

УДК 621. 372. 812

В.В. Саламатин, доцент, канд. техн. наук,**Г.А. Лукьянчук, канд. техн. наук,****Г.В. Лемешко***Севастопольский национальный технический университет,**ул. Университетская, д.33, Севастополь, 99053, Украина;**E-mail: rt.sevgtu@sevastopol.ua***ИЗМЕРИТЕЛЬ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ РЕЗОНАТОРА БЕГУЩИХ ВОЛН**

Предложен и исследован метод построения измерителя электромагнитных параметров материалов на основе резонатора бегущих волн с двусторонним возбуждением. Рассмотрена методика определения этих параметров по результатам измерения комплексных коэффициентов отражения входа и выхода резонатора.

Ключевые слова: резонатор бегущей волны, измерение комплексных коэффициентов отражения четырёхполюсников.

Электрические и магнитные свойства материалов наиболее полно определяются комплексными значениями диэлектрической и магнитной проницаемости:

$$\dot{\epsilon} = \epsilon' - i\epsilon'' ; \quad \dot{\mu} = \mu' - i\mu'' . \quad (1)$$

Знание электромагнитных параметров материалов позволяет решить многие прикладные задачи, связанные с разработкой некоторых невзаимных и взаимных устройств микроволновой техники, с диагностикой качественных характеристик веществ, с аттестацией новых видов разработанных материалов и идентификацией существующих (в частности, с целью определения фальсифицированной продукции). Об актуальности этих задач свидетельствует многообразие методов измерения указанных параметров. В настоящее время нашли широкое применение волноводные и резонаторные методы измерения электромагнитных параметров [1, 2]. Измеряемыми величинами обычно являются комплексные коэффициенты отражения и передачи, резонансные частоты, добротности волноводных четырёхполюсников и резонаторов, полностью или частично заполненных исследуемым материалом, диэлектрическая и магнитная проницаемости которого функционально связаны с информационными параметрами.

Погрешности измерения информационных параметров существенно зависят от используемых микроволновых измерительных преобразователей. В последнее время разработан высокоточный калибруемый измеритель комплексных коэффициентов отражения (ККО) на основе широкополосного интерференционного четырехдетекторного волноводно-щелевого преобразователя (ВЩП), имеющий погрешности измерения модуля и аргумента ККО, не превышающие 1% и 1°, соответственно. Использование такого прибора в составе измерительного комплекса предполагает значительное повышение точности определения электромагнитных параметров веществ.

В качестве измерительных ячеек можно использовать не только традиционные отрезки волноводов и резонаторы стоячих волн с образцами исследуемого материала, но и резонаторы бегущих волн (РБВ) с двусторонним возбуждением, которые находят применение в микроволновой технике для построения формирователей наносекундных радиоимпульсов повышенной мощности, измерителей комплексных параметров волноводных четырёхполюсников.

Целью данной статьи является исследование возможности определения комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей материала плоскопараллельной пластины, включенной в кольцевой тракт резонатора бегущих волн, путем измерения ККО входа и выхода РБВ.

В работе [1] получены соотношения, связывающие комплексные элементы матрицы рассеяния [S] плоскопараллельной пластины, расположенной в согласованном волноводе прямоугольного сечения, с комплексными электромагнитными параметрами материала этой пластины. Элементы матрицы $S_{ii} - S_{11}, S_{22}$ в данном случае представляют собой комплексные коэффициенты отражения Γ_{11}, Γ_{22} , а $S_{ij} - S_{21}, S_{12}$ – комплексные коэффициенты передачи (ККП) T_{21}, T_{12} :

$$S_{ii} = \dot{\Gamma} = \frac{\left[1 - \left(\frac{\lambda}{2a} \right)^2 \right] \cdot \frac{\mu' - i\mu''}{\epsilon' - i\epsilon''} - \frac{(\epsilon' - i\epsilon'')(\mu' - i\mu'') - \left(\frac{\lambda}{2a} \right)^2}{(\epsilon' - i\epsilon'')(\mu' - i\mu'')} \right] \cdot sh \left(\frac{i2\pi d}{\lambda} \sqrt{(\epsilon' - i\epsilon'')(\mu' - i\mu'')} \right)}{N}; \quad (2)$$

$$S_{ij} = \dot{T} = \frac{2\sqrt{1-\left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2} \sqrt{\frac{\mu'-i\mu''}{\epsilon'-i\epsilon''}} \cdot \sqrt{\frac{(\epsilon'-i\epsilon'')(\mu'-i\mu'')-\left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}{(\epsilon'-i\epsilon'')(\mu'-i\mu'')}}}{N}, \quad (3)$$

