

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА СВЧ

УДК 537.8:621.372.822

ТОНКИЙ ПРОВОДНИК СО СТУПЕНЧАТЫМ ИЗЛОМОМ В ПОПЕРЕЧНОМ СЕЧЕНИИ ПРЯМОУГОЛЬНОГО ВОЛНОВОДА КАК ПРОСТОЙ ОТРАЖАТЕЛЬ

А. А. Кириленко, С. А. Приколотин

Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины
12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина
E-mail: prikolotin@ire.kharkov.ua

Рассматриваются простые конфигурации реализуемых на практике устройств, вызывающих узкополосный резонанс полного отражения при помещении в поперечное сечение прямоугольного волновода – тонкие проводники со ступенчатым изломом, соединяющие две противоположные стенки волновода. Они образуют специального вида двухапертурные диафрагмы, которые можно расположить, например, между фланцами волновода. Резонансное явление, которое они вызывают, основано на интерференционном взаимодействии полей собственных колебаний диафрагмы с двумя L -образными апертурами. Частота и добротность резонанса отражения в пределах широкого диапазона управляются положением и высотой ступенчатого излома. Представлены ситуации, когда идеальный проводник со ступенчатым изломом обеспечивает резонанс с практически нулевой шириной полосы запыриания. Такой нетривиальный волноводный 3D-объект, нагруженный на подводящие тракты, способен поддерживать собственные колебания без радиационных потерь. Приведены результаты численного моделирования и экспериментального исследования. Ил. 17. Библиогр.: 13 назв.

Ключевые слова: прямоугольный волновод, отражающая ячейка, проводник со ступенчатым изломом.

Несколько конфигураций диафрагм, которые могут быть отражающими элементами и при этом просты в изготовлении, представлены в работах [1–3]. Их объединяет тот факт, что в основе соответствующих резонансных явлений лежит общее свойство многоапертурной диафрагмы с резонансными апертурами обеспечивать чередующиеся резонансы полного прохождения и отражения в одномодовом диапазоне частот [4]. Собственные колебания отдельных апертур на комплексных частотах, общий спектр многоапертурной диафрагмы и их изменение вследствие электромагнитного взаимодействия между собой предложены в работе [4] в качестве основы для интерпретации амплитудно-частотной характеристики такого вида. Хорошо известный [5] низкодобротный резонанс полного прохождения через полуволновую щель или их пару сопровождается высокодобротным резонансом отражения при нарушении симметрии диафрагмы с изменением размеров одной из щелей или их взаимного расположения.

В данной работе предложена новая отражающая ячейка, основанная на тонком проводнике со ступенчатым изломом и, в принципе, на той же идее двухапертурной диафрагмы. Такой волноводный элемент является аналогом бесконечно тонкой двупериодической решетки из периодических криволинейных лент. Ранее было установлено, что такая решетка обеспечивает полное отражение падающей плоской волны в конце одноволнового диапазона частот [6]. В рассматриваемом случае факт существования резонанса не настолько очевиден и требует дополнительного рассмотрения. Если говорить о резонансных явлениях, вызванных

тонкими проводниками в волноводах, то природа резонансов здесь отличается от ситуаций, имеющих место в случае продольных полу- или четвертьволновых проводников [7], когда такой объект выполняет функцию вибратора.

Рассмотрим два типа конфигураций проводников со ступенчатыми изломами: горизонтальный проводник, соединяющий узкие стенки волновода (рис. 1), и вертикальный – соединяющий широкие стенки волновода (рис. 2). Эти проводники позволяют управлять частотой и шириной полосы резонанса отражения в довольно широком диапазоне. Как оказалось, преимущество вертикального проводника заключается в возможности обеспечивать резонанс отражения в любой точке рабочего диапазона частот прямоугольного волновода и в более четком разделении геометрических параметров, отвечающих за частоту и добротность резонанса. Горизонтальный проводник с изломом обладает более плавной зависимостью резонансных характеристик от геометрических параметров и обеспечивает добротный резонанс отражения только в верхней части рабочего диапазона.

Далее будут обсуждаться возможности управления частотой и шириной полосы резонанса отражения и влияние наиболее важных геометрических параметров на резонансные характеристики устройства. Представлено сравнение результатов численного моделирования с экспериментально полученными данными. Особое внимание уделено сверхдобротному резонансу, существование которого было установлено в процессе изучения влияния геометрии проводника на характеристики резонанса.

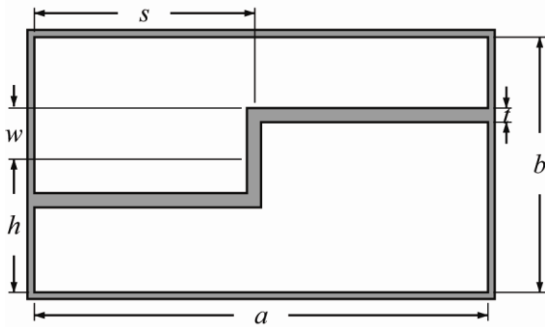


Рис. 1. Схематическое изображение горизонтального стержня с изломом, помещенного в прямоугольный волновод

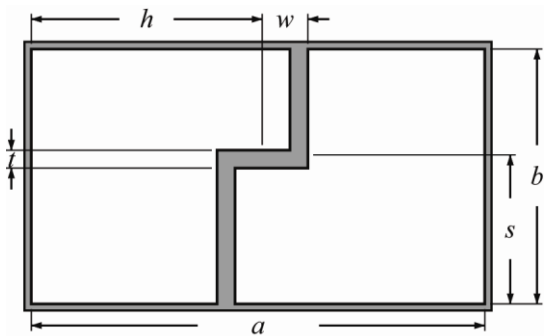


Рис. 2. Схематическое изображение вертикального стержня с изломом, помещенного в прямоугольный волновод

1. Геометрия проводников с изломом.

