивной. В результате с увеличением зазора $|k|$ сначала уменьшается до нуля в точке, где коэффициент емкостной связи равен по абсолютной величине коэффициенту индуктивной связи, а затем увеличивается, достигая своего максимального значения при определенном зазоре, и лишь при дальнейшем увеличении S_e взаимодействие резонаторов монотонно уменьшается. В результате заданный уровень коэффициента взаимодействия, например, $|k|=0.02$, а значит и фиксированную ширину полосы пропускания рассматриваемой двухзвенной секции, можно получить при трех сильно различающихся зазорах между полосковыми проводниками.

Для экспериментальной проверки полученных результатов, нами методом гравировки по лаку [9] были изготовлены на подложках из керамики В-40 ($\epsilon=40$) толщиной $h=2$ мм три макета двухзвенных фильтров, которые отличались только величиной зазора S_e между полосковыми проводниками резонаторов. Величины зазоров 0.48 мм, 1.29 мм и 7.0 мм, при которых относительная ширина полосы пропускания исследуемых фильтров, измеренная по уровню -3 дБ от уровня минимальных потерь, оставалась $\sim 2\%$, были предварительно получены из анализа конструкции в квазистатическом приближении.

На рис. 3 (верхние графики) сплошными линиями показаны результаты расчета, а точками – измеренные АЧХ макетов фильтров. Все фильтры имели одинаковые конструктивные параметры: $l_r=28$ мм, $l_r=3$ мм, $w=2$ мм, $S=1.1$ мм. Наблюдается достаточно хорошее совпадение теории и эксперимента на всех образцах. На нижних графиках рис. 3 для исследованных макетов приведены частотные зависимости коэффициентов индуктивной (штриховая линия), емкостной (точки) и полной (сплошная линия) связи МПР. Исследования показали, что, действительно, заданная ширина полосы пропускания реализуется при трех существенно различающихся зазорах между полосковыми проводниками резонаторов исследуемой двухзвенной конструкции. При этом минимальному зазору S_e в полосе пропускания фильтра соответствует преимущественно емкостное взаимодействие МПР при индуктивном того же порядка, среднему зазору – преимущественно индуктивное взаимодействие при емкостном того же порядка, а максимальному зазору – также преимущественно индуктивное взаимодействие при исчезающе малом емкостном.

