

МИКРОВОЛНОВЫЙ ЗОНД НА ОСНОВЕ КОМПЕНСИРОВАННОГО НЕРЕГУЛЯРНОГО ЗАПРЕДЕЛЬНОГО ВОЛНОВОДА

БОНДАРЕНКО И.Н., ГАЛИЧ А.В.
(Радиотехника)

Исследованы возможности применения нерегулярных за- пределных структур с диэлектрическим и магнитным за- полнением для создания зондов локальной СВЧ- диагностики материалов и объектов. Проведены численные исследования характеристик СВЧ зондов на основе запре- дельного прямоугольного волновода.

1. Введение. В последние годы активно развиваются методы локальной диагностики материалов, сред и структур, типичными представителями которых яв- ляются различные методы сканирующей зондовой микроскопии [1]. Электромагнитные поля микровол- ного диапазона также могут служить эффективным инструментом для бесконтактной локальной диагно- стики при использовании устройств микроволновой техники, обеспечивающих формирование локализо- ванных электромагнитных полей в области взаимо- действия с локальным участком или малоразмерным объектом диагностики [2, 3].

Обычно такая задача решается с помощью различных видов зондовых или микрозондовых устройств, со- прягаемых либо с линиями передачи, либо с резона- торными структурами. Достаточно широко теорети- чески и экспериментально развита также практика использования микроволновых апертурных резона- торных измерительных преобразователей [4, 5].

Общим недостатком упомянутых устройств является необходимость как конструктивного, так и электро- динамического сопряжения зондовых структур с из- мерительными цепями или измерительными преобра- зователями. Причем, с уменьшением геометрических размеров зонда, напрямую связанного с повышением локальности формируемых полей, возрастают кон- структивные и технологические сложности их объ- единения с элементами и устройствами измеритель- ной схемы.

В данной работе предлагается указанные проблемы решать с помощью использования за- пределных не- регулярных волноводов, заполняемых материалами с такими величинами диэлектрической и магнитной про- ницаемости, которые позволяют снимать за- пределность при сохранении малых геометрических размеров выходной части зонда и необходимой структуры поля.

2. Основная часть.

В качестве объекта исследования был выбран запре- дельный нерегулярный волновод на основе волновода прямоугольного сечения. Достоинствами такого вол- новода являются: возможность работы на одном ос- новном типе волны H_{10} , фиксированная поляризация распространяющейся электромагнитной волны, неза- висимость типа волны, поляризации и условий рас- пространения от размеров узкой стенки волновода, возможность регулирования степени за- пределности изменением размеров широкой стенки волновода.

Нерегулярный волновод упрощенно можно предста- вить в виде, показанном на рис.1. Амплитуда волны в за- пределном 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 за- пределного волновода; $\lambda_{кр.}$ – критическая длина волны за- пределного волновода на рабочем типе волны; λ – ра- бочая длина волны; $E(z)$ – амплитуда волны при неко- тором значении координаты z .

Величины затухания в таком за- пределном прямо- угольном волноводе регулируется с помощью диэлек- трика, вводимого в за- пределный участок. При этом величина диэлектрической проницаемости ϵ опреде- ляется из условия:

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

Переход от стандартного волновода к за- пределному осуществляется плавно, чтобы избежать нежелатель- ных дополнительных переотражений в линиях связи. Волновод делится на два отрезка, один из которых расположен до плоскости отсечки и не вносит замет- ного затухания в амплитуду распространяющейся волны, и второй, который расположен за плоскостью отсечки и является нерегулярным за- пределным вол- новодом. 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 $(2a - \lambda)/4tg\theta$.

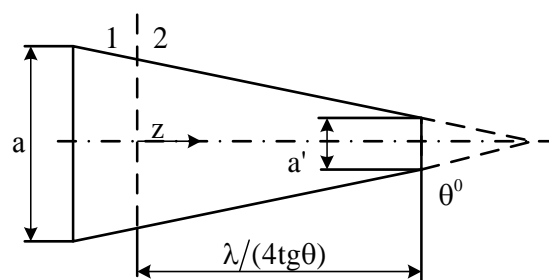


Рис. 1. Схема нерегулярного волновода

Минимальный размер аперттуры зондовой структуры на основе прямоугольного волновода определяется из соотношения (2) при заданном значении диэлектриче- ской (или магнитной) проницаемости материала за- полнения. На рис. 2 представлен график зависимости, с помощью которого можно определить значения ве- личины диэлектрической (или магнитной) проницае- мости для конкретной аперттуры зондовой структуры в зависимости от рабочей длины волны. Из графиков рис. 2 следует, что при размерах апертур $a' = 1 \dots 5$ мм величина проницаемостей заполнения превышает значение 10 (максимальное для твердых технологи- чных диэлектриков) и, соответственно, в этих случаях необходимо выбирать заполнение с $\mu > 10$. На рис. 3 представлены зависимости длин нерегулярных участ-

ков волновода (z) от рабочей длины волны (λ) при разных углах раскрытия апертуры.

