

PACS numbers: 07.57. – с, 77.22.Ch

КВЧ ДИЭЛЕКТРОМЕТРИЯ СИЛЬНОПОГЛОЩАЮЩИХ СРЕД. ИСТОЧНИК ИЗЛУЧЕНИЯ, ОБЛАСТЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Е.А. Архипова, П.С. Красов, А.И. Фисун

Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины
ул. Ак. Проскуры 12, 61085, Харьков, Украина
E-mail: arkhykate@gmail.com

С применением компьютерного моделирования оптимизирована конструкция измерительной кюветы разработанного ранее диэлектрометра, в результате чего повышена чувствительность и точность измерений. В работе также описаны требования к характеристикам генератора, используемого в диэлектрометре, и обоснован выбор способа его стабилизации.

***Ключевые слова:* КВЧ ДИЭЛЕКТРОМЕТРИЯ, МОДУЛЬ КОЭФФИЦИЕНТА ОТРАЖЕНИЯ, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ КЮВЕТА, СИЛЬНОПОГЛОЩАЮЩИЕ СРЕДЫ.**

(Получена 31.03.2010, в отредактированной форме – 14.04.2010)

1. ВВЕДЕНИЕ

Исследование диэлектрических свойств веществ является важной как научной, так и прикладной задачей. Диэлектрометрия позволяет получать информацию о строении молекул вещества и их симметрии [1], форме и геометрических размерах [2], содержании воды в различных веществах [3], а также структурных изменениях, происходящих под действием внешних факторов [4-6]. Исследование диэлектрических свойств биологических объектов проводится, как правило, с помощью микроволновой диэлектрометрии, в частности – диэлектрометрии КВЧ диапазона, – выступающей в качестве тонкого инструмента изучения водных структур. Это обусловлено наличием у молекул воды, основного компонента биосистем, дипольного момента и вращательной степени свободы. Наиболее привлекательным в диэлектрометрии биообъектов является, безусловно, высокая точность измерений в режиме реального времени, полностью исключающем разрушение объекта, что является важным фактором при исследовании функциональных свойств биосистем.

С помощью метода КВЧ-диэлектрометрии изучают эффекты гидратации [7-9], процессы комплексообразования [6], конформационные переходы биополимеров и состояние воды в биосистемах различных уровней организации [9-13]. По измеренным диэлектрометрическим параметрам крови людей можно судить о функциональном состоянии различных систем организма в норме и при патологии [14-16].

Проведенные в клинических условиях тестовые эксперименты по измерению диэлектрических характеристик крови человека и оценки адренореактивности эритроцитов [17], показали, что измерительный комплекс на основе разработанного ранее рефлектометра [18] требует усовершенствования. Измерительная кювета для биологических объектов

теряет стабильность измерений при длительном (6-8 часов) интенсивном использовании, а также при измерении временных зависимостей диэлектрической проницаемости. Оказалось, что при некоторых особенностях материала пациентов, чувствительности измерительного комплекса было недостаточно для статистически достоверной дифференциации реакции клеток крови на воздействие биологически активными веществами.

Цель настоящей публикации заключается в усовершенствовании измерительной кюветы путем компьютерного моделирования физических процессов взаимодействия электромагнитных волн с веществом, разработке требований к характеристикам источника излучения и выбору способа стабилизации источника, используемого в диэлектрометре.

2. ПРОБЛЕМЫ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ДИЭЛЕКТРОМЕТРИИ СИЛЬНО ПОГЛОЩАЮЩИХ СРЕД

С целью доработки измерительной кюветы, входящей в состав комплекса, была проведена серия численных экспериментов по оптимизации структуры волноводных фланцев частей кюветы и подбору оптимальных с точки зрения чувствительности и возможности реализации толщин прокладок, ограничивающих образец.

Для задачи моделирования применялся программный комплекс, разработанный в отделе математической физики ИРЭ НАН Украины [19]. Данный программный продукт позволяет производить расчет и анализ распространения электромагнитных волн в сложных структурах, состоящих, в том числе из диэлектрика произвольной формы с известными параметрами диэлектрической проницаемости и проводимости. Вычислительные эксперименты, результаты которых представлены в данной работе, были проведены методом конечных разностей во временной области (FDTD). При этом рассматриваются двумерные начально-краевые задачи для E-поляризованного поля. Характеристики временной области переводятся в характеристики частотной области с помощью преобразования Фурье [20].

