

А. Я. Кириченко, А. Е. Когут, В. В. Кутузов, И. Г. Максимчук, С. О. Носатюк, В. А. Солодовник

**ПОЛЫЙ ПОЛУШАРОВОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РЕЗОНАТОР
ДЛЯ ДИЭЛЕКТРОМЕТРИИ ЖИДКОСТЕЙ**

*Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины
12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина
E-mail: maksim51@ire.kharkov.ua*

Предложена новая измерительная ячейка для диэлектрометрии жидкостей. Исследовались диэлектрические свойства следующих жидкостей: метанол, бутанол, толуол, бензол и вода. Показано, что данные резонаторы пригодны для исследования диэлектрических свойств жидкостей. Ил. 5. Табл. 1. Библиогр.: 18 назв.

Ключевые слова: колебания шепчущей галереи, диэлектрические резонаторы, жидкость.

Благодаря своей высокой добротности и относительно разреженному спектру открытые диэлектрические резонаторы (ОДР) с колебаниями типа шепчущей галереи (ШГ) используются в широком диапазоне длин волн от СВЧ до оптических [1–3]. Поля колебаний ШГ в ОДР сосредоточены в узких областях, расположенных вблизи границы раздела сред диэлектрик–воздух и ограниченных акустическими поверхностями [4]. Внутренняя акустическая поверхность находится в диэлектрике, ее радиус определяется из выражения $r_{к1} = n\lambda / (2\pi\sqrt{\epsilon})$, а внешняя – в воздухе (ее радиус $r_{к2} = n\lambda / 2\pi$), где n – число вариаций поля рабочей моды вдоль азимутальной координаты, λ – длина волны в резонаторе, ϵ – диэлектрическая постоянная материала, из которого изготовлен резонатор. Наибольшей добротностью по сравнению с цилиндрическими и дисковыми резонаторами обладают шаровые резонаторы [5, 6]. Колебания ШГ в таких резонаторах $2(n + 1)$ -кратно вырождены [7].

Расширить функциональные возможности указанных резонаторов позволяет замена одной половины тела вращения плоским металлическим зеркалом, т. е. переход к зеркальным ОДР [8, 9]. Зеркальные шаровые ОДР с колебаниями ШГ также обладают высокими значениями собственной добротности. Они обладают $(n + 1)$ вырождением. Исследования показали, что и при отсутствии металлического зеркала в полусферовых резонаторах возбуждаются колебания ШГ [10]. Спектр колебаний в указанных резонаторах разрежен по сравнению со спектром зеркальных ОДР, а добротность выше.

Ранее ОДР, используя в качестве измерительных ячеек, погружали в исследуемые жидкости [2, 11–14]. При этом жидкость оказывала влияние на электромагнитное поле, сосредоточенное вблизи внешней каустики ОДР. Влияние жидкости приводило к изменению частоты f и добротности Q ОДР, что пропорционально ϵ' , ϵ'' ,

т. е. действительной и мнимой частям диэлектрической проницаемости соответственно.

В работе предложена и изучена измерительная ячейка в виде полусфера с концентрической полусферовой выборкой (двухслойный полусфера) для исследования жидкостей. Размеры выборки достигают внутренней каустики ОДР. В выборку заливается жидкость. Ранее экспериментальные исследования такой резонансной системы с колебаниями ШГ не проводились. Подобная резонансная система исследовалась для основных типов колебаний [15]. Цель нашей работы – экспериментальное исследование электродинамических характеристик двухслойного полусфера с колебаниями ШГ в качестве измерительной ячейки для диэлектрометрии жидкостей.

1. Объекты исследования и техника измерений. Экспериментально исследовался полусферовый ОДР, изготовленный из фторопласта ($\epsilon = 2,08$), с внешним радиусом $R_2 = 39$ мм и внутренним $R_1 = 32$ мм (рис. 1) в полосе частот 32...37 ГГц. Исследовались ОДР как с металлическим зеркалом в экваториальной плоскости полусфера, так и без него. Возбуждение резонатора осуществлялось фторопластовым диэлектрическим волноводом (ДВ) размером $7,2 \times 3,4$ мм, размещали вблизи экваториальной плоскости ОДР. Приемный ДВ того же сечения был размещен параллельно возбуждающему на диаметрально противоположной стороне ОДР. Резонатор размещали симметрично относительно возбуждающего и приемного ДВ. В экспериментальном макете можно было изменять ориентацию ДВ на 90° вокруг оси. В зависимости от ориентации ДВ в ОДР возбуждались преимущественно или H -, или E -моды ШГ. На рис. 1 изображено возбуждение H -мод колебаний. Также было предусмотрено изменять высоту расположения ДВ относительно плоскости среза полусфера. Измерения проводились с помощью панорамного измерителя коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН) P2-65 и резонансного волномера. В эксперименте измеря-

лись нагруженная добротность Q_n и частота f резонансной системы в зависимости от степени заполнения жидкостью полушаровой выборки. Расстояние между ОДР и ДВ выбиралось исходя из того, чтобы их связь была минимальна при приемлемой для проведения измерений величине сигнала резонансного отклика, таким образом, собственная добротность Q_0 приблизительно равнялась нагруженной Q_n .

