

# Физика и техника СВЧ

УДК 621.372.414

## Микрополосковые резонаторы с плавным изменением ширины проводника и фильтры на их основе

А. Б. Беляев, А. А. Лексиков, Ю. Г. Шихов, Н. В. Алексеева, П. Н. Сергиенко

В квазистатическом приближении на одномерных моделях рассчитаны спектры собственных колебаний нерегулярных микрополосковых резонаторов с плавным изменением ширины полоскового проводника; исследовано поведение собственных частот первой  $f_1$  и второй  $f_2$  моды колебаний полуволновых резонаторов, у которых форма полоски в виде "гантели" ограничена сопряженными дугами окружностей; определены оптимальные соотношения размеров нерегулярностей, позволяющие максимально понизить  $f_1$  или предельно увеличить отношение  $f_2 / f_1$ ; получено хорошее совпадение с результатами эксперимента; исследованы конструкции двух-, трех- и четырехзвенных фильтров на резонаторах типа "гладкая гантель"; на примере двухзвенного фильтра показано, что предложенный расчет одномерной модели связанных нерегулярных резонаторов также хорошо согласуется с данными эксперимента.

Spectra of natural oscillations of irregular microstrip resonators with smooth variation of the strip conductor width are calculated in quasistatic approximation in one-dimensional models. The behavior of natural frequencies of the first  $f_1$  and the second  $f_2$  modes of oscillations are investigated half wave resonators whose strip conductors with a dumbbell-like form restricted by conjugated arcs. Optimum ratios between irregularities sizes allowing one to decrease  $f_1$  or to increase the ratio  $f_2 / f_1$  as much as possible are determined. A good agreement with experiment is obtained, constructions of two-, three- and four-pole filters based on resonators of the "smooth dumbbell" type are investigated. It is shown, using the example of a two-pole filter, that calculation based on the one-dimensional model of irregular coupled resonators agrees well with the experiment.

**Введение.** Нерегулярные микрополосковые резонаторы (МПР) широко используются при конструировании частотно-селективных СВЧ-устройств благодаря некоторым своим достоинствам [1–3]. В частности, полуволновые резонаторы со ступенчатым изменением ширины полоскового проводника в форме "гантели" (рис. 1) имеют не только меньшие габариты по сравнению с регулярными МПР, но и при определенных соотношениях нерегулярностей более высокую собственную добротность [4]. В полосно-пропускающих фильтрах на таких резонаторах полоса заграждения увеличивается с ростом скачка ширины полоски, так как при этом частота первой моды колебаний МПР  $f_1$  падает, а второй  $f_2$  растет. В результате центральная частота второй (паразитной) полосы пропускания может более чем в 4 раза превышать частоту первой (рабочей).



Рис. 1

Однако фильтры на нерегулярных резонаторах со ступенчатым изменением ширины полоскового проводника не могут работать при больших уровнях СВЧ-мощности, так как в них существенно меньше зазоры между полосками МПР [5]. При этом, как известно, пробой фильтров с нарастанием уровня падающей мощности наблюдается на "остриях" полосковых проводников, где напряженность электрического поля существенно выше. Очевидно, использование нерегулярных резонаторов со скругленными углами увеличит устойчивость устройств к повышенным уровням мощности. Кроме того, собственная добротность резонаторов с плавным изменением ширины проводников должна быть выше вследствие уменьшения излучения.

Следует также заметить, что рисунки проводников со скругленными углами представляют огромный интерес для устройств на высокотемпературных сверхпроводящих (ВТСП) материалах, интенсивное внедрение которых в микрополосковую технику наблюдается в последние годы. В таких устройствах эксцессы высокочастотных полей, связанные с "острыми" углами и изломами полосковых проводников, являются одним из главных факторов, ограничивающих уровень управляемой СВЧ-мощности [6], так как сопротивление пленок из ВТСП материалов растет с увеличением напряженности высокочастотных полей, приводя к соответствующему уменьшению добротности микрополосковых линий.

**Цель работы** — теоретическое и экспериментальное исследование спектров собственных колебаний и собственных добротностей микрополосковых резонаторов с плавным изменением ширины полоскового проводника в форме “гладкой гантели”, а также конструкций многосвязных полосковых фильтров на основе таких МПР. Для получения эффективного метода расчета исследуемых резонаторов и фильтров на их основе рассмотрим одномерные модели нерегулярных МПР, позволяющие проводить анализ устройств в квазистатическом приближении.

**Модели и методика расчета.** Для определенности рассмотрим резонаторы, полосковый проводник которых ограничен сопряженными дугами окружностей двух радиусов  $R$  и  $r$  (рис. 2). Дуги меньшего радиуса сопряжены с прямоугольным перешейком, имеющим полудлину  $l$  и ширину  $w$ . Полную длину “гантели”  $l_r$  несложно вычислить через приведенные обозначения.