Кювета в модельном эксперименте представляла собой слоистую двумерную структуру, состоящую из измеряемого образца и ограничивающих его прокладок, расположенных в закороченном с одного конца волноводе, и полностью заполняющих его сечение.

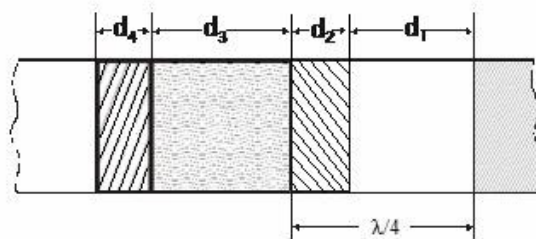


Рис. 1 – Двумерная слоистая структура кюветы: d_1 , – толщина пустого волновода, граничащего с короткозамыкателем, d_2 , d_4 – толщины прокладок, ограничивающих образец, d_3 – толщина образца

В эксперименте оптимизировались толщины каждого слоя. В качестве тестовых веществ выступали вода и водные растворы этилового спирта с молярными долями этанола $\chi_1 = 0,04$ и $\chi_2 = 0,08$. Для этих веществ с достаточной точностью известны значения комплексной диэлектрической проницаемости [21,22], с которыми хорошо согласуются измеренные нами экспериментальные значения [17]. Вычислялась частотная зависимость коэффициента отражения от оптимизируемой структуры при внесении тестового вещества. Полоса использованных частот соответствует рабочей полосе волновода и представляется в виде волнового числа.

В процессе оптимизации проводился подбор ограничивающей прокладки, граничащей с короткозамыкателем. В существующей кювете она изготовлена из фторопласта и имеет толщину, равную четверти рабочей длины волны в волноводе. Волновое число, соответствующее рабочей частоте, $k = 827$. Как показало моделирование (рис. 2), чувствительность можно увеличить до полутора раз, используя прокладку меньшей толщины. При этом абсолютная величина модуля коэффициента отражения в меньшей степени зависит от девиаций рабочей частоты. Наблюдается также уменьшение модуля коэффициента отражения, что дополнительно улучшает результат, т.к. используемая четырехзондовая измерительная линия дает при этих значениях лучшую статистическую достоверность.

Проведенные экспериментальные измерения хорошо согласуются с расчетными данными и демонстрируют увеличение чувствительности в 1,5 раза по модулю коэффициента отражения.

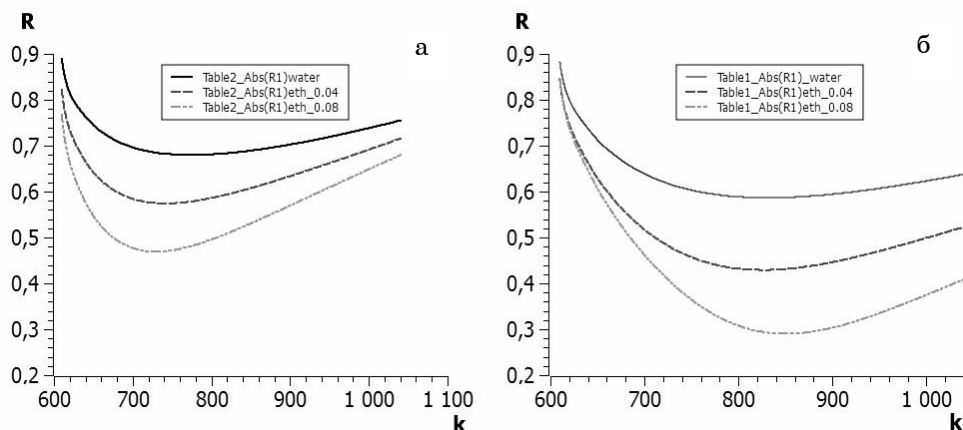


Рис. 2 – Зависимость модуля коэффициента отражения (R) моделируемой кюветы от волнового числа (k) при значениях толщин оптимизируемой прокладки 1,4 мм (а) и 0,8 мм (б) при внесении тестовых образцов в структуру

Таблица 1 – Экспериментальные значения модуля коэффициента отражения

Толщина прокладки, мм	Дистиллированная вода	Раствор этанола с мольной долей $\chi = 0,08$
1,4	$0,676 \pm 0,003$	$0,537 \pm 0,004$
0,8	$0,574 \pm 0,003$	$0,357 \pm 0,005$

3. ТРЕБОВАНИЯ К ИСТОЧНИКУ КВЧ ИЗЛУЧЕНИЯ

В устройствах для измерения диэлектрической проницаемости в сильно поглощающих средах к источнику предъявляются следующие требования: высокая кратковременная и долговременная стабильность частоты генератора, низкое напряжение питания, приемлемые габариты и вес.

