

А. А. Баранник, С. А. Витусевич*, И. А. Проценко

Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины

12, ул. Акад. Проскуры, Харьков, 61085, Украина

E-mail: i.o.protsenko@gmail.com

**Peter Grünberg Institute Forschungszentrum Juelich, Юлих, Германия*

ДВУХСЛОЙНЫЙ КВАЗИОПТИЧЕСКИЙ ЛЕЙКОСАПФИРОВЫЙ РЕЗОНАТОР ДЛЯ ДИЭЛЕКТРОМЕТРИИ БИОЛОГИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ

Резонаторы с волнами шепчущей галереи могут использоваться для исследования конденсированных сред, в частности для изучения свойств диэлектрических жидкостей. Однако электродинамические свойства реальных резонаторных структур указанного типа изучены недостаточно. Исследован микроволновый отклик радиально-двухслойного квазиоптического резонатора в виде диэлектрического цилиндрического кольца, зажато между двумя плоскими проводящими торцевыми стенками. Реальный резонатор имеет, как правило, дополнительный слой между лейкосапфировым кольцом и проводящей поверхностью, что исключает строгое решение соответствующей электродинамической задачи. Лейкосапфировый резонатор исследован методами численного моделирования и экспериментальных измерений его микроволнового отклика в 8-мм диапазоне. Получено хорошее соответствие экспериментально измеренных и вычисленных значений добротности и резонансных частот. Показано, что резонатор позволяет изменять комплексную диэлектрическую проницаемость водных растворов с погрешностью около 3 %. Ил. 5. Табл. 3. Библиогр.: 8 назв.

Ключевые слова: радиально-двухслойный резонатор, моды шепчущей галереи, комплексная диэлектрическая проницаемость, биологические жидкости.

Применение резонаторов с модами шепчущей галереи (ШГ), называемых также квазиоптическими диэлектрическими резонаторами (КДР), для определения диэлектрических свойств веществ позволяет, как правило, добиться высокой точности измерений благодаря высокой добротности резонаторных структур. Для определения комплексной диэлектрической проницаемости жидкостей были предложены радиально-двухслойные цилиндрические КДР с торцевыми проводящими стенками (ТПС) [1, 2]. Исследуемая жидкость помещается во внутреннюю полость КДР, т. е. представляет внутренний слой резонатора. Частота и добротность такого резонатора зависят от свойств жидкости во внутреннем слое. Отсюда следует принципиальная возможность определять свойства исследуемой жидкости по измеренным характеристикам резонатора.

В [3, 4] исследовался и использовался в качестве измерительной ячейки радиально-двухслойный тефлоновый резонатор с ТПС. Были проведены расчеты частоты и добротности резонатора на основе характеристического уравнения и экспериментальные исследования при заполнении полости резонатора водно-спиртовыми растворами, и сопоставлены их результаты. Однако чувствительность использованного резонатора оказалась недостаточной.

Сделано предположение, что более высокую чувствительность измерений может обеспечить резонатор, изготовленный из диэлектрика, характеризуемого более высокими значениями проницаемости [5]. Кроме того, такой резонатор в принципе позволяет исследовать меньшие объемы веществ. В [5] представлены результаты численных исследований радиально-двухслойного цилиндрического КДР, проницаемость диэлект-

рика которого равна проницаемости лейкосапфира. Экспериментальные исследования показали, что в реальных условиях всегда имеют место микрозазоры между лейкосапфировым диском и металлом, заполненные воздухом или жидкостью. Кроме того, аналитический подход, используемый в работах [5, 6], не учитывает потери в металлических стенках, т. е. торцевые стенки резонатора задаются как идеальные.

В данной работе рассмотрен радиально-двухслойный лейкосапфировый резонатор с медными ТПС, который может быть использован как основа измерительной ячейки для изучения жидкостей. Для лучшей фиксации и во избежание появления воздушных зазоров и проникновения воды в них торцевые стенки фиксировались с помощью клея БФ-2. Слой клея оказывает влияние на частоту и добротность резонатора, и это влияние не учитывается при использовании строгих аналитических методов [3–6]. В программе *COMSOL Multiphysics* была создана модель резонатора, позволяющая учесть особенности реальной резонаторной структуры. В работе сопоставляются результаты численных и экспериментальных исследований лейкосапфировых КДР с целью определения, может ли реальная резонаторная структура быть использована в качестве измерительной ячейки для определения диэлектрической проницаемости жидкостей.

