

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА СВЧ

УДК 621.372.8

ПОГЛОЩЕНИЕ В ВОЛНОВОДНО-ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРАХ С ОДНОСТОРОННИМ ПРЯМОУГОЛЬНЫМ ВЫСТУПОМ

Л. А. Рудь

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

Исследованы особенности резонансного поглощения и отражения в диэлектрических вставках, у которых одна из границ раздела сред имеет прямоугольный выступ, а другая - перпендикулярна стенкам прямоугольного волновода. Обнаружено, что такие резонансные структуры могут сильно поглощать энергию основной волны из одного плеча и сильно отражать из другого плеча. Показана возможность использования известной качественной модели для определения резонансных значений коэффициентов рассеяния и поглощения для вставок с малыми потерями. По результатам изучения полей дифракции предложена физическая интерпретация механизма резонансного поглощения в таких вставках. Ил. 6. Библиогр.: 11 назв.

Ключевые слова: волноводно-диэлектрический резонатор, резонансное поглощение.

При исследовании и проектировании резонансных систем, содержащих диэлектрические включения даже с малыми потерями, возникает потребность в математических моделях, позволяющих предсказать уровень поглощения подводимой мощности на резонансной частоте. В монографиях [1, 2] с использованием методов теории цепей построены качественные модели проходных волноводных резонаторов, обладающих внутренними потерями и разными коэффициентами связи с подводящими волноводами. С помощью построенных моделей получены соотношения между характеристическими параметрами резонаторов (резонансной частотой, коэффициентами связи, собственной и нагруженной добротностями) и S -параметрами (коэффициентами отражения и прохождения основной волны). Аналогичные соотношения для разнообразных типов одно- и двухплечих резонаторов приведены и в работах [3, 4]. Они послужили основой для классификации различных способов определения характеристических параметров резонаторов по измеренным S -параметрам. В работах [3, 4] описан также класс двухплечих поглощающих резонаторов с симметричными связями. Используя представления для S -параметров из [1 - 4] и закон сохранения энергии, нетрудно получить аналитические выражения, позволяющие определить долю подводимой мощности, поглощаемую в резонаторе за счет внутренних потерь.

В работах [5, 6] предложен другой способ описания симметричных резонаторов с потерями, характеристики которых управляются за счет изменения коэффициента связи или коэффициента потерь. Этот способ основан на анализе соответствующей спектральной краевой задачи. Его суть состоит в поиске собственных колебаний резонатора с такими комплексными частотами, которые

обеспечивают нужное соотношение между внутренней и внешней добротностями.

Из результатов [3 - 5] следует, что максимальное поглощение в симметричных резонаторах с малыми потерями достигает половину от подводимой мощности при критическом значении коэффициента связи (или коэффициента потерь [5, 6]) при условии, что резонансная частота рабочего колебания достаточно удалена от остальных. Если проходной резонатор несимметрично нагружен на подводящие волноводы, то согласно [1, 2] уровень поглощаемой мощности будет определяться уже двумя коэффициентами связи, соотношением между ними, а также тем, из какого плеча происходит возбуждение резонатора. Еще более сложная картина должна наблюдаться для несимметрично нагруженных резонаторов, работающих не на основной, а на высшей волне. Такие резонаторы принято называть резонаторами на запертых модах, и в отсутствие потерь они обеспечивают полное отражение падающей волны [7]. Эквивалентные схемы и качественные модели подобных резонаторов в случае наличия потерь еще не описаны в литературе, поэтому основным инструментом анализа резонансных свойств подобных структур при произвольных геометрических и материальных параметрах задачи могут служить лишь строгие математические модели.

Нами исследованы особенности резонансного поглощения и рассеяния основной волны прямоугольного волновода, набегающей на волноводно-диэлектрический резонатор, одна из границ которого перпендикулярна стенкам волновода, а другая - выполнена в виде прямоугольного выступа в H -плоскости волновода (см. рис. 1). Ранее частный случай такого резонатора с односторонней ступенькой ($g=0$ на рис. 1) был

рассмотрен в работе [8], где основное внимание уделено резонансам на высшей незатухающей TE_{20} волне вставки, приводящим к резкому уменьшению коэффициента прохождения. Однако последующий анализ показал, что в отличие от коэффициента прохождения величины коэффициентов отражения и поглощения на резонансной частоте могут быть разными в зависимости от плеча возбуждения. Выяснению закономерностей проявления этого эффекта и физического механизма его образования как раз и посвящена эта работа.

