

УДК 621.372.822

А.А. Жуков, В.А. Мещеряков, Г.А. Редькин

## Устройство измерения магнитной проницаемости материалов на основе запердельного круглого двухслойного волновода

Рассмотрена возможность применения запердельных круглых двухслойных волноводов в качестве устройств измерения магнитной проницаемости материалов. Выявлены особенности зависимости затухания собственных волн двухслойного волновода от магнитных проницаемостей материалов слоев и их геометрических параметров в запердельном режиме.

**Ключевые слова:** магнитная проницаемость, запердельный круглый двухслойный волновод, постоянная распространения.

Разработка технических средств измерения и контроля электромагнитных параметров материалов и сред с использованием волноводных СВЧ-методов является важной научной и практической задачей. В данной работе рассматривается возможность создания устройства для измерения и контроля магнитной проницаемости материалов и сред на основе запердельных круглых двухслойных волноводов. Частичное заполнение круглого волновода приводит к возникновению ряда особенностей, которые не наблюдаются в волноводе с однородным заполнением. Это позволяет на основе рассматриваемых структур создавать линии передачи и устройства СВЧ с улучшенными электрическими и эксплуатационными характеристиками [1, 2].

Результаты исследований авторов показывают, что запердельные круглые волноводы с радиально ступенчатыми на поперечном сечении неоднородностями и измерительные ячейки на их основе являются удачным дополнением к известным средствам измерения и контроля диэлектрической проницаемости материалов и сред на СВЧ [3–7].

На основе круглого двухслойного волновода также возможно создание преобразователей для измерения и контроля магнитной проницаемости материалов и сред.

**Постановка задачи.** В качестве базовой электродинамической модели измерительных ячеек для исследования электромагнитных свойств различных материалов волноводным методом в широком диапазоне частот рассмотрим круглый двухслойный волновод. Поперечное сечение волновода приведено на рис. 1. Внутренний слой волновода имеет радиус  $r_1$ . Диэлектрическая и магнитная проницаемости этого слоя равны соответственно  $\epsilon_1$  и  $\mu_1$ . Радиус внешнего металлического экрана равен  $R_a$ . Диэлектрическая и магнитная проницаемости внешнего слоя равны соответственно  $\epsilon_2$  и  $\mu_2$ .

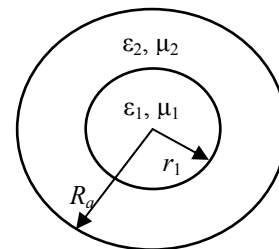


Рис. 1. Круглый двух-  
слойный волновод

Зависимость составляющих электромагнитного поля от времени  $t$ , продольной  $z$  и азимутальной  $\varphi$  координат цилиндрической системы выбирается в виде

$$\exp[j(\omega t + n\varphi + k_0 \Gamma z)], \quad (1)$$

где  $\omega$  – круговая частота;  $\Gamma$  – постоянная распространения, нормированная на волновое число свободного пространства  $k_0$ ;  $j = \sqrt{-1}$  – мнимая единица.

С учетом (1) уравнения Максвелла в дифференциальной форме сводятся к системе обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка относительно продольных составляющих электрического  $E_z$  и магнитного полей  $H_z$ :

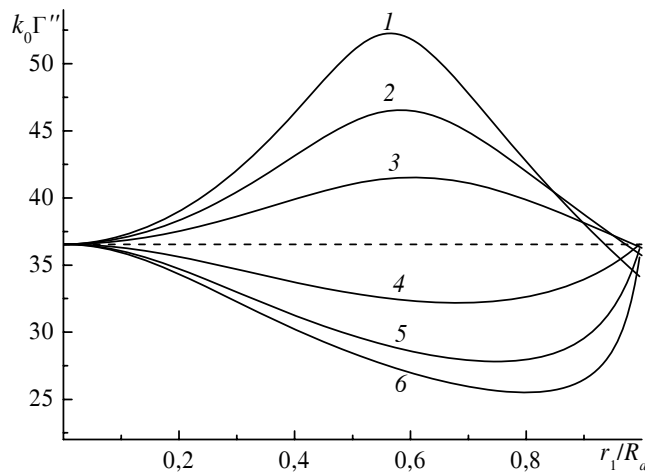
$$\xi^2 \frac{d^2 e_z}{d\xi^2} + \xi \frac{de_z}{d\xi} + (\xi^2 - n^2) e_z = 0, \quad \xi^2 \frac{d^2 h_z}{d\xi^2} + \xi \frac{dh_z}{d\xi} + (\xi^2 - n^2) h_z = 0, \quad (2)$$

