

С.П. АРСЕНИЧЕВ, Д.А. ПОЛЕТАЕВ, канд. физ.-мат. наук,  
 Н.И. СЛИПЧЕНКО, д-р физ.-мат. наук, В.В. СТАРОСТЕНКО, д-р физ.-мат. наук,  
 Е.П. ТАРАН, канд. физ.-мат. наук, А.А. ШАДРИН, канд. техн. наук

## РЕЗОНАНСНЫЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛОДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЛАСТИНЫ В ВОЛНОВОДЕ

### Введение

В волноводной технике широко используются индуктивные и емкостные диафрагмы, резонансные окна и штыри [1 – 3]. Их свойства и характеристики достаточно хорошо изучены и нашли широкое применение в различных СВЧ устройствах. Если одиночная индуктивная диафрагма не замыкает широкие стенки волновода, т.е. имеет с ними емкостные зазоры, тогда такая структура может обладать резонансными свойствами. Данную структуру можно трактовать и как проводящую пластину, расположенную вблизи узкой стенки волновода.

В настоящее время широко используются пленки – проводящие, диэлектрические, полупроводниковые. Вместо проводящей пластины целесообразно взять проводящую пленку на диэлектрической подложке, т.е. исследовать дифракционные свойства металлодиэлектрической структуры (МДС) в волноводе. Подложка в этом случае, в отличие от тел с большой диэлектрической проницаемостью в волноводе [4, 5], играет вспомогательную роль.

Цель настоящей работы – исследование с помощью численных и экспериментальных методов резонансных свойств металлодиэлектрической пластины в волноводе.

### Численная модель

Численная модель предполагает решение дифракционной задачи для МДС в волноводе (рис.1). МДС в общем случае может быть произвольно ориентирована и примыкать к узкой стенке волновода. Исследования проводились для трех наиболее характерных ориентаций (рис.2). МДС располагалась на расстоянии  $L$  от узкой стенки волновода.

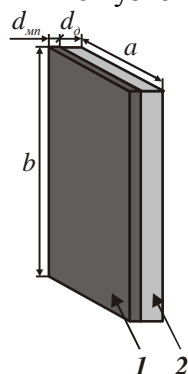


Рис.1. Металлодиэлектрическая структура

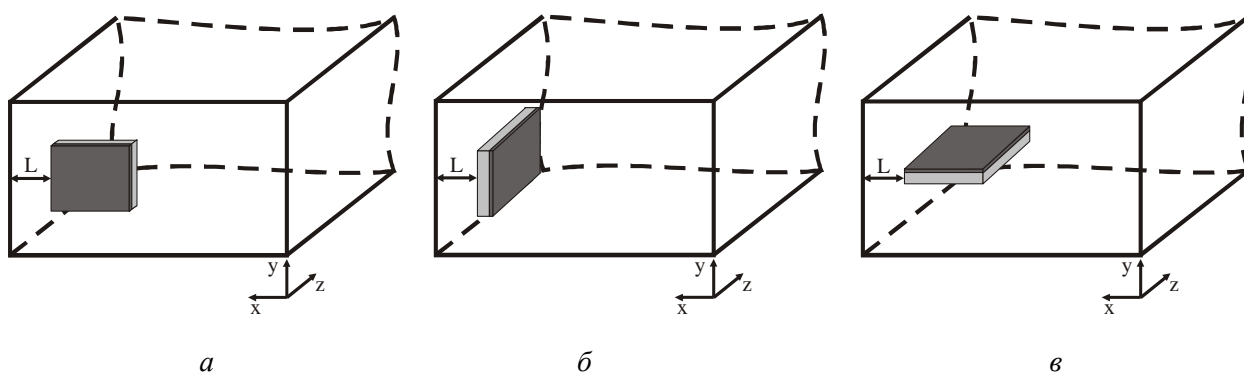


Рис.2. Ориентации МДС в волноводе

Основой численной модели являлось волновое уравнение, которое для МДС в волноводе решалось с помощью декомпозиционного метода [6]. При численной реализации область с МДС и волноводом с высшими типами волн ограничивалась плоскостями  $S_1$  и  $S_2$  и представлялась в виде совокупности кубических автономных блоков, которые соединялись виртуальными волноводными каналами (рис.3) [6]. Размеры автономных блоков изменялись в рассматриваемой области для учета особенностей рассматриваемой структуры (адаптивная сетка). Каждый кубический автономный блок описывался двухмодовой комплексной шестиканальной матрицей рассеяния, которая представляла собой реакцию автономного блока на падающую электромагнитную волну заданной поляризации, распространяющуюся по соответствующему виртуальному волноводному каналу [6]. Коэффициенты матрицы рассеяния определялись геометрическими и электрофизическими параметрами каждого автономного блока [6]. На границах автономных блоков удовлетворялись соответствующие граничные условия для полей [2, 6], стенки волновода предполагались идеально проводящими.