Использование метода автоматической подстройки частоты (АПЧ) по внешнему высокостабильному сигналу, в котором используется стабилизированный кварцевым резонатором умножитель частоты, – довольно сложный путь достижения высокой стабильности. К тому же, при АПЧ-стабилизации частотные шумы источника подавляются только в полосе захвата [23]. Стабилизация частоты внешней резонансной системой получила широкое распространение ввиду простоты ее технической реализации. В работах [24,25] предложено использовать квазиоптической принцип развития схем стабилизации частоты и мощности твердотельных генераторов, т.е. использовать для этих целей открытые резонаторы (ОР) и диоды Ганна (ДГ). Для обеспечения устойчивого режима генерации в колебательной системе необходимо обеспечить высокое разрежение спектра собственных частот. В пределе необходимо стремиться к одночастотному режиму возбуждения ОР в полосе возбуждения колебаний активного элемента – ДГ. Кроме этого, необходимо согласовать импеданс нелинейного элемента (низкое сопротивление порядка нескольких Ом) и ОР, который обладает сопротивлением, приближающимся к сопротивлению свободного пространства.

Предложен так называемый сфероуголково-эшелеттный ОР, в котором одно из зеркал выполнено из двух эшелеттов, расположенных под углом блеска относительно оси ОР и имеющих общую вершину на оси резонатора. Детальный анализ электродинамических свойств сфероуголково-эшелеттного ОР [1] показал, что в резонаторах данного типа решетка является дополнительным селективным элементом, а его свойства определяются пересечением двух условий резонанса: кратностью длины волны резонатора целому числу полуволн:

$$L = q\lambda/2, \quad (1)$$

где $q = 1, 2, 3, \dots$ – продольный индекс ТЕМ-колебаний; и автоколлимационным отражением.

В случае прямоугольного эшелетта и его установки под углом автоколлимационного отражения $\varphi = 45^\circ$ к оси ОР второе условие можно выразить через высоту ступени эшелетта:

$$n = n\lambda/2 \quad (2)$$

где n – номер волны Флоке, на практике $n = 1, 2, 3, 4, 5$. Одновременно условия (1) и (2) выполняются на безразмерной частоте:

$$K_r = nL/2h \quad (3)$$

Механизм формирования поля квазиосновных типов колебаний детально изучен [25]. В данной работе укажем лишь на то, что поле стягивается к оси резонатора и дифракционные потери на этом типе колебаний значительно ниже, чем на основном. Поскольку поле стянуто к оси резонатора, этот факт может служить предпосылкой для уменьшения

апертуры зеркал без существенного увеличения дифракционных потерь и снижения добротности.

Для проектирования генератора Ганна на заданную частоту на основании анализа модели уголково-эшелеттного ОР была получена эмпирическая формула для высоты ступени. При условии возбуждения резонатора на квазиосновном типе колебаний высота ступени эшелетта выбирается из соотношений:

$$h^H = 0.56\lambda \quad (4)$$

для Н-поляризованной волны, и

$$h^E = 0.48\lambda \quad (5)$$

для Е-поляризованной волны.

4. КВАЗИОПТИЧЕСКИЙ ГЕНЕРАТОР НА ДИОДЕ ГАННА

Для автоматизированного диэлектрометра, работающего на фиксированной частоте 39,5 ГГц [18], которая находится в области дисперсии свободной воды, разработан генератор Ганна, стабилизированный сфероуголково-эшелеттным ОР по схеме с реактивно-отражающим резонатором [23]. Конструкция исследуемого генератора в сечении по плоскости, проходящей через ось резонатора и перпендикулярной образующим эшелеттов, показана на рис. 3.

