

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ЗОНД НА ОСНОВЕ ЗАПРЕДЕЛЬНОГО ВОЛНОВОДА

Бондаренко И.Н., Галич А.В., Шахов А.В.

Харьковский национальный университет радиоэлектроники

Харьков, пр. Ленина, 14, 61166, Украина

тел.: (057) 702-13-62, e-mail: mepu@kture.kharkov.ua

The researches of the possibilities of using irregular with the area cutoff waveguides with dielectric and magnetic filling to create microprobe structures of local microwave diagnostics of materials and objects are carried out. Carried out numerical evaluation studies of the characteristics of the prototype microwave microprobe based on a rectangular waveguide, the formulas for the calculation of the parameters are given, tested technique of modeling the considered structures.

Введение. Одним из широко распространенных методов бесконтактной локальной диагностики материалов, сред и различных структур является использование устройств микроволновой техники, обеспечивающих формирование локализованных электромагнитных полей в области взаимодействия с локальным участком или малоразмерным объектом диагностики.

Обычно такая задача решается с помощью различных видов зондовых или микрозондовых устройств, сопрягаемых либо с линиями передачи, либо с резонаторными структурами. Достаточно широко теоретически и экспериментально развита также практика использования микроволновых апертурных резонаторных измерительных преобразователей [1, 2].

Общим недостатком упомянутых устройств является необходимость как конструктивного, так и электродинамического сопряжения зондовых структур с измерительными цепями или измерительными преобразователями. Причем, с уменьшением геометрических размеров зонда, напрямую связанного с повышением локальности формируемых полей, возрастают конструктивные и технологические сложности их объединения с элементами и устройствами измерительной схемы.

В данной работе предлагается указанные проблемы решать с помощью использования запердельных нерегулярных волноводов, заполняемых материалами с такими величинами диэлектрической и магнитной проницаемости, которые позволяют снимать запердельность при сохранении малых геометрических размеров выходной части зонда и необходимой структуры поля.

Основная часть.

В качестве объекта исследования был выбран запердельный нерегулярный волновод на основе волновода прямоугольного сечения. Достоинствами такого волновода являются: возможность работы на одном основном типе волны H_{10} , фиксированная поляризация распространяющейся электромагнитной волны, независимость типа волны, поляризации и условий распространения от размеров узкой стенки волновода, возможность регулирования степени запердельности изменением размеров широкой стенки волновода.

Нерегулярный волновод упрощенно можно представить в виде, показанном на рис.1. Амплитуда волны в запердельном волноводе ($\lambda > \lambda_{кр}$) уменьшается по экспоненциальному закону:

$$E(z) = E_0 \exp\left(-\frac{2\pi}{\lambda_{кр}} \sqrt{1 - \lambda_{кр}^2 / \lambda^2} \cdot z\right), \quad (1)$$

где E_0 – амплитуда волны на входе запердельного волновода; $\lambda_{кр}$ – критическая длина волны запердельного волновода на рабочем типе волны; λ – рабочая длина волны; $E(z)$ – амплитуда волны при некотором значении координаты z .

Величины затухания в таком запердельном прямоугольном волноводе регулируется с помощью диэлектрика, вводимого в запердельный участок. При этом величина диэлектрической проницаемости ε определяется из условия:

$$\varepsilon = (\lambda/2a)^2. \quad (2)$$

Переход от стандартного волновода к запердельному осуществляется плавно, чтобы избежать нежелательных дополнительных переотражений в линиях связи. Волновод делится на два отрезка, один из которых расположен до плоскости отсечки и не вносит заметного затухания в амплитуду распространяющейся волны, и второй, который расположен за плоскостью отсечки и является нерегулярным запердельным волноводом. Координата плоскости отсечки определяется из условия равенства $\lambda_{кр}$ рабочей длине волны λ для данного сечения волновода. Из рис.1 можно определить, что плоскость отсечки будет расположена на расстоянии от начала нерегулярного волновода $(2a - \lambda)/4tg\theta$.

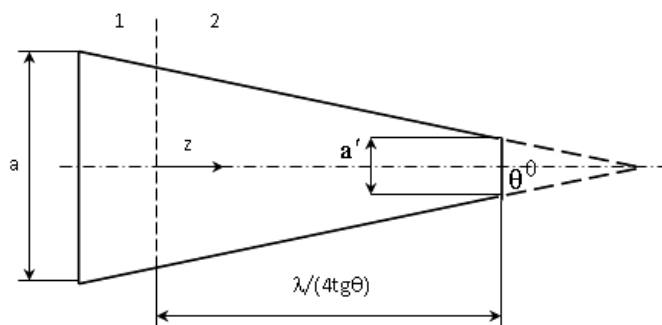


Рис. 1. Схема нерегулярного волновода

Минимальный размер апертуры зондовой структуры на основе прямоугольного волновода определяется из соотношения (2) при заданном значении диэлектрической проницаемости материала заполнения. На рис. 2 представлен график зависимости, с помощью которого можно определить значения величины диэлектрической проницаемости для конкретной апертуры зондовой структуры в зависимости от рабочей длины волны. На рис. 3 представлены зависимости длин нерегулярных участков волновода (z) от рабочей длины волны (λ) при разных углах раскрытия апертуры.

