

Математическая модель датчика для определения комплексной диэлектрической проницаемости материалов на основе двухслойных цилиндрических включений в прямоугольном волноводе

Зайцева И.Е.; Дробот С.В.

Кафедра электроники

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Минск, Республика Беларусь

e-mail: hanms@bsuir.by, irina_zaitseva@list.ru

Аннотация—Получено строгое решение граничной электродинамической задачи рассеяния основной волны H_{10} на двух двухслойных цилиндрах в прямоугольном волноводе.

Ключевые слова: волновод; диэлектрическая проницаемость; неоднородность; математическая модель.

I. ВВЕДЕНИЕ

На данный момент существует ряд методов измерения комплексной диэлектрической проницаемости материалов, основанных на определении параметров отражения и прохождения электромагнитных волн на электродинамической структуре, в которую помещается исследуемый материал. Но зачастую данные методы используют упрощенные математические модели таких структур, которые не учитывают возникновение высших мод в процессе дифракции волны на такой неоднородности. Это значительно снижает точность определения искомого параметра.

II. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В докладе представлена математическая модель датчика, основанного на двух двухслойных диэлектрических цилиндрах, внутри которых помещается исследуемый материал. Цилиндры располагаются в Е-плоскости отрезка прямоугольного волновода.

Для решения задачи рассеяния, как и в работе [1], используется метод частичных областей в предположении, что стенки волновода являются идеально проводящими. Пространство внутри волновода (рис. 1) представлено в виде ряда частичных областей Ω_0, Ω_j , где $j=1, 2$ – число слоев в цилиндре, а $i=1, 2$ – число цилиндров. Цилиндрические слои заполнены однородными изотропными диэлектриками с комплексной диэлектрической проницаемостью $\hat{\epsilon}_{ji}$ и вещественным $\mu=1$. Частичная область Ω_0 , представляющая собой внутреннее пространство

волновода за исключением цилиндрических областей Ω_j , заполнена средой с вещественными постоянными ϵ_0, μ_0 . Для определения полной картины рассеяния электромагнитной волны поля в частичных областях с учетом некоординатности границ неоднородностей были представлены в виде рядов по цилиндрическим функциям.

Были получены выражения для условий, которым удовлетворяют электрические и магнитные составляющие парциальных полей на границах, разделяющих частичные области электродинамической структуры. Использование метода зеркальных изображений позволило получить две связанные бесконечные системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) относительно неизвестных коэффициентов, которые и описывают рассеянное поле во внешней по отношению к неоднородностям области прямоугольного волновода с учетом распространения волн высших порядков:

$$X_{nj} + G_n \sum_{r=1}^M \left\{ \sum_{v=-\infty}^{\infty} X_v^{(r)} \alpha_{n,v}^{(rj)} \right\} = -G_n \cdot B_{nj}, \quad (1)$$

где

$$G_n = \left[\begin{array}{cc} Y_n'(v) \eta_3 & J_n'(u) \\ Y_n(v) \eta_2 & J_n(u) \end{array} \right] \left[\begin{array}{cc} Y_n'(v) \eta_3 & H_n^{(1)'}(u) \\ Y_n(v) \eta_2 & H_n^{(1)}(u) \end{array} \right]^{-1},$$

$$B_{nj} = -e^{-i\beta_{p0} z_{0j}} \frac{\sin \left[\frac{p\pi}{a} x_{0j} + n \cdot \arctg \frac{p\pi}{\beta_{p0} a} \right]}{H_n^{(1)}(kr_{0j})}, \quad (2)$$

$$\alpha_{n,v}^{(rj)} = \frac{J_v(kr_{0r})}{H_n^{(1)}(kr_{0j})} S_{n,v}^{(rj)}, \quad (3)$$

где $H_n^{(1)}(u)$, $H_n^{(1)'}(u)$ – функция Ханкеля первого рода порядка n аргумента u и ее производная

соответственно, $J_n(u)$, $J_n'(u)$ - функция Бесселя порядка n аргумента u и ее производная соответственно. Коэффициенты СЛАУ G_n , α_{nv} , B_{nj} определяются геометрическими размерами двухслойных цилиндров и волновода, параметрами материалов внешнего и внутреннего слоя цилиндра и частотой падающей волны.

Задача сводится к определению неизвестных амплитудных коэффициентов X_{nj} разложений электромагнитного поля в частных областях по цилиндрическим функциям путем решения двух связанных бесконечных СЛАУ методом усечения. Получено выражение для волноводных мод в области Ω_0 , позволяющее рассчитать комплексные коэффициенты отражения и передачи \hat{S}_{11} , \hat{S}_{21} для рассматриваемой структуры.