где  $h = \rho_0 H$  – нормированный вектор магнитного поля;  $e = jE$  – нормированный вектор электрического поля;  $\rho_0 = 120\pi$  (Ом) – волновое сопротивление свободного пространства;  $\xi = \rho\chi$ ;

$\chi^2 = \epsilon\mu - \Gamma^2$ ;  $\rho = k_0 r$  – нормированная радиальная координата;  $\epsilon, \mu$  – диэлектрическая и магнитная проницаемости. Поперечные составляющие электромагнитного поля выражаются через продольные составляющие и их производные.

Постоянная распространения  $k_0 \Gamma''$  выбранного типа волны определяется из численного решения системы дифференциальных уравнений (2) с учетом непрерывности касательных составляющих электромагнитного поля на границе раздела слоев.

**Полученные результаты.** В данной работе рассчитаны зависимости мнимой части постоянной распространения  $k_0 \Gamma''$  волны  $HE_{11}$  от изменения геометрических и материальных параметров волновода в запредельной области частот.



На рис. 2 приведены зависимости мнимой части постоянной распространения волны  $HE_{11}$  двухслойного волновода от отношения радиусов слоев для различных значений магнитной  $\mu_1$  проницаемости внутреннего слоя. Расчеты проведены для случая  $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 2$ ;  $\mu_2 = 10$ ;  $k_0 R_a = 0,05$ .

Рис. 2. Зависимость мнимой части постоянной распространения волны  $HE_{11}$  от отношения радиусов слоев

Кривые 1, 2, 3, 4, 5, 6 рассчитаны для магнитной проницаемости  $\mu_1$  внутреннего слоя равной 100; 40; 20; 5; 2 и 1 соответственно. Пунктирная линия соответствует затуханию волны в двухслойном волноводе с одинаковыми значениями диэлектрических и магнитных проницаемостей слоев ( $\mu_1 = \mu_2 = 10$ ,  $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 2$ ). Значения  $k_0 \Gamma''$  при  $r_1/R_a = 0$  и  $r_1/R_a = 1$  соответствуют затуханию волны в однородно заполненном волноводе с диэлектрической и магнитной проницаемостями заполнения, равными  $\epsilon_2, \mu_2$  и  $\epsilon_1, \mu_1$  соответственно. Из графиков видно, что затухание в волноводе при наличии скачка магнитной проницаемости на границе слоев существенно зависит от отношения  $\mu_1/\mu_2$ . Кроме этого, существует оптимальное значение отношения радиусов слоев, при котором величина коэффициента затухания волны  $HE_{11}$  принимает максимальное или минимальное значение.

На рис. 3 приведены зависимости мнимой части постоянной распространения волны  $HE_{11}$  (сплошные линии) от магнитной проницаемости  $\mu_1$  внутреннего слоя. Расчеты проведены для случая  $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 2$ ;  $k_0 R_a = 0,05$  и  $r_1/R_a = 0,6$ , что соответствует экстремальным значениям затухания волны  $HE_{11}$  в двухслойном волноводе (рис. 2). Кривые 1, 2, 3 и 4 отражают зависимости  $k_0 \Gamma''(\mu_1)$  для случаев  $\mu_2 = 1$ ; 10; 50 и 100 соответственно. Пунктирная линия (кривая 5) соответствует зависимости мнимой части постоянной распространения  $k_0 \Gamma''$  волны  $HE_{11}$  в двухслойном волноводе с одинаковыми значениями диэлектрической и магнитной проницаемостей слоев ( $\mu_1 = \mu_2$ ;  $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 2$ ). Кривые 1–4 пересекаются с кривой 5 в точках вырождения, когда магнитные проницаемости внутреннего и внешнего слоев совпадают.

