

## ИЗМЕРЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЖИДКОСТЕЙ С ПОМОЩЬЮ РЕШЕТОК БРЭГГА В РАДИОЧАСТОТНОМ КОАКСИАЛЬНОМ КАБЕЛЕ

Севастьянов А.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВПО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ», Казань, Россия (420111, Казань, ул. Карла Маркса, 10), e-mail: aaseva@mail.ru

Рассмотрен метод измерения диэлектрических параметров жидких материальных сред, основанный на использовании в качестве элемента измерительного преобразования решетки Брэгга на радиочастотном коаксиальном кабеле. Измеритель представляет собой отрезок коаксиального кабеля с периодически расположенными отверстиями круглого сечения по всей длине кабеля. Отверстия прорезают внешнюю изоляцию, внешний проводник и внутренний диэлектрик кабеля. Кабель с подключенной согласованной нагрузкой заливают контролируемой жидкостью. С помощью метода ориентированных графов получена аналитическая зависимость для коэффициента отражения решетки Брэгга на радиочастотном коаксиальном кабеле, используемого в качестве измерителя диэлектрических характеристик жидкостей. Задачей экспериментального исследования явилось физическое обоснование возможности применения решетки Брэгга на радиочастотном коаксиальном кабеле для измерения диэлектрических характеристик жидкостей, разработка рекомендаций к построению технических средств для измерения диэлектрических характеристик жидких продуктов. Получены характеристики для бензина ( $\epsilon' = 4,5$ ,  $\text{tg}\delta = 0,01$ ) и ацетона ( $\epsilon' = 20,7$ ,  $\text{tg}\delta = 0,05$ ).

Ключевые слова: решетка Брэгга на радиочастотном коаксиальном кабеле; жидкость; диэлектрическая проницаемость.

## MEASURING OF LIQUIDS DIELECTRIC CHARACTERISTICS USING A BRAGG GRATING IN RADIO FREQUENCY COAXIAL CABLE

Sevastyanov A.A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Kazan National Research Technical University n.a. A.N. Tupolev-KAI, Kazan, Russia (420111, Kazan, Karl Marx street, 10), e-mail: aaseva@mail.ru

This paper describes the method of measuring the dielectric parameters of liquid material media, based on the use of the Bragg grating in radio frequency coaxial cables as a component of measuring conversion. Sensor is a piece of coaxial cable with periodically spaced holes of circular cross section along the entire length of the cable. Hole cut through the outer insulation, the outer conductor and the inner dielectric cable. Cable connected to a matched load pour the liquid being monitored. An analytical dependence of the reflection coefficient for the Bragg grating in radio frequency coaxial cable used as a measure of the dielectric characteristics of liquids was produced, using the method of directed graphs. Objective of the experiments was a pilot study to value the possibility of using the physical Bragg grating in radio frequency coaxial cable to measure the dielectric properties of liquids, development of recommendations to the construction of technical means for measuring the dielectric characteristics of liquid products. Specifications for gasoline ( $\epsilon = 4,5$ ,  $\text{tg}\delta = 0,01$ ) and acetone ( $\epsilon = 20,7$ ,  $\text{tg}\delta = 0,05$ ) are given.

Keywords: Bragg grating in radiofrequency coaxial cable, liquid, dielectric constant.

СВЧ-устройства, которые можно обобщить определением структуры с периодическими неоднородностями, широко известны в теории и технике направляющих и излучающих систем. Подобные устройства, принцип действия которых основан на взаимодействии прямых и многократно отраженных от неоднородностей электромагнитных волн, нашли применение при создании фильтрующих схем, формирователей и преобразователей радиочастотных сигналов.

Наблюдающаяся на современном этапе научно-технического развития тенденция трансферта оптических и радиочастотных технологий обусловила повышенный интерес к этим устройствам как аналогам оптических фотонных кристаллов, Брэгговских структур и метаматериалов. Исследование свойств таких устройств в одном диапазоне электромагнитных колебаний может помочь открыть новые качества и явления в другом диапазоне.

Одним из направлений обмена технологий являются сенсорные приложения. Примером может служить волоконно-оптическая решетка Брэгга, широко используемая в измерительной технике, аналогом которой в радиодиапазоне можно назвать коаксиальный волновод с продольными периодическими неоднородностями [1].