Величина комплексной диэлектрической проницаемости определялась, аналогично [2], посредством решения обратной электродинамической задачи. Области Ω_{11} и Ω_{12} , т.е. внутренние слои цилиндров заполнены исследуемым материалом, поэтому $\hat{\epsilon}_{11} = \hat{\epsilon}_{12} = \hat{\epsilon}$. Использовалась итерационная процедура по нахождению минимума функции цели, выраженной через измеренные и полученные в результате математического моделирования S-параметры для данной структуры:

$$Y(\hat{\epsilon}) = \sum_i \sum_n \left| \epsilon_{ni}(\hat{\epsilon}) \right|^2, \quad (4)$$

где $n = 1, \dots, 4$ - индекс, соответствующий действительным и мнимым составляющим коэффициентов отражения и передачи; $i = 1, \dots, K$ - индекс, соответствующий K дискретным значениям частоты, на которых производятся измерения; $\hat{\epsilon}$ - комплексная диэлектрическая проницаемость

исследуемого материала. Функция ошибки $e(\hat{\epsilon})$ - разность между рассчитанными элементами матрицы рассеяния S_C с использованием разработанной математической модели и измеренными с помощью векторного анализатора цепей S_M :

$$e(\hat{\epsilon}) = S_C(\hat{\epsilon}) - S_M(\hat{\epsilon}), \quad (5)$$

где S - один из параметров $Re(S_{11})$, $Im(S_{11})$, $Re(S_{21})$, $Im(S_{21})$.

На основе разработанной математической модели было создано в среде Borland Delphi 7.0 Windows-приложение, позволяющее по известным значениям частоты сигнала, геометрических размеров волновода и цилиндрических неоднородностей, а также материальных параметров неоднородностей (комплексной диэлектрической проницаемости) выполнять расчет S-параметров и определять диэлектрическую проницаемость.

С использованием разработанного программного обеспечения проведены численные исследования характеристик тестовых систем. Сравнение полученных результатов с результатами расчетов, выполненных другим методом, и экспериментальными данными показало их хорошее совпадение.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученная математическая модель и реализующее ее программное обеспечение могут быть использованы при измерении параметров диэлектрических материалов

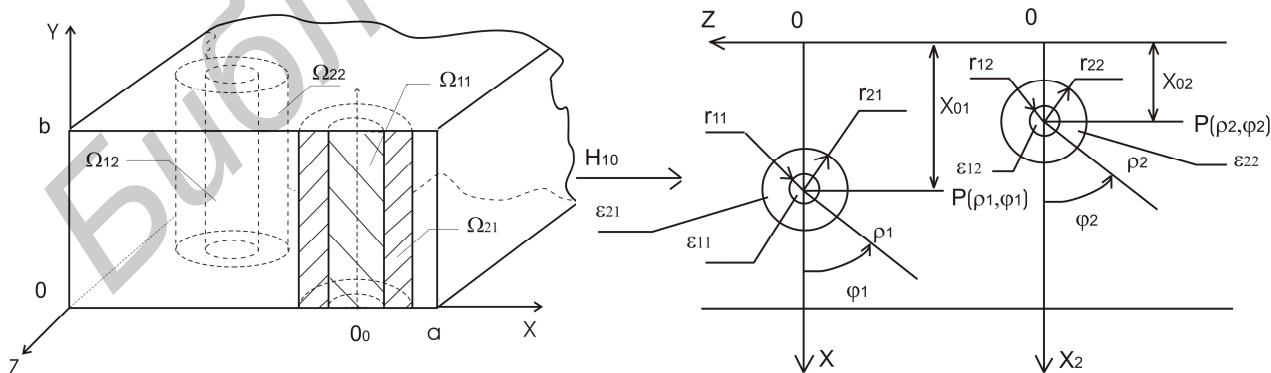


Рис. 1. Внешний вид датчика и геометрия задачи

- [1] В.К. Березовский, А.В. Мошинский. Дифракция волны H_{10} на двухслойном диэлектрическом цилиндре «индуктивного» типа в прямоугольном волноводе. Электромагнитные волны и электронные системы, 1999, т. 4, № 3. - С. 25-33.
- [2] Березовский В.К., Дробот С.В., Русакович В.Н., Хандогин М.С. Метод измерения диэлектрической проницаемости жидкостей в СВЧ-диапазоне // Электромагнитные волны и электронные системы. - 2005, т. 10, № 10. - С. 50-56.