

УДК 621.317.335.3

DOI 10.52928/2070-1624-2026-46-1-34-39

МИКРОВОЛНОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ СРАВНИТЕЛЬНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ МАТЕРИАЛОВ

*д-р техн. наук, проф. А. В. ГУСИНСКИЙ, д-р техн. наук, проф. М. В. ТУМИЛОВИЧ,
канд. техн. наук, доц. Н. А. ПЕВНЕВА, канд. физ.-мат. наук В. Н. РОДИОНОВА,
В. А. ШУТОВИЧ*

(Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск)

канд. техн. наук О. В. ТАНАНА

(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

Разработаны метод и физико-технические принципы активной непараметрической идентификации объектов исследования в многомодовых резонансных СВЧ-системах для сравнительной идентификации материалов (твердых, жидких, газообразных) с целью мониторинга исходных (промежуточных) материалов при производстве (эксплуатации) продукции, которая позволяет быстро (время измерения – несколько минут) без использования расходных материалов определить с высокой точностью (количество определяемых параметров от 3 до 15) отличие от образца (эталона) как в лабораторных условиях, так и в непрерывном технологическом процессе, что способствует повышению надежности и увеличению срока эксплуатации изделий.

Ключевые слова: *сверхвысокие частоты, многомодовые резонаторы, электродинамические характеристики, идентификация материалов.*

Введение. Уровень разработки и внедрения новых технологий в наукоемкие сферы промышленности характеризуется не только объемом производства и ассортиментом выпускаемой продукции, но также показателями ее качества. Высокое качество обеспечивается повышенным уровнем контроля продукции, в частности, диагностикой материалов, из которых она изготовлена. Трудоемкость контроля качества некоторых изделий в промышленности и разработка новых материалов составляет 15–20 % общих трудозатрат на их изготовление. Значимость и актуальность идентификации объектов исследования подтверждается тем, что этот вид деятельности за последние десятилетия стал объектом регламентирования в нормативных документах: законах, стандартах и правилах. В производственных системах идентификация технологических материалов позволяет определить возможные места появления дефектов, проводить оперативный и систематический анализ причин дефектов и выработку корректирующих действий. Разработка метода многомодовой резонансной идентификации и контроля материалов обеспечивает высокий уровень тождественности и подлинности объекта исследования с высокой степенью достоверности на основе выявления и измерения перечня существенных признаков благодаря применению многомодового (до 8 типов колебаний и 24 частотных, амплитудных параметров и параметров добротности) режима работы высокочастотного СВЧ-резонатора.

Резонансная частота и добротность резонатора напрямую зависят от диэлектрических характеристик исследуемых объектов [1–3]. Характеристикой конденсированного вещества (газов, жидкостей, твердых тел) в СВЧ-диапазоне является комплексная диэлектрическая проницаемость образца. Использование резонаторов для изучения этих параметров позволяет существенно повысить чувствительность измерений за счет усиления СВЧ-поля в образце вещества, а также за счет возможности прецизионного измерения частотных сдвигов в резонаторах большой добротности [4]. Образец может занимать весь объем, или часть объема резонатора, или же помещаться в виде небольшого образца в определенном месте резонатора – в максимум электрического СВЧ-поля.

Резонансные методы для исследования веществ отражены в некоторых работах [5–7], но измерения на одной частоте вызывают неоднозначность получаемых результатов.

Предлагаемый нами метод многомодовой резонансной идентификации позволяет избежать данной неоднозначности.

Состояние исследований в данной области. В производственных системах качества идентификация технологических материалов позволяет определить возможные места появления дефектов, проводить оперативный и систематический анализ причин дефектов и выработку корректирующих действий. Важным фактором, влияющим на работоспособность изделий микроэлектроники, является присутствие фоновых, неконтролируемых примесей (технологических примесей). Их наличие в сочетании с изменяющимися условиями эксплуатации может приводить к отказам в работе интегральных микросхем. Применение микроволновой технологии сравнительной идентификации материалов (твердых, жидких, газообразных) для мониторинга исходных (промежуточных) материалов при производстве (эксплуатации) продукции позволяет быстро (время измерения несколько минут) без использования расходных материалов определить с высокой точностью (количество определяемых параметров от 3 до 15) отличие от образца (эталона) как в лабораторных

условиях, так и в непрерывном технологическом процессе, что способствует повышению надежности и увеличению срока эксплуатации изделий.