Предлагаемые волноводные элементы описываются следующими основными параметрами: s – расстояние между одной из соединяемых стенок и центральной линией ступенчатого излома, h – расстояние между свободной (нижней или левой) стенкой и центром ступеньки, w – половина высоты ступенчатого излома, l – продольная длина проводника (толщина диафрагмы), t – поперечная толщина проводника (рис. 1 и 2). Стенки волновода и проводник со ступенчатым изломом предполагаются идеально проводящими.

2. Метод анализа. Проводник в поперечном сечении прямоугольного волновода рассматривался как двухапертурная диафрагма конечной толщины. Численная модель основана на методе частичных областей (МЧО) с учетом особенности на ребре и на методе матриц рассеяния [8]. Каждая из апертур диафрагмы рассматривалась как секция L -образного волновода. Такой подход выбран вследствие высокой точности и устойчивости расчетов вблизи точек резонанса. Кроме того, реализованный численный алгоритм позволит в будущем изучить собственные колебания таких диафрагм.

В качестве единого параметра, управляющего точностью вычислений, использовался частотный параметр f_{cut} . Его значение ограничивает максимальные частоты отсечки мод, учиты-

ваемых во всех волноводных базисах. Это позволяет достичь равномерной аппроксимации электромагнитных полей во всех подобластях, что в определенной мере аналогично использованию правила Миттры [9].

Результаты исследования сходимости алгоритма при расчете величины коэффициента отражения и поиске резонансной частоты показаны на примере ступенчатого излома в волноводе $23 \times 10 \text{ мм}^2$ на рис. 3.

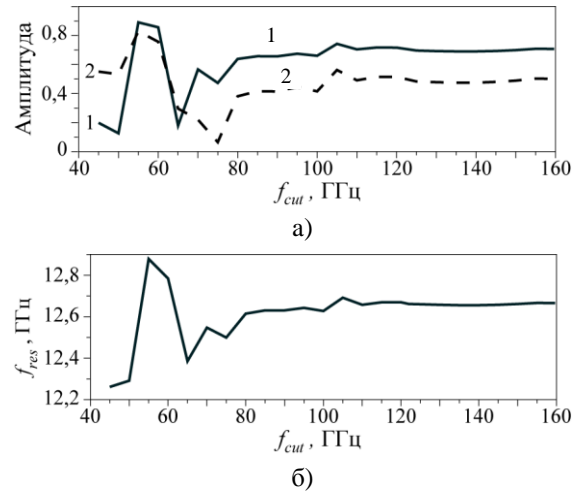


Рис. 3. Сходимость величины коэффициента отражения (а) и частоты резонанса (б) в зависимости от значения f_{cut} для горизонтального стержня со ступенчатым изломом при: $s = 11,5 \text{ мм}$, $w = 2 \text{ мм}$, $h = 5 \text{ мм}$, $t = 1 \text{ мм}$, $l = 0,5 \text{ мм}$: 1 – $f = 12,3 \text{ ГГц}$; 2 – $f = 12,5 \text{ ГГц}$

Прежде всего отметим «синхронность» поведения амплитудных ошибок и ошибки определения резонансной частоты. Эти величины слабо изменяются уже после $f_{cut} = 80 \text{ ГГц}$ и окончательно после $f_{cut} = 110 \text{ ГГц}$.

Для регулярных расчетов было выбрано значение параметра $f_{cut} = 120 \text{ ГГц}$, в этом случае ошибка определения резонансной частоты не превышает $0,01 \text{ ГГц}$. Такое значение f_{cut} соответствует базисам из 127 TE - и 101 TM -волн прямоугольного волновода и $\sim 90 TE$ - и 70 TM -волн L -образных волноводов в зависимости от их конкретной геометрии.

Каждая из апертур диафрагмы рассматривается как участок L -образного волновода (обозначим их L_1 и L_2). Для нахождения собственных мод L_1 разобьем его поперечное сечение, согласно МЧО, на две не пересекающиеся подобласти. Запишем решение двумерного уравнения Гельмгольца для магнитных (электрических) продольных компонент поля в этих подобластях с учетом граничных условий TE -, TM -волн в виде рядов с неопределенными коэффициентами по собственным функциям подобластей. Введем неизвестную функцию X , заданную на границе подобластей, которая описывает поведение про-

дольной магнитной (электрической) компоненты поля на границе подобластей. Затем разложим эту функцию в ряд по полной системе функций $\{f_n\}$, заданных на границе областей и имеющих нужную особенность, в соответствии с условием Мейкснера, вблизи сингулярной точки поперечного сечения, а также удовлетворяющих граничным условиям [10].

Очевидно, можно построить много полных систем функций, удовлетворяющих требуемым условиям на границе подобластей [10–12]. Преимущества и недостатки различных систем функций заслуживают отдельного рассмотрения. В данной работе после проведения сравнительного анализа использовались косинусы и синусы с весом.

Применяя граничные условия, сошьем продольные магнитные (электрические) компоненты поля на границе раздела подобластей с функцией X и спроектируем полученное равенство на систему базисных функций $\{f_n\}$. В результате получим выражения коэффициентов разложения полей в подобластях в ряды Фурье через неизвестные коэффициенты разложения функции X по базисным функциям $\{f_n\}$. Теперь, записывая условие непрерывности электрической (магнитной) компоненты поля на стыке подобластей и применяя метод Галеркина, придем к однородной системе линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных коэффициентов разложения функции X по базису $\{f_n\}$, разрешив которую, найдем модовый базис волновода L_1 .

Аналогичным способом найдем собственные моды волновода L_2 .

Далее следует решить задачу дифракции падающей на диафрагму $TE_{1,0}$ -волны. Сначала нужно найти матрицу рассеяния раздвоения прямоугольного волновода на два L -образных волновода. При решении этой проблемы используется классический МЧО, так как для применения подхода, учитывающего особенности полей на ребрах, к векторным задачам надо построить систему базисных функций $\{f_n\}$, область определения которых будет уже не отрезок, а участок плоскости, ограниченный L -образным многоугольником.

