Посвящается
70-летию РНТОРЭС

КрыМиКо 2015 CriMiCo

25-я Международная Крымская конференция

СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии

Материалы конференции

6—12 сентября 2015 г.
Севастополь, Крым, Россия

2015 25th International Crimean Conference

Microwave & Telecommunication Technology

Conference Proceedings

September 6—12, 2015
Sevastopol, Crimea, Russia

В двух томах
In Two Volumes

Том 1
Volume 1

Moscow • Minsk • Sevastopol
2015

УДК 621.3.029.62+621.39
ББК 32я431
С255

Организаторы:

Российское научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи (РНТОРЭС) им. А. С. Попова
Крымский научно-технологический центр им. проф. А. С. Попова (Севастополь)
Российский фонд фундаментальных исследований (РФФИ)
Севастопольский государственный университет
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (Минск)
Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)
НП ОАО «Фаза» (Ростов-на-Дону)
ОАО «НПП "Исток" им. Шокина» (Фрязино)
ЗАО «Микроволновые системы» (Москва)
НПП «Системные ресурсы» (Москва)
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
НПФ «Микран» (Томск)
ООО «Радиокомп» (Москва)
Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина (Екатеринбург)
Keysight Technologies (Москва)
SD Solutions (Санкт-Петербург)
Крымский федеральный университет им. проф. В. И. Вернадского (Симферополь)
НИИ «Крымская астрофизическая обсерватория» (Кацивели)

Информационная поддержка:

Журнал «Вестник электроники»

25-я Международная Крымская конференция «**СВЧ-техника** и телекоммуникационные
С255 технологии» (КрыМиКо'2015). Севастополь, 6—12 сентября 2015 г. : материалы конф. в 2 т. — Севастополь, 2015. — Т. 1: 666 с. (1—596) + 70 с.: ил. — ISBN 978-1-4673-9414-7.

В 1-й том сборника материалов включены 277 из 588-ти прошедших рецензирование и включенных в программу конференции докладов, которые будут представлены на секциях: Материалы и технология СВЧ-приборов; Нанотехнологии и наноматериалы; Наноэлектроника; Нанотехнологии и наноэлектроника; СВЧ-электроника сверхбольших мощностей и эффекты; Радиационная стойкость материалов и ЭКБ; Электромагнитная стойкость материалов и ЭКБ; Измерение параметров цепей и сигналов; Измерение параметров материалов и технологических процессов; Антенные измерения; Обработка результатов измерений и другие приложения; Контроль и управление в технологических процессах; СВЧ-технологии в задачах мониторинга окружающей среды; Радиофотоника; Микроволновые технологии в биологии и медицине; Радиоастрономия и распространение радиоволн в атмосфере Земли; Методы и средства ДЗЗ; Моделирование и реализация комплексов и систем. Авторами представленных на конференции докладов являются 1216 ученых и специалистов 194-х университетов и предприятий 14-ти стран: Беларуси, Великобритании, Дании, Ирака, Казахстана, Канады, Кореи, Польши, России, Румынии, Украины, Швеции, ЮАР и Японии.

Материалы конференции изданы также на компакт-диске.

Сборник предназначен для широкого круга специалистов в области СВЧ-техники и телекоммуникационных технологий. Сборник также будет полезен студентам и аспирантам телекоммуникационных, радиотехнических и радиофизических факультетов вузов.

УДК 621.3.029.62+621.39
ББК 32я431

IEEE Catalog Number CFP15788-PRT
ISBN 978-1-4673-9413-0 (CD)
ISBN 978-1-4673-9414-7

© Оргкомитет КрыМиКо'2015
© КНТЦ им. Попова, 2015

TWO-PARAMETER RESONATOR TESTING OF GLASS-COATED MICROWIRE

Dorofeev I. O., Dunaevskii G. T., Shpilnoy V. Yu.
National Research Tomsk State University
Lenina avenue, 3, Tomsk, 634050 Russian Federation
Ph.: +7(3822) 413989, e-mail:idorofeev@mail.tsu.ru

Abstract — The possibility of implementing the method of two-parameter non-contact monitoring of vitrified microwires based on a fixation reaction of the two main open-oscillations types of the microwave resonator with a large-spaced resonant frequencies is considered. This paper presented results of the measurement of the resonance frequency shift and broadening of the bandwidth for the modes of compact open resonator with resonant frequencies of 8.8 and 67.3 GHz when two sets of samples placing in it: a non-magnetic and magnetic properties. Shown that it is possible to obtain information about the two independent characteristics of microwire core if using frequency dependence of the results of the interaction of field open resonator with microwire.