Собственные частоты резонаторов определялись численным расчетом одномерных моделей, представляющих собой последовательное соединение отрезков регулярных микрополосковых линий, каждый из которых имеет определенную ширину полоскового проводника. Модели образуются разбиением рассматриваемого нерегулярного резонатора по всей длине на  $2N$  отрезков. При этом ширина полоскового проводника каждого отрезка в модели вычисляется усреднением ширины полоски на соответствующем участке исходного нерегулярного резонатора. Волновое сопротивление и электрическая длина отрезков регулярных микрополосковых линий вычислялись в квазистатическом приближении [7]. Частотная дисперсия параметров линий учитывалась в рамках приближенной аналитической модели [8]. В расчете учитывались также и концевые емкости, причем не только от торцов крайних отрезков регулярных линий [9], но и от всех “ступенек” на стыках соединения отрезков линий различной ширины.

Очевидно, что точность расчета при таком подходе увеличивается с ростом  $N$ , однако при этом пропорционально растет и время счета. Поэтому в модели важно определить минимальное число разбиений резонатора, обеспечивающее требуемую точность. На рис. 3 показаны зависимости относительной погрешности расчета резонансной частоты первой моды колебаний  $\delta = (\Delta f / f_1) 100\%$  от числа  $N$ , построенные для двух способов

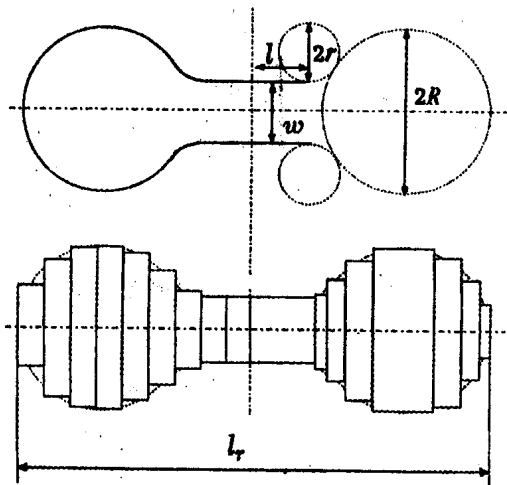


Рис. 2

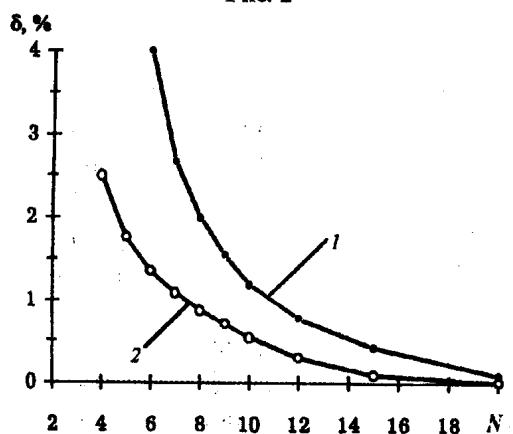


Рис. 3

разбиения полоски МПР. Кривая 1 соответствует разбиению, при котором длины всех отрезков регулярных микрополосковых линий одинаковы, а кривая 2 — разбиению, при котором длина каждого отрезка определяется зафиксированным изменением ширины полоски на соответствующем участке исходного резонатора. Каждая точка на графиках получена усреднением погрешности расчета для различных соотношений радиусов  $R$  и  $r$  в МПР, ширины перешейка  $w$  и его полудлины  $l$  (см. рис. 2). Видно, что первый способ разбиения обеспечивает точность расчета не хуже 1 % при  $N > 12$ , а второй способ — при  $N > 8$ . Однако при  $N > 20$  относительная точность расчета уже не хуже 0,1 % и практически не зависит от способа разбиения. Учитывая, что “эквидистантный” способ разбиения МПР более удобен при решении задач на связанных нерегулярных резонаторах типа “гладкая гантель”, в дальнейшем будем использовать только этот способ, принимая  $N = 15$ .

Корректность выбранной модели и метода расчета подтверждает эксперимент, проведенный на серии образцов нерегулярных резонаторов с плавным изменением ширины полоски. Резонаторы были изготовлены методом фотолитографии на металлизированных медью отполированных с двух сторон подложках толщиной  $h = 1$  мм. Слой меди толщиной 16 мкм осаждался вакуумным напылением на адгезионный подслой хрома толщиной 0,02 мкм. В качестве материалов подложек были выбраны керамика Т-150 с высокой диэлектрической проницаемостью  $\epsilon = 160$  и поликор с  $\epsilon = 9,8$ , традиционно используемый в СВЧ-технике для изготовления микрополосковых устройств.