Для нахождения S -матрицы плоского соединения прямоугольного волновода с L_1 и L_2 необходимо вычислить набор интегралов связи M_{pq} , где p и q – номера мод. Поскольку собственные моды поля в L_1 , L_2 представлены в виде кусочно-заданных функций на каждой из подобластей, то интегралы связи будут иметь вид

$$M_{pq} = \int_{S_1} \vec{e}_R^{(p)} \cdot \vec{e}_{L_1}^{(q)} dS + \int_{S_2} \vec{e}_R^{(p)} \cdot \vec{e}_{L_1}^{(q)} dS,$$

где $\vec{e}_R^{(p)}$ – собственная функция моды p прямоугольного волновода; $\vec{e}_{L_1}^{(q)}$ – собственная функция

моды q волновода L_1 . Аналогичным образом вычисляется набор интегралов связи прямоугольного волновода с L_2 .

Другое преимущество использованной модели, кроме описанных выше, становится очевидным, когда плоскостное соединение двух L -образных волноводов с прямоугольным волноводом рассматривается как ключевой элемент. Представляя его матрицу рассеяния в виде

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} \mathbf{S}^{00} & \mathbf{S}^{0L} \\ \mathbf{S}^{L0} & \mathbf{S}^{LL} \end{pmatrix},$$

получим следующее выражение для векторов амплитуд мод, прошедших за диафрагму:

$$\vec{b} = \mathbf{S}^{0L} \mathbf{E}^L \mathbf{S}^{LL} \mathbf{I} - \mathbf{S}^{LL} \mathbf{E}^L \mathbf{S}^{LL} \mathbf{E}^{L-1} \mathbf{S}^{L0} \vec{i}.$$

Здесь под индексами L и 0 обозначены соответственно пара L -образных волноводов диафрагмы (L_1 и L_2) и прямоугольный волновод; \mathbf{E}^L – это диагональная матрица, учитывающая фазовые набеги или затухание мод в волноводах диафрагмы; \mathbf{I} – единичная матрица, а \vec{i} – вектор падающих мод.

В нашем случае матричный оператор $\mathbf{I} - \mathbf{S}^{LL} \mathbf{E}^L \mathbf{S}^{LL} \mathbf{E}^L$, описывающий взаимодействие двух «сторон» диафрагмы и определяющий особенности амплитудно-частотной характеристики в задачах рассеяния, имеет более сложную структуру, чем в случае одноапертурной диафрагмы вследствие блочного характера матрицы отражения:

$$\mathbf{S}^{LL} = \begin{pmatrix} \mathbf{S}^{11} & \mathbf{S}^{12} \\ \mathbf{S}^{21} & \mathbf{S}^{22} \end{pmatrix}.$$

Наличие ненулевых внедиагональных элементов, описывающих взаимодействие двух отдельных L -образных апертур, радикально меняет спектр собственных чисел оператора. В терминах теории синтеза фильтров [13] можно предполагать наличие некоторого типа «*by-pass*» взаимодействия (когда между входным и выходным волноводами существует два канала электромагнитного взаимодействия). Такая ситуация обычно вызывает возникновение так называемого «синглета» на амплитудно-частотной характеристике или, другими словами, пары резонансов: «полного отражения» и «полного прохождения».

3. Результаты численного моделирования. Очевидно, что прямой тонкий горизонтальный проводник не возмущает электрическое поле основной моды прямоугольного волновода и чем меньше поперечное сечение проводника, тем ближе коэффициент прохождения к единице. Тем не менее, даже небольшой излом проводника вызывает высокочастотный резонанс полного отражения непосредственно перед частотой возникновения распространяющейся высшей моды TE_{20} .

С увеличением высоты ступенчатого излома проводника частота и добротность резонанса снижаются (под добротностью резонанса будем понимать величину, описанную выражением $Q = 100/\Delta f$ (%), где Δf (%) есть полоса резонанса по уровню 3 дБ, отнесенная к частоте полного отражения). Частный случай амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) для горизонтального проводника со ступенчатым изломом и поперечным сечением $0,3 \times 0,5 \text{ мм}^2$, помещенного в прямоугольный волновод $23 \times 10 \text{ мм}^2$, представлен на рис. 4, распределение электрического поля в точке резонанса $f = 10,755 \text{ ГГц}$ – на вставке рис. 4.

Более подробно изучить распределение полей можно, обратившись к рис. 5, на котором представлена АЧХ горизонтального проводника со ступенчатым изломом и поля в момент резонанса отражения и двух резонансов прохождения. Видно, что в момент первого резонанса прохождения поля в двух аперттурах синфазны и, в целом, соответствуют полю TE_{10} -волны. В то время как в момент второго резонанса прохождения и резонанса полного отражения поля не только противофазны в двух аперттурах, но и внутри каж-

дой аперттуры наблюдается поле, которое напоминает поле несимметричной TE_{20} -волны. Такой вид полей наиболее ярко выражен при небольшой высоте ступеньки, однако, как видно из рис. 4, даже при большой ступеньке характер полей сохраняется.

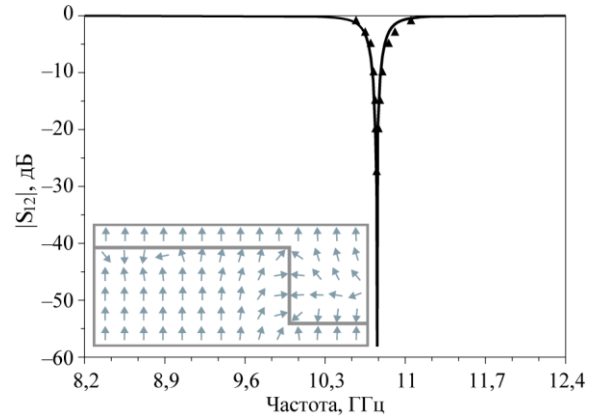


Рис. 4. АЧХ горизонтального стержня со ступенчатым изломом в волноводе $23 \times 10 \text{ мм}^2$ при $s = 16,45 \text{ мм}$, $w = 3,35 \text{ мм}$, $h = 5 \text{ мм}$, $t = 0,3 \text{ мм}$, $l = 0,5 \text{ мм}$: — — — расчетные данные; ▲ — экспериментальные данные