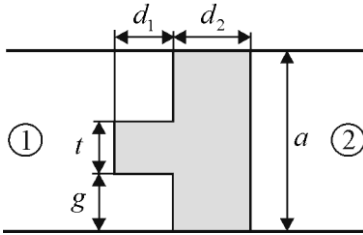


Рис. 1. Диэлектрическая вставка с односторонним выступом в H -плоскости прямоугольного волновода и ее геометрические параметры

1. Математическая модель. Продольное сечение, геометрические параметры и нумерация плеч исследуемой структуры показаны на рис. 1. Она представляет собой диэлектрическую вставку с относительной проницаемостью материала $\varepsilon_r = \varepsilon_r' + itg\delta$, помещенную в прямоугольный волновод с сечением $a \times b$ так, что она полностью перекрывает волновод по узкой стенке. Стенки волновода подразумеваются идеально проводящими. Однородность структуры вдоль узкой стенки позволяет рассматривать краевую задачу дифракции как скалярную относительно TE_{n0} волн. Далее в качестве частотного параметра мы будем использовать величину $\kappa = a/\lambda$, где λ - длина волны в свободном пространстве, а для описания геометрии - относительные параметры $T = t/a$, $G = g/a$ и $D_{1,2} = d_{1,2}/a$.

Для построения строгой математической модели нами использован метод обобщенных матриц рассеяния [9]. В качестве ключевых неоднородностей выбраны следующие сочленения:

- полого и частично заполненного волновода;
- частично и полностью заполненных волновода;
- полностью заполненного и полого волновода с прямой границей раздела сред.

Обобщенные матрицы рассеяния для первых двух сочленений находятся численно с использованием алгоритма метода частичных областей, описанного в работе [10]. Здесь также изложена процедура определения постоянных распространения и собственных функции TE_{n0}

волн частично заполненного волновода, знание которых необходимо при применении метода частичных областей. Элементы матрицы рассеяния для прямой границы раздела сред в волноводе вычисляются по известным аналитическим формулам.

Для описания электродинамических характеристик рассматриваемой структуры мы будем использовать коэффициенты отражения (P_{kk}) и прохождения (P_{jk}) по мощности TE_{10} волны волноводных плеч, определяемые по известным элементам матрицы рассеяния как $P_{jk} = |S_{11}^{(jk)}|^2$, где $k, j=1,2$ - номера плеч структуры. Тогда, используя закон сохранения энергии, выражение для коэффициента поглощения для k -го плеча можно представить как

$$L_k = 1 - P_{kk} - P_{3-k,k}, \quad k=1,2. \quad (1)$$

2. Целевые функции процедуры оптимизации. Для выявления предельно достижимых уровней поглощения используется оптимизационная процедура, основанная на поиске минимума функции многих переменных методом наискорейшего спуска. Максимальное поглощение со стороны k -го плеча при заданном значении $\kappa = \kappa_0$ будет, если целевую функцию согласно (1) выбрать в виде

$$F \vec{x}, \kappa_0 = \min P_{kk} + P_{3-k,k}. \quad (2)$$

Вектор оптимизируемых параметров \vec{x} в (2) в общем случае может содержать четыре геометрических ($T, G, D_{1,2}$) и два материальных

$\varepsilon_r', tg\delta$ параметра. Однако этот вектор может иметь и меньшее число параметров в зависимости от специфики исследуемой проблемы. Особое требование возникает к выбору фиксированного или начального для оптимизации значения параметра ε_r' . Оно должно быть таким, чтобы в полностью заполненном отрезке волновода на заданной частоте или в полосе частот распространялась хотя бы одна высшая TE_{n0} волна, т. е. должно выполняться условие $\kappa_0 \varepsilon_r'^{1/2} > 1$.

3. Анализ известных качественных моделей проходных резонаторов. Прежде чем перейти к изложению результатов проведенных численных экспериментов, считаем целесообразным кратко описать известные модели проходных резонаторов с потерями, несимметрично нагруженных на волноводы. Так, согласно [2] матрицу коэффициентов отражения P_{kk0} и прохождения P_{jk0} ($k=1,2, j=3-k$) по мощности для таких резонаторов на резонансной частоте $\kappa = \kappa_0$ можно представить в виде

$$P_0 = \tau^{-2} \begin{bmatrix} 1 - \beta_1 + \beta_2^2 & 4\beta_1\beta_2 \\ 4\beta_1\beta_2 & 1 + \beta_1 - \beta_2^2 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где $\tau = 1 + \beta_1 + \beta_2$, а β_1 и β_2 - коэффициенты связи резонатора с плечами 1 и 2 соответственно. С помощью (1), (3) нетрудно получить выражение для коэффициента поглощения для k -го плеча на резонансной частоте

