

Министерство образования и науки Российской Федерации
Сибирский федеральный университет

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

Сборник научных трудов

Электронное издание

Научный редактор А. И. Громыко

Красноярск
СФУ
2017

ОСОБЕННОСТИ РАДИОВОЛНОВОЙ ДИАГНОСТИКИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ В ОТКРЫТЫХ РЕЗОНАТОРАХ ЧЕТЫРЕХМИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН

В. В. Бессонов, И. О. Дорофеев (научный руководитель)

Томский государственный университет

634050, г. Томск, пр-т Ленина 36

E-mail: bessonov_vitaly@mail.ru, idorofeev@mail.tsu.ru

Рассмотрена возможность использования открытого резонатора миллиметрового диапазона длин волн, как преобразователя параметров цилиндрических диэлектрических образцов. Проверена адекватность теоретической модели тонкого цилиндра в открытом резонаторе. Измерены спектральные характеристики основных нечетных по продольному индексу типов колебаний открытого резонатора в полосе частот 50–70 ГГц с образцами тонких протяженных диэлектрических цилиндров диаметром от 0,1 до 0,6 мм. Проведены оценки чувствительности преобразования в данном частотном интервале.

В настоящее время идет успешное освоение терагерцового диапазона частот, развивается также и элементная база миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн. Это позволяет создавать промышленные устройства радиоволновой диагностики, использующие технические возможности данных диапазонов. В тоже время, многие методы, используемые на более низких частотах, могут быть адаптированы здесь с учетом возникающих особенностей. Для объектов малых по сравнению с длиной волны размеров целесообразно применение высокочувствительных резонаторных методов. В сантиметровом диапазоне длин волн были созданы устройства диагностики сверхтонких проводников на основе открытых резонаторов [1]. Открытые резонаторные преобразователи целесообразно использовать также и в более высокочастотных диапазонах для диагностики нитевидных протяженных объектов.

Открытый резонатор (ОР), как контролирующий датчик имеет ряд существенных преимуществ, а именно, свободный доступ к полю резонансного колебания для нитей, достаточно разреженный спектр основных типов колебаний и просто осуществляемую селекцию высших мод, имеющую важное значение при значительных спектральных изменениях, вносимых в резонатор диэлектрическим образцом.

В России, в частности в Томском государственном университете, ведется развитие технологии производства исходного материала для саморассасывающихся медицинских нитей [2]. Для развития данной технологии востребован контроль характеристик производимого продукта при непрерывном производстве. Такой контроль должен удовлетворять всем современным требованиям, а именно, обладать быстродействием, быть неразрушающим, бесконтактным и непрерывным на всем протяжении диэлектрического цилиндрического образца.

Учитывая характерные размеры данных диэлектрических цилиндрических объектов, перспективно развитие методов с использованием открытых резонаторов, для которых есть основания ожидать увеличения разрешающей способности преобразования.

Моделью такого преобразователя может служить открытый квазиоптический резонатор с тонким, по сравнению с длиной волны используемого типа колебаний, протяженным диэлектрическим цилиндром.

Согласно результатам, полученным в работах [3, 4] для сверхтонкого проводника, расположенного в центре резонатора параллельно вектору электрического поля, сдвиг резонансной частоты основного типа колебания можно представить в виде:

$$\Delta f = \frac{2r_c}{\sqrt{2\pi w_1 w_0 \epsilon_0 L}} \operatorname{Re} \left[\sum_{n=-\infty}^{\infty} (J'_n(k_1 r_c) + A_n H_n^{(2)*}(k_1 r_c)) \right], \quad (1)$$

где r_c – радиус цилиндра; w_0 – радиус «пятна» поля в центре резонатора; w_1, k_1, ε_0 – волновое сопротивление, волновое число и диэлектрическая проницаемость свободного пространства соответственно; L – расстояние между отражателями; J'_n и $H_n^{(2)'} -$ функции Бесселя и Ханкеля второго рода соответственно (штрих означает дифференцирование по полному аргументу). Коэффициенты A_n представляют собой хорошо известные из теории рассеяния плоской волны на круговом цилиндре коэффициенты «отражения» соответствующей цилиндрической гармонике [3].