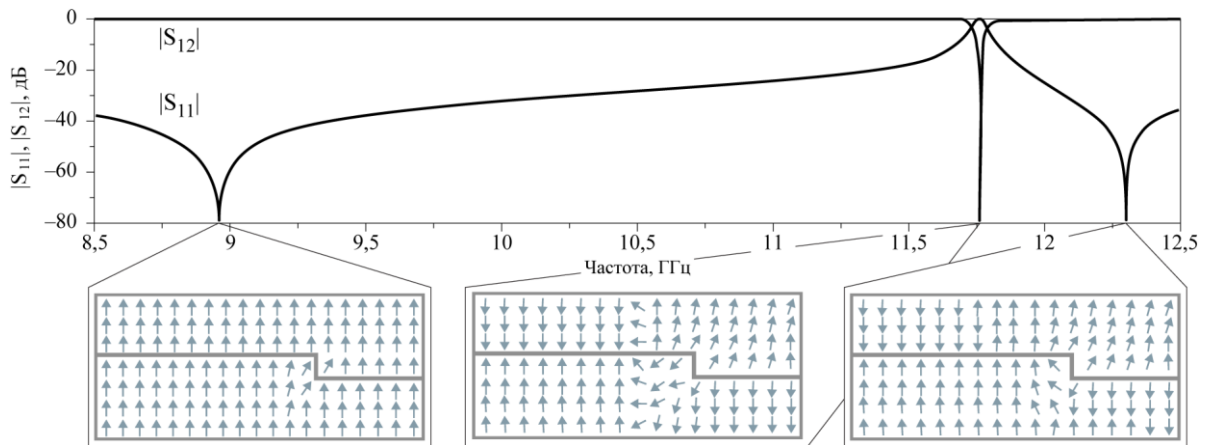


Рис. 5. АЧХ горизонтального стержня со ступенчатым изломом при $s = 15,5 \text{ мм}$, $w = 1 \text{ мм}$, $h = 5 \text{ мм}$, $t = 0,3 \text{ мм}$, $l = 0,5 \text{ мм}$

Наблюдаемая антисимметрия электрических полей в аперттурах в точке резонанса является характерной чертой двухапертурных структур. Таким образом, исследовав поля в точках полного прохождения, можно сделать вывод, что главной причиной резонансного явления являются антисимметричные собственные колебания апертур, подобно тому, как это описано в работе [1].

Численные эксперименты проводились для проводника с поперечным сечением $0,25 \times 1 \text{ мм}^2$ в прямоугольном волноводе $23 \times 10 \text{ мм}^2$ и были направлены на установление основных факторов, влияющих на частоту и добротность резонанса. Как оказалось, высота ступенчатого излома w и его положение вдоль широкой стенки s волновода являются главными параметрами, отвечающими за частоту и добротность резонанса, в то время как остальные параметры оказывают на резонансные характеристики объекта значительно меньшее влияние. Поэтому зависимости частоты резонанса $f_{рез}$ и ширины полосы запираения Δf (%) от высоты ступеньки (рис. 6) и ее положения (рис. 7 и 8), полученные для симметричного расположения проводника в поперечном сечении волновода, являются основными. В целом увеличение высоты ступеньки приводит к монотонному снижению частоты резонанса полного отражения и монотонному сниже-

пенчатого излома w и его положение вдоль широкой стенки s волновода являются главными параметрами, отвечающими за частоту и добротность резонанса, в то время как остальные параметры оказывают на резонансные характеристики объекта значительно меньшее влияние. Поэтому зависимости частоты резонанса $f_{рез}$ и ширины полосы запираения Δf (%) от высоты ступеньки (рис. 6) и ее положения (рис. 7 и 8), полученные для симметричного расположения проводника в поперечном сечении волновода, являются основными. В целом увеличение высоты ступеньки приводит к монотонному снижению частоты резонанса полного отражения и монотонному сниже-

нию его добротности. Как видно из рис. 6, частоту резонанса удается понизить почти до нижней границы рабочего диапазона частот волновода $23 \times 10 \text{ мм}^2$, изменяя высоту ступеньки.

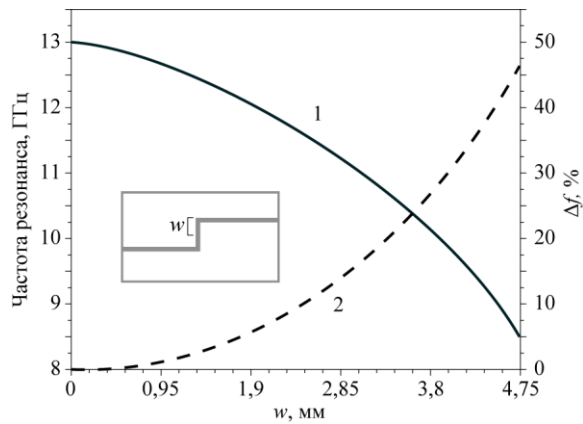


Рис. 6. Зависимость ширины полосы и частоты резонанса от высоты ступеньки w при значениях параметров $s = 11,5 \text{ мм}$, $h = 5 \text{ мм}$, $t = 0,25 \text{ мм}$, $l = 1 \text{ мм}$: 1 – частота; 2 – Δf

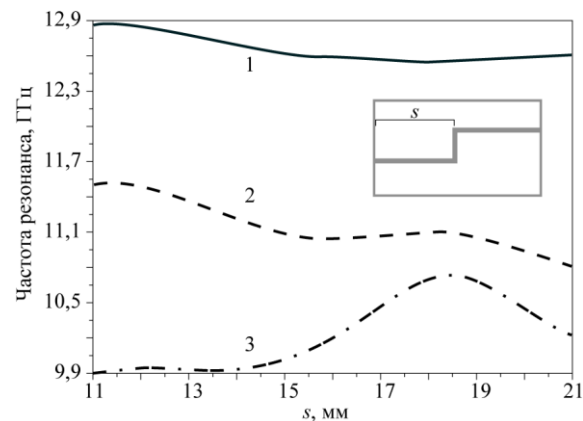


Рис. 7. Зависимость частоты резонанса от положения ступеньки вдоль широкой стенки волновода s при различных значениях w , для $h = 5 \text{ мм}$, $t = 0,25 \text{ мм}$, $l = 1 \text{ мм}$: 1 – $w = 1 \text{ мм}$; 2 – $w = 3 \text{ мм}$; 3 – $w = 4,25 \text{ мм}$

В то же время толщина диафрагмы l не оказывает значительного влияния на дифракционные характеристики устройства. Как видно из рис. 9, частота и ширина полосы резонанса, безусловно, зависят от толщины проводника в продольном направлении, однако причина резонансного явления кроется именно в наличии двух каналов связи входного и выходного волноводов. Анализируя влияние толщины диафрагмы на резонансные характеристики, отметим, что с увеличением l частота и ширина полосы резонанса несколько возрастают.

