

Высокодобротный измерительный резонатор на моде H_{11} для неразрушающего контроля диэлектрических параметров кольцевых структур

Д. В. Богомолов^{1,2}, Е. В. Медянцева^{1,2}, В. М. Коломин¹

¹АО «НПП «Исток» им. Шокина»¹

²Филиал РТУ МИРЭА в г. Фрязино²

Аннотация: в работе предложена оригинальная конструкция измерительного резонатора на основе отрезка круглого волновода с модой H_{11} , предназначенная для прецизионного определения комплексной диэлектрической проницаемости материалов кольцевой формы. Оптимизация электродинамической структуры с использованием внутренних металлических цилиндров и согласующих конусов позволила локализовать СВЧ-поле в области исследуемого образца и обеспечить высокую добротность системы. Приведены результаты моделирования, подтверждающие высокую чувствительность резонатора к изменению диэлектрической постоянной материала (с относительной погрешностью не более $\pm 1\%$). Разработанное техническое решение, защищенное патентом РФ, позволяет осуществлять эффективный контроль и отбраковку изделий по диэлектрическим параметрам (ϵ и $\tan\delta$) на ранних стадиях производства СВЧ-устройств.

Ключевые слова: комплексная диэлектрическая проницаемость, кольцевой диэлектрик, измерительный резонатор, СВЧ-диапазон, выходной контроль

1. Введение

Развитие современной микроволновой техники и материаловедения предъявляет высокие требования к точности определения электродинамических параметров диэлектриков. Особый интерес представляют материалы кольцевой формы, которые находят широкое применение в качестве базовых элементов микроволновых фильтров, антенн, высокодобротных резонаторов и сенсорных устройств.

Однако прецизионное измерение комплексной диэлектрической проницаемости ($\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon''$) кольцевых структур является технически сложной задачей. Традиционные волноводные и коаксиальные методы зачастую обладают недостаточной чувствительностью при работе с образцами малых размеров или имеют ограничения в высокочастотных диапазонах [1-4]. Резонаторные методы, в свою очередь, обеспечивают на порядок более высокую точность за счет регистрации малых смещений резонансной частоты и изменения добротности.

В данной работе предлагается оригинальная конструкция измерительного резонатора на основе отрезка круглого волновода на моде H_{11} . Особенностью решения является использование специальной системы связи и внутренней геометрии с металлическими цилиндрами, что позволяет достичь погрешности измерения относительной диэлектрической проницаемости не более $\pm 1\%$.

Применение данной разработки актуально для выходного контроля изделий на предприятиях электронной промышленности с целью минимизации брака на ранних стадиях производства.

2. Конструкция высокодобротного резонатора

В основе предлагаемого метода лежит использование отрезка круглого волновода, работающего на основном типе волны H_{11} . Выбор данной моды обусловлен

максимальной амплитудой электрического поля в центре волновода, что обеспечивает высокую чувствительность к параметрам помещенного туда диэлектрика.

Конструктивно измерительная ячейка (рис. 1) реализована в виде волноводной секции, на торцах которой установлены усеченные конусы с коаксиальными элементами связи.