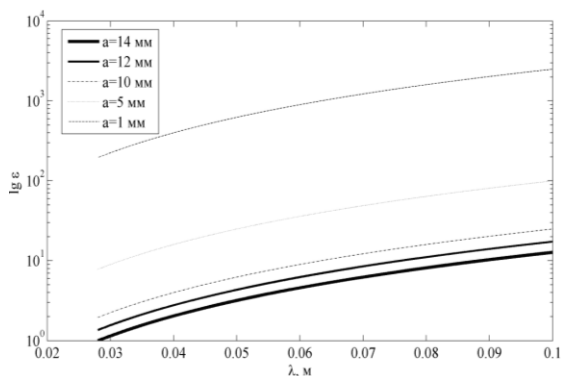


Рис.2. Зависимость величины ε от λ при заданных размерах апертуры зондовой структуры

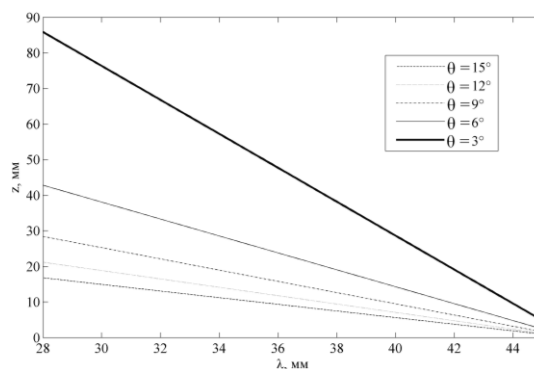


Рис.3. Зависимость длины нерегулярного участка волновода (z) от λ при разных углах раскрытия апертуры

Если представить нерегулярный запердельный волновод в виде большого количества соединенных друг с другом регулярных волноводов длиной Δz , то для расчета коэффициента затухания можно использовать следующее соотношение [3]:

$$\alpha_i = 20 \lg \left\{ \exp \left\{ - \sum_{k=1}^n \frac{\pi}{(\lambda/4 \operatorname{tg} \theta - k \Delta z) \operatorname{tg} \theta} \sqrt{1 - \frac{[4(\lambda/4 \operatorname{tg} \theta - k \Delta z) \operatorname{tg} \theta]^2}{\lambda^2}} \cdot \Delta z \cdot 2 \right\} \right\}, \quad (3)$$

где $n = z/\Delta z$.

На рис.4 приведены графики $\alpha(z)$, вычисленные для запердельных нерегулярных волноводов по формуле (3). При этом: $\lambda = 32$ мм, $\Delta z = 1$ мм, $a = 23$ мм, $\theta = 15^\circ, 12^\circ, 9^\circ, 6^\circ, 3^\circ$.

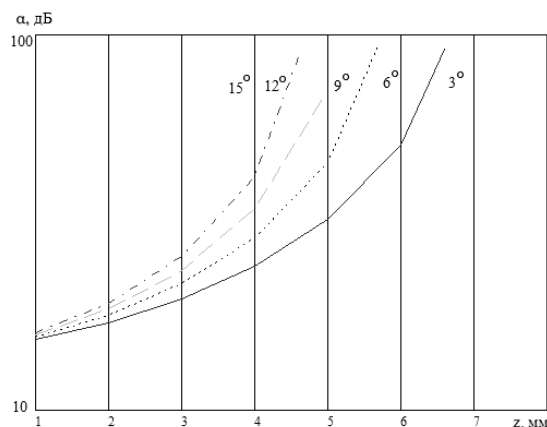


Рис.4. Графики зависимости коэффициента затухания от длины запердельного участка нерегулярного волновода

Как видно из графиков (рис.4) из-за высокого затухания в запердельном волноводе потери энергии достигают уровня $\sim 80-90$ дБ. Чем меньше угол раскрытия апертуры и больше длина нерегулярного участка волновода, тем уровень затухания выше.

Численное моделирование рассматриваемых волноводных структур с запердельными участками позволяет выявить структуру электромагнитного поля и коэффициенты отражения и передачи (см. рис.5 и 6, 7).