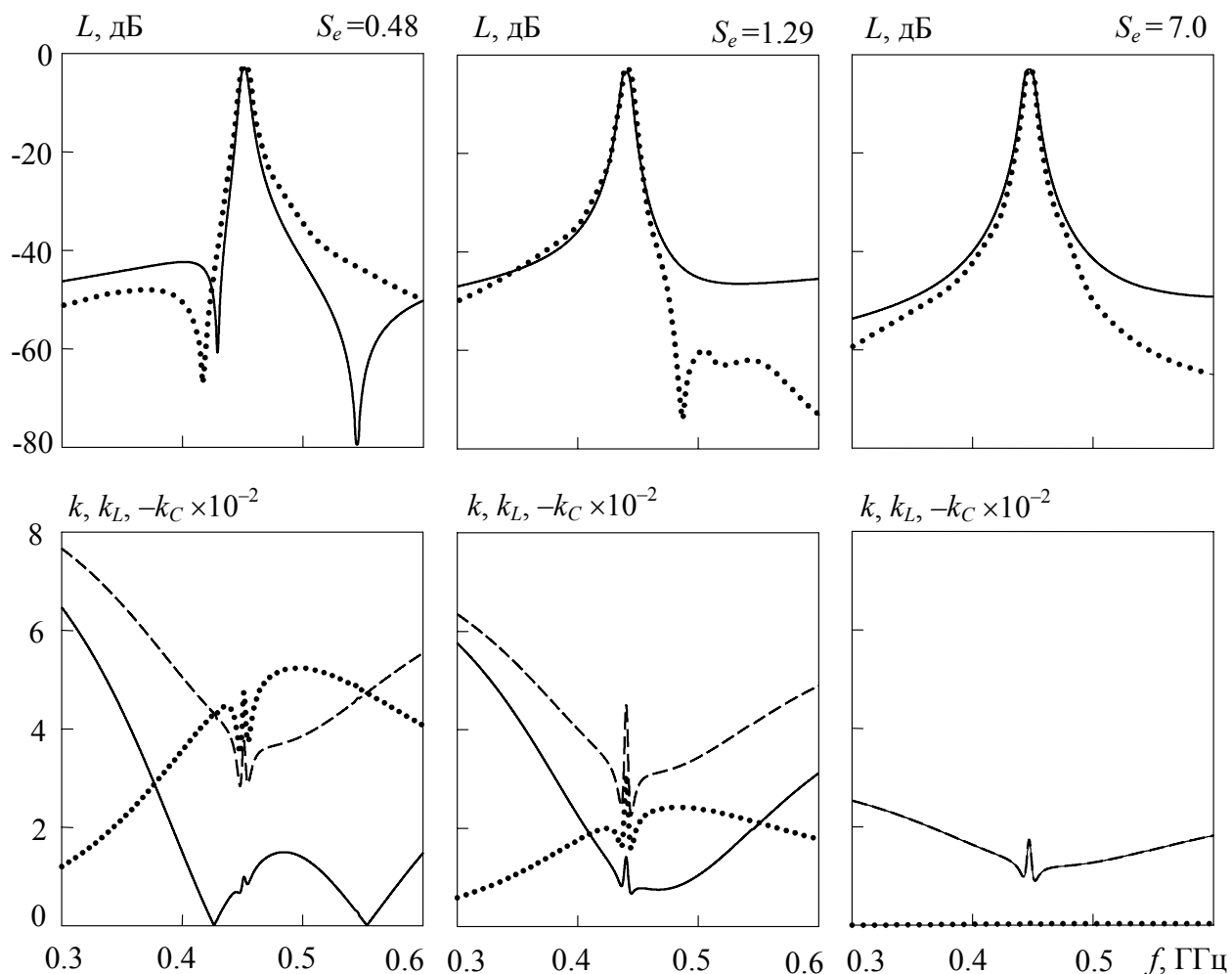


Рис. 3

Следует отметить, что в случае минимального зазора S_e между проводниками МПР секции на измеренной и рассчитанной АЧХ наблюдается по два полюса затухания – слева и справа от полосы пропускания, однако правый полюс в эксперименте сильно сдвинут в область высоких частот. При среднем зазоре на рассчитанной амплитудно-частотной характеристике полюса затухания отсутствуют, а в эксперименте справа от полосы пропускания наблюдается два полюса. При максимальном зазоре S_e полюса затухания отсутствуют как на рассчитанной, так и на измеренной АЧХ. Заметим, что полюса затухания являются точками компенсации индуктивного и емкостного взаимодействия резонаторов. Поэтому в случае изготовления секции с зазором S_e , при котором коэффициент полной связи резонаторов обращается в нуль (см. рис. 2), полюс затухания располагается точно в центре полосы пропускания, тем самым, уничтожает ее.

Таким образом, в настоящей работе исследованы коэффициенты связи и амплитудно-частотные характеристики сонаправленных четвертьволновых шпильковых резонаторов в двухзвенных микрополосковых секциях. Показано, что в таких фильтрах на частоте первой моды колебаний величина полного коэффициента связи, а, следовательно, и величина относительной полосы пропускания, определяется разностью коэффициентов емкостной и индуктивной связи, т.к. они действуют в противофазе. Теоретически и экспериментально доказано, что в исследованных конструкциях наблюдается такое же anomalous поведение коэффициента связи от величины зазора между проводниками МПР, как и в фильтрах на нерегулярных резонаторах типа гантели [5-7]. Благодаря этому заданная ширина полосы пропускания устройства может быть реализована при трех существенно различающихся зазорах между полосковыми проводниками резонаторов при неизменных остальных

лосковыми проводниками резонаторов при неизменных остальных конструктивных параметрах микрополосковой структуры. Установлено, что минимальный зазор между МПР обеспечивает существенно более высокую крутизну низкочастотного склона АЧХ, а средний зазор – высокочастотного склона. При максимальном зазоре между резонаторами крутизна обоих склонов приблизительно одинаковая. Этот факт очень важен для конструирования фильтров с заданной формой амплитудно-частотной характеристики.

Список литературы:

1. Беляев Б.А., Тюрнев В.В. // Электронная техника. Сер. 1, СВЧ-техника, вып. 4 (448), 1999, с. 23-27.
2. Беляев Б.А., Лексиков А.А., Сержантов А.М. // РТЭ, Т. 48, № 1, 2003, с.39-46.
3. Тюрнев В.В. Квазистатическая теория связанных микрополосковых линий. – Препринт № 557Ф, Институт физики СО АН СССР, Красноярск, 1989, 19 с.
4. Тюрнев В.В., Беляев Б.А. // Электронная техника. Сер. 1, Электроника СВЧ. 1990. Вып. 4(428). С. 25.
5. Беляев Б.А., Титов М.М., Тюрнев В.В. // Изв. ВУЗов, Радиофизика. 2000. № 8. С. 722.
6. Беляев Б.А., Лалетин Н.В., Лексиков А.А. // РТЭ, Т. 47, № 1, 2002, с.14-23.
7. Беляев Б.А., Сержантов А.М. Труды XII Международной конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии". Севастополь 2002, с.412-414.
8. Беляев Б.А., Сержантов А.М. Труды VI Международной конференции "Актуальные проблемы электронного приборостроения" АПЭП-2002. Новосибирск, 2002, Т. 4, с87-91.
9. Беляев Б.А., Казаков А.В., Лексиков А.А., Макиевский И.Я. // ПТЭ, № 1, 1998, с. 124-125.