Результаты, полученные при расчете и измерениях двух первых резонансных частот нескольких образцов МПР, приведены в табл. 1. Исследуемые образцы имели одинаковую длину полоскового проводника  $l_r = 18,5$  мм, одинаковый радиус внешних окружностей  $R = 3,5$  мм, но различную ширину узкого внутреннего участка полоски  $w$ , которая изменялась за счет уменьшения радиусов внутренних окружностей  $r$ . Длина регулярного внутреннего участка у всех образцов была равна нулю ( $l = 0$ ). Заметим, что форма полоски первого образца ( $w = 7$  мм) представляет собой отрезок регулярной линии, ограниченный с торцов дугами окружностей.

Таблица 1

Ширина образца $w$ , мм	Материал образца									
	керамика Т-150					поликор				
	Частота, МГц				$Q_0$	Частота, МГц				$Q_0$
	Эксперимент		Расчет			Эксперимент		Расчет		
	$f_1$	$f_2$	$f_1$	$f_2$		$f_1$	$f_2$	$f_1$	$f_2$	
7,0	725	1400	723	1433		315	2771	5376	2782	
4,0	650	1457	649	1486	295	2487	5595	2489	5737	226
3,0	621	1502	618	1526	282	2361	5734	2372	5899	265
2,0	575	1550	578	1574	240	2211	5938	2220	6089	297
1,0	527	1631	531	1643	210	2003	6216	2039	6356	333
0,5	492	1669	493	1672	190	1870	6379	1885	6471	267

Кроме резонансных частот в табл. 1 приведены значения собственных добротностей резонаторов  $Q_0$ , измеренные для первой моды колебаний. Видно, что в случае “регулярной” полоски добротность существенно выше у резонатора на подложке из керамики Т-150, несмотря на больший тангенс угла диэлектрических потерь материала и более низкую частоту резонанса по сравнению с МПР на подложке из поликора. Это, очевидно, объясняется значительно меньшими потерями на излучение у резонаторов на подложках с высокой диэлектрической проницаемостью. С уменьшением ширины перешейка “гантели” у резонаторов на подложках из керамики Т-150 добротность монотонно падает вследствие возрастания “омических” потерь, обусловленных увеличением плотности тока в узкой части полоски. У регулярного МПР на подложке из поликора потери на излучение велики, но с уменьшением  $w$  они быстро падают вследствие понижения резонансной частоты  $f_1$ . При этом на начальном этапе уменьшение потерь на излучение столь велико, что оно способно не только полностью скомпенсировать рост “омических” потерь, но даже уменьшить потери в целом [4]. В результате собственная добротность резонаторов сначала растет, достигая максимума при  $w \approx 1$  мм, а затем вновь падает.

Из таблицы видно достаточно хорошее совпадение данных эксперимента и расчета для первых двух резонансных частот МПР, которое сохраняется и в случае протяженного внутреннего регулярного участка полоски, т. е. при  $l \neq 0$  [5]. Это позволяет теоретически исследовать закономерности поведения первых собственных частот предлагаемого резонатора при изменении его конфигурации.

**Резонансные частоты МПР.** Для рассматриваемого микрополоскового резонатора на рис. 4 показано поведение собственных частот первой и второй моды колебаний в зависимости от ширины центрального участка полоски, нормированной на диаметр внешних окружностей. При этом в модели подложка с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon = 160$  имела толщину  $h = 1$  мм, а длина полоски МПР  $l_r = 30$  мм при радиусе внешних окружностей  $R = 5,5$  мм. Для удобства сравнения зависимости на рис. 4 нормированы на первую резонансную частоту регулярного МПР  $f_{01} = 445$  МГц. Такое поведение частот связано с тем, что у резонатора в центре располагается пучность высокочастотного тока для первой моды колебаний и пучность высокочастотного напряжения для второй. Поэтому сужение полоски в средней части МПР приводит к уменьшению первой резонансной частоты и к увеличению второй в соответствии с увеличением погонной индуктивности и уменьшением погонной емкости этого участка.

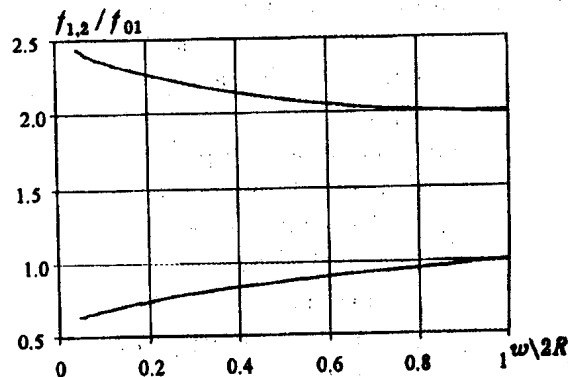


Рис. 4

Таким образом, благодаря форме полоскового проводника в виде “гладкой гантели” резонансная частота второй (паразитной) моды колебаний удаляется больше чем на октаву относительно первой (рабочей), а также обеспечиваются существенно меньшие габариты резонатора по сравнению с регулярным МПР. С уменьшением ширины среднего участка “гантели” оба эффекта монотонно растут, однако при этом возможно значительное уменьшение собственной добротности резонатора (см. табл.1). Поэтому важно определить оптимальные соотношения конфигурации “гладкой гантели” для получения наибольшего эффекта при заданном значении  $w$ .