Для проверки адекватности данной модели случаю открытого резонатора с диэлектрическими цилиндрическими включениями, были проведены экспериментальные исследования в четырёхмиллиметровом диапазоне длин волн. Открытый резонатор представлял собой два одинаковых сферических отражателя диаметром 4,93 см, радиусом вогнутости 8,39 см, расположенных на расстоянии 6,61 см (рис 1, а). В центре отражателей находились элементы связи в виде узких щелей, образованных сходящимися по узкой стенке отрезками волноводов, обеспечивающих поляризацию электрического поля в резонаторе ортогональную щелям. Образцы располагались в центре резонатора ортогонально его оси, параллельно вектору электрического поля в его пучности. Измерения проводились в диапазоне от 50–70 ГГц. В данном диапазоне у открытого резонатора имелись 4 основных, нечетных по продольному индексу типов колебаний. Экспериментальная установка для измерения резонансной частоты и добротности (полосы пропускания) ОР была построена на основе анализатора цепей Agilent N4257A (рис 1, б).

В качестве образцов использовались отрезки полимерных полиэтиленовых нитей.

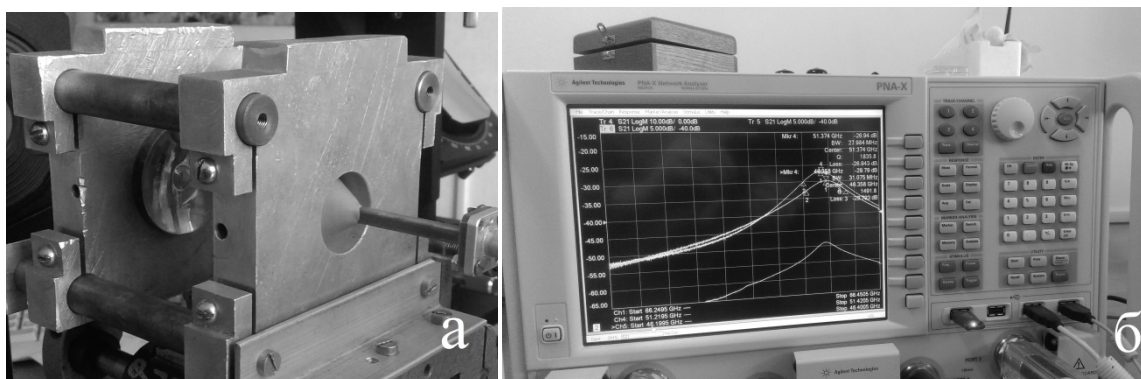


Рис. 1. Экспериментальная установка: анализатор цепей Agilent, измерительный открытый резонатор ($R = 8,39$ см, $D = 4,93$ см, $L = 6,61$ см)

Результаты измерения показали, что потери, вносимые в открытый резонатор исследуемыми образцами, по абсолютной величине малы, поэтому основным параметром, определяющим реакцию резонатора при внесении тонкого диэлектрического цилиндрического образца, является сдвиг резонансной частоты. Из графика на рис. 2 можно заметить, что сдвиг резонансной частоты нелинейно увеличивается с увеличением диаметра образца. Здесь также приведены расчетные кривые, построенные по формуле (1). Как видно, результаты расчетов хорошо согласуются с измеренными значениями сдвигов резонансных частот для цилиндров диаметром до 0,17 мм. Дальнейшее отклонение расчётных кривых от измеренных значений связано с ростом «электрических» размеров образцов $k_1 d$.

Для целей диагностики диаметра цилиндрического образца, для сопоставления результатов, полученных для различных мод, можно ввести понятие чувствительности преобразования. Имеет смысл пользоваться как абсолютной чувствительностью

$S_1 = \partial(\Delta f) / \partial d$, так и относительной $S_2 = (\Delta f_1 - \Delta f_2) / d$, где d – среднее значение диаметра в установленных интервалах. Абсолютная чувствительность для различных значений диаметра различна и увеличивается для высокочастотной моды с резонансной частотой 66,6 ГГц от $S_1 = 30,7$ МГц/мм на участке 0,1–0,12 мм до $S_1 = 115,4$ МГц/мм на участке 0,3–0,4 мм зависимости сдвига резонансной частоты от диаметра. Относительная чувствительность на данных участках составила от $S_2 = 4,54$ МГц/мм до $S_2 = 32,98$ МГц/мм. На рис. 3 представлена частотная зависимость сдвига резонансной частоты открытого резонатора для различных значений диаметра диэлектрических цилиндрических образцов. Можно заметить, что для малых диаметров частотная зависимость слабая, и проявляется только для образцов большего диаметра.