ДВУХПАРАМЕТРОВЫЙ РЕЗОНАТОРНЫЙ КОНТРОЛЬ ЛИТОГО ОСТЕКЛОВАННОГО МИКРОПРОВОДА

Дорофеев И. О., Дунаевский Г. Е., Шпильной В. Ю.
Национальный исследовательский Томский государственный университет
Ленина проспект, 36, Томск, 634050, Российская Федерация
тел.: +7(3822) 413989, e-mail:idorofeev@mail.tsu.ru

Аннотация — Рассмотрена возможность реализации метода двухпараметрового бесконтактного контроля остеклованного микропровода, основанная на фиксации реакции двух основных типов колебаний открытого СВЧ резонатора с большим разносом резонансных частот. Приведены результаты измерений сдвигов резонансной частоты и уширений резонансной кривой для мод малогабаритного открытого резонатора с резонансными частотами 8.8 ГГц и 67.3 ГГц при размещении в нем двух наборов образцов: немагнитного и с магнитными свойствами. Показано, что, используя частотную зависимость результатов взаимодействия поля открытого резонатора с микропроводом, можно получить информацию о двух независимых характеристиках жилы микропровода.

I. Введение

В настоящее время одной из актуальных задач является создание современных искусственных материалов для СВЧ диапазона. Под современными материалами прежде всего имеются ввиду метаматериалы, причем все большее внимание привлекают управляемые метаматериалы, электрофизические свойства которых изменяются под тем или иным воздействием (прежде всего электрическим, магнитным, механическим). В качестве составляющей компоненты таких метаматериалов, как правило, композитов, перспективно использование литого остеклованного микропровода, производимого по технологии Улитовского-Тейлора [1].

Для получения материала с заданными свойствами необходимо знать характеристики исходных компонентов на частотах его применения. Микропровод, как правило имеет значительный разброс параметров даже в пределах одной катушки из-за особенностей его получения. Поэтому важен предварительный неразрушающий радиоволновый контроль СВЧ характеристик используемых проводников.

Одним из наиболее перспективных датчиков для устройств такого контроля является открытый СВЧ резонатор [2]. Однако до настоящего времени такие датчики использовались в однопараметровом режиме, в основном для фиксации диаметра жилы микропровода. В настоящей работе предлагается использование открытого резонатора для фиксации одновременно двух характеристик тонких проводников [3].

II. Основная часть

Двухпараметровый контроль сверхтонких проводников с помощью открытого резонатора основан на использовании частотной зависимости характеристик жилы микропровода. В сантиметровом диапазоне длин волн взаимодействие микропровода, используемого в качестве компонента искусственного материала с электромагнитным полем характеризуется, как правило, слабым скин эффектом. Это значит, что проводимость и магнитные свойства жилы существенно влияют на эффективность такого взаимодействия. Кроме того, значительное влияние оказывает значение диаметра жилы. Таким образом, при использовании единственного выходного сигнала резонаторного датчика, полученного при преобразовании результатов взаимодействия резонансного пучка с микропроводом, на его величину будут влиять изменения как геометрических, так и электрофизических параметров проводника. Поэтому для однопараметрового контроля необходимо иметь дополнительную информацию о неизменности остальных характеристик микропровода. С другой стороны, с увеличением частоты, в общем случае за счет усиления скин-эффекта, влияние электрофизических параметров жилы ослабевает. На достаточно высокой частоте результат взаимодействие поля открытого резонатора с проводником будет определяться только значением его диаметра. Необходимо лишь, чтобы на данной частоте влияние стеклянной изоляции оставалось бы по-прежнему несущественным.

Для исследования возможности использования открытого резонатора, как двухпараметрового датчика микропровода, была разработана его конструкция, обеспечивающая возбуждение двух основных типов колебаний со значительным разносом резонансных частот. Резонансная частота низкочастотной моды выбиралась исходя из необходимости обеспечения слабого скин-эффекта в микропроводе и требований к геометрическим размерам датчика и составила

2015 25th Int. Crimean Conference "Microwave & Telecommunication Technology" (CriMiCo'2015). 6—12 September, Sevastopol, Crimea
© 2015: CriMiCo'2015 Org. Com. ISBNs: 978-1-4673-9413-0, 978-1-4673-9414-7, 978-1-4673-9415-4. IEEE Cat. Nr. CFP 15788

величину порядка 10 ГГц. Выбор резонансной частоты высокочастотной моды обуславливался необходимостью обеспечить значительный скин-эффект в микропроводе, а также наличием доступной промышленной базы СВЧ элементов и составил величину около 70 ГГц. Геометрические характеристики изготовленного резонатора составили: диаметр отражателей – 12.7 см, радиус вогнутости – 17.6 см, расстояние между ними - 12.8 см с возможностью перестройки в небольших пределах. Вблизи центра каждого отражателя находились элементы связи в виде узких щелей, образованных сходящимися отрезками волноводов трехсантиметрового и четырехмиллиметрового диапазонов длин волн.

С помощью анализатора цепей фирмы Agilent измерялись изменения резонансной частоты и полосы пропускания двух мод резонатора при размещении в нем образцов микропровода с различными геометрическими и электрофизическими параметрами жилы. Первый набор образцов представлял собой микропровод из немагнитного материала диаметром жилы от 2.6 до 17.2 микрон и удельной проводимостью $7 \cdot 10^5$ См/м. Второй – диаметром жилы от 2.6 до 23.9 микрон, с близким значением удельной проводимости ($7.27 \cdot 10^5$ См/м), изготовленный из материала с естественным ферромагнитным резонансом в диапазоне частот 8 – 12 ГГц.

