

Ю. Д. Черноусов¹, А. Е. Левичев², В. М. Павлов², Г. К. Шамуилов³

¹ Институт химической кинетики и горения СО РАН
ул. Институтская, 3, Новосибирск, 630090, Россия
E-mail: chern@catalysis.ru

² Институт ядерной физики СО РАН
пр. Акад. Лаврентьева, 11, Новосибирск, 630090, Россия
E-mail: A.E.Levichev@inp.nsk.su; V.M.Pavlov@inp.nsk.su

³ Новосибирский государственный университет
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия
E-mail: shadowmancer211@gmail.com

ТОНКАЯ ДИАФРАГМА В ПРЯМОУГОЛЬНОМ ВОЛНОВОДЕ

Представлено описание тонкой одиночной диафрагмы в прямоугольном волноводе в плоскости ее геометрического расположения. Получены и сопоставлены с измерениями соотношения, определяющие параметры диафрагмы. Показано, что в плоскости диафрагмы сдвиг фазы прошедшего и отраженного сигнала относительно фазы падающего линейно зависит от модуля коэффициента передачи, а фаза отраженного сигнала опережает фазу прошедшего на угол $\pi/2$.

Ключевые слова: диафрагма, плоскость представления, коэффициент прохождения, коэффициент отражения, фаза.

Введение

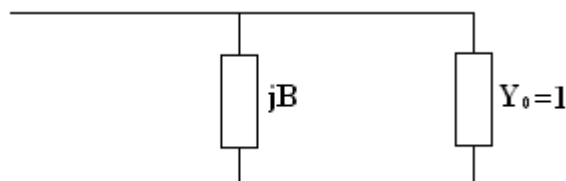
Диафрагмой называют пластину, частично перекрывающую поперечное сечение волновода. Различают резонансные, индуктивные и емкостные диафрагмы [1–8]. Они применяются для создания резонаторов, фильтров, согласующих элементов и других устройств техники сверхвысоких частот (СВЧ). Установившиеся названия отражают схему эквивалентного представления в соответствии с методом эквивалентных схем [2–6], когда СВЧ устройство заменяется совокупностью элементов с сосредоточенными параметрами – емкостями и индуктивностями. Так, индуктивная диафрагма может быть представлена как шунтирующая передающую линию нормированная реактивная проводимость $B < 0$, включенная параллельно единичной волноводной проводимости (рис. 1) [7; 8].

В технике СВЧ диафрагмы, как правило, используются в устройствах, содержащих объемные элементы, например, резонаторы,

которые являются системами с распределенными параметрами. Для описания подобных систем используется понятие плоскости эквивалентного представления, которая располагается в минимуме стоячей волны подводящей линии при сильной расстройке исследуемого резонатора [5]. Соответственно характеристики элементов резонатора, например диафрагм связи, также рассматриваются в плоскости их эквивалентного представления, в которой свойства диафрагм описываются наиболее просто.

В данной работе представлено описание одиночной диафрагмы в прямоугольном волноводе в плоскости ее геометрического расположения, получены и сопоставлены с измерениями соотношения, определяющие параметры диафрагмы. Такое представление позволяет методом рассеянных волн относительно просто получить соотношения, описывающие полосовые характеристики одного, системы из двух и более связанных резонаторов [9].

Рис. 1. Эквивалентная схема представления диафрагмы в волноводе



Диафрагма в волноводе

Диафрагма в волноводе характеризуется комплексными коэффициентами передачи T и отражения Γ . Если на диафрагму падает волна с нормированной амплитудой a , то отражается волна $\Gamma \cdot a$ и проходит волна $T \cdot a$. Коэффициенты T и Γ связаны. Для тонкой диафрагмы без потерь справедливы соотношения [7; 8]:

$$T = 1 + \Gamma, \quad (1)$$

$$|T|^2 + |\Gamma|^2 = 1. \quad (2)$$

Соотношение (1) следует из граничных условий на диафрагме, (2) – отражает отсутствие потерь при прохождении волны. Представим выражения для коэффициентов T и Γ в комплексной форме:

$$T = |T| \exp(j\theta) = |T|(\cos \theta + j \sin \theta), \quad (3)$$

$$\Gamma = |\Gamma| \exp(j\psi) = |\Gamma|(\cos \psi + j \sin \psi), \quad (4)$$

где $|T|$, θ – модуль и фаза коэффициента передачи, $|\Gamma|$, ψ – модуль и фаза коэффициента отражения соответственно. Приравняв мнимые и действительные части, из системы уравнений (1)–(4) соответственно для индуктивной (5а) и емкостной (5б) диафрагм можно получить [9]:

$$\Gamma = |\Gamma|(-|\Gamma| + j|T|), \quad (5a)$$

$$\Gamma = |\Gamma|(-|\Gamma| - j|T|). \quad (5b)$$

Для коэффициента прохождения T аналогично имеем ((5а) – индуктивная диафрагма, (5б) – емкостная):

$$T = |T|(|T| + j|\Gamma|), \quad (6a)$$

$$T = |T|(-|T| + j|\Gamma|). \quad (6b)$$

Как известно, комплексные числа могут быть представлены в виде векторов на комплексной плоскости [10]. Из (1) следует: $T - \Gamma = 1$. Возводя обе части этого равенства в квадрат, с учетом (2) для скалярного произведения векторов T, Γ имеем:

$$T \cdot \Gamma = 0.$$

Таким образом, с учетом (2) коэффициенты прохождения и отражения на комплексной плоскости можно изобразить в виде двух векторов, вписанных в окружность с диаметром 1, с прямым углом между T и Γ , как показано на рис. 2. Верхняя полуплоскость отвечает множеству индуктивных диафрагм, нижняя – емкостных. Для индуктивной диафрагмы прошедшая волна опережает падающую волну на угол θ , отраженная – на угол ψ .

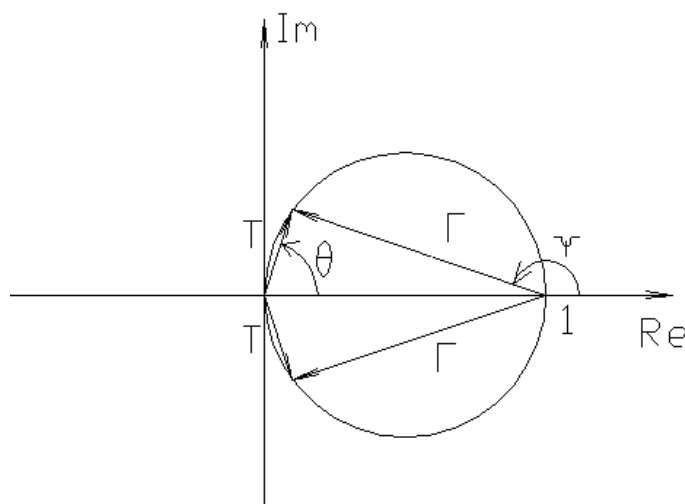


Рис. 2. Векторная диаграмма комплексных коэффициентов прохождения и отражения

Далее рассмотрим индуктивные диафрагмы, поскольку они используются для связи резонаторов с подводящей линией. Для индуктивной диафрагмы, как видно из (5) и (6), имеют место соотношения:

$$\Gamma = |\Gamma| \exp(j\psi), \quad \operatorname{tg}(\psi) = -|T|/|\Gamma|, \quad (7)$$

$$\pi \geq \psi \geq \pi/2;$$

$$T = |T| \exp(j\theta), \quad \operatorname{tg}(\theta) = |\Gamma|/|T|, \quad (8)$$

$$\pi/2 \geq \theta \geq 0;$$

$$\psi - \theta = -\pi/2. \quad (9)$$

Фаза отраженной волны опережает фазу падающей волны на угол ψ (рис. 2, верхняя полуплоскость). При увеличении $|T|$ величина ψ уменьшается от π до $\pi/2$. В пределе, при $|T| \rightarrow 0$ $\psi = \pi$, а коэффициент отражения короткого замыкания волновода – диафрагмы без отверстия связи – $\Gamma = -1$. Фаза прошедшей волны $T \cdot a$ опережает фазу падающей волны a на угол θ . При уменьшении $|\Gamma|$ величина θ уменьшается от $\pi/2$ до 0. При малых $|\Gamma|$ фаза отраженной волны опережает фазу падающей, $\psi \approx \pi/2$, а фазы прошедшей и падающей волн совпадают, $\theta \approx 0$. При малых $|T|$, $|\Gamma| \cong 1$, $\operatorname{tg}(\theta) = 1/|T|$ и

$$\psi \cong \pi - |T|. \quad (10)$$

Можно определить связь параметров диафрагмы как элемента эквивалентной схемы – нормированной индуктивной проводимости B , и как элемента волноводного тракта с коэффициентом отражения Γ . В соответствии с эквивалентной схемой (см.