где λ – длина волны генератора; a – размер широкой стенки волновода; d – толщина пластины; N – вспомогательная величина

$$N = \left[\frac{(\epsilon'-i\epsilon'')(\mu'-i\mu'')-\left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}{(\epsilon'-i\epsilon'')(\mu'-i\mu'')} + \left(1-\left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2\right) \cdot \frac{\mu'-i\mu''}{\epsilon'-i\epsilon''} \right] \operatorname{sh}\left(\frac{i2\pi d}{\lambda} \sqrt{(\epsilon'-i\epsilon'')(\mu'-i\mu'')}\right) + \\ + 2\sqrt{1-\left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2} \sqrt{\frac{\mu'-i\mu''}{\epsilon'-i\epsilon''}} \sqrt{\frac{(\epsilon'-i\epsilon'')(\mu'-i\mu'')-\left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}{(\epsilon'-i\epsilon'')(\mu'-i\mu'')}} \operatorname{ch}\left(\frac{i2\pi d}{\lambda} \sqrt{(\epsilon'-i\epsilon'')(\mu'-i\mu'')}\right).$$

Для изотропных веществ действительны равенства $S_{11}=S_{22}$; $S_{21}=S_{12}$. Для анизотропных – равенства нарушаются.

Плоскопараллельная пластина, размещенная в кольцевом резонаторе, как показано на рисунке 1 статьи [3] в настоящем сборнике, представляет собой волноводный четырехполюсник. Его S-параметры с достаточно высокой точностью определяются рассмотренным в этой статье резонаторным измерителем:

$$\dot{S}_{11} = \frac{\dot{\Gamma}_{11}(1-\dot{S}_{12} \cdot \tau \cdot \sqrt{1-k^2}) \cdot (1-\dot{S}_{21} \cdot \tau \cdot \sqrt{1-k^2})}{k^2 \cdot \tau}; \quad (4)$$

$$\dot{S}_{21} = \frac{\sqrt{1-k^2} - (\dot{\Gamma}_{11} - \dot{\Gamma}_{12})}{\tau \cdot [1 - (\dot{\Gamma}_{11} - \dot{\Gamma}_{12}) \cdot \sqrt{1-k^2}]}; \quad (5)$$

$$\dot{S}_{12} = \frac{\sqrt{1-k^2} - (\dot{\Gamma}_{22} - \dot{\Gamma}_{21})}{\tau \cdot [1 - (\dot{\Gamma}_{22} - \dot{\Gamma}_{21}) \cdot \sqrt{1-k^2}]}; \quad (6)$$

$$\dot{S}_{22} = \frac{\dot{\Gamma}_{22}(1-\dot{S}_{12} \cdot \tau \cdot \sqrt{1-k^2}) \cdot (1-\dot{S}_{21} \cdot \tau \cdot \sqrt{1-k^2})}{k^2 \cdot \tau}, \quad (7)$$

где Γ_{11} ; Γ_{21} ; Γ_{12} ; Γ_{22} – ККО входа и выхода РБВ; τ – модуль ККП кольцевого резонатора; k – коэффициент связи каналов направленного ответвителя РБВ.

Приравняв правые части уравнений (2) и (4), (7), а также (3) и (5), (6), находим значения вещественных и мнимых частей комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей.

Использование резонатора бегущих волн с двухсторонним возбуждением позволяет определить комплексные электромагнитные параметры плоскопараллельной пластины одним измерителем, при этом можно измерять параметры как взаимных, так и невзаимных материалов.

Бibliографический список

1. Бухаров С.В. Измерение диэлектрической проницаемости веществ методом частично заполненного резонатора / С.В. Бухаров // СВЧ техника и телекоммуникационные технологии: матер. 14-ой междунар. науч.-техн. конф. КрыМиКо, Севастополь, 13–17 сентября 2004 г. — Севастополь, 2004. — С. 678–679.
2. Афонин И.Л. Интерференционный метод измерения электромагнитных параметров материалов / И.Л. Афонин, И.В. Лашенко, В.В. Саламатин // Вестник СевГТУ: сб. научн. тр. — Севастополь, 2002. — Вып. 41. — С. 76–79.
3. Саламатин В.В. Резонаторный измеритель комплексных параметров волноводных четырехполюсников / В.В. Саламатин, Г.А. Лукьянчук, Г.В. Лемешко // Вестник СевГТУ: сб. научн. тр. — Севастополь, 2009. — Вып. 101. — С. 161–164.

Поступила в редакцию 12.02.2009 г.