

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРВИЧНЫХ СВЧ-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ЯЧЕЙКИ С ТОЛСТОСТЕННОЙ ДИАФРАГМОЙ С ПРЯМОУГОЛЬНЫМ ОКНОМ

Цель работы – оценка влияния диэлектрических свойств, формы, геометрических размеров вставок в прямоугольном окне толстостенной диафрагмы волноводного измерителя на коэффициенты отражения и передачи. Проведено компьютерное моделирование оценки влияния геометрических размеров, форм и диэлектрических свойств материала частичного заполнения волноводной измерительной ячейки на её резонансные свойства. В качестве аппарата реализации моделирования выбран метод частичных областей. Показано, что форма образца частичного диэлектрического заполнения в измерителях с прямоугольным окном вставки влияет на частотные характеристики измерительной ячейки. Использование диэлектрических образцов в форме параллелепипеда может повысить чувствительность первичных СВЧ-преобразователей по сравнению с использованием образцов цилиндрической формы, а гранично-допустимая площадь поперечного сечения исследуемых материалов не должна превышать 7 мм^2 .

Ціль роботи – оцінка впливу діелектричних властивостей, форми, геометричних розмірів вставок у прямокутному вікні товстостінної діафрагми хвилевідного вимірювача на коефіцієнти відбиття й передачі. Проведено комп'ютерне моделювання оцінки впливу геометричних розмірів, форм і діелектричних властивостей матеріалу часткового заповнення хвилевідної вимірювальної комірки на її резонансні властивості. У якості апарату реалізації моделювання обраний метод часткових областей. Показано, що форма зразка часткового діелектричного заповнення у вимірниках із прямокутним вікном вставки впливає на частотні характеристики вимірювальної комірки. Використання діелектричних зразків у формі паралелепіпеда може підвищити чутливість первинних НВЧ-перетворювачів у порівнянні з використанням циліндричної форми, а гранично-припустима площа поперечного перерізу досліджуваних матеріалів не повинна перевищувати 7 мм^2 .

The goal of this work is to estimate the effect of the dielectric properties, shape, and geometric dimensions of inserts in a rectangular window of a waveguide meter thick-walled diaphragm on the reflection and transmission coefficients. The estimation of the effects of the geometric dimensions, forms and dielectric properties of the material for partial filling the measuring waveguide cell on its resonance properties has been simulated on the computer. The method of partial domains has been chosen as an apparatus for modeling. The form of the sample of partial dielectric filling for meters with a rectangular window of an insert was demonstrated to affect the frequency characteristics of the measuring cell. Dielectric samples in the form of a parallelepiped may increase the sensitivity of primary microwave frequency converters in comparison with cylindrical samples. A limiting cross-section area for materials under consideration may not exceed 7 mm^2 .

Ключевые слова: сверхвысокие частоты, толстостенная диафрагма, волновод, коэффициенты отражения и передачи, относительная диэлектрическая проницаемость.

Введение. Тонкие волноводные диафрагмы с окнами приобрели широкое распространение в технике сверхвысоких частот (СВЧ). Они используются преимущественно как элементы фильтров или согласований [1]. При увеличении толщины диафрагмы в прямоугольном волноводе она приобретает вид вставки. При этом характер распространения электромагнитных волн в окне диафрагмы претерпевает качественные изменения: в этом окне могут наблюдаться резонансные явления. Поэтому основное внимание при исследованиях диафрагм как неоднородностей в запердельных волноводах уделялось частотным характеристикам коэффициентов отражения или передачи [2, 3]. В таких случаях частотные характеристики резонаторов зависят от толщины диафрагмы и формы окна. Кроме того, при наличии частичного диэлектрического заполнения окна на резонансные явления значительное влияние оказывают геометрические размеры, форма, местоположение и диэлектрические свойства такого заполнения.

Все это делает применение толстостенных диафрагм с окнами различной

формы перспективным для проведения измерений диэлектрической проницаемости различных материалов или изготовления контрольно-измерительной аппаратуры и элементов к ней для электромеханической перестройки СВЧ-устройств.

Цель исследований – оценка влияния диэлектрических свойств, формы, геометрических размеров вставок в прямоугольном окне толстостенной диафрагмы волноводного измерителя на коэффициенты отражения и передачи.

Постановка эксперимента. На практике для измерения диэлектрических свойств материалов применяются методы, использующие измерительную ячейку, в которой исследуемый образец полностью заполняет поперечное сечение прямоугольного волновода [1, 2].