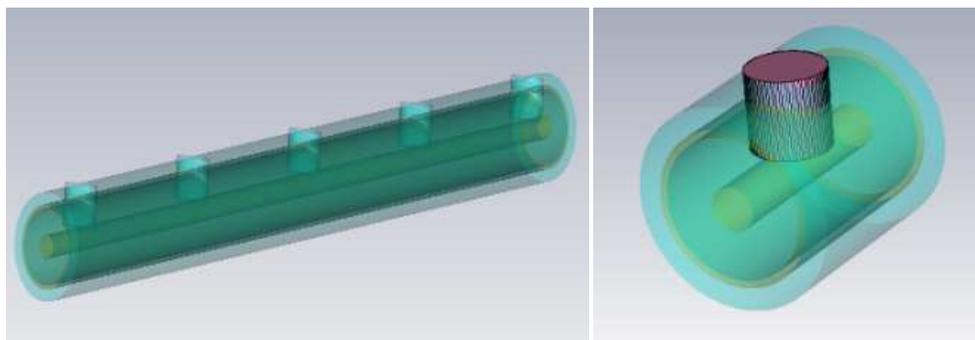
В настоящей работе рассматриваются методы измерения параметров материальных сред, основанные на использовании в качестве преобразовательного элемента решетки Брэгга на радиочастотном коаксиальном кабеле. В частности, исследуются свойства и характеристики решетки при заполнении неоднородностей различными по диэлектрической проницаемости жидкими материалами.

### **Решетки Брэгга на радиочастотном коаксиальном кабеле**

Рассмотрим свойства СВЧ-устройств с периодическими неоднородностями: фотонных кристаллов (ФК) и Брэгговских структур в коаксиальном кабеле и их приложения для измерения параметров материальных сред.

В радиочастотной области аналогом волоконной решетки Брэгга можно считать структуру, представляющую собой расположенные в направляющем волноводе периодические нерегулярности волнового сопротивления. В качестве направляющей системы может быть использован коаксиальный волновод, частным случаем такой структуры является решетка Брэгга на коаксиальном кабеле (РБКК) [4–5]. Введение нерегулярностей в поперечных сечениях оси РБКК производится высверливанием отверстий во внешнем проводнике и диэлектрическом заполнении кабеля (рис. 1).

СВЧ-системы с периодическими неоднородностями обладают большими перспективами использования в сенсорной технике в силу существования зависимостей частотных характеристик подобных структур от внешних условий: вариации электрофизических параметров материалов, контактно связанных с системой; геометрических преобразований структуры, изменений физических свойств компонентов системы [2–3].



а б

Рис. 1. Решетка Брэгга на коаксиальном кабеле:

сегмент коаксиального кабеля с нерегулярностью (а) и общий вид (б)

Проведенный анализ показывает, что связанный с неоднородностью диэлектрический материал (введенный в отверстия в случае РБКК, либо соприкасающийся с проводником в случае микрополоскового ФК) приводит к преобразованию формы частотных характеристик СВЧ периодической системы, характер которых зависит от диэлектрических параметров материального объекта. Отсюда следует, что подобный принцип может быть с успехом применен в измерителях свойств материальных сред при заполнении ими неоднородностей.

#### **Моделирование отклика РБКК при заполнении неоднородностей различными жидкостями**

Рассмотрим методы теоретического описания и компьютерного электродинамического моделирования структур в коаксиальном кабеле для реализации измерителей диэлектрических свойств материалов.

Измеритель представляет собой отрезок коаксиального кабеля с периодически расположенными отверстиями круглого сечения по всей длине кабеля. Отверстия прорезают внешнюю изоляцию, внешний проводник и внутренний диэлектрик кабеля. Кабель с подключенной согласованной нагрузкой заливают контролируемой жидкостью.

Теоретический анализ свойств и характеристик РБКК возможен следующими аналитическими и вычислительными операциями: методы численного расчета электромагнитных полей в линии передачи (теория связанных мод), приложения теории СВЧ цепей (матричный метод и метод ориентированных графов) и компьютерное моделирование в специализированных программах синтеза электродинамических структур.

Применив матричный метод описания СВЧ-устройств, можно определить частотные свойства коэффициента отражения свободного порта коаксиального кабеля. Общая матрица передачи РБКК будет определяться как:

$$[T] = \{[T^0][T_i^h]\}^n, \quad (1)$$

где  $n$  – число отверстий в коаксиальном кабеле,  $[T^0]$  – матрица передачи однородного участка,  $[T_i^h]$  – матрица передачи неоднородного участка с заполнением жидкостью.