Из рис. 3 видно, что при изменении магнитной проницаемости внутреннего слоя от 10 до 100 мнимая часть постоянной распространения волны  $HE_{11}$  может увеличиваться в значительных пределах (на 42% для кривой 2). В то же время при изменении магнитной проницаемости среды однородно заполненного волновода от 10 до 100 мнимая часть постоянной распространения волны  $HE_{11}$  уменьшается только на 7% (кривая 5).

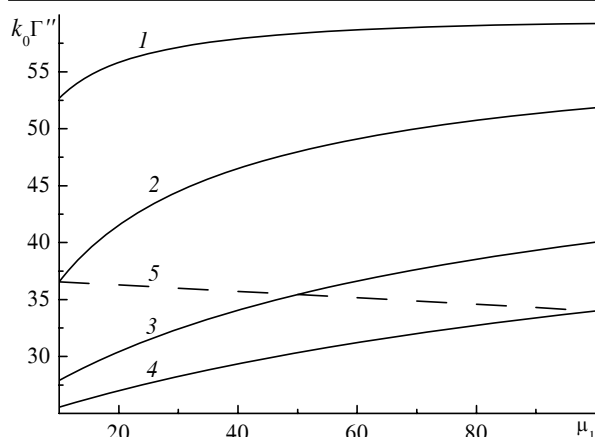


Рис. 3. Зависимость мнимой части постоянной распространения волны  $HE_{11}$  от магнитной проницаемости внутреннего слоя

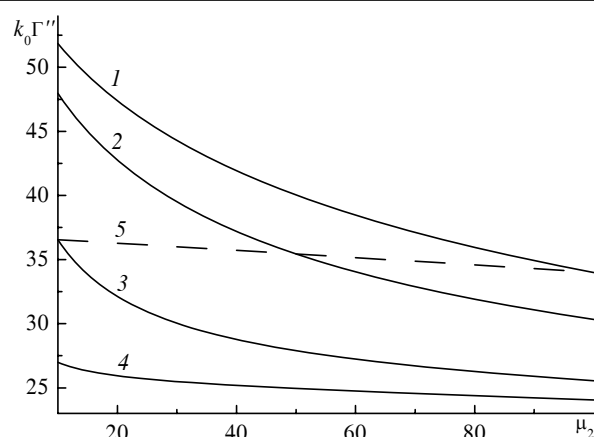


Рис. 4. Зависимость мнимой части постоянной распространения волны  $HE_{11}$  от магнитной проницаемости внешнего слоя

На рис. 4 приведены зависимости мнимой части постоянной распространения волны  $HE_{11}$  (сплошные линии) от магнитной проницаемости  $\mu_2$  внешнего слоя. Расчеты проведены для случая  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 2$ ;  $k_0 R_a = 0,05$  и  $\eta / R_a = 0,6$ . Кривые 1, 2, 3 и 4 отражают зависимости  $k_0 \Gamma''(\mu_2)$  для случаев  $\mu_1 = 100$ ; 50; 10 и 1 соответственно. Пунктирная линия (кривая 5) соответствует зависимости мнимой части постоянной распространения  $k_0 \Gamma''$  волны  $HE_{11}$  в двухслойном волноводе с одинаковыми значениями диэлектрической и магнитной проницаемостей слоев ( $\mu_1 = \mu_2$ ;  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 2$ ).

Как видно из рис. 4, при изменении магнитной проницаемости внешнего слоя от 10 до 100 мнимая часть постоянной распространения волны  $HE_{11}$  может уменьшаться в значительных пределах (37% для кривой 2).