рис. 1), для проводимости нагрузки Y_H , состоящей из включенных параллельно реактивности B и проводимости линии, можно записать:

$$Y_H = jB + 1.$$

Коэффициент отражения нагрузки Γ определяется соотношением [3]:

$$\Gamma = \frac{1 - Y_H}{1 + Y_H}.$$

Из последних уравнений находим [7; 8]:

$$\frac{2\Gamma}{1 + \Gamma} = -jB,$$

и соответственно

$$\Gamma = -jB/(2 + jB),$$

$$|\Gamma|^2 = B^2/(4 + B^2).$$

Полученные соотношения (5) и (6) для индуктивной диафрагмы были проверены экспериментально на стенде, представляющем собой отрезок прямоугольного волновода с высотой 34 мм и шириной 72 мм, в который прижимным способом вставлена медная диафрагма (рис. 3). Волновод с двух сторон имеет согласованные коаксиально-волноводные переходы. Толщина всех исследуемых диафрагм одинакова – 3 мм, высота отверстий связи составляла 10 мм, ширина изменялась в пределах 20–50 мм. При таких размерах в области исследуемых частот представленные диафрагмы могут быть описаны с помощью индуктивности. Измерения производились на векторном анализаторе цепей Agilent N5230A.

Расчетные и измеренные характеристики тонкой индуктивной диафрагмы в прямоугольном волноводе приведены на рис. 4–7.