Такой подход хорошо зарекомендовал себя при проведении лабораторных измерений, но является практически непригодным для проведения экспресс-измерений, так как конструктивное изготовление самого образца, точно повторяющего форму измерительной ячейки, требует достаточно длительного времени.

Более удобным представляется метод измерения, когда диэлектрик заполняет объем окна толстостенной диафрагмы частично. Однако резонансные свойства такой волноводной системы будут зависеть не только от свойств диэлектрика, но и от его размеров, формы, а также от места расположения в прямоугольном окне.

В качестве аппарата реализации моделирования был выбран метод частичных областей, который по существу представляет собой не один, а группу методов, в основе которых лежит разбиение исходной структуры на ряд частичных областей, в каждой из которых известно решение уравнений Максвелла. Размер областей должен быть достаточно мал для того, чтобы поле в её пределах можно было описать простой функцией или набором функций с неизвестными коэффициентами. Благодаря своей широкой универсальности метод получил широкое распространение при исследовании резонансных эффектов в коаксиальных резонаторах [3, 4].

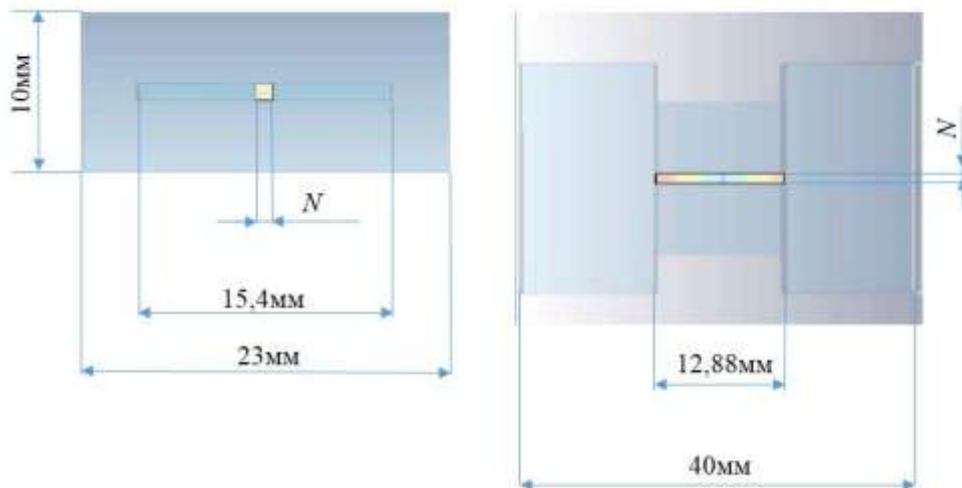
На данном этапе проводились исследования влияния размеров и формы диэлектрика внутри волноводной толстостенной вставки с прямоугольным окном на изменение структуры электромагнитного поля во вставке, а также на поведение коэффициентов передачи и отражения.

Продольное расположение диэлектрика внутри измерительной ячейки обусловлено наличием большего участка с линейным характером перестройки частоты, чем в случае, когда диэлектрик расположен поперек продольной оси прямоугольного окна, что обеспечивает преимущество при использовании в перестраиваемых СВЧ-устройствах.

Было проведено моделирование волноводной ячейки прямоугольного волновода, выполненного из материала с идеальной проводимостью. Основные параметры волновода приведены на рис. 1.

При моделировании рассматривался волновод сечением $23 \times 10 \times 40$ мм. Размеры толстостенной диафрагмы принимались равными $23 \times 10 \times 12,88$ мм.

Высота окна принималась равной высоте N диэлектрического материала заполнения для варианта с поперечным сечением в форме квадрата и диаметру N для сечения в форме круга.



N – параметр размера образца частичного диэлектрического заполнения

Рис. 1

Величина N при исследовании влияния размеров поперечного сечения диэлектрических образцов с поперечным сечением в форме квадрата на резонансные эффекты изменялась в диапазоне значений от 0,25 мм до 4 мм. Для случая исследования цилиндрических образцов диаметр поперечного сечения также изменялся в диапазоне значений от 0,25 мм до 4 мм.

Анализ. На рис. 2 представлено изображение распределения модуля электрического поля E_{11} внутри толстостенной диафрагмы на поверхности исследуемого диэлектрика для случая, когда он находится в центре волновода, с вариациями размеров и формы поперечного сечения (квадрат и диск) при относительной диэлектрической проницаемости материала $\epsilon = 10$.