Представленные на рис. 2–4 зависимости мнимой части постоянной распространения волны  $HE_{11}$  круглого двухслойного волновода с различными значениями магнитных проницаемостей слоев можно объяснить переотражением и интерференцией электромагнитного поля от границы раздела слоев и стенки волновода.

**Заключение.** В результате проведенных исследований показано, что в диапазоне частот, меньших частоты отсечки, введение в круглый волновод радиально-ступенчатых магнитных неоднородностей приводит к существенному, по сравнению с однородным волноводом, увеличению чувствительности системы к изменению магнитной проницаемости материала одного из слоев.

Представленные результаты показывают возможность создания на основе отрезков запердельных круглых двухслойных волноводов устройств измерения и контроля магнитной проницаемости различных материалов и сред.

Работа выполнена в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы». Государственный контракт № 14.740.11.0335 от 17 сентября 2010 г.

#### Литература

1. Веселов Г.И. Слоистые металлдиэлектрические волноводы / Г.И. Веселов, С.Б. Раевский. — М.: Радио и связь, 1988. — 248 с.
2. Раевский А.С. Неоднородные направляющие структуры, описываемые несамосопряженными операторами / А.С. Раевский, С.Б. Раевский. — М.: Радиотехника, 2004. — 112 с.
3. Контроль электрофизических параметров текучих сред радиоволновыми методами на запердельных волноводах / А.А. Жуков, Г.А. Редькин, А.Е. Мудров, В.Я. Хасанов // Дефектоскопия. — 1998. — № 10. — С. 47–58.
4. Диэлектрометрический контроль неоднородных текучих сред и материалов / А.А. Жуков, Г.А. Редькин, А.Е. Мудров и др. // Радиолокация, навигация, связь: труды V Междунар. НТК. — Воронеж, 1999. — Т. 2. — С. 1308–1317.

5. Electromagnetic Processes in the Multilayer Circular Cut-Off Waveguides / A.A. Zhukov, G.A. Redkin, A.E. Mudrov et al. // Microwave Electronics: Measurements, Identification, Application: proceedings of 2001 IEEE-Russia conference MEMIA'2001, Novosibirsk. – Novosibirsk, Russia, 2001. – P. 61–66.

6. Жуков А.А. Измерительные преобразователи на основе запердельных двухслойных круглых волноводов / А.А. Жуков, Г.А. Редькин, О.И. Ширенкова // Изв. вузов. Физика. – 2008. – Т. 51, № 9/2. – С. 172–174.

7. Жуков А.А. Радиоволновой датчик для контроля диэлектрической проницаемости материалов и сред / А.А. Жуков, В.А. Мещеряков, Г.А. Редькин // Измерение, контроль, автоматизация: матер. XII междунар. науч.-техн. конф. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2011. – С. 124–127.

---

**Жуков Андрей Александрович**

Канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент кафедры радиоэлектроники Национального исследовательского Томского государственного университета (НИТГУ)

Тел.: (382-2) 41-39-64

Эл. почта: gyk@mail.tsu.ru

**Мещеряков Владимир Алексеевич**

Канд. физ.-мат. наук, доцент каф. радиоэлектроники НИТГУ

Тел.: (382-2) 41-39-64

Эл. почта: mva@webmail.tsu.ru

**Редькин Герман Александрович**

Канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник Сибирского физико-технического института при НИТГУ

Тел.: (382-2) 41-39-64

Эл. почта: german@elefot.tsu.ru

Zhukov A.A., Meshcherykov V.A., Redkin G.A.

**On using two-layer circular evanescent waveguide for the measurement of permeability**

In this article we present the results of numerical investigation of complex propagation constants in circular two-layer waveguides. It is shown that in the off-limit frequency range the waveguides has new properties. On the basis of these properties of the transducers for the measuring of permeability different materials can be developed.

**Keywords:** permeability, evanescent two-layer circular waveguide, propagation constant.

---