Зависимости частоты резонанса и ширины полосы заграждения от положения ступеньки имеют немонотонный характер (рис. 7 и 8), и чем больше высота ступеньки, тем шире диапазон изменения резонансных параметров при смещении излома. При изменении положения ступенча-

того излома вдоль горизонтальной оси для различной высоты ступеньки частота резонанса может как повышаться, так и понижаться. Такое смещение также существенно влияет на ширину полосы резонанса. Наиболее низкая добротность резонанса наблюдается при симметричном положении ступеньки (рис. 8), и при дальнейшем смещении ступеньки к узкой стенке волновода ширина полосы резонанса резко сужается.

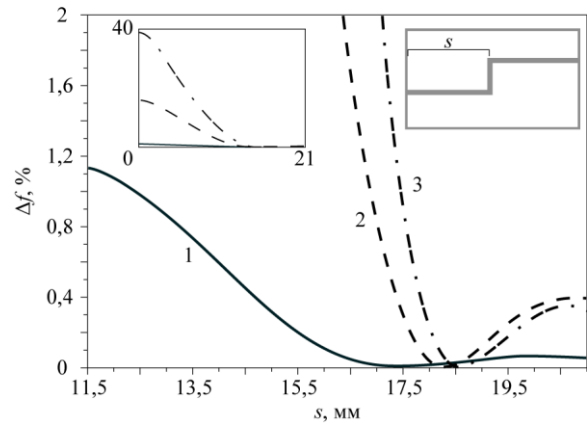


Рис. 8. Зависимость ширины полосы резонанса от положения ступеньки вдоль широкой стенки волновода s при различных значениях w , для $h = 5 \text{ мм}$, $t = 0,25 \text{ мм}$, $l = 1 \text{ мм}$: 1 – $w = 1 \text{ мм}$; 2 – $w = 3 \text{ мм}$; 3 – $w = 4,25 \text{ мм}$

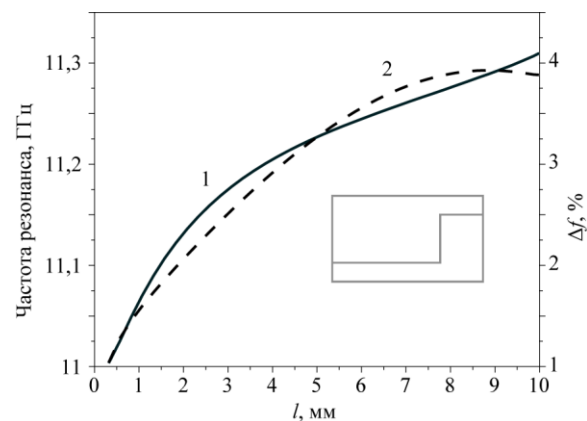


Рис. 9. Зависимость ширины полосы и частоты резонанса от толщины диафрагмы l при значениях параметров $s = 16,5 \text{ мм}$, $h = 5 \text{ мм}$, $t = 0,25 \text{ мм}$, $w = 3 \text{ мм}$: 1 – частота; 2 – Δf

В процессе расчетов были найдены геометрии, обеспечивающие очень высокую добротность резонансов отражения (более 10^6), омические потери не учитывались. Оказалось, что такие глубокие минимумы ширины полосы заграждения могут быть найдены для любой высоты ступенчатого излома w путем подбора положения ступеньки s (рис. 8), и чем больше высота ступеньки, тем ближе к узкой стенке следует поместить излом, для того чтобы возник такой «сверхдобротный резонанс». Таким образом, можно предположить, что даже для очень малого поперечного сечения проводника со ступенчатым изломом

существует геометрия, которая обеспечивает собственные колебания такого открытого волнового элемента без потерь на излучение.

Конечно, при реальных омических потерях резонанс полного отражения будет постепенно исчезать, как только радиационные потери станут сравнимы с омическими. Тем не менее, обнаруженный эффект интересен с фундаментальной точки зрения как нетривиальный пример сложной открытой геометрии, которая способна поддерживать шестикомпонентное собственное поле на действительной частоте с очень низкими потерями на излучение.

В случае вертикального проводника с малой ступенькой резонансные электрические поля в двух апертурах соответствуют уже горизонтально поляризованной TE_{01} -моду и противоположно направлены, как и в случае горизонтального проводника с малым изломом. Более того, эта черта наблюдается в полях апертур в точке резонанса даже для относительно больших ступенек (рис. 10).

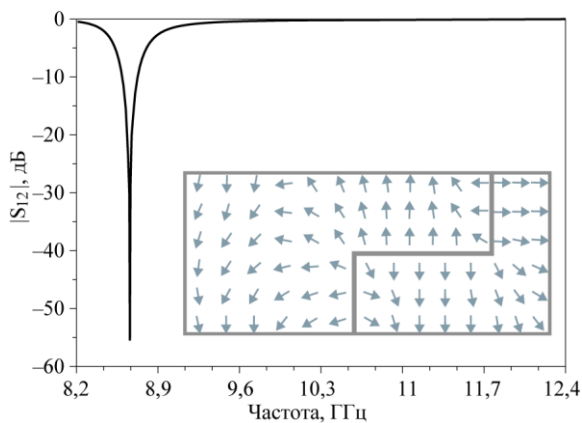


Рис. 10. АЧХ вертикального стержня со ступенчатым изломом при $s = 5$ мм, $w = 4,5$ мм, $h = 15$ мм, $t = 0,25$ мм, $l = 0,25$ мм

Было установлено, что увеличение ширины ступеньки оказывает на частоту и ширину полосы резонанса такое же влияние, как и в случае горизонтального проводника (рис. 11 и 12). Рост w приводит к снижению частоты резонанса с одновременным уменьшением его добротности. Чем меньше сдвиг проводника к узкой стенке волновода h , тем более значительно влияние ширины ступеньки w на ширину полосы резонанса отражения, в то время как частота резонанса ведет себя одинаково для любого значения h .