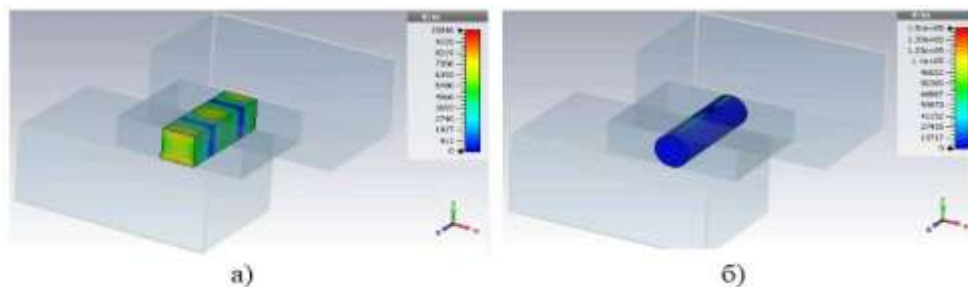


Рис. 2

Полученные в результате моделирования зависимости резонансных частот от размеров и диэлектрических свойств материалов для варианта с квадратным поперечным сечением исследуемого материала представлены на рис. 3.

Наличие на зависимостях резонансной частоты от относительной диэлектрической проницаемости образца $f_{\text{рез}}(\epsilon)$ линейных участков в области рабочего диапазона частот для данного типа волноводов (в пределах от 8 до 12,5 ГГц) является необходимым условием для построения работоспособных измерителей диэлектрических свойств материалов.

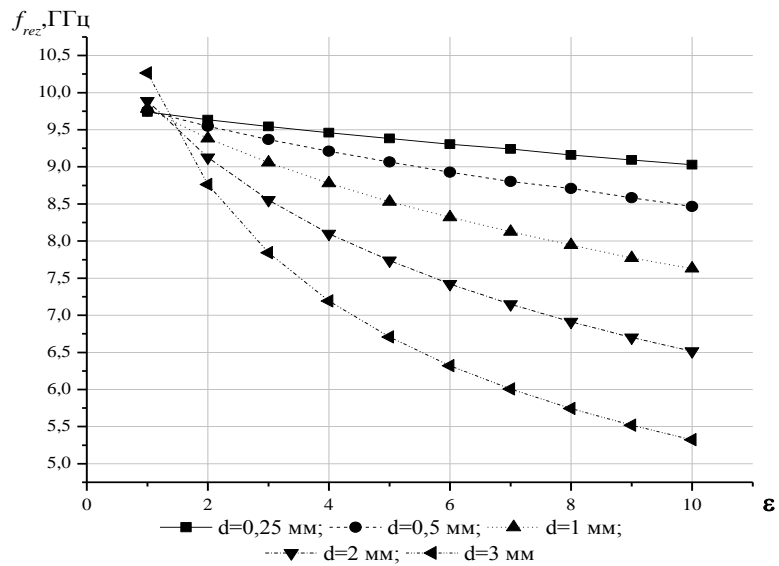


Рис. 3

На рис. 4 представлены результаты исследования зависимости резонансной частоты измерительной ячейки для диэлектрика в форме цилиндра. Диапазон изменений относительной диэлектрической проницаемости материалов, как и в предыдущем случае, составлял от 1 до 10.

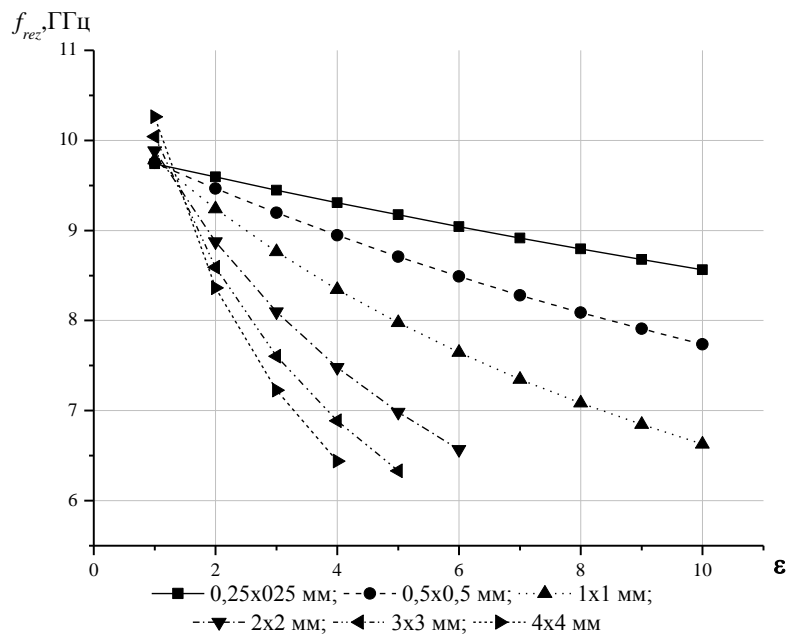


Рис. 4

Кроме этого, для цилиндров диаметром $d=2$ мм и $d=3$ мм и $\epsilon > 6$ также присутствуют резонансные явления, но они и находятся за пределом рабочего диапазона волноводной измерительной ячейки.