Проведены экспериментальные исследования резонатора при заполнении внутренней полости растворами биологических жидкостей. Действительная и мнимая части комплексной диэлектрической проницаемости растворов определялись с помощью калибровочной процедуры, предложенной в [7].

1. Радиально-двухслойный КДР – основа измерительной ячейки. Основой измерительной ячейки является цилиндрический КДР, внешний слой которого изготовлен из лейкосапфира. Диаметр резонатора $D_2 = 14,51$ мм, высота $H_{\text{КДР}} = 2,51$ мм, диаметр внутреннего слоя (полости) $D_1 = 8,54$ мм. Резонатор ограничен двумя идеально проводящими плоскостями. Исследуемое вещество представлено внутренним слоем резонатора (рис. 1) [1].

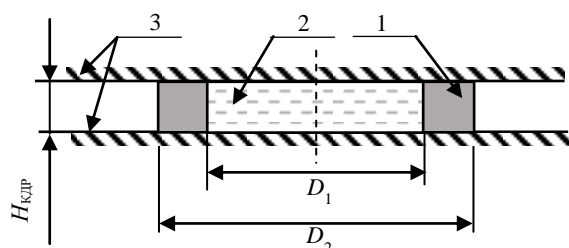


Рис. 1. Резонатор из лейкосапфира (1) с внутренним слоем (полостью) (2), ограниченный идеально проводящими плоскостями (3)

Исследуемое вещество взаимодействует с электромагнитным полем резонатора и, следовательно, оказывает влияние на его характеристики. Таким образом, используя изменения значений резонансной частоты и добротности, полученные экспериментально при заполнении резонаторной полости жидкостью, можно определить диэлектрическую проницаемость исследуемого вещества.

Однако для экспериментальных исследований использовался КДР с двумя ТПС, изготовленными из меди ($D_{\text{ТПС}} = 20$ мм, $H_{\text{ТПС}} = 5$ мм). Исследуемое вещество помещается в полость резонатора через отверстия в ТПС ($D_{\text{отв.}} = 3$ мм). Схематически измерительная ячейка показана на рис. 2.

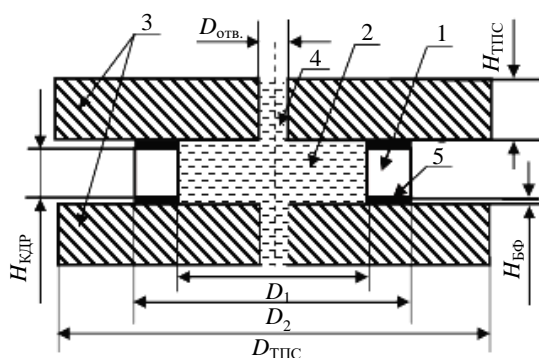


Рис. 2. Измерительная ячейка на основе радиально-двухслойного КДР: 1 – кольцо из лейкосапфира; 2 – внутренняя полость КДР с исследуемой жидкостью; 3 – медные ТПС; 4 – отверстия в ТПС для заполнения КДР жидкостью; 5 – клей БФ-2

Следует отметить, что полное исключение проникновения воды и водных растворов в

микрощели между диэлектрическим диском и ТПС представляет определенную техническую сложность. В данной работе проводящие стенки фиксируются на кольце из лейкосапфира с помощью клея БФ-2. Слой клея достаточно тонкий, однако оказывает существенное влияние на частоту и добротность резонатора. Программа *COMSOL Multiphysics*, используемая для расчетов, позволяет учитывать влияние слоя клея на частоту и добротность резонатора.