На рис. 5 представлена зависимость отношения резонансных частот второй и первой мод колебаний от диаметра внешних окружностей при фиксированной длине проводника  $l_r = 22$  мм. В расчетной модели была также зафиксирована ширина среднего участка полоски  $w = 1$  мм и его длина  $l = 0$ . Изменение радиуса  $R$  внешних окружностей “гантели” сопровождалось соответствующим изменением радиуса  $r$  внутренних сопрягающих окружностей. На вставке рис. 5 показана исходная регулярная форма полоски с минимально возможным радиусом  $R_{\min} = w/2$  при  $r = \infty$  и максимально возможным радиусом  $R_{\max} = l_r/4$  при  $r = 0$ .

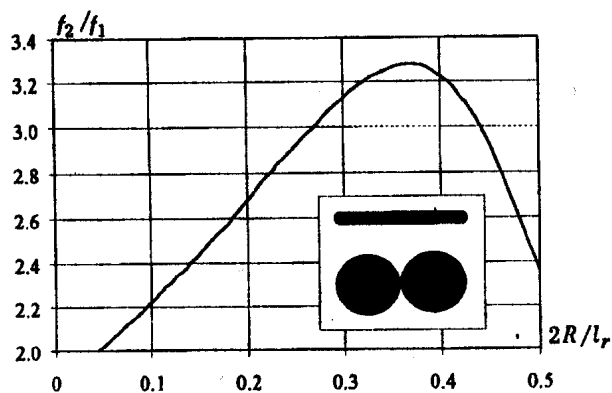


Рис. 5

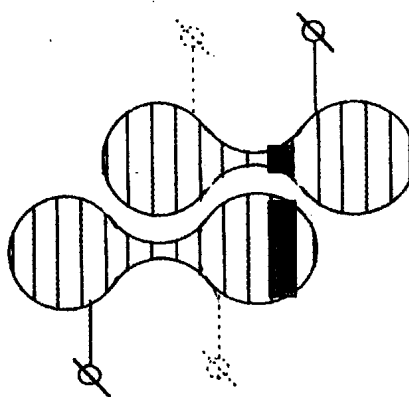


Рис. 6

Видно, что при  $2R/l_r \approx 1/3$  имеет место максимальное расхождение резонансных частот  $f_1$  и  $f_2$ , а как показывает расчет, это соотношение слабо зависит от длины полоскового проводника. Более того, именно при таком соотношении

наблюдается максимальное понижение частоты первого резонанса МПР, поэтому его можно считать оптимальным. Подробно исследования зависимости собственных частот от конструктивных параметров резонатора “гладкая гантель” приведены в [5].

**Фильтры на МПР “гладкая гантель”.** Предложенный подход к вычислению собственных частот микрополосковых резонаторов с плавным изменением ширины полоскового проводника вполне может использоваться и для расчета характеристик многозвенных фильтров на таких резонаторах. Была осуществлена проверка точности такого расчета на простейшем фильтре из двух одинаковых связанных резонаторов, кондуктивно подключенных к линиям передачи либо по большой, либо по малой диагонали (рис. 6).

Модель представлялась в виде последовательного соединения  $N$  равных по длине отрезков одиночных или связанных микрополосковых линий. Полосковые проводники на участках связанных линий так же, как и на участках одиночных, аппроксимируются регулярными отрезками, имеющими усредненную ширину полоски, причем свою для каждого резонатора, и соответствующий усредненный зазор между полосками. Для наглядности на рис. 6 на одном из участков модели регулярные отрезки связанных линий заштрихованы. Параметры связанных и одиночных линий, необходимые для расчета, вычислялись для каждого участка также в квазистатическом приближении [7] с учетом частотной дисперсии [8]. В расчетной модели учитывались концевые емкости как от торцов крайних отрезков регулярных линий [9], так и от всех “ступенек” на стыках соединения отрезков полосковых проводников различной ширины.