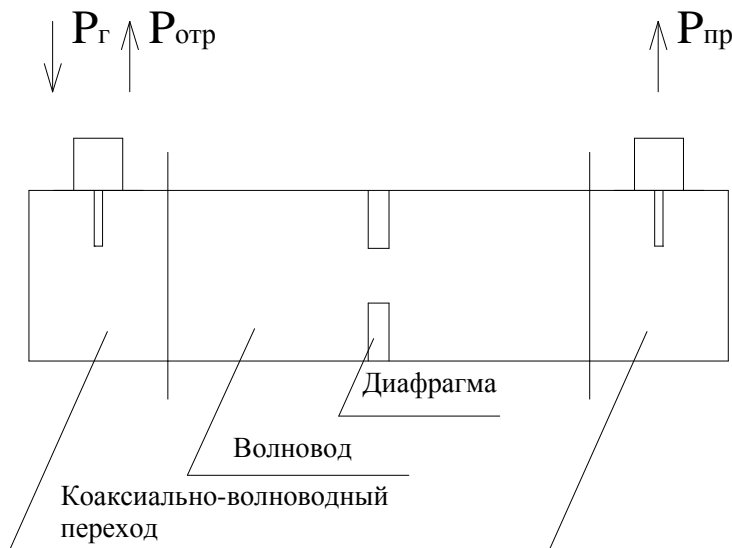


Рис. 3. Схематичный вид измерительной установки

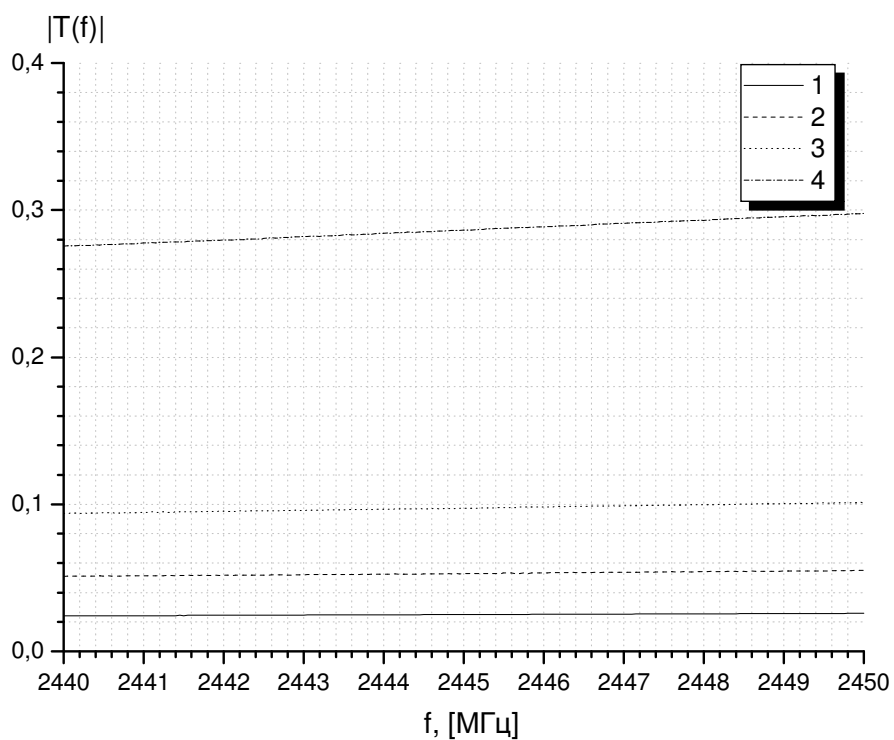


Рис. 4. Зависимость измеренного модуля коэффициента прохождения для диафрагм с различными отверстиями связи в зависимости от частоты: 1 – отверстие связи $10 \times 20 \text{ мм}^2$; 2 – отверстие связи $10 \times 30 \text{ мм}^2$; 3 – отверстие связи $10 \times 40 \text{ мм}^2$; 4 – отверстие связи $10 \times 50 \text{ мм}^2$

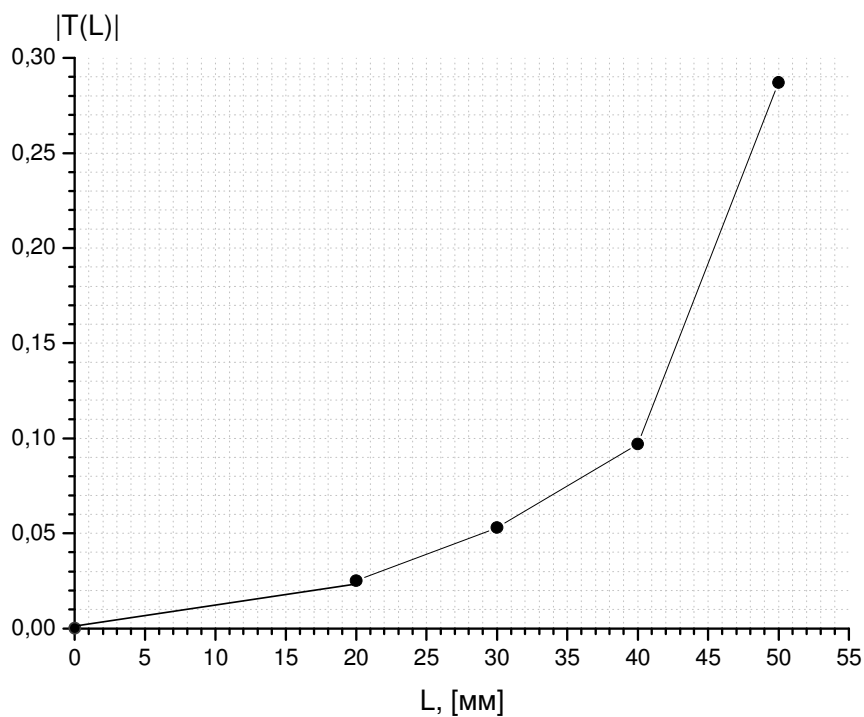


Рис. 5. Зависимость измеренного модуля коэффициента прохождения диафрагмы от длины отверстия связи на частоте 2 445 МГц

