

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.

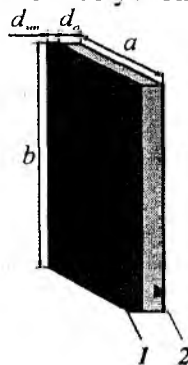


Рис.1. Металлодиэлектрическая структура

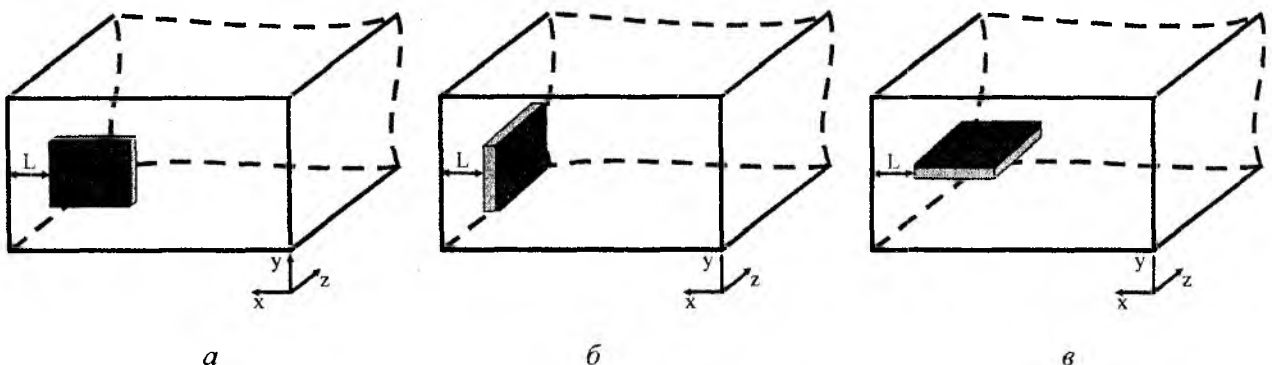


Рис.2. Ориентации МДС в волноводе

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 шести-канальной 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 ($K_{СВ}$) и ослабления (A):

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

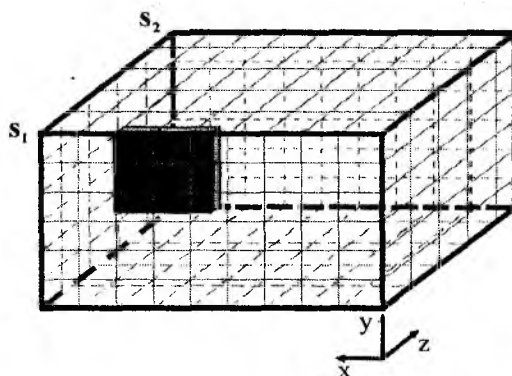


Рис.3. Моделируемая область в виде кубических автономных блоков

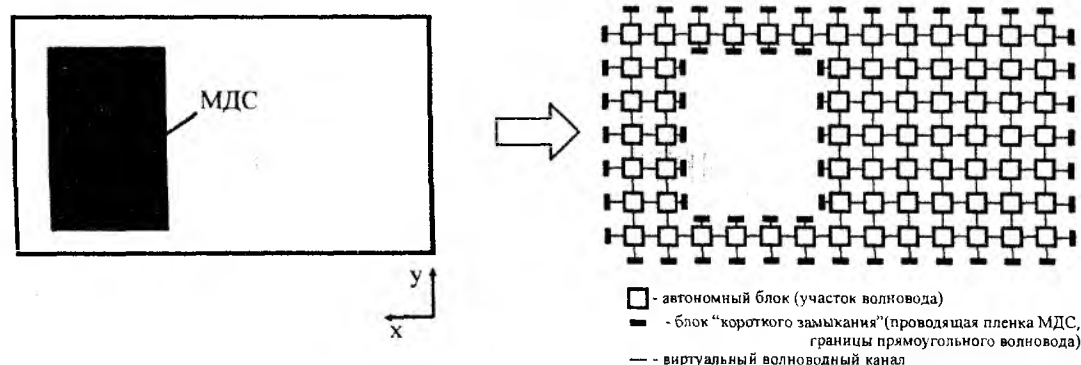


Рис.4. Декомпозиционная схема моделируемой области (в плоскости XY)

Экспериментальные исследования

Экспериментальные исследования проводились на панорамном измерителе коэффициента стоячей волны $K_{СВ}$ и ослабления A – Р2-56. $K_{СВ}$ и A измерялись в диапазоне частот $f = 3,0 \dots 4,1$ ГГц в волноводе с поперечным сечением 34×72 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 $K_{СВ}=K_{СВ}(f)$ 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: 20×20 , 15×20 и 10×20 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.