На рис. 7 сплошной линией показана амплитудно-частотная характеристика, рассчитанная для двухзвенного фильтра на подложке из керамики Т-150 ( $\epsilon = 155$ ), кондуктивно подключенного к линиям передачи по большой диагонали. Фильтр имел следующие конструктивные параметры: толщину подложки  $h = 1$  мм, длину полоскового проводника  $l_r = 10,46$  мм, радиус внешних окружностей “гантели”  $R = 1,99$  мм, ширину центрального участка  $w = 0,49$  мм при нулевой его длине. “Гантели” смещены одна относительно другой так, что центр внешней окружности одного резонатора находится строго напротив середины другого, при этом

зазор между полосками резонаторов именно в этой области конструкции  $S = 1,52$  мм. Внешние линии передачи с волновым сопротивлением 50 Ом подключены к полоскам резонаторов проводниками-перемычками круглого сечения диаметром 0,12 мм и длиной 4 мм. Точки подключения перемычек подбирались так, чтобы минимум обратных потерь в полосе пропускания фильтра был на уровне 14 дБ, что соответствует максимуму КСВН в полосе пропускания на уровне 1,5. При расчете модель фильтра разбивалась на 22 отрезка, причем участок связанных линий разбивался на 12 частей, а участки с одиночными линиями — на 5 частей каждый.

Для сравнения теоретических и экспериментальных данных на рис. 7 (кривой и кружками) показаны результаты измерений на образце фильтра, изготовленного в полном соответствии с параметрами расчетной модели. Видно довольно хорошее согласие между представленными кривыми.

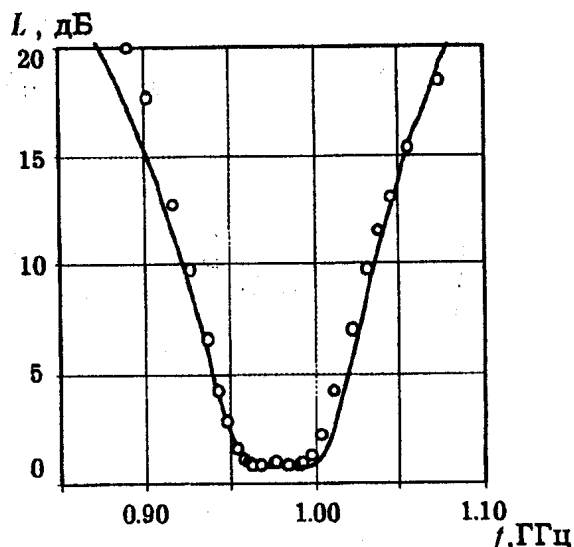


Рис. 7

На рис. 8 показаны амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) рассматриваемого двухзвенного фильтра, рассчитанные и измеренные в широкой полосе частот, превышающей более чем в 4 раза центральную частоту полосы пропускания, сплошной линией — расчет, штриховой — эксперимент. Рис. 8,а соответствует подключению по большой диагонали, рис. 8,б — по малой. Приведенные результаты исследований позволяют оценить качество квазистатического расчета в полосах заграждения устройства. Как и следовало ожидать, область заграждения фильтра справа от основной полосы пропускания имеет ширину значительно больше октавы вследствие смещения второй (паразитной) полосы пропускания в область высоких частот. Следует отметить, что на частотах существенно ниже полосы пропускания у фильтра, подключенного по большой диагонали, экспериментально наблюдаемое затухание меньше расчетного, а у фильтра, подключенного по малой диагонали, — наоборот. Очевидно, в этой области частот сильнее проявляется противоречие между идеальной одномерной моделью, используемой в расчете, и реально существующей двумерной картиной распределения высокочастотных токов и напряжений в исследуемой микрополосковой структуре, особенно сильно это противоречие проявляется вблизи точек подключения линий передачи.

Значительное различие теории и эксперимента на участке АЧХ в области второй полосы пропускания (см. рис. 8) также является следствием упрощенности модели микрополоскового фильтра, используемой в расчете. В частности, расчет показывает, что в формировании этой паразитной полосы участвуют резонансы четных и нечетных волн второй и третьей мод колебаний в МПР. Собственные частоты этих мод колебаний из-за нерегулярной формы полоскового проводника сближаются так же, как и в МПР со ступенчатым изменением ширины полоски в виде “гантели” (см. рис. 1) [2, 4]. Однако эксперимент показывает, что в области второй полосы пропускания, кроме названных четырех резонансов, наблюдается еще четыре дополнительных пика, связанных, по-видимому, с резонансами электромагнитных колебаний на ограниченных окружностях участках с низким электрическим сопротивлением полоскового проводника МПР. Высокочастотные электрические поля этих резонансов имеют узлы почти в центрах окружностей и