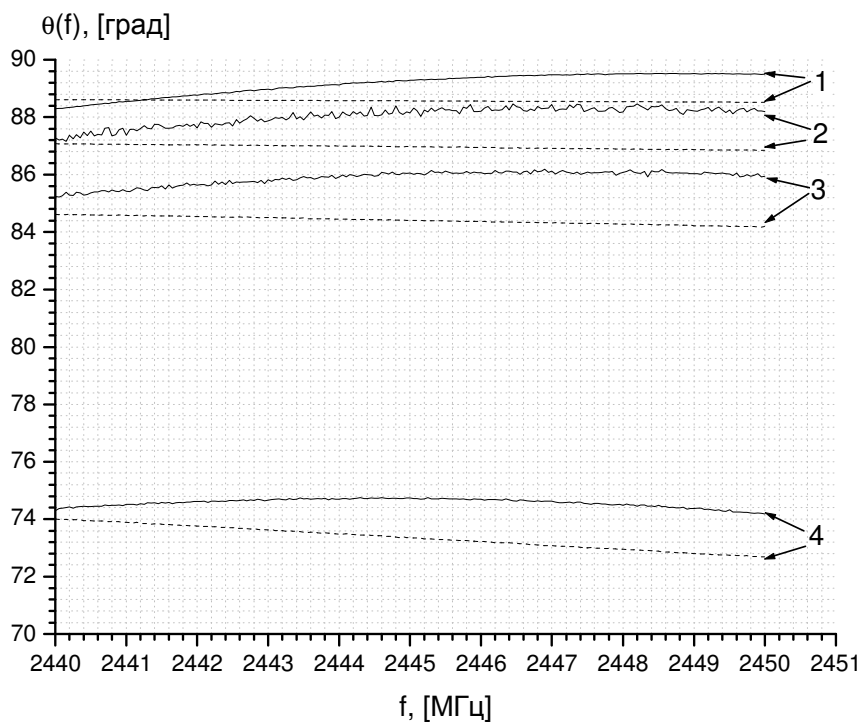


Рис. 6. Зависимость фазы коэффициента прохождения от частоты для диафрагм с различными отверстиями связи. Сплошная линия – измерение, пунктирная – расчет: 1 – отверстие связи $10 \times 20 \text{ мм}^2$; 2 – отверстие связи $10 \times 30 \text{ мм}^2$; 3 – отверстие связи $10 \times 40 \text{ мм}^2$; 4 – отверстие связи $10 \times 50 \text{ мм}^2$

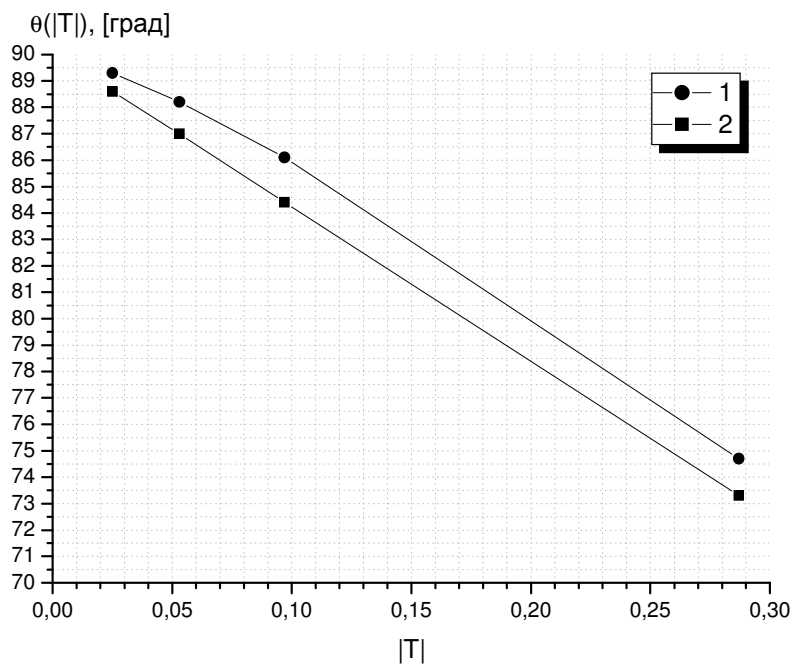


Рис. 7. Зависимость фазы прошедшего через диафрагму сигнала от модуля коэффициента прохождения на частоте 2 445 МГц: 1 – измерения; 2 – расчет

На рис. 4 представлены зависимости модуля $|T|$ от частоты для диафрагм с различными отверстиями связи. В измеренном частотном интервале коэффициент $|T|$ практически не зависит от частоты. На рис. 5 показана зависимость модуля коэффициента прохождения диафрагмы от длины отверстия связи на частоте 2 445 МГц. Измерение этого параметра осуществляется наиболее просто и точно.