При построении декомпозиционной схемы нерегулярные включения в волноводный тракт представлялись совокупностью однородных автономных блоков, блоков «короткого замыкания», описывающих реакцию проводящей пленки на падающую электромагнитную волну и блоков перехода, служащих для согласования структур с различными электрофизическими свойствами.

Пример пространственной декомпозиции моделируемой области в поперечном сечении приведен на рис.4. Для определения общей матрицы рассеяния всей структуры использовалась операция рекомпозиции [6]. Значения коэффициентов отражения  $S_{11}$  и прохождения  $S_{12}$  в дальней зоне являлись исходными для вычисления коэффициентов стоячей волны ( $K_{CB}$ ) и ослабления ( $A$ ):

$$K_{CB} = \frac{1 + S_{11}}{1 - S_{11}}; \quad A = 20 \cdot \lg(S_{12}). \quad (1)$$

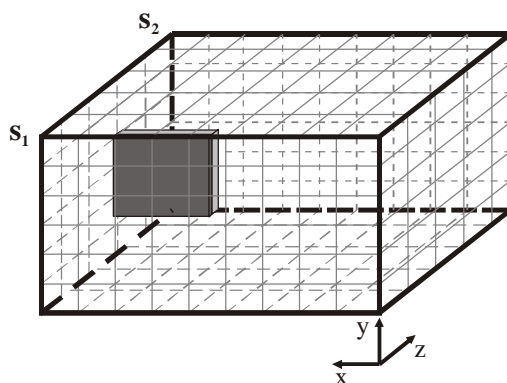


Рис.3. Моделируемая область в виде кубических автономных блоков

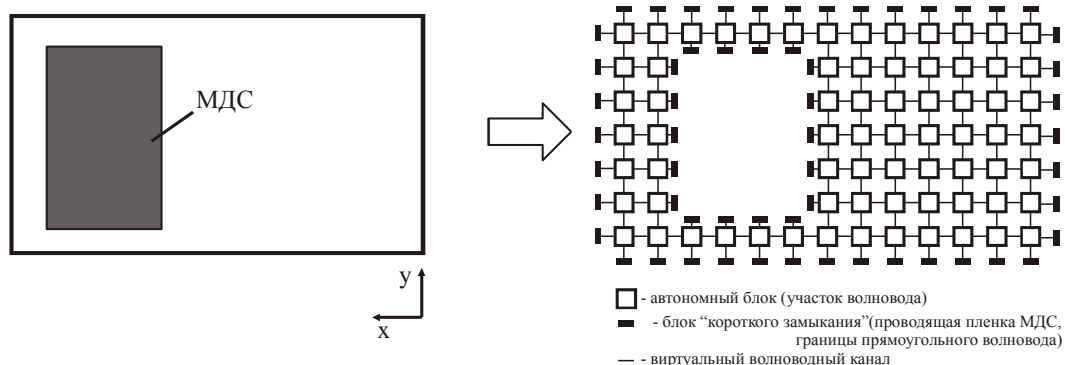


Рис.4. Декомпозиционная схема моделируемой области (в плоскости XY)

## Экспериментальные исследования

Экспериментальные исследования проводились на панорамном измерителе коэффициента стоячей волны  $K_{CB}$  и ослабления  $A$  – Р2-56.  $K_{CB}$  и  $A$  измерялись в диапазоне частот  $f = 3,0 \dots 4,1$  ГГц в волноводе с поперечным сечением  $34 \times 72$  мм. В экспериментальных исследованиях резонансных свойств металлодиэлектрических структур в волноводе МДС представляли собой подложки из оргстекла ( $\epsilon = 3,5$ ) и стеклотекстолита ( $\epsilon = 4,5$ ), на которые наклеивалась фольга из алюминия или меди. МДС фиксировались в волноводе в пенопластовой вставке. Особых требований при экспериментальном решении дифракционной задачи ни к подложке, ни к фольге не предъявлялось. Зависимости  $K_{CB} = K_{CB}(f)$  и  $A = A(f)$  позволяют судить о резонансных свойствах МДС в волноводе.

### Резонансные свойства металлодиэлектрической пластины в волноводе

Резонансные свойства системы характеризуются резонансной частотой  $f_0$  и добротностью  $Q$ . Нас будут интересовать в основном сама возможность резонанса для МДС в волноводе и резонансная частота. Эти характеристики зависят от размеров МДС ( $a \times b$ ), расстояния МДС от узкой стенки волновода, ориентации МДС (рис.1, 2), проводимости металлизации, толщины пленки и подложки, диэлектрической проницаемости подложки.