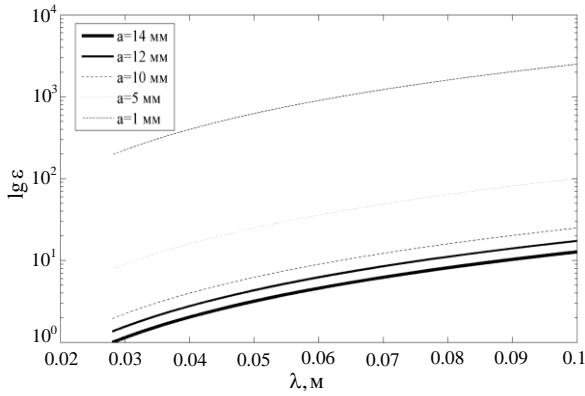


Рис.2. Зависимость величины ϵ (или μ) от λ при заданных размерах апертуры зондовой структуры

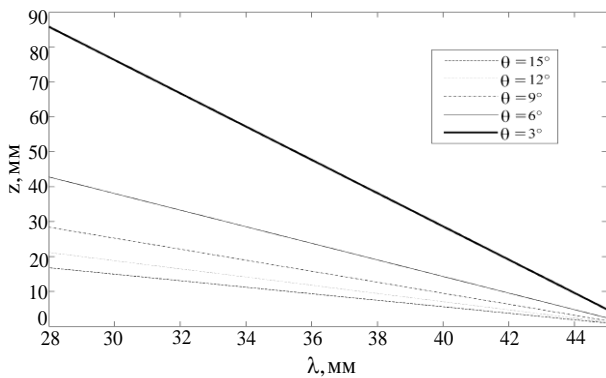


Рис.3. Зависимость длины нерегулярного участка волновода (z) от λ при разных углах раскрытия апертуры

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 [6]:

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

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, $\theta = 15^\circ, 12^\circ, 9^\circ, 6^\circ, 3^\circ$.

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. Более того, уровень затухания $\sim 80-90$ дБ достигается при длинах запердельных участков значительно меньших, чем определяются из графиков рис. 3.

Численное моделирование рассматриваемых волноводных структур с запердельными участками позволяет выявить коэффициенты отражения и передачи (см. рис.5-10) [7].

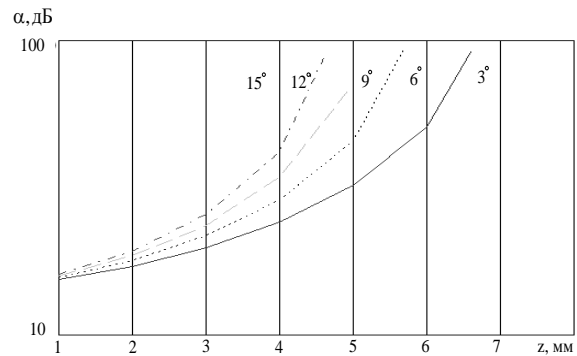


Рис.4. Графики зависимости коэффициента затухания от длины запердельного участка нерегулярного волновода

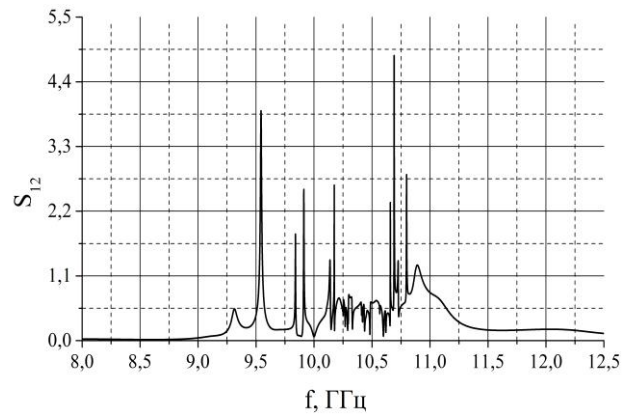


Рис.5. Коэффициент передачи для нерегулярного волновода $(23 \times 10) - (3 \times 3)$ при ϵ (или μ) = 25

