

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 ϵ_1 и μ_1 . Радиус внешнего металлического экрана равен R_a . Диэлектрическая и магнитная проницаемости внешнего слоя равны соответственно ϵ_2 и μ_2 .

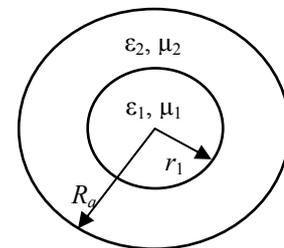


Рис. 1. Круглый двухслойный волновод

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

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

где ω – круговая частота; Γ – 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 :

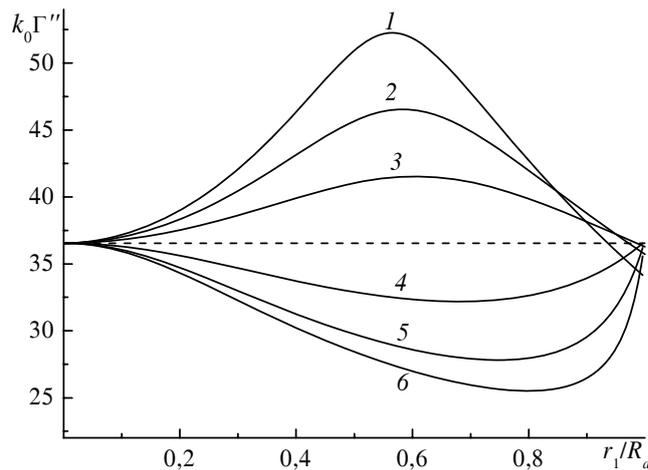
$$\xi^2 \frac{d^2 e_z}{d\xi^2} + \xi \frac{de_z}{d\xi} + (\xi^2 - n^2) e_z = 0, \quad \xi^2 \frac{d^2 h_z}{d\xi^2} + \xi \frac{dh_z}{d\xi} + (\xi^2 - n^2) h_z = 0, \quad (2)$$

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; ϵ, μ – 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 μ_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 μ_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 ϵ_2, μ_2 и ϵ_1, μ_1 соответственно. Из графиков видно, что затухание в волноводе при наличии скачка магнитной проницаемости на границе слоев существенно зависит от отношения μ_1/μ_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 μ_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).

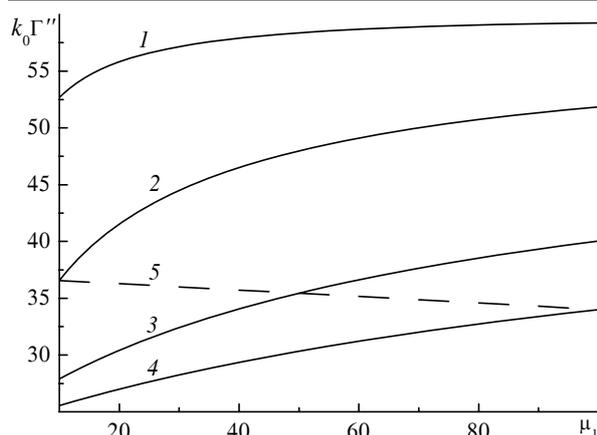


Рис. 3. Зависимость мнимой части постоянной распространения волны HE_{11} от магнитной проницаемости внутреннего слоя

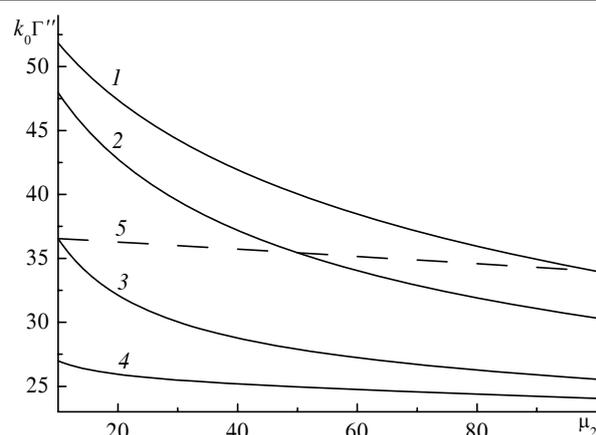


Рис. 4. Зависимость мнимой части постоянной распространения волны HE_{11} от магнитной проницаемости внешнего слоя

На рис. 4 приведены зависимости мнимой части постоянной распространения волны HE_{11} (сплошные линии) от магнитной проницаемости μ_2 внешнего слоя. Расчеты проведены для случая $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 2$; $k_0 R_a = 0,05$ и $\eta_1 / R_a = 0,6$. 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.