$$L_{k0} = 4\beta_k \tau^{-2}. \quad (4)$$

Из (3), (4) видно, что двухплечий резонатор с потерями, несимметрично нагруженный на волноводы, должен обладать одинаковыми коэффициентами прохождения. Что касается коэффициентов отражения и поглощения, то их значения на резонансной частоте могут быть разными, поскольку они определяются величинами коэффициентов связи, соотношением между ними и плечом возбуждения. В частности, если коэффициенты связи таковы, что $\beta_k - \beta_{3-k} = 1$, то из (3) следует, что на резонансной частоте $P_{kk0} = 0$, т. е. должно наблюдаться полное согласование со стороны k -го плеча [2]. Однако, согласно (3), (4) при таком режиме согласования лишь часть подводимой мощности может проходить в выходной волновод, а остальная мощность поглощается в резонаторе за счет наличия внутренних потерь.

Другой, ранее не исследованный в литературе режим реализуется при условии

$$\beta_1 + \beta_2 = 1. \quad (5)$$

При выполнении этого условия из (4) нетрудно получить, что коэффициенты поглощения на резонансной частоте равны коэффициентам связи $L_{k0} = \beta_k$, $k = 1, 2$. Отсюда следует, что при выполнении условия (5) и $\kappa = \kappa_0$ сумма коэффициентов поглощения должна равняться единице

$$L_{10} + L_{20} = 1, \quad (6)$$

а коэффициенты отражения и прохождения при возбуждении из k -го плеча согласно (3), (5) принимают значения

$$P_{kk0} = \beta_{3-k}^2 = L_{3-k,0}^2, \quad (7)$$

$$P_{k,3-k} = \beta_k \beta_{3-k} = L_{k0} L_{3-k,0}. \quad (8)$$

Из анализа (5) - (8) получаем, что если один из коэффициентов связи стремится к нулю, то на резонансной частоте резонатор полностью запирается со стороны одного плеча и полностью поглощает подводимую мощность с другого плеча.

4. Результаты оптимизации в режиме максимального поглощения со стороны плеча 2. В качестве примера рассмотрим результаты оптимизации с использованием целевой функцией (2) при $k = 2$ для вставки с несимметричным выступом. Фиксированными выбраны параметры

$T = 0,33$, $D_1 = 0,1$, $D_2 = 0,11$, а варьируемыми - G , ε'_r , $\text{tg } \delta$. Оптимизация проводилась для последовательности частотных точек из диапазона $0,501 \leq \kappa_0 \leq 0,999$. На каждой частотной точке находились оптимальные значения варьируемых параметров и затем вычислялись интересующие нас значения коэффициентов отражения, прохождения и поглощения для TE_{10} волны, падающей на вставку из плеч 1 и 2. Результаты оптимизации представлены на рис. 2. Наблюдаемое на рис. 2, а, б мелкое „дрожание” кривых связано с тем, что используемая процедура оптимизации способна находить не глобальный, а лишь локальные минимумы целевой функции многих переменных.

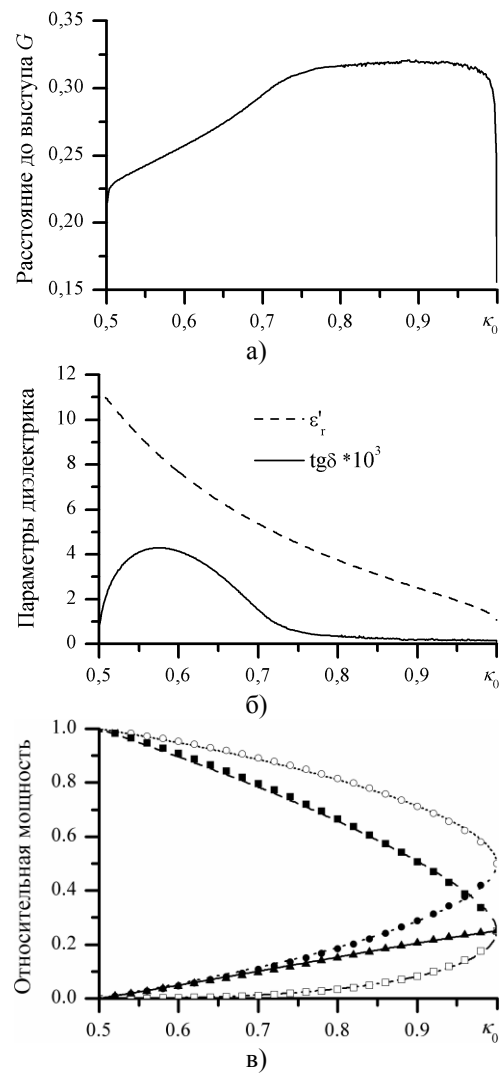


Рис. 2. Изменение расстояния до выступа (а), материальных параметров диэлектрика (б) и значений коэффициентов отражения, прохождения и поглощения (в) при оптимизации вставки с несимметричным выступом в последовательных частотных точках в режиме максимального поглощения со стороны плеча 2: - - ■ - P_{110} ; — ▲ - P_{210} ; ···· ○ - L_{10} ; - · - □ - P_{220} ; ···· ○ - L_{20}