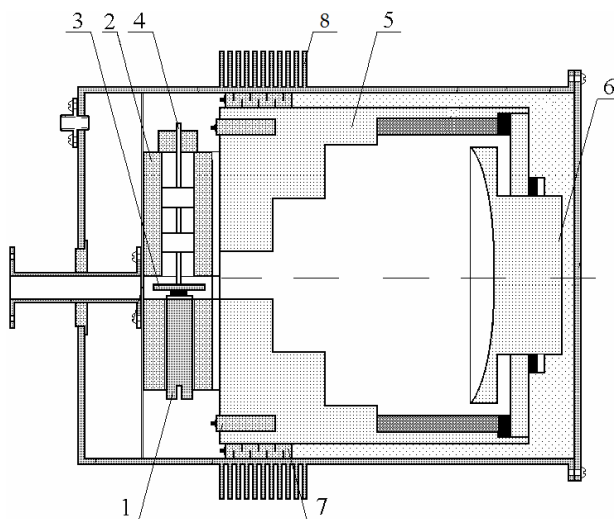


Рис. 3 – Конструкция квазиоптического твердотельного генератора

Диод 1 на столбике установлен во вставке 2 сечением волновода $7,2 \times 3,4$ мм. Корпус диода Ганна и диск 3 образуют первичный резонансный контур. Напряжение питания подается через штырь 4 с высокочастотным фильтром.

В данном генераторе для стабилизации частоты используется малогабаритный квазиоптический сфероуголково-эшелеттный ОР. Он образован уголково-эшелеттным зеркалом 5, состоящим из двух

ступенчато-деформированных поверхностей. Это зеркало для улучшения механической жесткости резонатора изготовлено как единое целое с корпусом ОР. Второе зеркало 6 с радиусом кривизны $R = 78$ мм составляет единое целое с механизмом перемещения, который служит для настройки резонатора на требуемую частоту. Апертуры зеркал одинаковы, и равны $a = 41$ мм ($5,2 \lambda_{cp}$). Длина резонатора $L = 45 \div 46$ мм выбиралась из соображений минимизации массы и габаритов прибора и не критична к условиям устойчивости, которые необходимо выполнить для эквивалентного ОР с плоским и сферическим зеркалом вследствие того, что исследуемый ОР возбуждается на квазиосновном типе, поле которого стянуто к оси резонатора (дифракционные потери минимальны). Корпус и эшелетты ОР выполнены из суперинвара с коэффициентом линейного температурного расширения $K = 2,61 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, а зеркало 6 - из меди с $K = 16,7 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Регулировочный винт зеркала, кроме роли механизма настройки, играет роль температурного компенсатора.

Частота генерации на квазиосновном типе колебаний зависит от длины резонатора L , высоты ступени h и радиуса кривизны зеркала R : $F_g = f(L, h, R)$. Уход частоты, вызванный изменением температуры резонатора, является функцией линейного расширения материала α и изменением показателя преломления заполнителя $\Delta F_g / \Delta T = f(\alpha, L, \varepsilon)$, при этом изменение кривизны зеркала и высоты ступени не учитывается.

С целью улучшения долговременной стабильности источника излучения в конструкции, кроме герметизации, предусмотрена система температурной стабилизации [25]. Величина теплового потока и его направление в процессе стабилизации температуры ОР регулируется двумя батареями элементов Пельтье 7, установленными между корпусом ОР и внешним радиатором 8, изготовленным из алюминия ($K = 209$).

Измерение характеристик генератора проведено с помощью стандартной аппаратуры: частота измерялась гетеродинным частотомером ЧЗ-66, для измерения мощности использовался измеритель МЗ-53 и спектр генерации исследовался анализатором спектра С4-28.

На рис. 4 представлены частота и выходная мощность генератора в зависимости от длины резонатора L при механической перестройке ОР.

Из рис. 4 видно, что генерация носит зонный характер. Однако, в отличие от генераторов, в которых использовались ОР без дополнительных дисперсионных элементов (зеркала гладкие) [24], периодичности зон генерации не наблюдается. Наиболее выраженной является зона, в которой выполняются условия возбуждения квазиосновного типа (при длине резонатора $L = 45,5 \div 45,4$ мм; $\lambda \sim 7,59$ мм; продольное число $q = 12$; квазиосновной TEM_{0012}). Относительная перестройка частоты в этой зоне составляет около 0,5 %. Другие зоны генерации, в которых источник излучения возбуждается, носят неустойчивый характер.