Ориентированный граф в этом случае будет иметь вид, показанный на рис. 2, представляющий собой каскадное соединение однородных участков и участков с жидкостным заполнением.

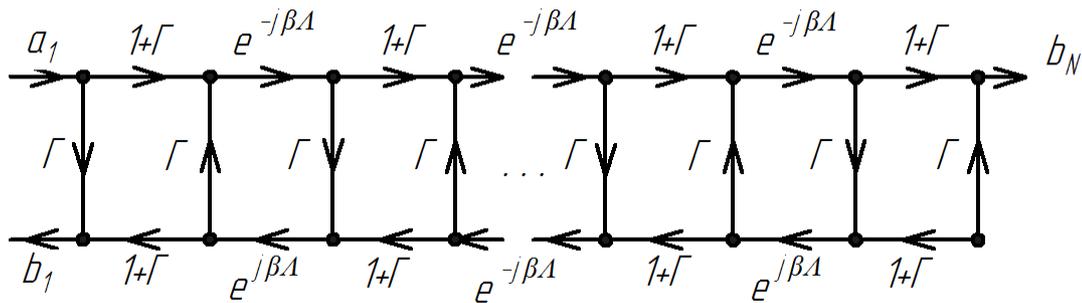


Рис. 2. Ориентированный граф измерителя

С помощью метода ориентированных графов можно получить аналитическую зависимость для коэффициента отражения РБКК, используемого в качестве измерителя диэлектрических характеристик жидкостей.

В результате решения данного ориентированного графа с помощью метода не касающегося контура [4] получим выражение для коэффициента отражения РБКК:

$$\Gamma_{\text{РБКК}} = \Gamma \exp^{-j2\beta\Delta} \left\{ 1 - [(1 + \Gamma)^2 \exp^{-j2\beta\Delta}]^N \right\} / [1 - (1 + \Gamma)^2 \exp^{-j2\beta\Delta}], \quad (2)$$

при этом выражение для коэффициента отражения от неоднородности в общем виде можно представить как:

$$\Gamma = -y / (2 + y), \quad (3)$$

где  $y = g + jb$  – нормированная полная проводимость неоднородности, заполненной конкретной жидкостью, причем характеристики последнего звена определяются характеристиками согласующей проводимости.

Полученные расчетные характеристики для бензина ( $\epsilon' = 4,5$ ,  $\text{tg}\delta = 0,01$ , линия 1) и ацетона ( $\epsilon' = 20,7$ ,  $\text{tg}\delta = 0,05$ , линия 2) показаны на рис. 3.

При этом для воздуха центральная частота резонансной характеристики РБКК будет находиться на частоте 2,45 ГГц с коэффициентом отражения 0,9.

## Экспериментальное исследование измерителя диэлектрических параметров жидких продуктов на РБКК

Задачей экспериментального исследования явилось физическое обоснование возможности применения РБКК для измерения диэлектрических характеристик жидкостей, разработка рекомендаций к построению технических средств для измерения диэлектрических характеристик жидких продуктов.