Из анализа численных данных было установлено, что при любом значении κ_0 справедливо равенство $L_{10} + L_{20} = 1 + O \operatorname{tg} \delta$. В пренебрежении малыми потерями (см. рис. 2, б) из (5), (6) можно заключить, что при данном режиме оптимизации коэффициенты связи получаемых вставок близки к значениям $\beta_k = L_{k0}$, $k=1,2$. Благодаря гладкости кривой $L_{10}(\kappa_0)$ на рис. 2, в ее удалось аппроксимировать зависимостью

$$\tilde{L}_{10} \kappa_0 = \beta_1 = 0,5 \left[1 - \left(\frac{1 - \kappa_0^2}{0,75} \right)^\alpha \right]. \quad (9)$$

Полагая далее $\tilde{L}_{20} = \beta_2 = 1 - \tilde{L}_{10}$, нетрудно рассчитать приближенные значения коэффициентов отражения и прохождения с помощью (7), (8). Результаты таких расчетов с $\alpha = 0,625$ в (9) показаны на рис. 2, в соответствующими символами. Как видно, они хорошо совпадают со строго рассчитанными зависимостями, подтверждая тем самым справедливость качественных выводов, вытекающих из анализа модели проходного резонатора [2] при выполнении условия (5).

Показательным является поведение значений исследуемых коэффициентов в нижней и верхней частях одномодового диапазона. Из рис. 2, в видно, что чем ниже частота, тем ближе уровни поглощения и отражения к единице при падении TE_{10} волны со стороны плеча 2 и 1 соответственно. Отсюда и из равенств (5) - (8) можно сделать вывод, что коэффициенты связи ведут себя по-разному: $\beta_1 \rightarrow 0$, а $\beta_2 \rightarrow 1$ при приближении к критической частоте TE_{10} волны волноводных плеч ($\kappa_0 = 0,5$). С другой стороны, при приближении к критической частоте TE_{20} волны ($\kappa_0 = 1$) оба коэффициента поглощения стремятся к значению $L_{10,20} = 0,5$, в то время как $P_{110}, P_{220}, P_{210} \rightarrow 0,25$. Такие значения коэффициентов рассеяния характерны для симметричных резонаторов, работающих при критической связи [3-6] (см. (3), (4) при $\beta_1 = \beta_2 = 0,5$).

Рис. 3 иллюстрирует частотные зависимости исследуемых характеристик вставки с варьируемыми параметрами, соответствующими $\kappa_0 = 0,65$ на рис. 2, а, б. Резонансные значения всех коэффициентов на рис. 3 совпадают с результатами рис. 2, в при указанном κ_0 . Следует отметить резонансный характер возрастания коэффициента поглощения для плеча 2, значение которого в резонансе равно $L_{20} = 0,92$ (нагруженная добротность вставки $Q_l \approx 200$). Весьма

показательным является поведение кривых для коэффициентов отражения на рис. 3. Как видно, даже при сравнительно малых потерях наблюдается резкое возрастание уровня отражения лишь со стороны плеча 1, а от плеча 2 оно уменьшается. Вне малой окрестности резонансной частоты наблюдается совпадение кривых для коэффициентов отражения. Заметим, что в случае идеального диэлектрика они должны совпадать во всем диапазоне и на резонансной частоте должны равняться единице, как это свойственно резонаторам на запертых модах в отсутствии потерь [7]. Необходимо подчеркнуть, что теория проходных резонаторов [1, 2] непригодна для описания частотных характеристик рассматриваемых здесь резонаторов отражательного типа.

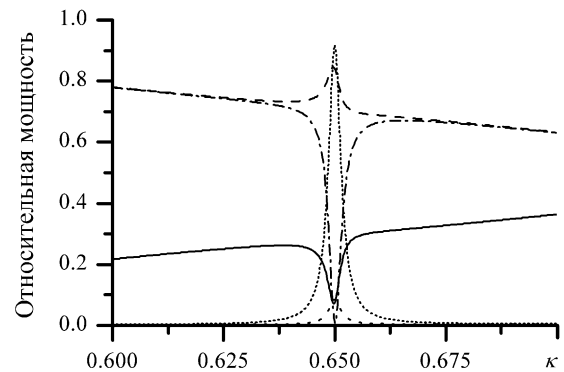


Рис. 3. Частотные характеристики диэлектрической вставки с параметрами: $T=0,33$, $D_1=0,1$, $D_2=0,11$, $\epsilon_r=6,39(1+i0,0031)$, $G=0,274$: - - - - P_{110} ; — — — — P_{210} ; ······ L_{10} ; - · - · - P_{220} ; ······ L_{20}