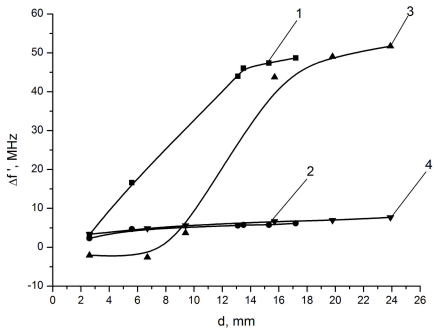

Рис. 1. Зависимость сдвига резонансной частоты открытого резонатора от диаметра микропровода. Кривые 1, 2 - образцы микропровода с жилой из резистивного сплава, 3,4 – с жилой из сплава с естественным ферромагнитным резонансом соответственно для мод с частотами 8.8 и 67.3 ГГц.

Fig. 1. Dependence of shift of resonant frequency of microwires diameter. Curves 1,2 – microwire with hi-resistive core, 3,4 – with natural ferromagnetic resonance core material for a mode with resonance frequency 8.8 and 67.3 GHz

Как видно из представленных графиков, реакция низкочастотной моды (сдвиг резонансной частоты и уширение резонансной кривой) существенно зависит от диаметра и магнитной проницаемости жилы микропровода, реакция же высокочастотной моды в основном зависит только от диаметра проводника. Таким образом, в данном случае для построения схемы двухпараметрового контроля можно использовать частотную зависимость магнитной проницаемости проводника. Фиксация преобразованного сигнала высокочастотной моды позволит извлечь информацию об изменении диаметра жилы микропровода. Преобразованный же сигнал низкочастотной моды будет содержать информацию как о магнитной проницаемости жилы, так и о ее диаметре. Разделить данные о разных параметрах можно с помощью обработки обоих сигналов.

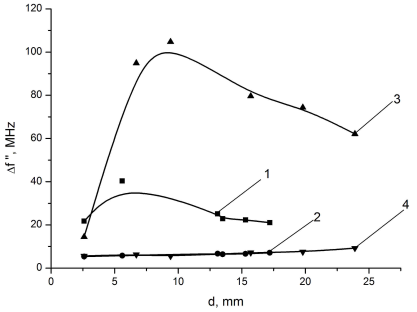

Рис. 2. Зависимость уширения резонансной кривой от диаметра микропровода. Кривые 1, 2 - образцы микропровода с жилой из резистивного сплава, 3,4 – с жилой из сплава с естественным ферромагнитным резонансом соответственно для мод с частотами 8.8 и 67.3 ГГц.

Fig. 2. Dependence broadening of bandwidth of microwires diameter. Curves 1,2 – microwire with hi-resistive core, 3,4 – with natural ferromagnetic resonance core material for a mode with resonance frequency 8.8 and 67.3 GHz.

В данном случае использовался эффект явной частотной зависимости магнитной проницаемости жилы, поэтому влиянием скин-эффекта на высокой частоте можно пренебречь. В общем же случае, именно скин-эффект будет определять уменьшение реакции высокочастотной моды на электрофизические параметры жилы микропровода.

III. Заключение

Таким образом, экспериментально показана возможность использования открытого СВЧ резонатора в качестве датчика для двухпараметрового бесконтактного неразрушающего контроля жилы остеклованного литого микропровода под слоем стеклянной изоляции.

Открытый резонатор в предложенной схеме практически не имеет альтернативы, так как, имея достаточно разреженный спектр и хорошую возможность селекции мод, обеспечивает возможность возбуждения двух типов колебаний со значительным разносом резонансных частот.

Работа выполнена в рамках базовой части государственного задания при финансовой поддержке Минобрнауки России (код проекта 1975).

IV. References

[1] F.X. Qin, H.X. Peng, M.H. Phan, L.V. Panina, M. Ipatov, A. Zhukov Effects of wire properties on the field-tunable behavior of continuous-microwire composites *Sensors and Actuators A: Physical,* May 2012, Volume 178, pp. 118–125.

[2] I.O Dorofeev., G.E. Dunaevskii A Device for the quasi-optical resonance diagnostics of a glass-coated cast microwire *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2014, Vol. 50, No. 12, pp. 741–747.

[3] *Dorofeev I.O., Dunaevskij G.E., Shpilnoj V.Yu. Patent na p.m. 148988 (RF) Ustrojstvo dvuhparametrovogo kvaziopticheskogo kontrolja sverhtonkih pro-vodnikov Opubl. v B.I., 2014. №35.*

© 2015: CriMiCo'2015 Org. Com. ISBNs: 978-1-4673-9413-0, 978-1-4673-9414-7, 978-1-4673-9415-4. IEEE Cat. Nr. CFP 15788