Так как слой клея слишком тонкий для того, чтобы его измерить, толщина клея определялась путем сопоставления данных, полученных в результате численных и экспериментальных исследований КДР, заполненного воздухом. Таким же образом была определена диэлектрическая проницаемость клея. Полученные значения составляют соответственно $H_{\text{БФ}} = 12$ мкм, $\varepsilon_{\text{БФ}} = 3,3(1 - 0,0025i)$. В табл. 1 представлены частота и добротность резонатора, заполненного воздухом, с модой ШГ $HE_{15\ 1\ \delta}$, где $0 < \delta < 1$.

Таблица 1

Частота и добротность радиально-двухслойного лейкосапфирового резонатора

КДР	Частота, ГГц	Добротность
Без слоя клея	36,400	5572
Со слоем клея	36,853	4298

Видно, что частота КДР со слоем клея примерно на 450 МГц выше, а добротность ниже, чем у резонатора без клея.

Распределение E_z -компоненты электромагнитного поля данной моды представлено на рис. 3.

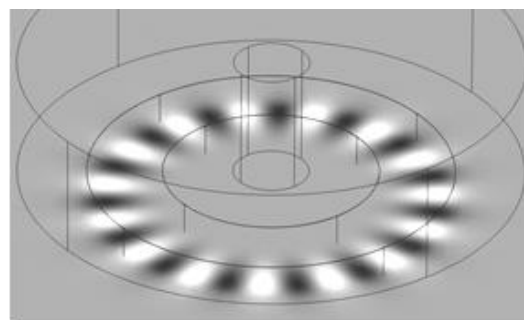


Рис. 3. Распределение E_z -компоненты электромагнитного поля моды ШГ $HE_{15\ 1\ \delta}$ в радиально-двухслойном лейкосапфировом КДР

2. Радиально-двухслойный КДР, заполненный водой. Экспериментальные исследования радиально-двухслойного КДР проводились в диапазоне 30...40 ГГц. Спектры радиально-двухслойного КДР при заполнении воздухом (пунктирные линии) и дистиллированной водой (сплошные линии) представлены на рис. 4. В спектре резонатора с воздухом четко просле-

живаются два набора мод – $HE_{n1\delta}$ (с одной вариацией электромагнитного поля вдоль радиуса КДР) и $HE_{n2\delta}$ (с двумя вариациями электромагнитного поля вдоль радиуса КДР). Однако при заполнении резонатора дистиллированной водой моды с двумя вариациями затухают. Это объясняется тем, что электромагнитное поле моды $HE_{n2\delta}$ имеет более высокую интенсивность в области резонатора, где находится вода – сильнопоглощающая жидкость.

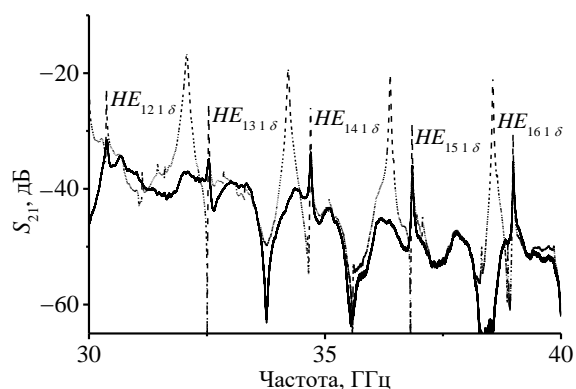


Рис. 4. Спектры радиально-двухслойного лейкосапфирового КДР при заполнении внутренней полости воздухом и дистиллированной водой

На рис. 5 представлены графики зависимости частоты и добротности радиально-двухслойного КДР при заполнении полости воздухом и дистиллированной водой для мод ШГ $HE_{n1\delta}$ от азимутального индекса n . Линиями представлены результаты численных исследований, точками – экспериментальных (треугольники соответствуют заполнению КДР воздухом, кружки – заполнению водой, ромбы – разнице между частотами КДР с водой и с воздухом). В модели резонатора с полостью, заполненной дистиллированной водой, использовались параметры слоя клея, приведенные в разд. 1. Значения диэлектрической проницаемости дистиллированной воды при температуре 25 °С для расчета взяты из [8]. Для дальнейшего уменьшения влияния неполного соответствия модели и реальной измерительной ячейки на результат измерений рассматривались не абсолютные значения частоты и добротности, а сдвиг частоты (вставка на рис. 5, а) и разница величин, обратных добротности, относительно резонатора, заполненного воздухом.