На рис. 5 для сравнения показаны частотные зависимости f_{rez} от относительной диэлектрической проницаемости ϵ для диэлектриков с квадратной

формой сечения (кривая 1) с размерами 0,25x0,25 мм и $f_{rez}(\epsilon)$ для диэлектриков с сечением в форме круга с диаметром 0,25 мм (кривая 2).

Использование образцов цилиндрической формы в первичных СВЧ-преобразователях, построенных на основе таких измерительных ячеек позволит охватить более широкий диапазон значений относительной диэлектрической проницаемости, что видно по меньшему углу наклона графика частотной зависимости $f_{rez}(\epsilon)$ (Рис. 5).

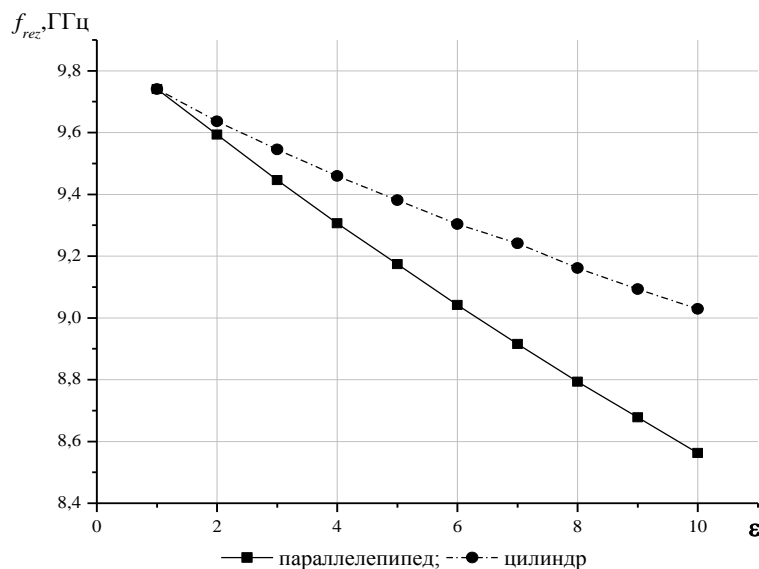


Рис. 5

Выводы. Построение элементов измерительной СВЧ-техники и первичных преобразователей для измерения комплексной диэлектрической проницаемости материалов с применением толстостенных волноводных вставок с частичным диэлектрическим заполнением зависит как от формы, так и от размеров площади поперечного сечения материалов диэлектрика. Для измерительных ячеек площадь поперечного сечения материалов не должна превышать 7 мм² (рис. 3 и рис. 4). Следует отметить, что использование диэлектрика в форме параллелепипеда может повысить чувствительность таких измерителей по сравнению с использованием диэлектриков цилиндрической формы.

1. Evanescent-mode bandpass filters based on ridged waveguide sections and inductive strips / A. Kirilenko, L. Rud, V. Tkachenko, D. Kulik // IEEE MTT-S, Microwave Symposium Digest. – 2001. – V. 2. – P. 1317 – 1320.
2. Craven G. F. Waveguide band-pass filters using vanescent modes / G. F. Craven // Electron. Lett. – 1966. – Vol. 2, No 7. – P. 251 – 252.
3. Шестопалов В. П. Резонансное рассеяние волн. Т. 2. Волноводные неоднородности / В. П. Шестопалов, А. А. Кириленко, Л. А. Рудь. – Киев : Наук. думка, 1986. – 216 с.
4. Вычислительные методы в современной радиофизике : [монография] / В. Ф. Кравченко, О. С. Лабунько, А. М. Лерер, Г. П. Синявский. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 469 с.

Институт технической механики
Национальной академии наук Украины и
Государственного космического агентства Украины,
Днепропетровск

Получено 12.05.2016,
в окончательном варианте 21.06.2016