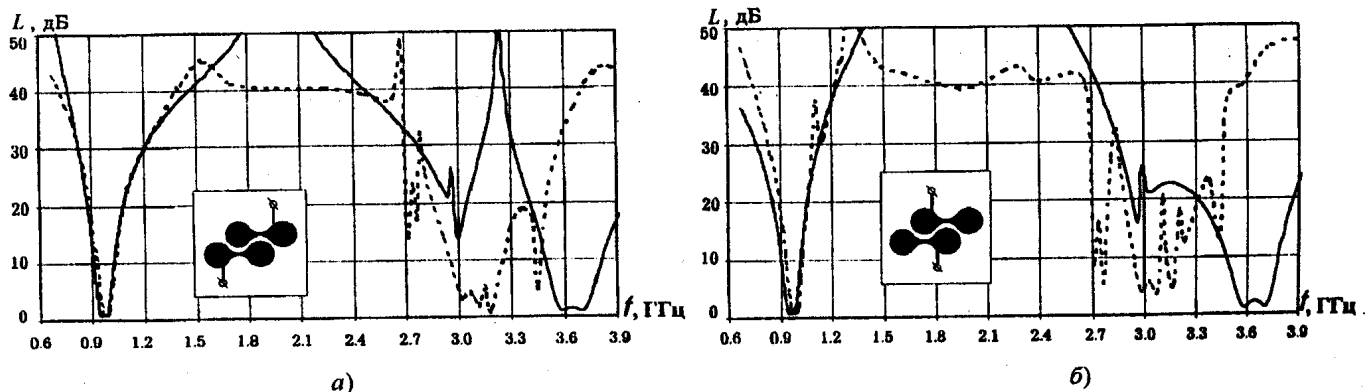


Рис. 8

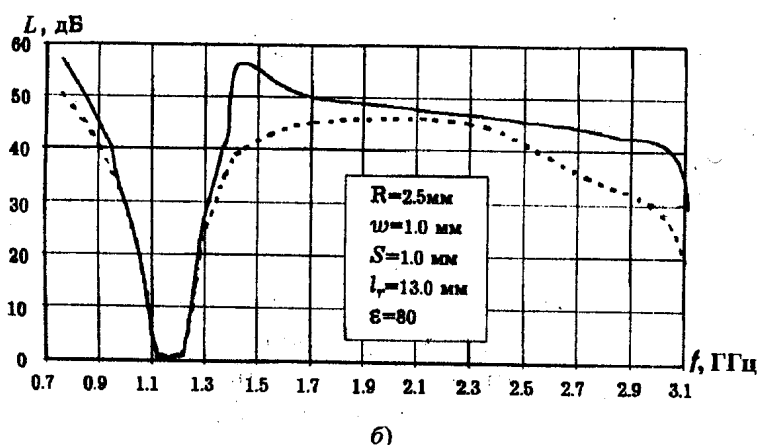
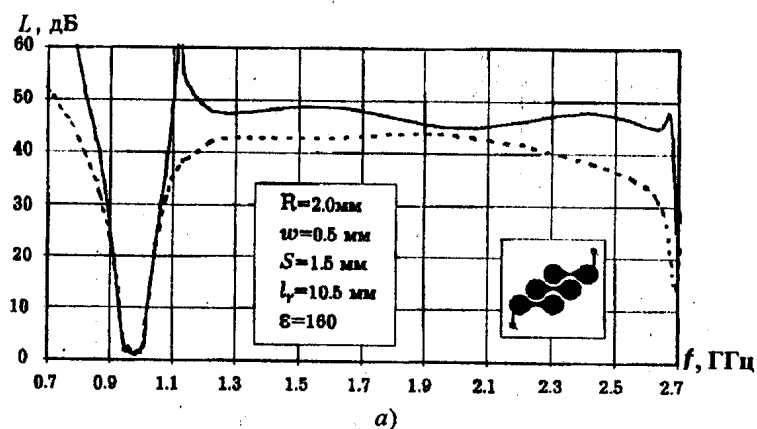


Рис. 9

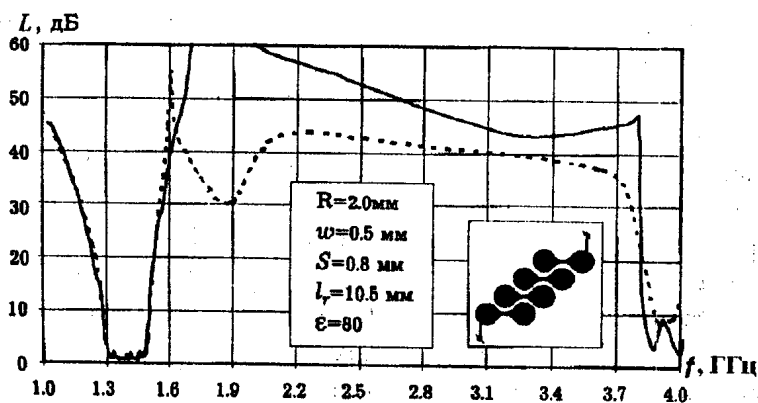


Рис. 10

не могут быть описаны в рамках одномерной модели.