Сравнительный анализ показал, что отмеченные выше закономерности в поведении электродинамических характеристик имеют место и при оптимизации вставок с целевой функцией (2) при $k=2$, но с другим набором варьируемых параметров при условии, что потери малы. Некоторые отличия могут наблюдаться лишь в показателе α аппроксимирующей функции (9), если параметр ϵ'_r включен в вектор оптимизируемых параметров. Если же этот параметр выбран фиксированным, то соотношения (5) - (8) выполняются с хорошей точностью, однако не во всем диапазоне частот, а зависимости, типа представленных на рис. 2, в, имеют другой характер.

5. Результаты оптимизации в режиме максимального поглощения со стороны плеча 1. Сравнительный анализ показал, что для вставок с несимметричным выступом режим максимального поглощения со стороны плеча 1 реализуется при величинах $\operatorname{tg} \delta > 0,1$. В этом случае наблюдается достаточно большой уровень нерезонансного поглощения. Меньшие потери получаются для вставок с симметричным выступом. Результаты оптимизации таких вставок с варьируемыми

параметрами D_1 , ε'_r , $\text{tg } \delta$ и заданными параметрами $T=0,3$, $G=0,35$ и $D_2=0,2$ представлены на рис. 4.

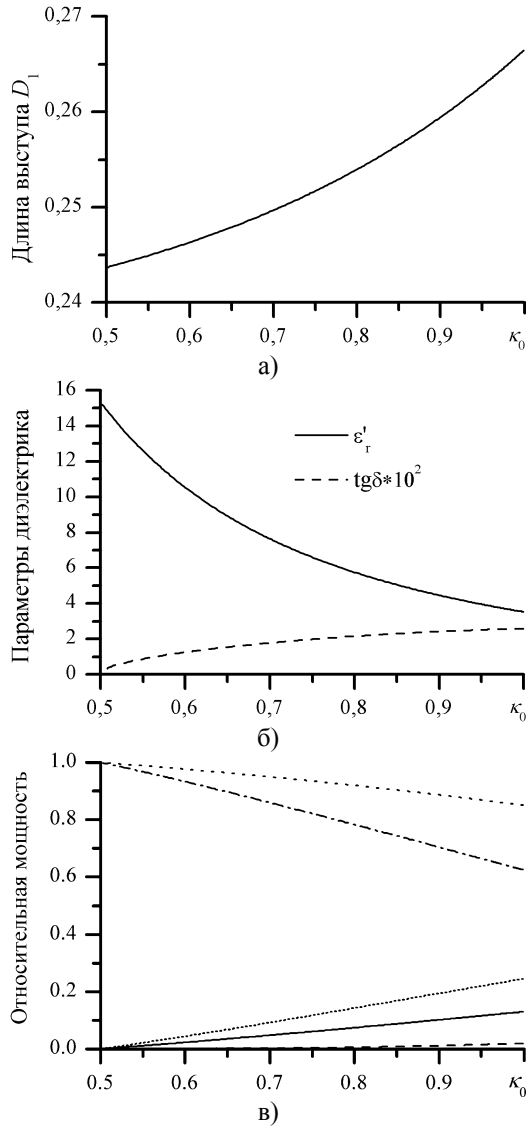


Рис. 4. Изменение длины выступа (а), материальных параметров диэлектрика (б) и значений коэффициентов отражения, прохождения и поглощения (в) при оптимизации вставки с симметричным выступом в последовательных частотных точках в режиме максимального поглощения со стороны плеча 1: - - - P_{110} ; — P_{210} ; ···· L_{10} ; - · - · P_{220} ; ····· L_{20}

Сравнивая результаты, представленные на рис. 4, б и рис. 2, б, можно сделать вывод, что максимальное поглощение со стороны плеча 1 обеспечивается при больших значениях ε'_r и $\text{tg } \delta$, чем со стороны плеча 2. Увеличение ε'_r обусловлено тем, что для вставки с симметричным выступом в качестве высшей запертой волны выступает TE_{30} волна, распространяющаяся в заполненном отрезке волновода, что возможно

при $\kappa_0 \varepsilon_r^{1/2} > 1,5$. Увеличение диэлектрических потерь приводит к тому, что коэффициенты рассеяния и поглощения уже не удовлетворяют соотношениям (5)-(8). Заметим, что при получаемых значениях $\text{tg } \delta$ поглощение со стороны плеча 1 превышает уровень $L_{10} = 0,85$, отражение практически отсутствует ($P_{110} < 0,02$), а от плеча 2 оно достаточно велико ($P_{220} > 0,6$) во всем рассматриваемом диапазоне резонансных частот (см. рис. 4, в).