Измеренные и рассчитанные с помощью выражения (8) значения фазы коэффициента прохождения в частотном интервале изображены на рис. 6. Значения фазы прошедшей через диафрагму волны в зависимости от модуля коэффициента прохождения на частоте 2 445 МГц показаны на рис. 7. Из рис. 6, 7 видно, что измеренные и рассчитанные значения фазы прошедшего через диафрагму сигнала близки друг к другу, отличаются не более чем на 2° . Отличия обусловлены, по-видимому, тем, что при измерении малых значений изменения фазы СВЧ сигнала возникают погрешности, обусловленные наличием гибких кабелей, разъемных фланцев, коаксиальных разъемов.

Выводы

Расчетные соотношения (2), (7)–(10) полностью определяют характеристики диафрагмы в области ее геометрического расположения через один достаточно просто и точно экспериментально определяемый параметр – модуль коэффициента передачи $|T|$. Расчетным и экспериментальным путем показано, что при относительно небольших значениях сдвиг фазы прошедшего и отраженного сигнала линейно зависит от коэффициента передачи диафрагмы. Фазовые измерения требуют не только высокой разрешающей способности измерительной аппаратуры, но и высоких точностей изготовления и установки всех СВЧ элементов. В связи с этим возникают расхождения между расчетными и экспериментальными данными. Однако точности измерения, достигнутые в данной работе, показывают, что

выражения для связи фаз прошедших и отраженных от диафрагм волн с модулями коэффициентов прохождения и отражения правильно описывают тонкую диафрагму в прямоугольном волноводе и могут использоваться для решения расчетных задач. Полученные соотношения пригодны для разработки высокочастотных устройств, в которых индуктивные диафрагмы связи используются и являются основными элементами, в том числе и в задачах, в которых необходимо определение фазочастотных характеристик без возможности их прямого измерения.

Список литературы

1. Теория линий передачи сверхвысоких частот: Пер. с англ. / Под ред. А. И. Шпунтова. М.: Сов. радио, 1951. Т. 1.
2. Харвей А. Ф. Техника сверхвысоких частот. М.: Сов. радио, 1965. Т. 1.
3. Лебедев И. В. Техника и приборы СВЧ. М.: Высш. шк., 1970. Т. 1.
4. Милованов О. С., Собенин Н. П. Техника сверхвысоких частот. М.: Атомиздат, 1980.
5. Альтман Дж. Устройства СВЧ. М.: Мир, 1968.
6. Сазонов Д. М., Гридин А. Н., Мишустин Б. А. Устройства СВЧ. М.: Высш. шк., 1981.
7. Карлинер М. М. Электродинамика СВЧ: Курс лекций / Новосиб. гос. ун-т. Новосибирск, 1999.
8. Левин Л. Теория волноводов. М.: Радио и связь, 1981.
9. Черноусов Ю. Д., Иванников В. И., Шеболаев И. В. и др. Полосовые характеристики связанных резонаторов // РЭ. 2010. Т. 55, № 8. С. 923.
10. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике для инженеров и учащихся ВТУЗов. М.: Наука, 1981.

Материал поступил в редакцию 22.11.2010

Yu. D. Chernousov, A. E. Levichev, V. M. Pavlov, G. K. Shamuilov

THIN DIAPHRAGM IN THE RECTANGULAR WAVEGUIDE

This paper presents description of single diaphragm in the rectangular waveguide in the plane of the geometric diaphragm location. Relations to define diaphragm characteristics are obtained and compared with measured data. Such diaphragm presentation allows us relatively easy to describe bandpass characteristics of single cavity or system of several connected cavities by scattered wave method.

Keywords: diaphragm, presentation plane, transmission coefficient, reflection coefficient, phase.