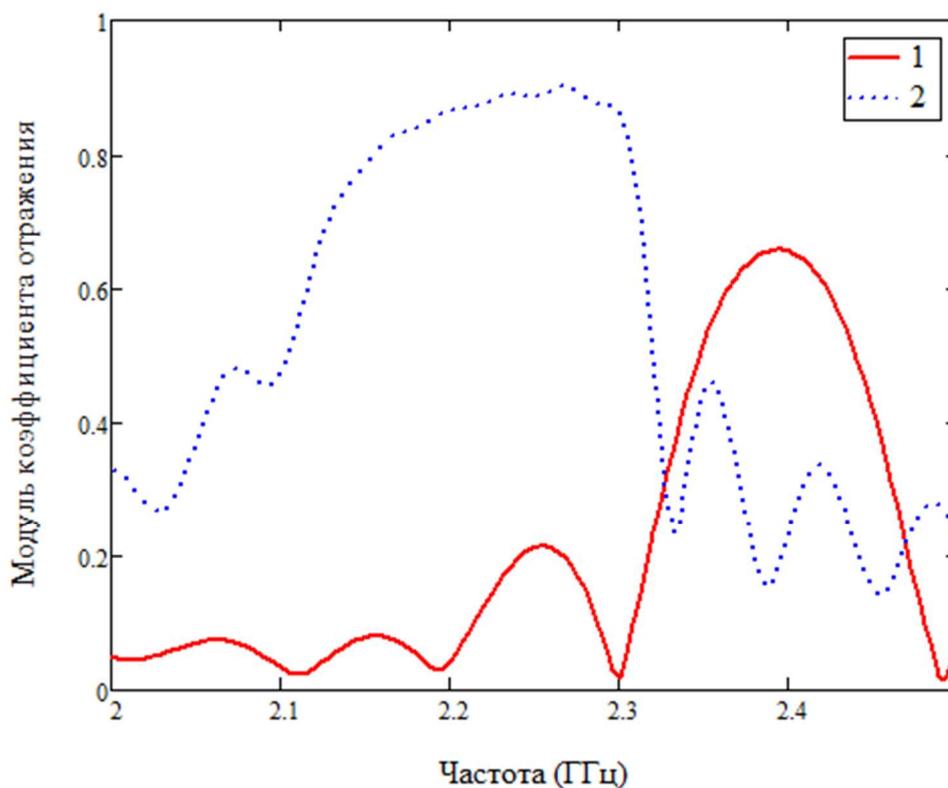


Рис. 3. Расчетные характеристики коэффициента отражения РБКК при заполнении бензином (линия 1) и ацетоном (линия 2)

Методика измерения характеристик РБКК, используемой в качестве измерителя диэлектрических характеристик жидких материалов, состоит из следующих операций:

1. К векторному анализатору цепей подключается через соединительный кабель коаксиальный кабель без отверстий с подключенной согласованной нагрузкой (калибровка 1).
2. Производится высверливание отверстий в коаксиальном кабеле с заданным периодом, количеством, диаметром и глубиной.
3. К разъему РБКК подключается согласованная нагрузка, которая герметизируется с помощью пластикового пакета.

4. Свободный конец РБКК подключается через соединительный кабель к векторному анализатору цепей и измеряется коэффициент отражения при воздушном заполнении отверстий (калибровка 2).

5. Отверстия РБКК заливают исследуемой жидкостью.

6. По изменившимся характеристикам отражения РБКК определяют диэлектрические параметры жидкости и ее тип (или концентрацию раствора).

**Заключение.** В результате проведенных исследований разработаны принципы построения, методы анализа и синтеза измерителей диэлектрических параметров жидкостей, основанных на Брэгговских сенсорных структурах в радиочастотном коаксиальном кабеле.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках базовой и проектной частей государственного задания на оказание услуг (выполнение работ) по организации научных исследований, выполняемых ФГБОУ ВПО «КНИТУ-КАИ» на кафедре телевидения и мультимедийных систем и в научно-исследовательском институте прикладной электродинамики, фотоники и живых систем (программа «Фотоника», задание 3.1962.2014К).*

### Список литературы

1. Куприянов В.Г., Морозов О.Г., Насыбуллин А.Р. и др. Маломодовое зондирование датчиков на основе волоконных решеток Брэгга // Научно-технический вестник Поволжья. — 2013. — № 4. — С. 200-204.
2. Морозов О.Г., Морозов Г.А., Насыбуллин А.Р. и др. Резонансный метод мониторинга технологического процесса отверждения полимеров // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. — 2012. — № 1(15). — С. 67-75.
3. Морозов О.Г., Морозов Г.А., Насыбуллин А.Р. и др. Резонансные методы мониторинга технологических процессов отверждения полимеров в функционально адаптивных СВЧ-реакторах // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. — 2012. — Т. 14 (35). — № 1 (2). — С. 568-572.
4. Морозов О.Г., Насыбуллин А.Р., Севастьянов А.А. и др. Двухчастотный метод определения параметров резонансных датчиков СВЧ-диапазона // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. — 2014. — № 1 (20). — С. 76-86.
5. Насыбуллин А.Р., Морозов О.Г., Севастьянов А.А. Брэгговские сенсорные СВЧ-структуры на коаксиальном кабеле // Журнал радиоэлектроники. — 2014. — № 3. [электронный ресурс]. — Режим доступа. — URL:<http://jre.cplire.ru/koi/contents.htm> l.

**Рецензенты:**

Морозов О.Г., д.т.н., профессор, директор научно-исследовательского института прикладной электродинамики, фотоники и живых систем ФГБОУ ВПО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ», г. Казань;

Морозов Г.А., д.т.н., профессор, директор Казанского филиала ФГБОУ ВПО «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики», г. Казань.