Для оценки селективных свойств многозвенных микрополосковых фильтров на МПР типа "гладкая гантель" были изготовлены и исследованы несколько образцов конструкций из трех и четырех связанных резонаторов. На рис. 9,а представлены АЧХ трехзвенного фильтра на подложке из керамики Т-150 толщиной 1 мм и размерами 15×24 мм, а на рис. 9,б представлены АЧХ также трехзвенного фильтра, но на подложке из ТБНС толщиной 1 мм. Остальные конструктивные параметры приведены на вставках рисунков. Сплошные линии соответствуют подключению по большой диагонали, штриховые — по малой. Отметим, что относительные полосы пропускания фильтров отличаются приблизительно в 1,5 раза и хорошо коррелируют со значением зазоров между МПР.

Из рисунков видно, что фильтры, подключенные по большой диагонали, имеют не только более высокую прямоугольность характеристики, но и сильнее подавляют падающую мощность в полосах заграждения. Следует также отметить, что средний уровень заграждения между рабочей и паразитной полосами пропускания, как показал эксперимент, слабо зависит от размеров зазоров между резонаторами.

На рис. 10 представлены АЧХ фильтра, изготовленного на подложке ТБНС размерами 22×15×1 мм, состоящего из четырех связанных резонаторов. Конструктивные параметры устройства приведены на вставке рисунка. Видно, что при подключении четырехзвенного фильтра к линиям передачи по малой диагонали, крутизна высокочастотного склона несколько выше вследствие близости полюса затухания. При этом, как и в случае

трехзвенных фильтров, значительно ухудшается уровень заграждения устройства в высокочастотной области.

Количественно селективные свойства фильтров удобно сравнивать, вычисляя крутизну каждого склона их АЧХ: низкочастотного  $K_l$  и высокочастотного  $K_h$ , а также "усредненную" крутизну обоих склонов их характеристик  $K_s$  по формулам [10]

$$K_l = \frac{f_0 - f_3^l}{f_3^l - f_{30}^l}; \quad K_h = \frac{f_3^h - f_0}{f_{30}^h - f_3^h}; \quad K_s = \frac{f_3^h - f_3^l}{(f_{30}^h - f_{30}^l) - (f_3^h - f_3^l)}, \quad (1)$$

где  $f_3^h$  и  $f_3^l$  — частоты справа и слева от центральной частоты полосы пропускания  $f_0$ , измеренные по уровню 3 дБ от уровня минимальных потерь в полосе пропускания  $L_0$ ;  $f_{30}^h$  и  $f_{30}^l$  — аналогичные частоты, измеренные по уровню 30 дБ.

Для анализа и оценки качества исследованных устройств основные характеристики, полученные на различных образцах двух- трех- и четырехзвенных фильтров, представлены в табл. 2. Фильтры подключались к линиям передачи сопротивлением 50 Ом либо по большой (Б), либо по малой (М) диагонали. Габариты подложек всех образцов были приблизительно одинаковы и не превышали 24×15 мм.

Таблица 2

Число МПР	$\epsilon$ подложки	Способ подключе- ния	$L_0$ , дБ	$f_0$ , МГц	$\Delta f/f_0$ , %	Крутизна склонов АЧХ		
						$K_1$	$K_n$	$K_r$
2	160	Б	0,8	982	6,8	0,28	0,16	0,20
2	160	М	0,9	984	6,6	0,28	0,37	0,32
3	160	Б	1,0	977	7,3	0,66	0,70	0,68
3	160	М	1,1	979	7,2	0,44	0,56	0,49
3	160	Б	0,8	812	10,8	0,71	0,68	0,69
3	160	М	0,9	815	10,6	0,51	0,45	0,48
3	80	Б	0,5	1169	10,6	0,58	0,73	0,65
3	80	М	0,5	1172	10,4	0,57	0,56	0,56
4	160	Б	1,0	976	12,0	1,08	1,13	1,10
4	160	М	0,9	978	12,8	0,81	1,54	1,06
4	80	Б	0,6	1394	13,3	0,73	1,10	0,89
4	80	М	0,6	1398	14,0	0,84	1,60	1,15

**Закключение.** Таким образом, проведенные исследования показали перспективность применения микрополосковых резонаторов с плавным изменением ширины проводника в конструкциях СВЧ-фильтров. В частности, установлено, что резонаторы с формой полоскового проводника в виде “гладкой гантели” оказываются предпочтительнее по сравнению с регулярными МПР. Среди достоинств резонаторов следует отметить, во-первых, высокую степень миниатюрности при сравнительно большой собственной добротности, во-вторых, значительное удаление второго (паразитного) резонанса в спектре собственных колебаний и, в-третьих, эффективное использование площади подложки в конструкциях многозвенных фильтров.