Современные измерительные методы определения значений показателей для идентификации диэлектрических материалов в микроэлектронике можно условно разделить на оптические (включая спектрометрию), радиометрические, термометрические и ряд других [8–10]. Все используемые на практике в настоящее время измерительные методы трудоемки, а проведение измерений занимает значительное время. Анализ продукции ведущих мировых производителей электронных компонентов (Honeywell, Michelin, Texas Instruments Transense, Motorola, Murata, RFSAW, Fujitsu, Vishay, Epcos и др.) позволяет выявить основные тенденции и перспективы развития метрологического обеспечения качества идентификация технологических материалов микроэлектроники. В стратегической программе исследований технологической платформы «СВЧ технологии», принятой в Российской Федерации, разработка комплексов специального назначения и высокоточного метрологического оборудования (в области СВЧ-радиоприборостроения) отнесена к классу особо важных. В Республике Беларусь, в связи с открытием новых радиофизических специальностей в ряде вузов, наращиванием мощностей ряда предприятий микроэлектроники и радиотехники, актуальны разработка и создание нового класса метрологического оборудования, чему в стандартах и правилах придается первостепенное значение.

Метод активной непараметрической идентификации объектов исследования в многомодовых резонансных СВЧ-системах. Данный метод основан на измерении изменений резонансных характеристик многомодового резонатора:

$$\frac{\omega_1 - \omega_0}{\omega_1} = \frac{\epsilon' g}{2};$$

$$\frac{1}{Q_0} - \frac{1}{Q_1} = (\epsilon'') g,$$

где ω_1 и ω_0 – резонансные частоты резонатора (с исследуемым объектом и без него), ГГц;
 ϵ' и ϵ'' – действительная и мнимая части диэлектрической проницаемости образца;
 Q_0 – добротность пустого резонатора;
 Q_1 – добротность резонатора с исследуемым образцом;
 g – коэффициент заполнения резонатора.

Инженерный расчет резонаторов проводится по диаграмме типов колебаний (рисунок 1), которая представляет собой графическое изображение уравнения

$$(f_p D)^2 = \left(\frac{cx_{lm}}{\pi}\right)^2 + \left(\frac{cn}{2}\right)^2 \left(\frac{D}{L}\right)^2,$$

где f_p – резонансная частота резонатора, ГГц;
 D – диаметр резонатора, мм;
 L – длина резонатора, мм;
 c – скорость света, м/с;
 n – число полуволн, укладываемых вдоль оси резонатора при резонансе;
 x_{lm} – значения корней Бесселевых функций или их производных в зависимости от типа колебаний.

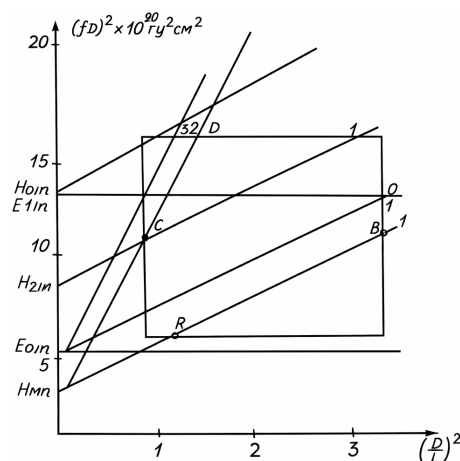


Рисунок 1. – Диаграмма типов колебаний цилиндрического резонатора

Задавая необходимые параметры f_p , D , L и выбрав рабочий тип колебаний (основной тип колебаний, который будет иметь собственную добротность порядка 40 000), выполнили расчет геометрических размеров экспериментального образца резонатора.

Конструкция резонатора. Расчет резонатора проводился на основном типе колебаний H_{11n} . Возбуждение резонаторов на волне H_{11n} ведется с боковой поверхности магнитной связью, то есть петлей (центр петли связи расположен на расстоянии $\lambda/4$ от короткозамыкающей крышки). По результатам расчетов разработана конструкторская документация и изготовлен образец резонатора, макет которого показан на рисунке 2.