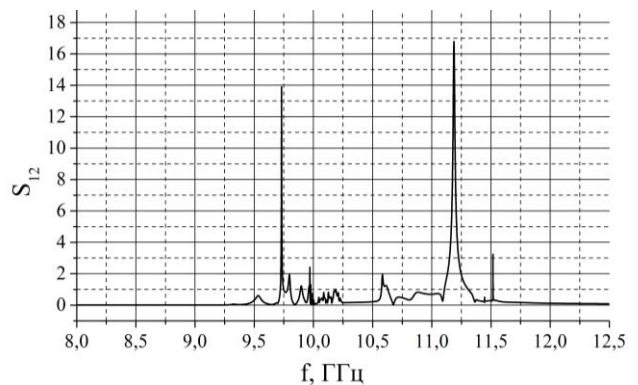


Рис.6. Коэффициент передачи для нерегулярного волновода $(23 \times 10) - (3 \times 3)$ с клиновидным согласователем при ϵ (или μ) = 25

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 более) и, во-вторых, резким

несогласованным переходом в регулярной и не за­пре­дельной части волновода от области без заполнения к области с заполнением.

Использование клиновидного согласователя позволя­ет в некоторых случаях значительно уменьшить ам­плитуду стоячих волн в неза­пре­дельной области и повысить напряженность поля в узкой части за­пре­дельного участка.

При увеличении значения проницаемости (ϵ или μ или $\epsilon \cdot \mu$) заполнения наблюдается сужение рабочего диапазона и уменьшение количества резонансных откликов.

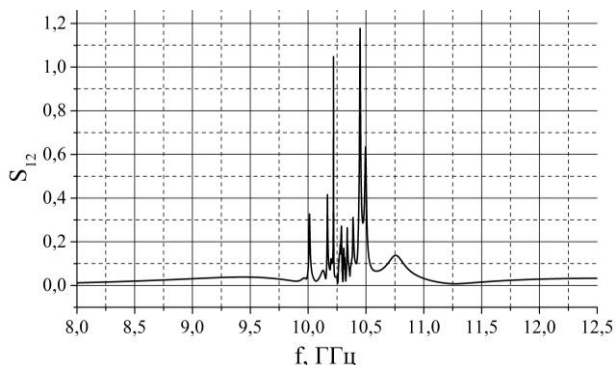


Рис.7. Коэффициент передачи для нерегулярного волновода (23x10) – (2x2) при ϵ (или μ) = 56,25

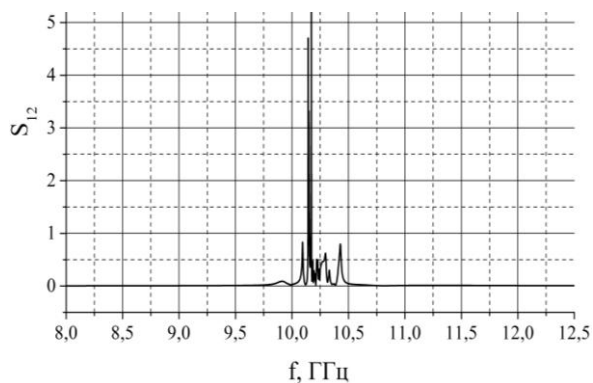


Рис.8. Коэффициент передачи для нерегулярного волновода (23x10) – (2x2) с клиновидным согласователем при ϵ (или μ) = 56,25

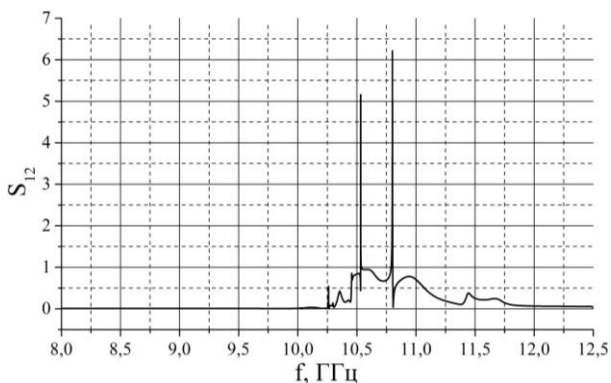


Рис.9. Коэффициент передачи для нерегулярного волновода (23x10) – (1x1) при ϵ (или μ) = 225