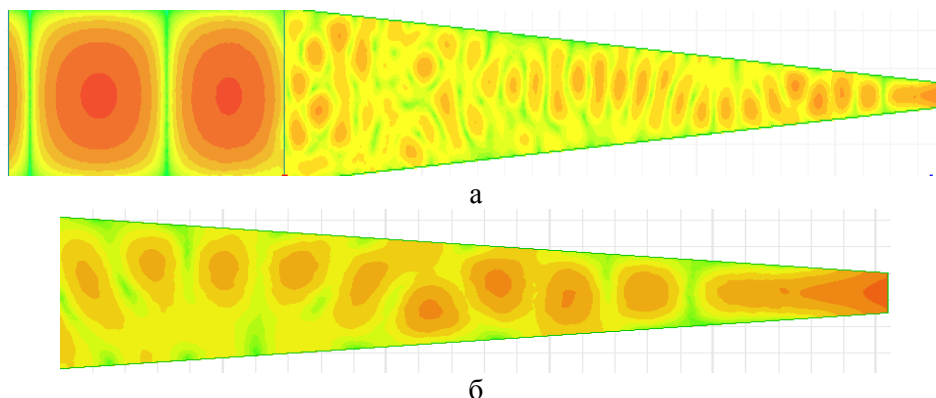


Рис.5. Распределение электромагнитного поля для нерегулярного волновода (23x10) – (3x3) при $\theta = 9^\circ$ и $\epsilon = 18$ (длина нерегулярной части волновода ~ 120 мм):
а – устройство в целом, б – наконечник

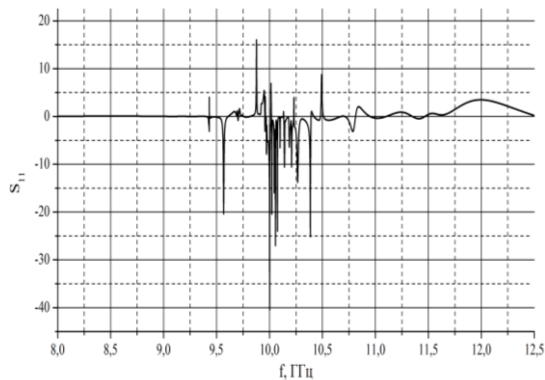


Рис.6. $S_{11}(f)$ для нерегулярного волновода (рис.5)

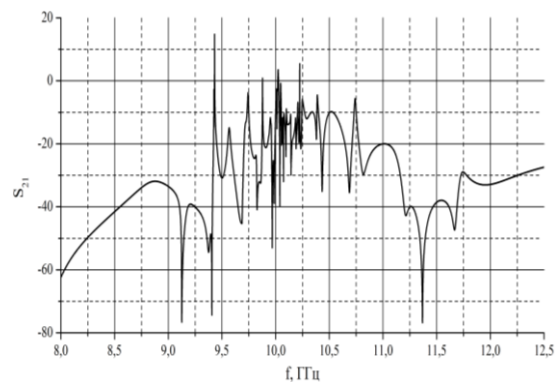


Рис.7. $S_{21}(f)$ для нерегулярного волновода (рис.5)

Из рис. 5-7 видно, что на узком конце волновода формируется поле с повышенной напряженностью, однако в регулярной части возникают стоячие волны, а коэффициенты отражения и передачи в рабочем диапазоне имеют сильно изрезанные характеристики. Это обусловлено, во-первых, выбором диэлектрика с пониженным значением ϵ (по формуле (2) для таких размеров величина ϵ должна быть ~ 100) и, во-вторых, резким несогласованным переходом в регулярной и не запредельной части волновода от области без заполнения к области с заполнением.

Учет этих факторов должен в значительной степени снять выявленные недостатки рассматриваемого устройства. В частности моделирование устройства при заполнении его запредельной части диэлектриком с большей величиной ϵ (или μ) приводит к существенному сглаживанию частотных характеристик коэффициентов отражения и передачи.

Выводы. Рассматриваемые в работе нерегулярные волноводные структуры с запредельностью, снимаемой с помощью диэлектрического или магнитного заполнения, представляются достаточно перспективными для создания микрозондовых структур для локальной микроволновой бесконтактной диагностики различных материалов и объектов.

Достоинством этих устройств является их конструктивная простота, а также возможность формирования в выходной апертуре фиксированной поляризации электромагнитного поля.

К недостаткам (в перспективе преодолимым) можно отнести необходимость подбора материала заполнения с требуемыми характеристиками и принятие мер по согласованию вставки с регулярной частью волновода.

Список литературы

1. Гордиенко, Ю. Е. Приближение заданного поля в задачах определения характеристик резонаторных СВЧ-датчиков апертурного типа / Ю. Е. Гордиенко, А. Ю. Панченко, Р. С. Фар // Радиотехника. Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – X., 1998. – Вып. 107. – С. 93–103.
2. Інтелектуальні вимірювальні системи на основі мікроелектронних датчиків нового покоління: монографія / Я. І. Лепіх, Ю. О. Гордієнко, С. В. Дзядевич та ін. ; за ред. Я. І. Лепіха. – Одеса : Астропринт, 2011. – 352 с.
3. Бондаренко, И.Н. Регулируемые элементы связи на основе запредельных волноводов / И.Н. Бондаренко, Н.О. Гнесь, А.С. Гнесь // Радиотехника. Респ. межвед. науч.-техн. сб. – X., 1986. – Вып. 76. – С. 114–119.