Исследования позволили определить оптимальную форму полоскового проводника резонатора, при которой его длина  $l$ , приблизительно в 3 раза превышает диаметр наружных окружностей “гантели”  $2R$ . Именно такая форма “гладкой гантели” обеспечивает одновременно максимальное понижение частоты первой моды колебаний резонатора и максимальное повышение частоты второй. При этом эффект возрастает с увеличением различия между диаметром наружных окружностей “гантели” и шириной полосы в ее центре. Однако сильное сужение перешейка “гантели” не рекомендуется, так как в этом случае возрастают “омические” потери в проводниках и наблюдается заметное уменьшение собственной добротности первого резонанса МПР.

Одним из наиболее значимых результатов работы является хорошее совпадение данных предложенного расчета и эксперимента, по крайней мере, вполне достаточное для практических целей. Несмотря на довольно простую используемую при расчете модель, расчет пригоден для проектирования многозвенных фильтров на резонаторах типа “гладкая гантель”.

Следует отметить тот факт, что рисунки полосковых проводников у фильтров на резонаторах “гладкая гантель” не содержат острых углов и ступенек, на которых может значительно возрастет напряженность высокочастотных электрических полей. Поэтому, очевидно, исследованные фильтры более устойчивы к повышенным уровням СВЧ-мощности. Кроме того, формы проводников со скругленными углами представляют огромный интерес для микрополосковых устройств на ВТСИ, в которых эксцессы высокочастотных полей, связанные с “острыми” углами и изломами проводников, являются одним из главных факторов, ограничивающих уровень управляемой СВЧ-мощности.

## Литература

1. Chen, Y. Ho and Weldman, John H., Half-Wave length and Step Impedance Resonators Aid Microstrip Filter Design, Microwave System News, 1983, vol. 13, no. 10, pp. 88, 93, 95, 96, 101–103.
2. Беляев Б. А., Тюрнев В. В., Шихов Ю. Г. — Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника, 1997, вып. 2, с. 20–24.
3. Беляев Б. А., Лексиков А. А., Трусов Ю. Н., Тюрнев В. В., Шенов В. Н., Шихов Ю. Г. Миниатюризованные микрополосковые СВЧ-фильтры. — Препринт № 730Ф, Ин-т физики СО РАН, Красноярск, 1993.
4. Беляев Б. А., Тюрнев В. В., Васильев В. А., Разин Г. М. Исследование микрополосковых резонаторов и устройств СВЧ на их основе. Ч. II. — Препринт № 448Ф, Ин-т физики СО АН СССР, Красноярск, 1987.
5. Беляев Б. А., Лексиков А. А., Шихов Ю. Г. и др. Исследование микрополосковых резонаторов с плавным изменением ширины проводника. — Препринт № 784Ф, Ин-т физики СО РАН, Красноярск, 1998.
6. Newman, N. and Lyons, W. G., Journ. of Superconductivity, 1993, vol. 6, no. 3, pp. 119–160.
7. Тюрнев В. В. Квазистатическая теория связанных микрополосковых линий. — Препринт № 557Ф, Ин-т физики СО АН СССР, Красноярск, 1989.
8. Kirschning, M. and Jansen, R. H., Electronics Letters, 1982, vol. 1, no. 6, p. 272.
9. Гупта К., Гардж Р., Чадха Р. Машинное проектирование СВЧ-устройств. — М.: Радио и связь, 1987.
10. Беляев Б. А., Никитина М. И., Тюрнев В. В. — Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника, 1993, вып. 5–6, с. 11–15.

Поступила 30 ноября 1998 г.



**Беляев Борис Афанасьевич** (1950 г. р.) — докт. техн. наук, зав. лабораторией электродинамики и СВЧ-электроники Института физики СО РАН. Область научных интересов: распространение электромагнитных волн в микрополосковых структурах, СВЧ-устройства, исследование магнитных и диэлектрических материалов на высоких частотах.



**Лексиков Александр Александрович** (1951 г. р.) — канд. физ.-мат. наук, ст. научн. сотр. Института физики СО РАН. Область научных интересов: частотно-селективные микрополосковые устройства, СВЧ-датчики, высокочастотная диэлектрическая метрия, магнитооптика.



**Шихов Юрий Германович** (1962 г. р.) — научн. сотр. Института физики СО РАН. Область научных интересов: частотно-селективные микрополосковые устройства, СВЧ-датчики.



**Алексеева Наталья Викторовна** (1961 г. р.) — канд. физ.-мат. наук, научн. сотр. Института физики СО РАН. Область научных интересов: СВЧ-фильтры на нерегулярных микрополосковых резонаторах.



**Сергиенко Павел Николаевич** (1974 г. р.) — аспирант Института физики СО РАН. Область научных интересов: взаимодействие нерегулярных микрополосковых резонаторов, СВЧ-фильтры на их основе.