На рис.5 представлена зависимость коэффициента стоячей волны от частоты для трех размеров МДС:  $20 \times 20$ ,  $15 \times 20$  и  $10 \times 20$  мм при ориентации в волноводе, как показано на рис.2, а. Расстояние от узкой стенки волновода  $L$  выбрано 10 мм. На рис.5 дискретными точками показаны экспериментальные значения, сплошные линии соответствуют результатам численного расчета.

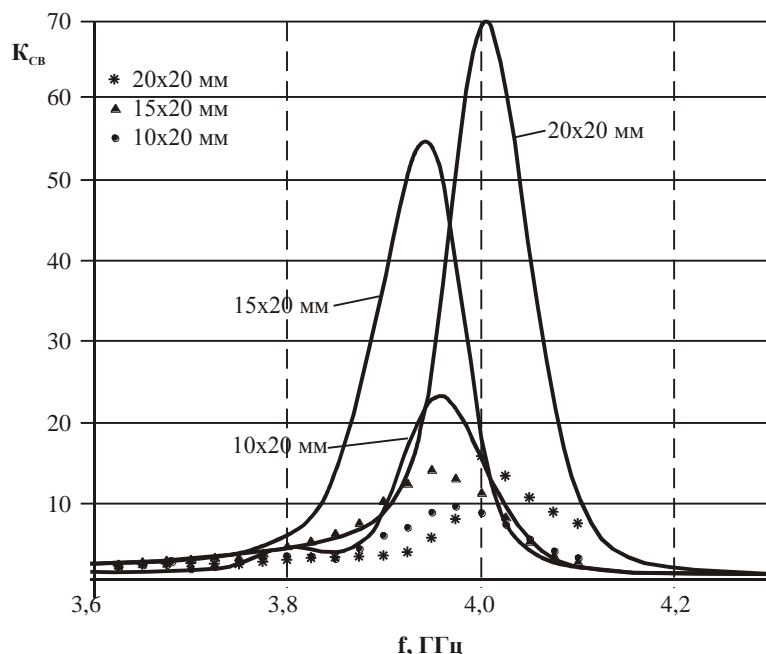


Рис.5. Зависимость  $K_{CB}$  от частоты для МДС разных размеров

Теоретические и экспериментальные зависимости качественно близки друг к другу. Отличие в теоретических значениях  $K_{CB}$  от подобных экспериментальных значений объясняется тем, что в расчетах проводимость стенок волновода предполагалась бесконечной. По резонансной частоте различие между экспериментальными значениями и теоретическими не превышает 7%. Из рисунка видно, что размер стороны  $a$  МДС (рис.1) оказывает нелинейное воздействие на резонансную частоту системы волновод-МДС. Это обусловлено сложной

зависимостью сосредоточенных емкости и индуктивности от геометрических размеров металлодиэлектрической структуры в волноводе. Следует отметить уменьшение  $K_{СВ}$  с уменьшением размера МДС (рис.5). В других ориентациях МДС в волноводе (рис.1, б, в) резонансные явления в выбранном частотном диапазоне отсутствуют.

На рис.6 представлена зависимость  $K_{СВ}$  на резонансной частоте от расстояния  $L$  (рис.1). Дискретными точками показаны экспериментальные значения, сплошные линии соответствуют результатам численного расчета.

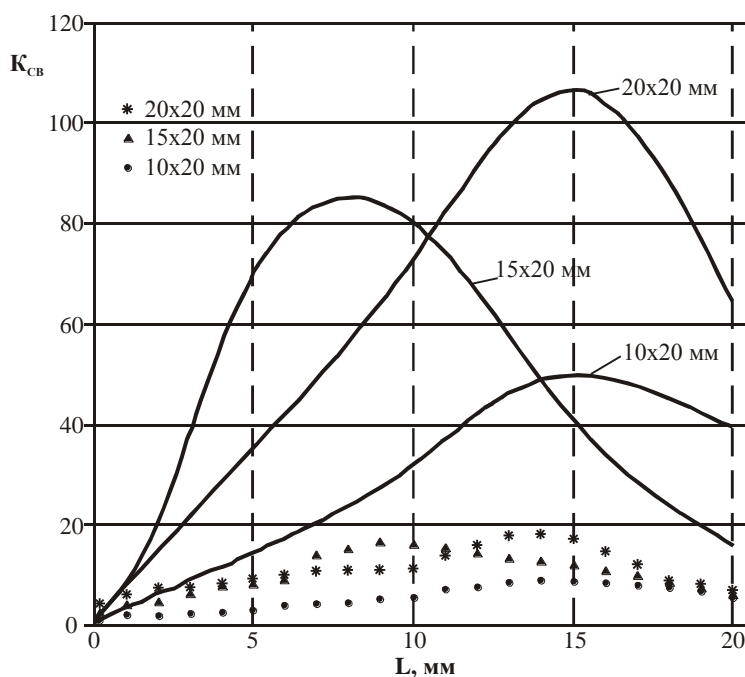


Рис.6. Зависимость  $K_{СВ}$  от расстояния до узкой стенки волновода

Как и в случае зависимости  $K_{СВ} = K_{СВ}(f)$  (рис.5) теоретические и экспериментальные зависимости  $K_{СВ} = K_{СВ}(L)$  качественно близки друг к другу. Резонансные свойства МДС в волноводе в значительной степени определяются проводимостью стенок волновода, что следует из количественного сравнения теоретических и экспериментальных данных.