Рисунок 2. – Многомодовый неперестраиваемый цилиндрический резонатор

Одной из сложных задач, возникающих при разработке многомодовых резонаторов, является согласование резонатора на нескольких типах колебаний (как на основном, так и на сопутствующих). Для решения этой задачи выполнен расчет оптимального возбуждения многомодовой резонансной СВЧ-системы.

Размеры петли связи подбираются экспериментально на самой высокодобротной моде резонатора (обычно это среднее по индексу n колебание, из присутствующих в резонаторе) для получения КСВ $< 1,1$. Резонатор был «недосвязан» для колебаний с нижним значением индекса n и «пересвязан» для колебания с верхним индексом n .

При измерениях спектральных характеристик многомодового резонатора использовался векторный анализатор цепей Anritsu MS4644B. На рисунке 3 представлен спектр резонансных частот многомодового неперестраиваемого высокодобротного резонатора с широкополосным устройством связи.

На экране векторного анализатора цепей показаны результаты коэффициента отражения четырех типов колебаний высокодобротного резонатора в диапазоне частот 1,7–3,0 ГГц.

С использованием данного многомодового неперестраиваемого высокодобротного резонатора выполнен комплекс исследований характеристик жидких и твердых материалов электродинамическими методами [11].

Проведено исследование электрофизических параметров жесткости воды. Исследовались образцы дистиллированной воды, ультрачистой воды, воды с различной жесткостью. Образцы отличаются друг от друга по электрофизическим параметрам и характеризуются собственной частотой, амплитудой и добротностью многомодового СВЧ-резонатора (рисунок 4).

На рисунке 5 приведены результаты исследования солевой концентрации воды. Исследовались образцы дистиллированной воды с различной концентрацией соли. Образцы отличаются друг от друга по электрофизическим параметрам и характеризуются собственной частотой, амплитудой и добротностью многомодового СВЧ-резонатора.

Установлена зависимость физико-химических характеристик идентифицируемых объектов (концентрации химических растворов) от электродинамических характеристик многомодовых резонансных СВЧ-систем (резонансной частоты и коэффициента поглощения). Как показали исследования, наибольшую эффективность дает применение резонаторов для сравнительных измерений близких по составу образцов или для высокочувствительного контроля различных физических и структурных параметров (концентрации, состава, примесей, плотности и т. д.) жидких сред.