На рис. 5 приведены частотные характеристики вставки, варьируемые параметры которой соответствуют точке $\kappa_0 = 0,65$ на рис. 4, а, б. В отличие от вставки, иллюстрируемой рис. 3, данная вставка обладает низкодобротным резонансным поглощением со стороны плеча 1 ($Q_l \approx 33$), что является следствием повышенного уровня диэлектрических потерь. Последнее также влияет на поведение коэффициентов отражения от двух плеч - они начинают совпадать при частотах, достаточно удаленных от резонансной. При $\kappa = \kappa_0$ вставка практически полностью согласована со стороны плеча 1 за счет сильного поглощения ($P_{110} = 0,001$, $L_{10} = 0,963$), в то же время как со стороны плеча 2 она является сильно отражающей ($P_{220} = 0,896$, $L_{20} = 0,068$).

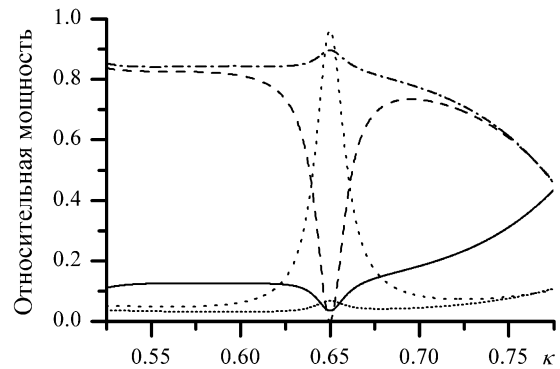


Рис. 5. Частотные характеристики диэлектрической вставки с параметрами: $T=0,3$, $G=0,35$, $D_2=0,2$, $\varepsilon_r=8,92(1+i0,015)$, $D_1=0,248$: - - - P_{110} ; — P_{210} ; ···· L_{10} ; - · - · P_{220} ; ····· L_{20}

6. О физическом механизме образования эффектов сильного поглощения и отражения. Описанные выше результаты в основном дают представление о «внешнем» проявлении исследуемых резонансных эффектов. Однако закономерным является вопрос о том, за счет чего они образуются. С одной стороны, на процесс их образования существенное влияние оказывают свойства границ вставки, обуславливающие разные коэффициенты связи электромагнитного поля вставки как резонатора с основной волной

волноводных плеч 1 и 2. С другой стороны, у рассматриваемых резонаторов, работающих на высших «запертых» модах, коэффициенты связи β_1 и β_2 не могут изменяться независимо друг от друга. Если TE_{10} волна плеча 1 непосредственно связывается с высшей TE_{n0} волной вставки за счет нерегулярности границы, то связь с плечом 2 реализуется на этой же границе, но после прохождения волной прямой границы раздела сред и отрезка заполненного волновода длиной D_2 . Поэтому изменение геометрии выступа и (или) параметров диэлектрика приводит к одновременному изменению обоих коэффициентов связи.

Одним из инструментов познания физики процессов, приводящих к сильному поглощению или отражению подводимой мощности с того или иного плеча, может служить изучение особенностей формирования полей внутри и вне вставки в условиях резонанса. Для примера на рис. 6 показаны распределения линий $|E_y(x, z)| = \text{const}$ для вставки, обеспечивающей максимальное поглощение со стороны плеча 2 при $\kappa_0 = 0,65$. Ее параметры указаны в подписи к рис. 3. Картины полей рассчитывались для случаев падения из плеча 1 и 2 TE_{10} единичной амплитуды по E_y составляющей электрического поля. При этом в каждой частичной области суммировались вклады от 25 волн, амплитуды которых определялись по решению соответствующей задачи дифракции.

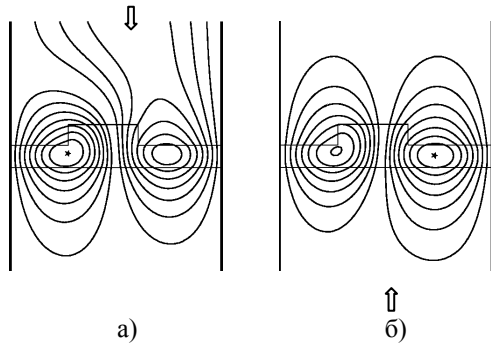


Рис. 6. Распределение линий равного уровня электрического поля при дифракции TE_{10} волны на вставке с несимметричным выступом и параметрами, обеспечивающими сильное резонансное отражение со стороны плеча 1 (а) и поглощение из плеча 2 (б). Звездочками указаны положения максимумов поля