Из данных, приведенных на рис. 5, видно, что модель корректно описывает реальную измерительную ячейку, так как данные расчета и эксперимента хорошо совпадают. Следовательно, данную структуру можно использовать для определения диэлектрической проницаемости жидкостей, включая водные растворы.

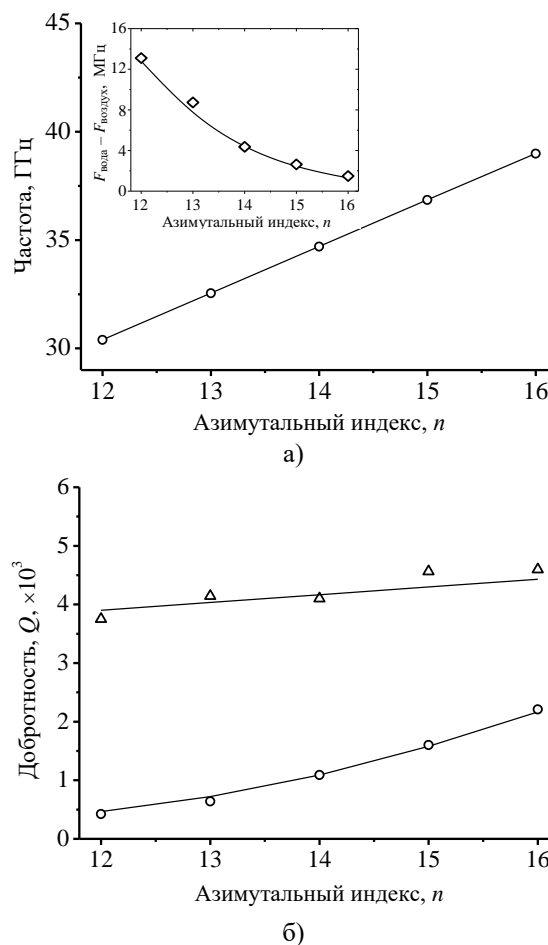


Рис. 5. Частота (а) и добротность (б) радиально-двухслойного КДР с модами ШГ $HE_{n1\delta}$

3. Определение комплексной диэлектрической проницаемости растворов биологических жидкостей. Проведены экспериментальные исследования КДР при заполнении полости различными растворами биологических жидкостей: глюкозы (20 %), лактальбумина (5 ммоль/л), бычьего сывороточного альбумина (5 ммоль/л). В табл. 2 приведены спектральные и энергетические характеристики резонатора с модой ШГ $HE_{151\delta}$. Для частоты, характерной для данной моды ($\approx 36,85$ ГГц), диэлектрическая проницаемость дистиллированной воды при температуре 25 °С составляет $\epsilon_{\text{воды}} = 21,34(1 - 1,39i)$. Для повышения точности измерений рассмотрены не абсолютные величины частоты и добротности КДР, а сдвиг частоты и величин, обратных добротности, относительно соответствующих характеристик резонатора с внутренней полостью, заполненной дистиллированной водой.

Обе характеристики резонатора, как частота, так и добротность, зависят от действительной (ϵ') и мнимой (ϵ'') частей комплексной диэлектрической проницаемости жидкости в резонаторе.

Таблица 2

Характеристики лейкосапфирового КДР при заполнении растворами биологических жидкостей

Раствор	Разница	
	частот, $F_{р-ра} - F_{воды}$, Гц	величин, обратных добротности, $Q_{р-ра}^{-1} - Q_{воды}^{-1}$
глюкозы (20 %)	$-1,63 \times 10^6$	$-4,21 \times 10^{-5}$
бычьего сывороточного альбумина (5 ммоль/л)	$-1,95 \times 10^6$	$-5,21 \times 10^{-5}$
лактальбумина (5 ммоль/л)	$-7,10 \times 10^5$	$-1,11 \times 10^{-5}$

Это затрудняет определение проницаемости исследуемой жидкости. Для того, чтобы получить значения комплексной проницаемости жидкости, заполняющей КДР, использовалась калибровочная процедура, подробно описанная в [7]. С этой целью построена номограмма, показывающая изменение частоты и добротности резонатора с модой $HE_{151\delta}$ при его заполнении веществами с различными значениями ϵ' и ϵ'' диэлектрической проницаемости относительно соответствующих характеристик резонатора с полостью, заполненной дистиллированной водой (рис. 6).