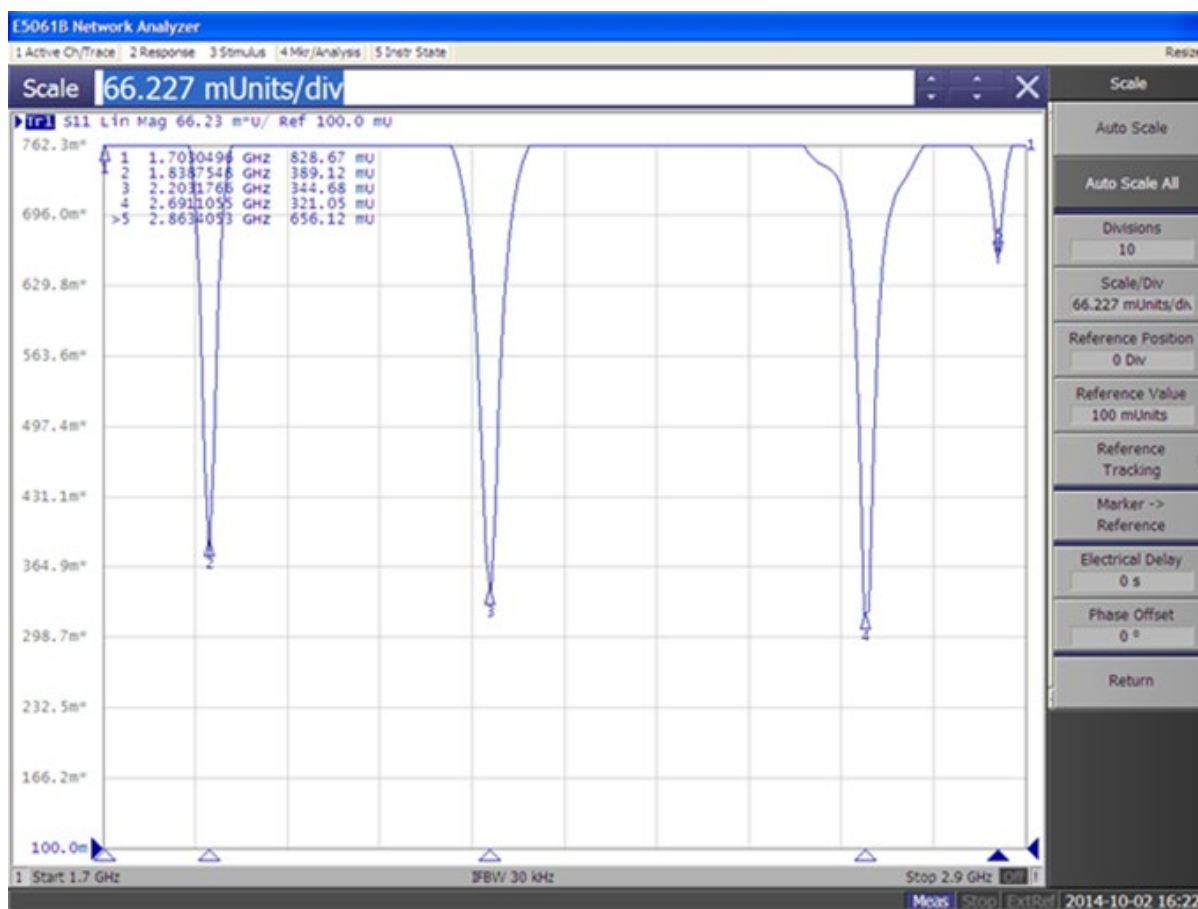


Рисунок 3. – Резонансные частоты многомодового неперестраиваемого высокодобротного резонатора с широкополосным устройством связи

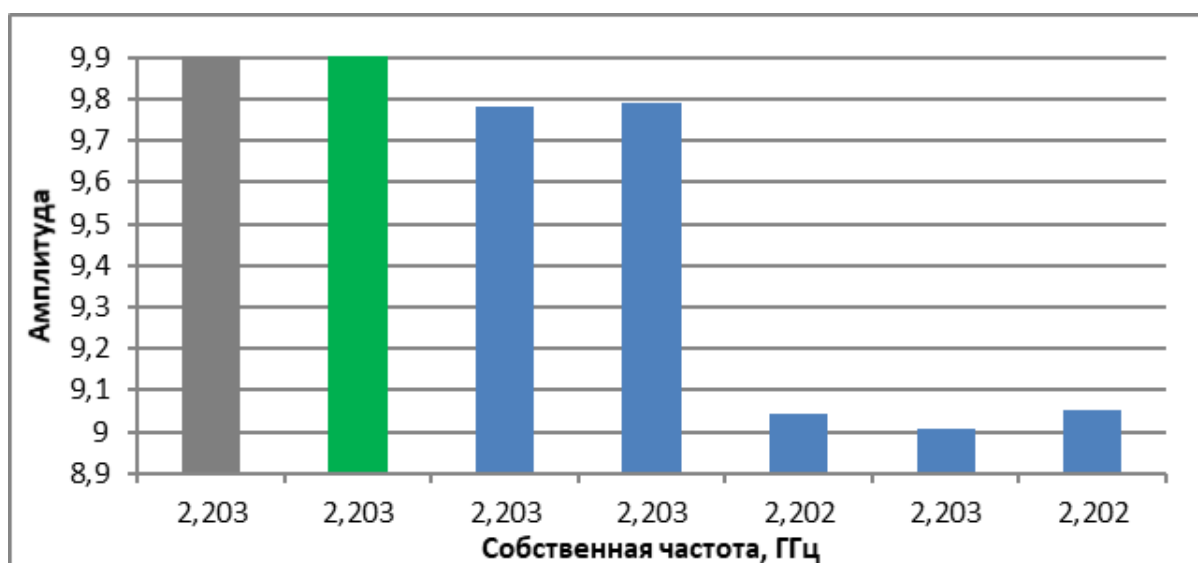


Рисунок 4. – Амплитуды и собственные частоты образцов воды с различной жесткостью



Рисунок 5. – Амплитуды и собственные частоты образцов воды с различной концентрацией соли

Заключение. Выполнен расчет многомодовой резонансной СВЧ-системы и ее оптимального возбуждения. Разработана конструкторская документация, изготовлены резонатор и его устройства связи. Разработаны физико-технические принципы построения измерительного тракта схемы многомодовой резонансной идентификации и контроля материалов. Установлена зависимость физико-химических характеристик идентифицируемых объектов от электродинамических характеристик многомодовых резонансных СВЧ-систем.