Долговременная стабильность генерации в данных условиях обеспечивается стабильностью геометрических размеров ОР и согласующих цепей, а также герметизацией всего узла в целом. При разных режимах стабилизации при колебании внешней температуры элементы Пельтье могут работать как охлаждающие или нагревательные элементы. На рис. 5 показано отклонение частоты, измеренное с помощью частотомера типа ЧЗ-66.

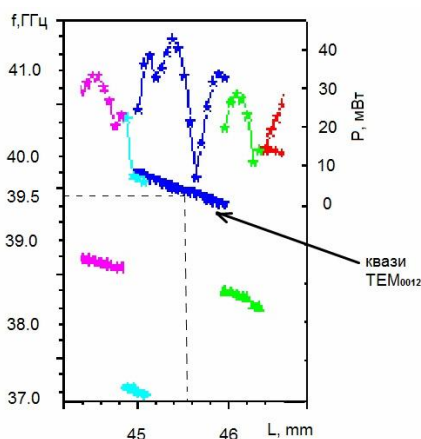


Рис. 4 – Зависимость частоты и выходной мощности от длины сферуюгловоло-эшелетного ОР

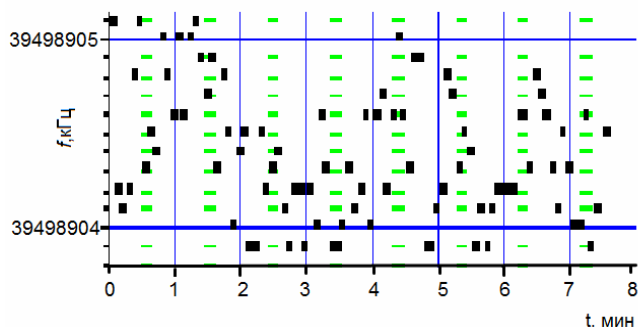


Рис. 5 – Девияция частоты после выхода на стабильный температурный режим термостата

Основные характеристики генератора: частота генерации $F_g = 39,5$ ГГц; кратковременная нестабильность частоты $\Delta F_g/F_g = 1,6 \cdot 10^{-8}$, измеренная за секунду; уровень частотных шумов – не более 105 дБ/Гц при расстройке на 20 кГц от несущей; ширина спектральной линии не превышает 0,25 кГц; выходная мощность составила 30 мВт. Электронная перестройка генератора составила величину порядка 8 МГц/В, что свидетельствует о высокой добротности колебательной системы и хорошем согласовании нелинейного элемента. Долговременная нестабильность, оцененная по измерениям частоты гетеродинным частотомером $\Delta F_g/F_g \sim 3 \cdot 10^{-7}$, сохраняется при времени измерения более 1 часа при активном термостатировании температуры $\Delta T \sim 0,1$ К при поддержании температуры генератора 34 °С.

5. ВЫВОДЫ

Таким образом, в результате работы проведено моделирование измерительной кюветы, в которой происходит взаимодействие

электромагнитного излучения с веществом. Определены оптимальные размеры и толщин диэлектрических прокладок, ограничивающих объем кюветы. Повышена чувствительность и точность диэлектromетра, т.к. используемая в диэлектromетре четырехзондовая измерительная линия дает при оптимальных размерах лучшую статистическую достоверность измерений. Показано, что использование квазиоптического термостатированного источника излучения на диоде Ганна улучшает эксплуатационные характеристики диэлектromетра. Снижение частотных шумов генератора позволяет улучшить соотношение сигнал-шум и тем самым повысить чувствительность, термостабилизация источника позволяет сократить время введения устройства в рабочий режим, и проводить измерения в течение 6-8 часов без внесения систематических ошибок, вызванных уходом частоты.

КВЧ ДІЕЛЕКТРОМЕТРІЯ СИЛЬНОПОГЛИНАЮЧИХ СЕРЕДОВИЩ. ДЖЕРЕЛО ВИПРОМІНЮВАННЯ, ОБЛАСТЬ ВЗАЄМОДІЇ

К.А. Архипова, П.С. Красов, А.И. Фисун

Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України
вул. Ак. Проскури 12, 61085, Харків, Україна
E-mail: arkhykate@gmail.com

Із застосуванням комп'ютерного моделювання оптимізована конструкція вимірювальної кювети розробленого раніше діелектromетра, в результаті чого підвищена чутливість і точність вимірювань. У роботі також описані вимоги до характеристик генератора, що використовується в діелектromетрі, та обґрунтований вибір способу його стабілізації.