Максимальные значения  $K_{СВ}$  (рис.6) нелинейно зависят от расстояния до узкой стенки волновода  $L$  и размеров  $a \times b$  МДС, что обусловлено соответствующей зависимостью индуктивности и емкости МДС в волноводе. Максимум коэффициента стоячей волны (добротности) для разных размеров МДС приходится на расстояние  $L = 7 \dots 17$  мм.

На рис.7 представлена зависимость резонансной частоты от расстояния  $L$ . Из рисунка видно, что теоретические и экспериментальные данные качественно коррелируют между собой.

Аналогичные зависимости были сняты экспериментально и рассчитаны численными методами для ослабления  $A$ . В целом эти зависимости аналогичны приведенным на рис.5 – 7. Изменения диэлектрической проницаемости в указанных выше пределах практически не влияют на зависимости, приведенные на рис.5 – 7.

По своим характеристикам МДС в волноводе аналогична параллельному колебательному контуру. Эти свойства можно использовать для волноводных фильтров и аттенюаторов.

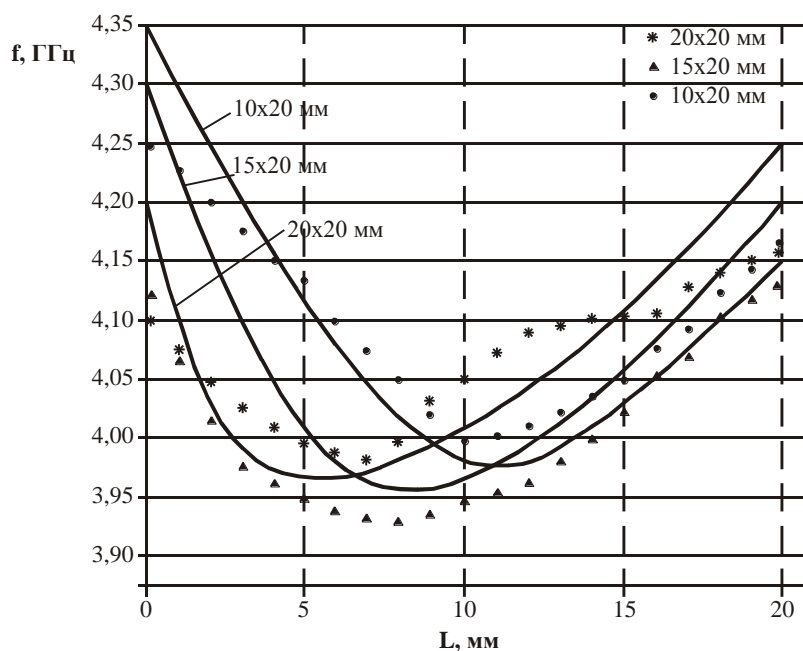


Рис.7. Зависимость резонансной частоты от расстояния до узкой стенки волновода

### Заклучение

Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований свойств металлодиэлектрической структуры в волноводе. Проведенные исследования показали, что МДС или проводящая пластина вблизи узкой стенки в волноводе обладают резонансными свойствами, что можно использовать в волноводной технике.

**Список литературы:** 1. Лебедев, И.В. Техника и приборы СВЧ. – М. : Высш. шк., 1970. – 440 с. 2. Кураев, А.А., Попкова, Т.Л., Синицын, А.К. Электродинамика и распространение радиоволн. – Минск : Бестпринт, 2004. – 358 с. 3. Makimoto, M. Microwave resonators and filters for wireless communication. – Berlin: Springer, 2000. – 168 p. 4. Хижняк, Н.А., Козарь, А.И. Резонансное рассеяние электромагнитных волн на диэлектрической сфере в волноводе // Известия вузов. Радиоэлектроника. – 1975. – Т.18, № 1. – С. 29 – 35. 5. Глазун, В.В., Колесников, В.С., Моденов, В.П., Пирогов, Ю.А. Резонансно-дифракционные свойства диэлектрического параллелепипеда в прямоугольном волноводе // Известия вузов СССР. Серия Радиофизика. – 1986. – Т.26, №12. – С.1509-1511. 6. Никольский, В.В., Никольская, Т.И. Декомпозиционный подход к задачам электродинамики. – М. : Физматлит, 1983. – 304 с.

Таврический национальный университет  
им. В.И. Вернадского  
Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 09.09.2012