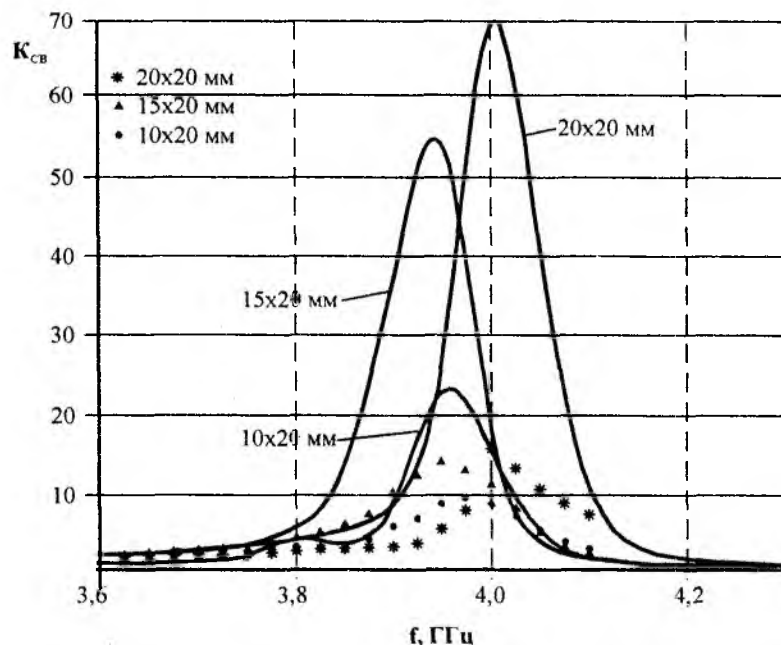


Рис.5. Зависимость $K_{СВ}$ от частоты для МДС разных размеров

Теоретические и экспериментальные зависимости качественно близки друг к другу. Отличие в теоретических значениях $K_{СВ}$ 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_{CB} 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_{CB} на резонансной частоте от расстояния L (рис.1). Дискретными точками показаны экспериментальные значения, сплошные линии соответствуют результатам численного расчета.

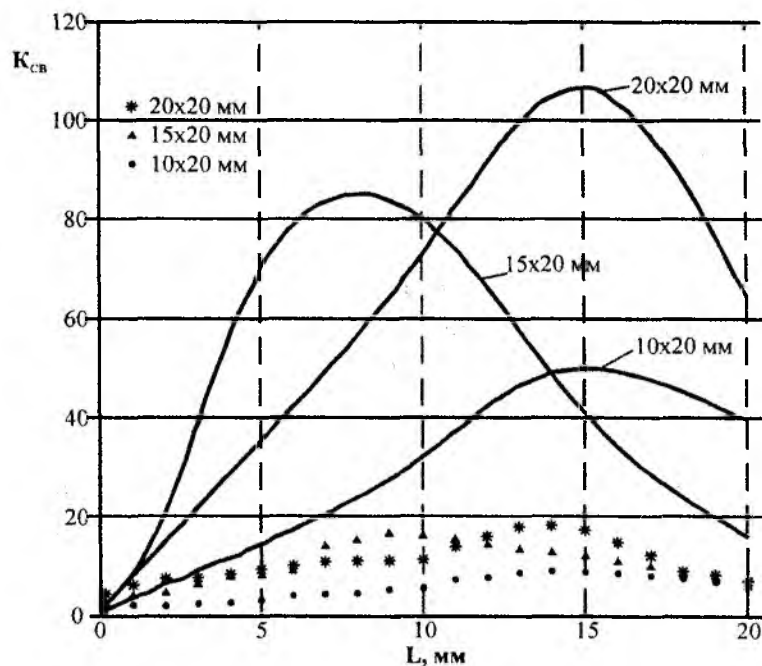


Рис.6. Зависимость K_{CB} от расстояния до узкой стенки волновода

Как и в случае зависимости $K_{CB} = K_{CB}(f)$ (рис.5) теоретические и экспериментальные зависимости $K_{CB} = K_{CB}(L)$ 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_{CB} (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 аттенуаторов.

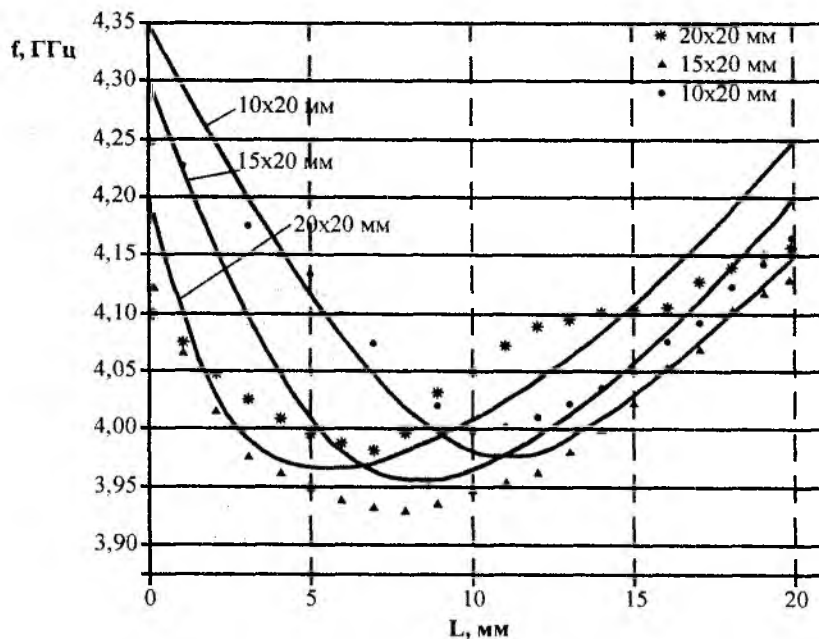


Рис.7. Зависимость резонансной частоты от расстояния до узкой стенки волновода

Заключение

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., Сеницын, 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