Ключові слова: КВЧ ДІЕЛЕКТРОМЕТРІЯ, МОДУЛЬ КОЕФІЦІЄНТА ВІДБИТТЯ, ВИМІРЮВАЛЬНА КЮВЕТА, СИЛЬНОПОГЛИНАЮЧІ СЕРЕДОВИЩА.

EHF DIELECTROMETRY OF HIGH-LOSS MEDIA. RADIATION SOURCE, THE INTERACTION REGION

К.А. Arkhykova, P.S. Krasov, A.I. Fisun

A.Ya. Usikov Institute of Radio Physics and Electronics NAS of Ukraine
12 Ak. Proskura Str., 61085, Kharkov, Ukraine
E-mail: arkhykate@gmail.com

By means of computer simulation the measuring cell design has been optimized. It was resulted in increased sensitivity and accuracy of measurements. The paper also deals with performance requirements for the generator used in dielectrometer and justified the choice of its stabilization mode.

Keywords: EHF DIELECTROMETRY, REFLECTION COEFFICIENT MODULE, MEASURING CUVETTE, HIGH-LOSS MEDIA.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. S. Mashimo and T. Umehara, *J. Chem. Phys.* **95**, 6257 (1991).
2. K. Asami, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **42**, 135503 (2009).

3. Meyer W., Schilz W.M, *IEEE T. Microw. Theory* **29**, 732 (1981).
4. Т.Ю. Щеголева, В.Г. Колесников *Биофизика* **42**, 834 (1997).
5. E.V. Hackl, S.V. Gatash, O.T. Nikolov, *J. Biochem. Bioph. Meth.* **63**, 137 (2005).
6. В.А. Кашпур, В.Я. Малеев, О.В. Хорунжая, *Радиофизика и электроника* **13**, 446 (2008).
7. G.H. Haggis, T.J. Buchanan and J.V. Hasted, *Nature* **167**, 607 (1951).
8. Н.Г. Есипова, Т.Ю. Щеголева, *Биофизика* **26**, 501 (1983).
9. Т.Ю. Щеголева, Л.К. Бахова, *Биофизика* **31**, 358 (1986).
10. T.Yu. Shchegoleva and T.V. Parshikova, *Telecommun. Radio Eng.* **65**, 1247 (2006).
11. Т.Ю. Щеголева, *Применение миллиметрового диапазона радиоволн в медицине* (Харьков: ХИМБ: 1999).
12. А.Н. Кузнецов, И.И. Турковский, *Биофизика*. **48**, 73 (2003).
13. В.В. Мериякри, *Электромагнитные волны. Электронные системы* **10**, 31 (2005).
14. Е.В. Свиридова, Т.Ю. Щеголева, *Кардиология* **11**, 58 (1993).
15. О.Н. Ковалева, Т.Ю. Щеголева, *Медицина сегодня и завтра* **3**, 37 (2001).
16. О.В. Висоцька, К.А. Архипова, *Восточно-Европейский журнал передовых технологий* **6/7**, 17 (2009).
17. P.S. Krasov, E.A. Arkhipova, *Telecommun. Radio Eng.* **68**, 727 (2009).
18. П.С. Красов, *Прикладная радиоэлектроника* **7**, 188 (2008).
19. Ю.К. Сиренко, *Моделирование и анализ переходных процессов в открытых периодических, волноводных и компактных резонаторах* (Харьков: ЭДЭНА: 2003).
20. Y.K. Sirenko, S. Strom, N.P. Yashina, *Modeling and analysis of transient processes in open resonant structures. New methods and techniques* (New York: Springer: 2007).
21. W.J. Ellison, *J. Phys. Chem. Ref. Data* **36**, 1 (2007).
22. T. Sato, R. Buchner, *J. Phys. Chem.* **108**, 5007 (2004).
23. С.И. Выровой, С.Н. Гуменный, Ю.А. Цвирко, *Электронная техника. Сер. 1 Электроника СВЧ.* **3**, 47 (1976).
24. O.I. Belous, A.I. Fisun, *Int. J. Infrared. Milli.* **21**, 1451 (2000).
25. O.I. Belous, A.I. Fisun, A.A. Kirilenko, V.I. Tkachenko, *Electromagnetic Waves & Electronic Systems* **3**, 56 (1998).
26. A.I. Fisun, *Electron. Lett.* **34**, 192 (1998).