Горизонтальное смещение проводника со ступенчатым изломом от центра вдоль широкой стенки волновода существенным образом влияет на добротность резонанса, снижая ее на порядки (рис. 13 и 14). Чем меньше ширина ступеньки,

тем уже диапазон изменения ширины полосы резонанса вследствие смещения проводника к узкой стенке волновода, в то время как частота резонанса изменяется слабо.

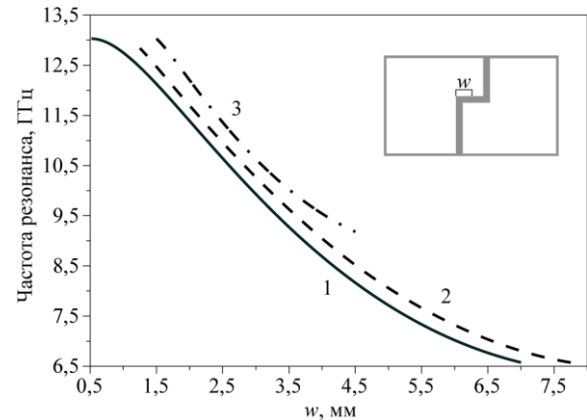


Рис. 11. Зависимость частоты резонанса от ширины ступеньки w для различных значений h , для $s = 5$ мм, $t = 0,25$ мм, $l = 0,25$ мм: 1 – $h = 12$ мм; 2 – $h = 15$ мм; 3 – $h = 18$ мм

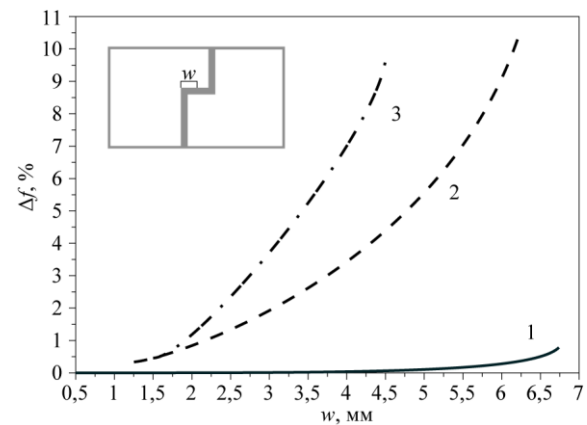


Рис. 12. Зависимость Δf от ширины ступеньки w для различных значений h , для $s = 5$ мм, $t = 0,25$ мм, $l = 0,25$ мм: 1 – $h = 12$ мм; 2 – $h = 15$ мм; 3 – $h = 18$ мм

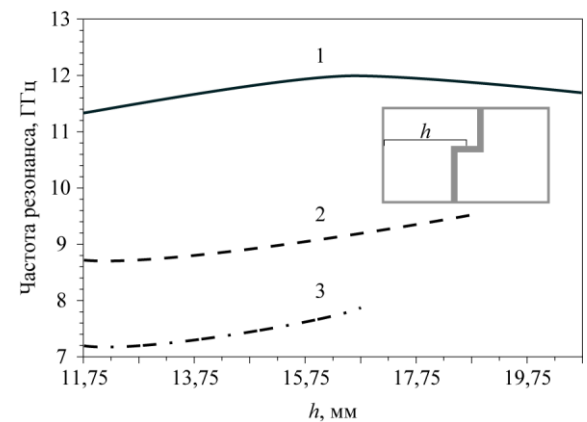


Рис. 13. Зависимость частоты резонанса от положения ступеньки вдоль узкой стенки волновода h для различных значений w , для $s = 5$ мм, $t = 0,25$ мм, $l = 0,25$ мм: 1 – $w = 2$ мм; 2 – $w = 4$ мм; 3 – $w = 6$ мм

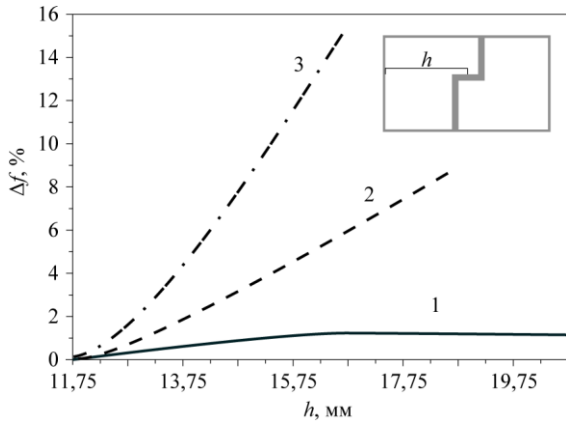


Рис. 14. Зависимость ширины полосы резонанса от положения ступеньки вдоль узкой стенки волновода h для различных значений w , для $s = 5$ мм, $t = 0,25$ мм, $l = 0,25$ мм: 1 – $w = 2$ мм; 2 – $w = 4$ мм; 3 – $w = 6$ мм

Кривые на рис. 15 и 16 отражают зависимости ширины полосы и частоты резонанса от положения ступеньки вдоль стержня. Как и в случае горизонтального проводника, эти зависимости оказались наиболее яркими благодаря наличию глубоких минимумов ширины полосы, вплоть до 10^{-5} % (в случае модели, предполагающей идеальный металл). Эти минимумы близко расположены вследствие широкого диапазона изменения Δf при довольно небольшом диапазоне изменения w , что объясняет, почему даже небольшое изменение w существенно влияет на Δf . Посредством этого свойства вертикальный проводник обеспечивает возможность расположения резонансной частоты во всем рабочем диапазоне прямоугольного волновода и даже вне него.