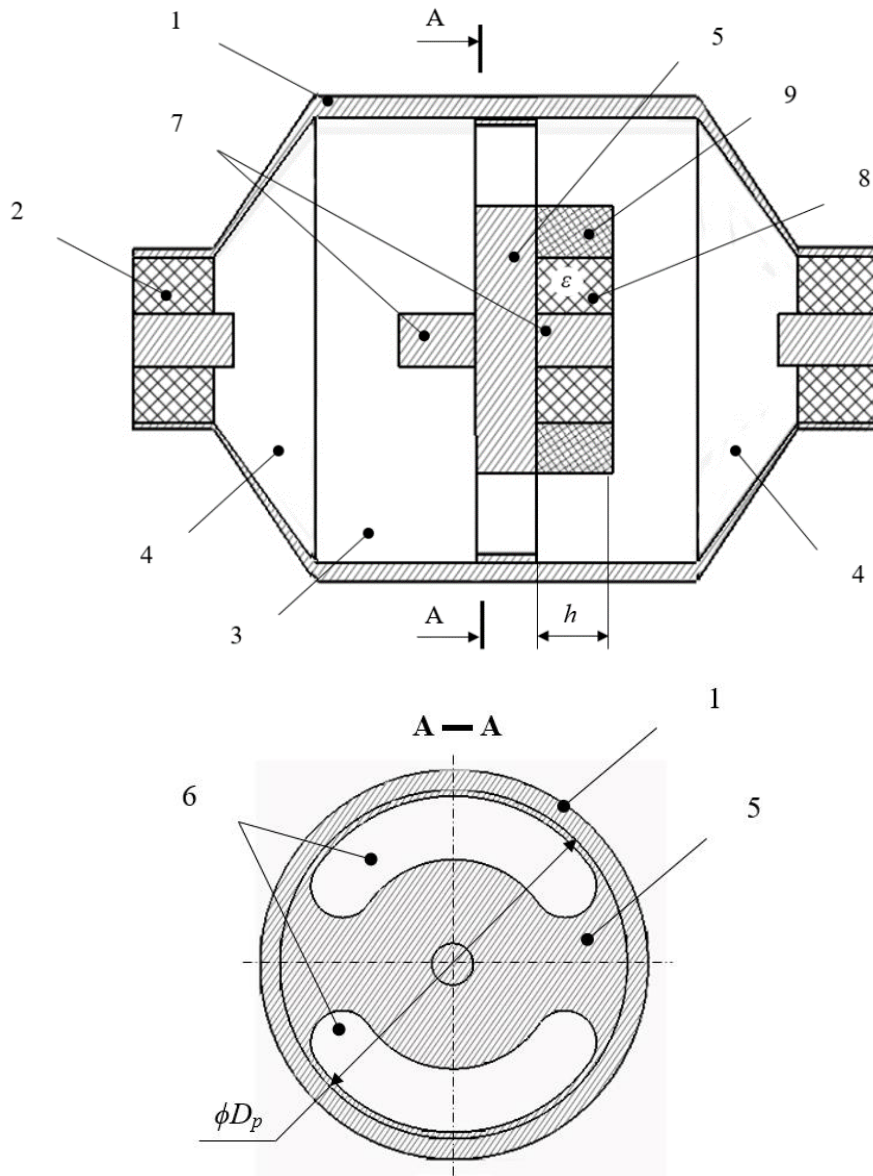


Рисунок 1. Общий вид конструкции: резонатор 1, элемент связи 2, отрезок круглого волновода 3, усеченный конус 4, металлическая диафрагма 5, щель связи 6, металлические цилиндры 7, диэлектрическая втулка 8, исследуемый кольцевой диэлектрический материал 9.

Длина конусов выбирается равной $\lambda/4$, где λ – длина волны в волноводе, что гарантирует эффективное согласование СВЧ-тракта и подавление высших типов волн. В центральной поперечной плоскости резонатора расположена металлическая диафрагма с двумя «фасолевидными» щелями связи, обеспечивающими необходимое возбуждение рабочего объема.

Для локализации электромагнитного поля в области исследуемого материала в центре диафрагмы симметрично установлены металлические цилиндры высотой h . Исследуемый кольцевой диэлектрик размещается на диэлектрической втулке, которая соединена с одним из металлических цилиндров без зазора. Оптимизация

чувствительности системы достигается при соблюдении геометрического соотношения:

$$0.23 \leq \frac{h\sqrt{\varepsilon}}{D_p} \leq 0.32. \quad (1)$$

где D_p – диаметр отрезка круглого волновода, ε – диэлектрическая проницаемость материала втулки.

Численное моделирование показало (рис.2), что регистрация смещения резонансной частоты при изменении ε (например, с 22 до 20) позволяет определять параметры кольцевых образцов с относительной погрешностью не более $\pm 1\%$.

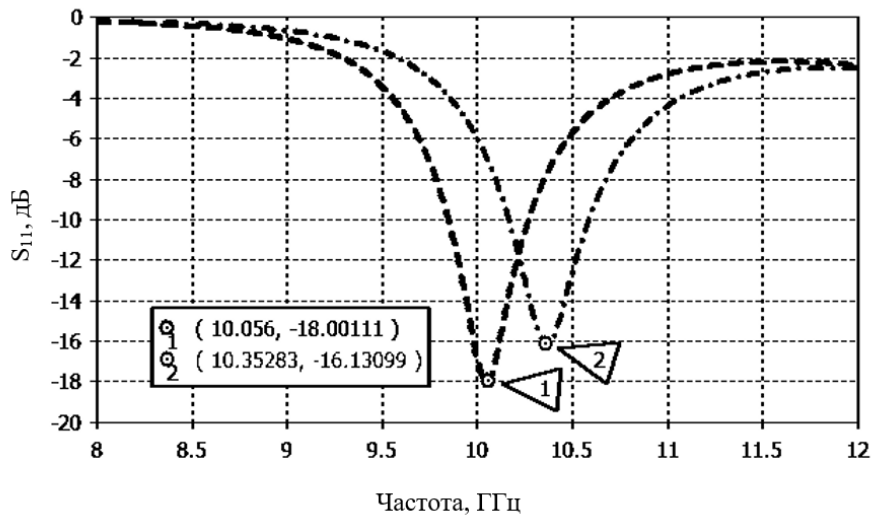


Рисунок 2. Чувствительность резонатора на изменение относительной диэлектрической проницаемости исследуемого кольцевого диэлектрика в полосе пропускания: пунктирная линия – материал кольцевого диэлектрика с $\varepsilon=22$ и $\mu=1$; штрихпунктирная линия – материал кольцевого диэлектрика с $\varepsilon=20$ и $\mu=1$.

3. Заключение

Разработанная конструкция измерительного резонатора позволяет регистрировать минимальные флуктуации электродинамических параметров относительно номинальных значений в рабочем диапазоне частот. Новизна и промышленная применимость разработанного технического решения подтверждены патентом РФ на изобретение [5], что позволяет рекомендовать данное устройство для использования в технологическом цикле с целью эффективной отбраковки изделий на ранних стадиях производства и повышения надежности выходного контроля СВЧ-компонентов.

Список литературы

1. Chen L.F. Microwave electronics. Measurements and materials characterization / L.F. Chen, C.K. Ong, C.P. Neo, V.V. Varadan, V.K. Varadan — John Wiley & Sons, 2004. — 552 p.
2. Nicolson A.M., Ross G.F. Measurement of intrinsic properties of materials by time domain techniques / A.M. Nicolson, G.F. Ross // Trans. On Instrumentation and Measurements — 1970 — Vol. 19 (4). — P. 377-382
3. Weir W. B. Automatic measurement of complex dielectric constant and permeability at microwave frequencies / W. B. Weir // Proceedings of the IEEE — 1974 — Vol. 62 (1). — P. 33–36.
4. Musil, J. and Zacek, F. Microwave Measurements of Complex Permittivity by Free Space Methods and their Applications / J. Musil and F. Zacek — Elsevier, Amsterdam, 1986.
5. Коломин В.М., Богомолова Е.А. и др. «Резонатор для измерения комплексной диэлектрической проницаемости кольцевых диэлектриков» // Патент РФ № 2848992 от 22.10.2025 Бюл. №30.