Из рис. 6 видно, что доминирующую роль в формировании резонансного поля дифракции играет высшая TE_{20} волна. Она является распространяющейся как в частично, так и в полностью заполненной частях вставки. У такой вставки коэффициенты поглощения из разных плеч сильно отличаются. Согласно рис. 3 они соотносятся как $L_{20} / L_{10} = 10,8$. Столь большее

отличие этих коэффициентов и соответствующих коэффициентов связи обусловлено разным уровнем напряженности резонансных полей дифракции. В частности, из результатов численных расчетов следует, что для данной вставки $|E_{y,\text{max}}^{(2)}| : |E_{y,\text{max}}^{(1)}| = 8,2 : 2,5$, где $|E_{y,\text{max}}^{(k)}|$ - максимальный уровень поля внутри вставки при падении волны из k -го плеча. Поскольку коэффициенты поглощения можно вычислить как [11]

$$L_k = \frac{\omega \varepsilon_r' \text{tg} \delta}{8\pi} \int_V |E_y^{(k)}(x, z)|^2 dv, \quad (10)$$

где ω - круговая частота, а интеграл берется по объему вставки V , то справедливость неравенства $L_{20} > L_{10}$ на резонансной частоте (а значит и $\beta_2 > \beta_1$) для рассматриваемой вставки с малыми потерями становится очевидной.

Для вставки с симметричным выступом, чьи частотные характеристики представлены на рис. 5, соответствующие распределения полей для $\kappa_0 = 0,65$ показаны на рис. 7. Эта вставка обладает свойством сильного поглощения со стороны плеча 1 (при этом $L_{10} / L_{20} = 14,2$) и отражения от плеча 2 на уровне $P_{220} = 0,897$ (см. рис. 4 и 5). Симметричность выступа обусловила определяющую роль TE_{30} волны в формировании структуры поля резонансного колебания внутри вставки. Из картин распределения полей на рис. 7, а, б видно, что при падении волны со стороны плеча 1 поле концентрируется внутри вставки, а при падении со стороны плеча 2 наблюдается интерференция поля падающей и отраженной волны во входном волноводе (с $|E_y| = 1,95$ в максимуме). Расчеты показывают, что максимумы поля внутри вставки соотносятся как $|E_{y,\text{max}}^{(1)}| : |E_{y,\text{max}}^{(2)}| = 2,5 : 0,4$. Такие особенности распределения полей согласно (10) обеспечивают неравенство $L_{10} > L_{20}$.

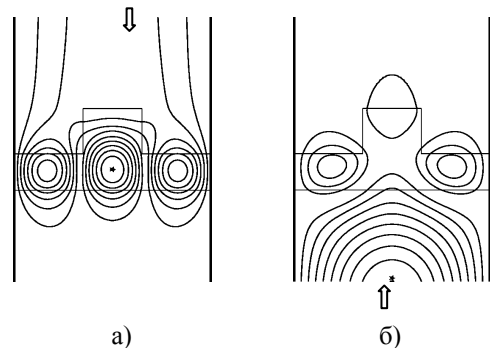


Рис. 7. Распределение линий равного уровня электрического поля при дифракции TE_{10} волны на вставке с симметричным выступом и параметрами, обеспечивающими сильное резонансное поглощение со стороны плеча 1 (а) и отражение из плеча 2 (б). Звездочками указаны положения максимумов поля

Выводы. Результаты проведенных исследований с использованием строгой численной модели показывают, что диэлектрические вставки в H -плоскости прямоугольного волновода, у которых одна из границ имеет прямоугольный выступ, а другая перпендикулярна стенкам волновода, могут обладать нетривиальными режимами резонансного рассеяния и поглощения подводимой мощности. В отличие от симметричных резонаторов с малыми потерями, где при критической связи поглощается половина подводимой мощности на резонансной частоте, рассмотренные несимметричные вставки могут обеспечивать сильное резонансное поглощение со стороны одного плеча и сильное отражение с другого плеча в низкочастотной части одноволнового диапазона волновода.

Обнаружено, что в режиме сильного поглощения со стороны плеча с прямой границей раздела сред сумма резонансных значений коэффициентов поглощения для двух плеч оказывается близкой к единице, если диэлектрические потери вставки малы. При этом резонансные значения коэффициентов рассеяния и поглощения с обоих плеч хорошо совпадают со значениями, полученными с помощью известной качественной модели [2] проходного резонатора с потерями при условии, что сумма коэффициентов связи равна единице. Такое условие на заданной частоте реализуется только при определенном наборе геометрических и материальных параметров вставок, найденных с использованием численной процедуры оптимизации. Режим сильного резонансного поглощения со стороны нерегулярной границы наблюдается при большем уровне диэлектрических потерь. В этом случае качественная модель [2] уже не пригодна для определения резонансных значений исследуемых характеристик.