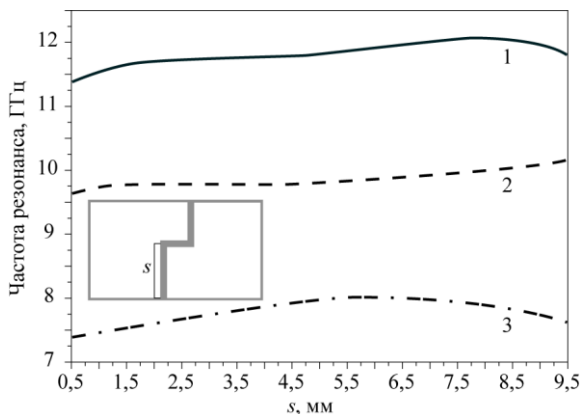


Рис. 15. Зависимость частоты резонанса от положения ступеньки вдоль широкой стенки волновода s для различных значений w , для $h = 11,5$ мм, $t = 0,25$ мм, $l = 1$ мм: 1 – $w = 2$ мм; 2 – $w = 3$ мм; 3 – $w = 5$ мм

Принимая во внимание наличие глубоких минимумов Δf на рис. 16, геометрии проводника со ступенчатым изломом, которые поддерживают собственные колебания с очень низкими потерями

ми на излучение, существуют также и в случае вертикального проводника.

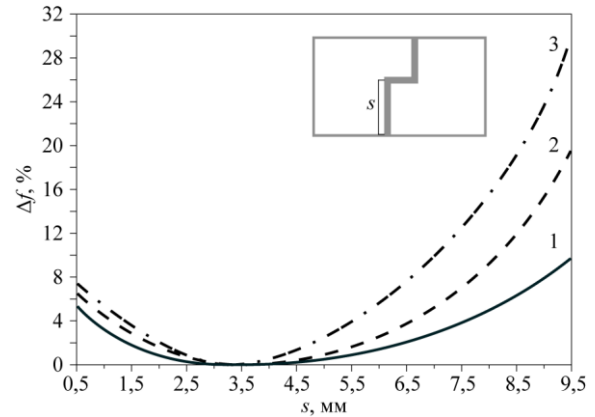


Рис. 16. Зависимость ширины полосы резонанса от положения ступеньки вдоль широкой стенки волновода s для различных значений w , для $h = 11,5$ мм, $t = 0,25$ мм, $l = 1$ мм: 1 – $w = 2$ мм; 2 – $w = 3$ мм; 3 – $w = 5$ мм

4. Результаты экспериментов. Чтобы проверить реальные отражающие свойства стержня со ступенчатым изломом, был проведен ряд экспериментов. Медная диафрагма с $t = 0,3$ мм, $w = 3,35$ мм, $s = 16,45$ мм, $h = 5$ мм и $l = 0,5$ мм была помещена между фланцами прямоугольного волновода 23×10 мм². Вносимые потери в точке резонанса 10,77 ГГц составили 19,4 дБ. После того как на диафрагму был нанесен 8- μ м слой серебра, вносимые потери увеличились до 23 дБ. Из-за высокой напряженности ближних к диафрагме полей в точке резонанса большую роль играют потери в стенках ближних волноводных секций. Поэтому, после того как были посеребрены близлежащие волноводные секции длиной 10 мм (рис. 17), мы получили подавление падающего сигнала на 28 дБ. Расхождение по частоте между измеренными и расчетными данными не превышает $5 \cdot 10^{-3}$ ГГц. Экспериментальные данные показаны треугольниками на рис. 4.

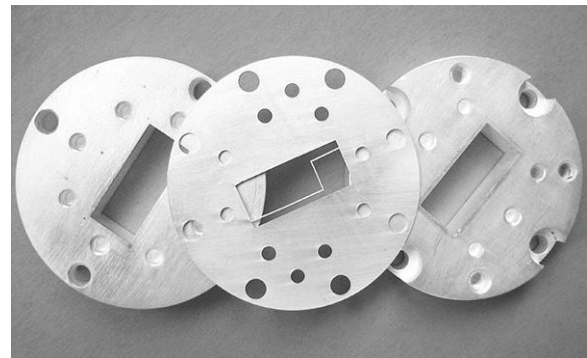


Рис. 17. Фотография представленного горизонтального проводника со ступенчатым изломом и волноводных секций с 8- μ м покрытием серебра

Выводы. Подробно рассмотрены тонкие проводники со ступенчатым изломом, помещенные в поперечное сечение прямоугольного волновода. Было показано, что такие устройства способны обеспечить резонанс полного отражения в рабочем диапазоне частот волновода. Представлены основные зависимости частоты и добротности резонанса от геометрических параметров проводников со ступенчатым изломом. Следует особо отметить, что такие диафрагмы способны обеспечить существование сверхвысокодобротного резонанса отражения.

В одноволновом диапазоне частот резонансное явление возникает вблизи частоты отсечки ближайшей высшей волны в апертурах, на которые делится прямоугольный волновод вертикальным или горизонтальным проводниками. Возникновение резонанса происходит вследствие нарушения симметрии, что вызывает возбуждение асимметричных собственных колебаний диафрагмы. Одновременное возбуждение симметричного и антисимметричного собственных колебаний является причиной появления полюсов на АЧХ. Оба рассмотренных объекта позволяют управлять частотой и шириной полосы резонанса запирающего в довольно широком диапазоне. Преимущество вертикального проводника со ступенчатым изломом состоит в возможности обеспечивать резонанс полного отражения в нижней части рабочего диапазона частот прямоугольного волновода и более явном разделении геометрических параметров, отвечающих за частоту и ширину полосы резонанса. В свою очередь, горизонтальный проводник со ступенькой имеет плавную зависимость резонансных характеристик от геометрии, что снижает требования к погрешностям изготовления.