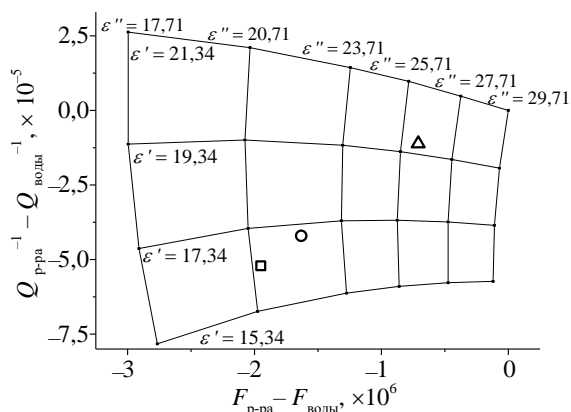


Рис. 6. Номограмма для определения действительной и мнимой частей комплексной проницаемости жидкостей с помощью радиально-двухслойного КДР

Видно, что величина мнимой части диэлектрической проницаемости вещества, представляющего внутренний слой КДР, вносит более существенный вклад в изменение частоты, а величина действительной части – в изменение добротности. Данное явление связано с процессом изменения распределения электромагнитного поля резонатора в условиях больших потерь в слое жидкости [6]. Эта особенность отличает диэлектromетрию жидкостей с большими и малыми потерями микроволновой энергии.

В номограмму помещались значения сдвига частоты и величины, обратной добротности, для растворов различных биологических веществ (табл. 2). На рис. 6 кружком обозначены соответствующие значения для раствора глюко-

зы, квадратом – для раствора лактальбумина, треугольником – для раствора бычьего сывороточного альбумина, полученные экспериментально. С помощью номограммы определены значения действительной ϵ' и мнимой ϵ'' частей комплексной диэлектрической проницаемости исследуемых растворов (табл. 3).

Таблица 3

Диэлектрическая проницаемость растворов биологических жидкостей

Раствор	Комплексная диэлектрическая проницаемость	
	действительная часть, ϵ'	мнимая часть, ϵ''
глюкозы (20%)	17,04	22,19
бычьего сывороточного альбумина (5 ммоль/л)	16,42	20,96
лактальбумина (5 ммоль/л)	19,53	26,31

Относительная погрешность измерения диэлектрической проницаемости рассчитана способом, описанным в [3]. Как для действительной, так и для мнимой частей диэлектрической проницаемости она составляет примерно 3 %.

Выводы. Исследования радиально-двухслойного КДР, внешний слой которого изготовлен из лейкосапфира, а внутренний слой представляет из себя полость, куда помещается жидкость, ограниченного двумя ТПС, показали, что данная структура может быть использована в качестве основы измерительной ячейки для определения диэлектрической проницаемости конденсированных сред. Для устранения микрозазоров между ТПС и кольцом из лейкосапфира плоскости фиксировались с помощью тонкого слоя клея БФ-2. Толщина клея и его диэлектрическая проницаемость определены путем сопоставления результатов эксперимента и численных исследований на основе модели резонатора, созданной в программе *COMSOL Multiphysics* для случая, когда полость резонатора заполнена воздухом. Для численного исследования резонатора с полостью, заполненной жидкостями, использована модель с установленными параметрами клеевого слоя.

Определены диэлектрические свойства растворов биологических жидкостей (глюкозы, бычьего сывороточного альбумина и лактальбумина) в 8-мм диапазоне длин волн. Для этого с помощью численного моделирования была построена номограмма, позволяющая по спектральным и энергетическим характеристикам резонатора с соответствующей модой определить действительную и мнимую части диэлектрической проницаемости исследуемой жидкости. Относительная погрешность измерений диэлектрической проницаемости составляет около 3 %. Полученные данные соответствуют значениям, приведенным в [7].