Метод многомодовой резонансной идентификации и контроля материалов обеспечивает достоверное подтверждение тождественности и подлинности объекта исследования на основе выявления и измерения комплекса существенных признаков благодаря применению многомодового режима работы высокочастотного СВЧ-резонатора (до 8 типов колебаний и 24 параметра частотных, амплитудных и добротности).

ЛИТЕРАТУРА

1. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Электродинамика сплошных сред. – М.: Наука, 1982. – 621 с.
2. Электродинамика специальных высокочастотных резонансных систем и микроволновые технологии / В. А. Карпович, Г. Я. Слепян, В. Н. Родионова и др. // Фундаментальные и прикладные физические исследования. 2002–2009 гг.: сб. науч. тр.; под ред. проф. В. Г. Барышевского. – Мн.: БГУ, 2009. – С. 291–321.
3. Комплект измерительных сверхвысокочастотных резонаторов / В. Н. Родионова, В. А. Карпович, О. В. Танана, Т. В. Гаевская // Приборы и техника эксперимента. – 2013. – № 3. – С. 1–6.
4. Танана О. В., Карпович В. А., Слепян Г. Я. Метод определения комплексной диэлектрической проницаемости композитных наноматериалов по электродинамическим параметрам СВЧ-резонаторов // Вестник БГУ. Серия 1, Физика. Математика. Информатика. – 2013. – № 2. – С. 28–31.
5. Егоров В. И. Резонансные методы исследования диэлектриков на СВЧ // ПТЭ. – 2007. – № 2. – С. 5–38.
6. Певнева Н. А., Гусинский А. В., Гурский А. Л. СВЧ метод определения диэлектрических свойств жидкостей // Доклады БГУИР. – 2012. – № 5(67). – С. 46–50.
7. Лабутин С. А., Лопаткин А. В. Резонаторная система с в.ч.-измерений комплексной диэлектрической проницаемости материалов // ПТЭ. – 1998. – № 3. – С.166–167.
8. Barsoukov E., MacDonald J. R. Impedance spectroscopy: theory, experiment, and applications. – Hoboken: Wiley-Interscience, 2005. – 595 p.
9. Бояршинова А. К., Фишер А. С. Теория инженерного эксперимента: текст лекций. – Челябинск: ЮУрГУ, 2006. – 85 с.
10. Dorman J. L., Fionari D., Trons E. // Advances in Chemical Physics. – 1997. – Vol. XC VIII. – P. 283 – 477.
11. Гусинский А. В., Певнева Н. А., Родионова В. Н. Резонансные методы технического контроля и диагностики материалов для устройств микро-, опто- и СВЧ-электроники // III междунар. науч.-техн. конф. «Микро-, опто- и СВЧ-электроника – 2025», 14–17 октября 2025 года, г. Минск / Нац. акад. наук Беларуси, Гос. науч.-производ. объединение «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»; редкол.: М. В. Богданович, И. В. Семченко, А. Ю. Панарин, А. Л. Чиж. – Минск, 2025. – С. 30–32.

Поступила 12.01.2026

**MICROWAVE TECHNOLOGY
FOR COMPARATIVE IDENTIFICATION OF MATERIALS****A. GUSINSKIY, M. TUMILOVICH, N. PEVNEVA,
V. RODIONOVA, V. SHUTOVICH****(Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk)****O. TANANA****(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk)**

A method and the physical-technical principles of active nonparametric identification of research objects in multimode microwave resonant systems have been developed for comparative material identification (solid, liquid, and gaseous). This method enables rapid (measurement time of several minutes) and reagent-free determination of deviations from a reference sample (standard) with high accuracy (the number of determined parameters ranges from 3 to 15) both in laboratory conditions and in continuous technological processes. Its application contributes to increased reliability and extended service life of products through monitoring of initial and intermediate materials during production (or operation).

Keywords: *microwave frequencies, multimode resonators, electrodynamic characteristics, material identification.*