Кроме проводников с изломом, рассматривались также и другие волноводные элементы подобного типа. Было выявлено, что резонанс полного отражения в рабочем диапазоне прямоугольного волновода может быть вызван наклоном проводника, выступами на стержне, его изгибом и т. д. Возбуждаемые наборы собственных колебаний различны для всех типов таких двухапертурных диафрагм, как и особенности АЧХ. Если говорить о нарушении симметрии, то наклоненный прямой стержень – устройство наиболее близкое к рассмотренным выше стержням со ступенчатым изломом.

С полной уверенностью мы можем предсказать наличие таких же свойств у периодических решеток, составленных из проводников со ступенчатыми изломами. Такие экраны могут быть интересны для разработки частотно-

селективных поверхностей, способных отражать плоскую волну, кросс-поляризованную к направлению проводника, в узком диапазоне частот.

1. Kirilenko A. A., Mospan L. P. The simplest notch and bandstop filters based on the slotted strips // *EuMC*. – 2001. – P. 1–4.
2. Kirilenko A. A., Mospan L. P. Reflection resonances and natural oscillations of two-aperture iris in rectangular waveguide // *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*. – 2000. – 48, No. 8. – P. 1419–1421.
3. Tomassoni C., Mongiardo M., Tarricone L. Analytical evaluation of coupling integrals for elliptical irises in rectangular waveguides // *EuMC*. – 2000. – P. 1–4.
4. Kirilenko A. A., Mospan L. P., Tkachenko V. I. Multislots irises as a tool for frequency response control (physics, applications, and a review of simulation results) // *Journ. of Communications Technology and Electronics*. – 2005. – 50, No. 2. – P. 152–161.
5. Саусворт Дж. К. Принципы и применения волноводной передачи / Пер. с англ. под ред. В. И. Сушкевича. - М.: Сов. радио, 1955. – 700 с.
6. Младенов П. Л., Просвирнин С. Л. Дифракция волн на двухпериодической плоской решетке из непрерывных криволинейных металлических лент // *Радиофизика и радиоастрономия*. – 2002. – 7, № 3. – С. 265–272.
7. Konishi Y. Planar circuit mounted in waveguide used as a downconverter // *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*. – 1978. – 26, No. 10. – P. 716–719.
8. Kirilenko A. A., Kulik D. Yu., Rud L. A. et al. Electromagnetic modeling of multi-layer microwave circuits by the longitudinal decomposition approach // *MWSYM*. – 2001. – P. 1257–1260.
9. Mittra R. Relative convergence of the solution of a doubly infinite set of equations // *Journ. of Research, Section D, National Bureau of Standards*. – 1963. – 67D. – P. 245–254.
10. Веселов Г. И., Платонов Н. И., Слесарев Е. С. Об учете особенностей электромагнитных полей в методе частичных областей // *Радиотехника*. – 1980. – 35, № 5. – С. 27–34.
11. Заргано Г. Ф., Ляпин В. П., Михалевский В. С. и др. Волноводы сложных сечений. – М.: Радио и связь, 1986. – 123 с.
12. Damaschk J. M., Amari S., Bornemann J. Fast and accurate mode-spectrum analysis of waveguide structures using a new set of edge-conditioned basis functions // *Int. J. RF and Microwave CAE*. – 1998. – 8, No. 3. – P. 215–225.
13. Amari S., Rosenberg U., Bornemann J. Singlets, cascaded singlets, and the nonresonating node model for advanced modular design of elliptic filters // *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*. – 2004. – 14, No. 5. – P. 237–239.

A THIN STEPPED CONDUCTOR IN A WAVEGUIDE CROSS-SECTION AS A SIMPLE REJECTION UNIT

A. A. Kirilenko, S. A. Prikolotin

The simple configurations of practically feasible rejection units placed in a rectangular waveguide cross-section are suggested. They are the thin stepped conductors, connecting the opposite waveguide walls. They form a kind of thin two-aperture irises easily placed, for example, between waveguide flanges. A rejection phenomenon is based on the interference interaction of the eigen oscillation fields of the iris with two L-shaped apertures. The rejection frequency and quality factor are controlled by the placement and the height of the conductor step over a wide range. The situation when a stepped perfect conductor provides the resonance of a nearly zero bandwidth is revealed. In other words, such a nontrivial 3D waveguide unit loaded on propagating waveguides is able to support an eigen oscillation without radiation loss.

Key words: rejection cell, stepped wire, waveguide.

**ТОНКИЙ ПРОВОДНИК ЗІ СТУПІНЧАСТИМ
ЗЛАМОМ У ПОПЕРЕЧНОМУ ПЕРЕРІЗІ
ПРЯМОКУТНОГО ХВИЛЕВОДУ В ЯКОСТІ
ПРОСТОГО ВІДБИВАЧА**

А. О. Кириленко, С. А. Приколотін

Розглядаються прості конфігурації реалізованих на практиці пристроїв, які призводять до появи вузькосмугового резонансу повного відбивання при розташуванні у поперечний переріз прямокутного хвилеводу – тонкі провідники зі ступінчастим зломом, що поєднують дві протилежні стінки хвилеводу. Вони утворюють спеціального виду двоапертурні діафрагми, які можна розташувати, наприклад, між фланцями

хвилеводу. Резонансне явище, яке вони викликають, засновано на інтерференсній взаємодії полів власних коливань діафрагми з двома L -образними апертурами. Частота й добротність резонансу відбивання в межах широкого діапазону керуються положенням і висотою ступінчастого зламу. Представлено ситуації, коли ідеальний провідник зі ступінчастим зломом забезпечує резонанс із практично нульовою шириною полоси запирання. Такий нетривіальний хвилеводний $3D$ -об'єкт, що навантажено на підвідні тракти, здатен підтримувати власні коливання без радіаційних втрат. Наведено результати чисельного моделювання та експериментального дослідження.

Ключові слова: прямокутний хвилевід, відбиваючий елемент, провідник зі ступінчастим зломом.

Рукопись поступила 15 мая 2009 г.