Анализ полей дифракции позволил установить, что на резонансной частоте поле внутри вставки в основном формируется за счет высшей незатухающей волны. Если вставка оптимизирована в режиме максимального поглощения при возбуждении из какого-либо одного плеча, то концентрация и интенсивность поля в объеме вставки существенно выше по сравнению со случаем ее возбуждения из другого плеча.

1. *Альтман Дж. Л.* Устройства СВЧ / Пер. с англ. под ред. И. В. Лебедева. - М.: Мир, 1968. - 487 с.
2. *Будурис Ж., Шеневье П.* Цепи сверхвысоких частот (теория и применение) / Пер. с франц. под ред. А.Л. Зиновьева. - М.: Сов. радио, 1979. - 288 с.
3. *Sanchez M. C., Martin E., Zamorro J. M.* Unified and simplified treatment of techniques for characterising transmission, reflection or absorption resonators // Proc. Inst. Elect. Eng. Pt. H. - 1990. - 137, N 4. - P.209-212.
4. *Bray J. R., Roy L.* Measuring the unloaded, loaded, and external quality factors of one- and two-port resonators using scat-

- tering-parameter magnitudes at fractional power levels // Proc. Inst. Elect. Eng. Pt. H. - 2004. - 151, N4. - P.345-350.
5. *Minakova L. B., Rud L. A.* Resonance absorption in single and cascaded lossy waveguide-dielectric resonators // Microw. Opt. Technol. Lett. - 2003. - 36, N2. - P.122-126.
 6. *Минакова Л. Б., Рудь Л. А.* Резонансное поглощение в волноводах, содержащих диэлектрические включения с потерями // Радиотехника и электроника. - 2004. - 49, №2. - С.141-146.
 7. *Шестопалов В. П., Кириленко А. А., Рудь Л. А.* Волноводные неоднородности. - Киев: Наук. думка, 1986. - 216 с. - (Резонансное рассеяние волн: В 2-х т.: Т. 2).
 8. *Колесников В. С., Моденов В. П., Пирогов Ю. А., Свешников А. Г.* Резонансная дифракция волны H_{10} на диэлектрической неоднородности в H -плоскости волновода // Радиотехника и электроника. - 1987. - 32, №9. - С.1841-1848.
 9. *Миттра Р., Ли С.* Аналитические методы теории волноводов. - М.: Мир, 1974. - 328 с.
 10. *Минакова Л. Б., Рудь Л. А.* Свободные колебания волноводно-диэлектрических резонаторов на отрезке частично-заполненного прямоугольного волновода // Радиофизика и электроника. - Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. - 1999. - 4, №3. - С.72-77.
 11. *Вайнштейн Л. А.* Электромагнитные волны. - М.: Радио и связь, 1988. - 440 с.

ABSORPTION IN WAVEGUIDE-DIELECTRIC RESONATORS WITH ONE-SIDE RECTANGULAR LEDGE

L. A. Rud

Features of resonance absorption in dielectric inserts, which one interface has a rectangular ledge and the other is perpendicular to rectangular waveguide walls, are studied. It is found that these resonator structures can provide a strong absorption of the dominant mode power from one port and a strong reflection from the other port. A possibility to use the known qualitative model for determining resonance values of the scattering and absorption coefficients is shown in the case of low-loss inserts. By the results of studying the scattered fields, a treatment of the resonance absorption physical mechanism is proposed.

Key words: resonance absorption, waveguide-dielectric resonator.

ПОГЛИНАННЯ В ХВИЛЕВОДНО-ДІЕЛЕКТРИЧНИХ РЕЗОНАТОРАХ З ОДНОБІЧНИМ ПРЯМОКУТНИМ ВИСТУПОМ

Л. А. Рудь

Досліджено особливості резонансного поглинання у діелектричних вставках, у яких одна границя поділу середовищ має прямокутний виступ, а друга - перпендикулярна стінкам прямокутного хвилеводу. Знайдено, що такі резонансні структури можуть сильно поглинати енергію основної хвилі з одного плеча та сильно відбивати з другого плеча. Показано можливість використання відомої якісної моделі для визначення резонансних значень коефіцієнтів розсіяння та поглинання для вставок з малими втратами. По результатам вивчення полів дифракції запропоновано фізичну інтерпретацію механізму резонансного поглинання в таких вставках.

Ключові слова: резонансне поглинання, хвилеводно-діелектричний резонатор.

Рукопись поступила 23 февраля 2007 г.