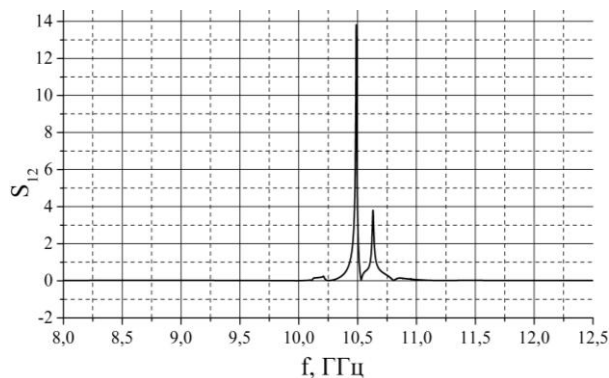


Рис.10. Коэффициент передачи для нерегулярного волновода (23x10) – (1x1) с клиновидным согласователем при ϵ (или μ) = 225

Фактически при очень сильной степени за­пре­дельности (размеры выходных сечений 3x3, 2x2, 1x1 мм), компенсируемой с помощью заполнения с большими значениями проницаемости, характеристики возмож­ной зондовой структуры на основе прямоугольного нерегулярного волновода ухудшаются в связи с со­кращением рабочего диапазона частот и проявлением резонансных явлений.

Поскольку распределения полей, рассчитывались для соответствующих максимальных значений коэф­фициентов передачи и при этом не наблюдалось резонансных распределений в области вставок, можно пред­положить, что их источником являются процессы в ре­гулярных и неза­пре­дельных областях, обусловленные недостаточным согласо­ванием за­пре­дельной и неза­пре­дельной частей волновода.

3. Выводы.

Рассматриваемые в работе нерегулярные волно­водные структуры с за­пре­дельностью, снимаемой с по­мощью диэлектрического или магнитного заполнения, представляются достаточно перспективными для создания микронзондовых 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 более тщательного подбора материала заполнения с требуемыми характеристиками и принятие мер по оптимизации геометрии внешней части вставки для согласования ее с регулярной частью волновода.

Литература: 1. Миронов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии. – Москва: Техносфера, 2004. – 144с. 2. Chen L.F., Ong C.K., Neo C.P. et al. Microwave Electronics. Measurements and Materials Characterization. John Wiley & Sons, Ltd., 2004. – 537p. 3. Anlage S.M., Talanov V.V., Schwartz A.R. Principles of near-field microwave microscopy // Scanning probe microscopy: electrical and electromechanical phenomena at the nanoscale / edited by S.V.Kalinin, A.Gruverman. – New York: Springer-Verlag, 2007. – Vol. 1. – P. 215-253. 4. 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. – Х., 1998. – Вып. 107. – С. 93–103. 5. Интеллектуальні 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. 6. 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. – Х., 1986. – Вып. 76. – С. 114–119. 7. Бондаренко И.Н. Измерительный зонд на основе запредельного волновода / И.Н. Бондаренко, А.В. Галич, А.В. Шахов // Сб. научн. трудов 6 Международной научн. конф. «Функциональная база наноэлектроники», Харьков-Крым, 2013, 30.09.-4.10.2013. с. 82-85.

Поступила в редколлегию 00.00.00

Рецензент: д-р физ.-мат. наук, проф. Панченко А.Ю.

Бондаренко Игорь Николаевич, доктор физ.-мат. наук, доцент, заведующий кафедрой микроэлектроники, электронных приборов и устройств ХНУРЭ. Научные интересы: криогенная радиофизика, техника СВЧ, бесконтактные методы диагностики. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. (057)702-13-62.

Галич Александр Владимирович, аспирант кафедры микроэлектроники, электронных приборов и устройств ХНУРЭ. Научные интересы: техника СВЧ, бесконтактные методы диагностики. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. (057)702-13-62.

УДК 621.372

Мікрохвильовий зонд на основі компенсованого нерегулярного закритичного хвильоводу / І.М. Бондаренко, О.В. Галіч // Радіоелектроніка та інформатика. 2000. № 00, С. 00-00.

Проведені дослідження можливостей створення мікрохвильових зондових структур на основі нерегулярних закритичних хвильоводів з вставками, які компенсують закритичність. Методом чисельного моделювання досліджені характеристики ряду можливих конфігурацій мікрохвильових зондів на основі прямокутного нерегулярного закритичного хвильоводу з заповненням, що компенсує.

Іл.10. Бібліогр.7.

UDC 621.372

Microwave probe on the basis of offset of irregular with the area cutoff waveguide / I.N. Bondarenko, A.V. Galich // Radioelektronika i informatika. 2000. N 00. P. 000-000.

The conducted research for the creation of a microwave probe structures based on the irregular with the area cutoff waveguides with compensating inserts are carried out. Numerical simulation investigated the characteristics of a number of possible configurations of microwave probes on the basis of irregular rectangular waveguide with a compensating filling.

Fig. 10. Ref.: 7 items.