С точки зрения дальнейшего повышения чувствительности измерительной ячейки, перспективным является использование резонатора, изготовленного из диэлектрика со значением проницаемости, превышающим диэлектрическую проницаемость воды.

Работа выполнена при частичной поддержке *Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) project (German Research Foundation Project VI 456/3-1)*.

Авторы выражают благодарность проф. Черпаку Н. Т. и с.н.с. Губину А. И. за помощь и участие в обсуждении работы.

Библиографический список

1. Квазиоптический диэлектрометр: пат. 59568 А Украина: 7G01R27/26 / О. А. Баранник, Ю. В. Прокопенко, Т. О. Смирнова, Ю. Ф. Филипов, М. Т. Черпак. № 2002086550; заявл. 06.08.2002; опубл. 15.09.2003, бюл. № 9. 5 с.
2. Cherpak N. T., Barannik A. A., Prokopenko Yu. V., Smirnova T. A. and Filipov Yu. F. A new technique of dielectric characterization of liquids. *Nonlinear dielectric phenomena in complex liquids*. S. J. Rzoska and V. P. Zhelezny (eds.) NATO Science Series. Vol. 157. Kluwer Academic Publ., 2004. P. 63–67.
3. Barannik A. A., Cherpak N. T., Prokopenko Yu. V., Filipov Yu. F., Shaforost E. N. and Shipilova I. A. Two-layered disc quasi-optical dielectric resonators: electro-dynamics and application perspectives for complex permittivity measurements of lossy liquids. *Meas. Sci. Technol.* 2007. N 18. P. 2231–2238.
4. Баранник О. А., Прокопенко Ю. В., Филипов Ю. Ф., Черпак М. Т. Електромагнітні мікрохвилі шепочучої галереї в рідинах. *Доп. НАН України*. 2003. № 3. С. 77–79.
5. Barannik A. A., Cherpak N. T., Filippiov Yu. F., Prokopenko Yu. V., Shipilova I. A. Whispering gallery mode sapphire resonator for microwave characterization of lossy liquids. Proc. of The Sixth Int. Kharkov Symposium on *Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves*. Kharkov, Ukraine, 2007. P. 922–924.
6. Кириченко А. Я., Прокопенко Ю. В., Филипов Ю. Ф., Черпак Н. Т. Квазиоптические твердотельные резонаторы. Киев: Наук. думка, 2008. 296 с.
7. Gubin A. I., Barannik A. A., Cherpak N. T., Protsenko I. A., Pud S., Offenhäusser A., and Vitusevich S. A. Whispering-Gallery-Mode Resonator Technique With Microfluidic Channel for Permittivity Measurement of Liquids. *IEEE Trans. on MW Theory and Tech.* 2015. Vol. 63, N 6. P. 2003–2009.

8. Ellison W. J. Permittivity of Pure Water, at Standard Atmospheric Pressure, over the Frequency Range 0–25 THz and the Temperature Range 0–100°C. *J. Phys. Chem. Ref. Data*. 2007. Vol. 36, N 18. P. 1–18.