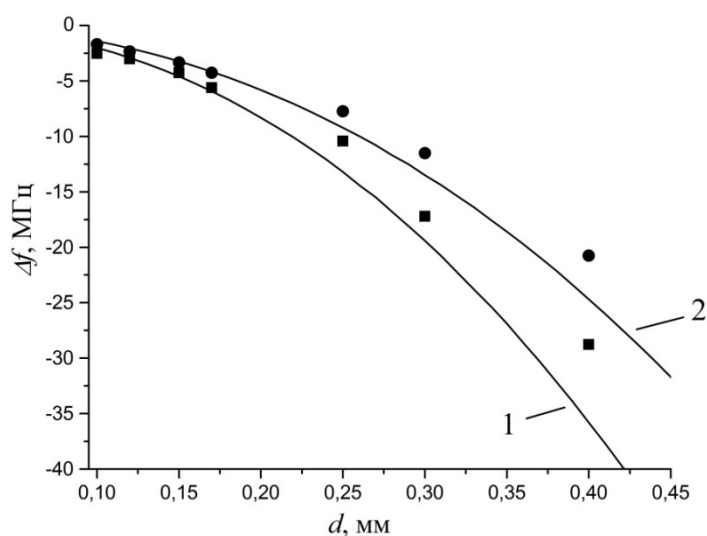


Рис. 2. Зависимость сдвига резонансной частоты открытого резонатора от диаметра цилиндра. Кривая 1 – расчетная по формуле (1) для моды с частотой 66,68 ГГц, прямоугольники – измеренные значения, кривая 2 – расчетная для моды 53,06 ГГц, кружки – измеренные значения

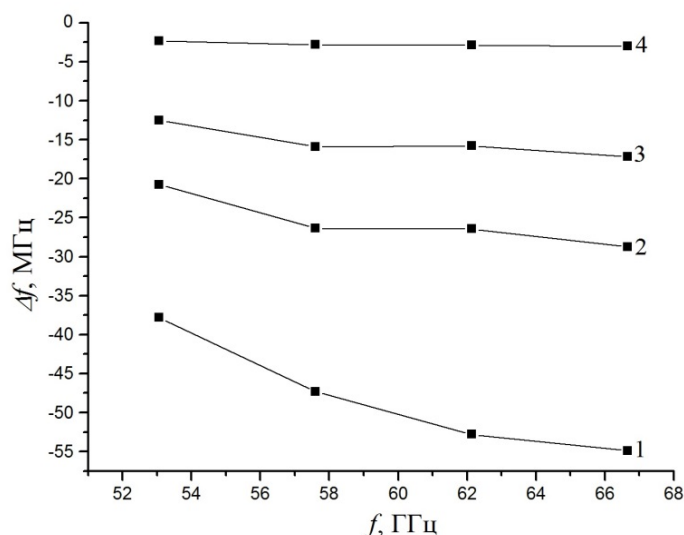


Рис. 3. Частотная зависимость сдвига резонансной частоты открытого резонатора для различных значений диаметра диэлектрических цилиндрических образцов: Кривая 1 соответствует: 1 – $d = 0,6$ мм, 2 – $d = 0,4$ мм, 3 – $d = 0,3$ мм, 4 – $d = 0,15$ мм

В результате проведенных экспериментов определены границы адекватности разработанной ранее модели открытого резонатора с тонким цилиндрическим включением для открытого резонатора четырехмиллиметрового диапазона длин волн. Показана возможность резонаторной диагностики нитевидных диэлектрических объектов и определены параметры чувствительности для фиксации их диаметра. Данные результаты могут быть положены в основу разработки устройств для бесконтактной непрерывной диагностики диаметра тонкого диэлектрического цилиндрического объекта.

Список литературы

1. Дорофеев И.О., Дунаевский Г.Е. Устройство квазиоптической резонаторной диагностики остеклованного литого микропровода // Дефектоскопия. 2014. № 12. С. 50–57.
2. Бабкина О.В., Алексеенко А.В., Немойкина А.Л. // Известия вузов. Химия и химическая технология. 2014. Т. 57. № 3. С. 79–81.
3. Бессонов В.В., Дорофеев И.О. Исследование возможности квазиоптического радиоволнового контроля медицинской нити // Изв. Вузов. Физика. 2014. Т. 57. № 3. С. 78–91.
4. Дорофеев И. О., Дунаевский Г.Е. Двухслойный тонкий цилиндр в открытом СВЧ-резонаторе // Известия вузов. Физика. 2013. Т. 56. № 1. С. 43–48.