REFERENCES

1. BARANNYK, O. A., PROKOPENKO, Yu. V., SMYRNOVA, T. O., FILIPOV, Yu. F., CHERPAK, M. T., 2002. Quasioptical dielectrometer. Patent UA, №. 59568 (in Ukrainian).
2. CHERPAK, N. T., BARANNIK, A. A., PROKOPENKO, Yu. V., SMIRNOVA, T. A., FILIPOV, Yu. F., 2004. A new technique of dielectric characterization of liquids. In: *Nonlinear dielectric phenomena in complex liquids*. S. J. Rzoska and V. P. Zhelezny (eds.), NATO Science Series, Kluwer Academic Publ., vol. 157, pp. 63–67.
3. BARANNIK, A. A., CHERPAK, N. T., PROKOPENKO, Yu. V., FILIPOV, Yu. F., SHAFOROST, E. N., SHIPILOVA, I. A., 2007. Two-layered disc quasi-optical dielectric resonators: electro-dynamics and application perspectives for complex permittivity measurements of lossy liquids. *Meas. Sci. Technol.* no. 18, pp. 2231–2238.
4. BARANNYK, O. A., PROKOPENKO, Yu. V., FYLYPPOV, Yu. F., CHERPAK, M. T., 2003. Electromagnetic WGM in liquids. *Dopovidi NAN Ukrainy*. no. 3, pp. 77–79 (in Ukrainian).
5. BARANNIK, A. A., CHERPAK, N. T., FILIPPOV, Yu. F., PROKOPENKO, Yu. V., SHIPILOVA, I. A., 2007. Whispering gallery mode sapphire resonator for microwave characterization of lossy liquids. Proc. of *The Sixth Int. Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves*. Kharkov, Ukraine, pp. 922–924.
6. KIRICHENKO, A. Ja., PROKOPENKO, Ju. V., FILIPPOV, Ju. F., CHERPAK, N. T., 2008. Quasioptical solid-state resonators. Kiev, Naukova dumka (in Russian).
7. GUBIN, A. I., BARANNIK, A. A., CHERPAK, N. T., PROTSENKO, I. A., PUD, S., OFFENHÄUSSER, A., VITUSEVICH, S. A., 2015. Whispering-Gallery-Mode Resonator Technique With Microfluidic Channel for Permittivity Measurement of Liquids. *IEEE Trans. on MW Theory and Tech.* vol. 63, no. 6, pp. 2003–2009.
8. ELLISON, W. J., 2007. Permittivity of Pure Water, at Standard Atmospheric Pressure, over the Frequency Range 0–25 THz and the Temperature Range 0–100 °C. *J. Phys. Chem. Ref. Data*. vol. 36, no. 18, pp. 1–18.

Рукопись поступила 14.12.2016.

A. A. Barannik, S. A. Vitusevich, I. A. Protsenko

TWO-LAYERED QUASIOPTICAL SAPPHIRE RESONATOR FOR BIOLIQUIDS DIELECTROMETRY

WGM resonators can be used for studies of condensed matter, especially for the study of the dielectric liquids properties. However, the electromagnetic properties of the real resonator structures are not well understood. The microwave response of quasioptical radially-two-layered dielectric resonator in the form of a cylindrical ring sandwiched between two flat conducting endplates is studied. Usually real resonator has an additional layer between the leucosapphire ring and a conducting surface, that eliminates a possibility of the rigorous solution for the corresponding electromagnetic problem. The leucosapphire resonator is studied with numerical modeling methods and experimental measurements in the Ka-band. A good agreement between the experimentally measured and calculated values of frequencies and Q -factors is achieved. It is shown that the resonator allows the measurement of the complex permittivity of solutions with an error of about 3 %.

Key words: radially-two-layered resonator, WGM, complex permittivity, biological liquids.

О. А. Баранник, С. О. Вітусевич, І. О. Проценко

**ДВОШАРОВИЙ КВАЗІОПТИЧНИЙ
ЛЕЙКОСАПФІРОВИЙ РЕЗОНАТОР ДЛЯ
ДІЕЛЕКТРОМЕТРІЇ БІОЛОГІЧНИХ РІДИН**

Резонатори з хвилями шепочучої галереї можуть використовуватися для дослідження конденсованих середовищ, зокрема для вивчення властивостей діелектричних рідин. Однак електродинамічні властивості реальних резонаторних структур цього типу досліджені недостатньо. Досліджений

мікрохвильовий відгук радіально-двошарового квазіоптичного резонатора у вигляді діелектричного циліндричного кільця, затисненого між двома плоскими провідними торцевими стінками. Реальний резонатор має, як правило, додатковий шар між лейкосапфировим кільцем і провідною поверхнею, що виключає строге рішення відповідної електродинамічної задачі. Лейкосапфировий резонатор досліджений методами числового моделювання і експериментальних вимірювань його мікрохвильового відгуку в 8-мм діапазоні. Отримано добру відповідність експериментально виміряних і обчислених значень добротності та резонансних частот. Показано, що резонатор дозволяє вимірювати комплексну діелектричну проникність водних розчинів з похибкою приблизно 3 %.

Ключові слова: радіально-двошаровий резонатор, моди шепочучої галереї, комплексна діелектрична проникність, біологічні рідини.