Изменения частоты и добротности по сравнению с воздушным заполнением полости зависят от ϵ' и ϵ'' исследуемой жидкости. Исследовались следующие жидкости: метанол, бутанол, толуол, бензол, дистиллированная вода. Данные о диэлектрических постоянных ϵ' , ϵ'' , $\text{tg}\delta$ [16] этих жидкостей приведены в таблице.

Диэлектрические постоянные ϵ' , ϵ'' и $\text{tg}\delta$ жидкостей

Жидкости	ϵ'	ϵ''	$\text{tg}\delta$, tg угла потерь
Бензол	2,84	0,05	0,018
Толуол	2,29	0,055	0,024
Метанол	5,90	3,9	0,66
Бутанол	3,00	0,48	0,16
Вода	20,23	30,341	1,5

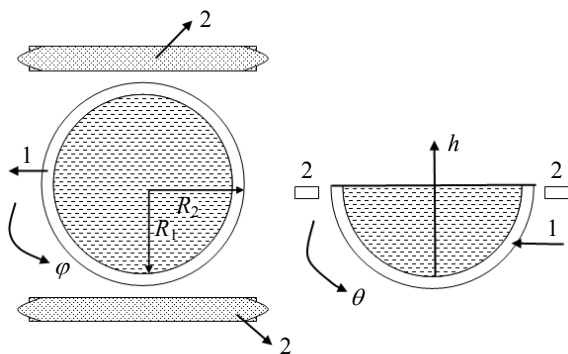


Рис. 1. Схема измерительной ячейки: 1 – полный ОДР; 2 – возбуждающий и приемный ДВ

2. Результаты. При возбуждении исследуемых ОДР, когда ДВ располагаются вдоль экваториальной плоскости, наблюдается густой спектр колебаний. В спектре колебаний идентифицируются азимутальные колебания ШГ с 1–3 вариациями поля вдоль полярной координаты полушара для ОДР без металлического зеркала. В резонаторе с металлическим зеркалом спектр еще насыщенней, в нем присутствуют колебания и с большим числом вариаций поля вдоль полярной координаты. Поле колебаний локализовано на криволинейной поверхности полушара в виде экваториальных поясков. Ширина пояска различна для каждого колебания типа ШГ. Минималь-

ная ширина у основного колебания ШГ с одной вариацией поля вдоль полярной координаты полушара. Более подробно об электродинамических характеристиках полушаровых ОДР с зеркалом и без описано ранее [10]. Тип колебания, ширина пояска поля, количество вариаций поля в пояске определялись с помощью метода малых возмущений [17]. Разрежить спектр колебаний удается юстировкой ДВ относительно плоского среза полушара, располагая ДВ в минимуме вариации поля ближайшего по полярному типу колебания. Таким образом, удается выделить колебания с одной вариацией поля вдоль полярной координаты полушара. Данный метод разрежения спектра был апробирован ранее [18].

При исследовании заполнения полушаровой выборки жидкостями для обоих типов резонаторов (без металлического зеркала и с ним) было выяснено, что использование E -колебаний дает преимущество в чувствительности. В этом случае для жидкостей с большими потерями ($\text{tg}\delta > 10^{-1}$) не удалось достигнуть полного заполнения ячейки одновременно с наличием сигнала: резонансный отклик исчезал уже при частичном заполнении выборки. У ОДР с металлическим зеркалом это наступало при меньшей высоте h жидкости. Для жидкостей с малыми потерями $\text{tg}\delta < 10^{-1}$ (толуол, бензол) сигнал существует и при полном заполнении ячейки.

Результаты исследований сдвига частоты ($\Delta f = f_h - f_0$) и изменения добротности Q от приведенной высоты h заполнения ячейки жидкостью к радиусу R выборки при возбуждении H -колебаний для резонатора без металлического зеркала показаны на рис. 2 и 3 соответственно. Заметим, что для различных жидкостей изменения частоты различаются как по величине, так и по знаку изменения. Для жидкостей с $\epsilon' > \epsilon'$ фторопласта (вода, метанол) частота резонатора сдвигается в сторону увеличения и наоборот для жидкостей с $\epsilon' \approx \epsilon'$ фторопласта (толуол, бензол, бутанол).

На рис. 3 показана зависимость добротности Q от приведенной высоты h заполнения ячейки жидкостью к радиусу R выборки. С увеличением высоты заливки h добротность падает. Порядок чередования кривых $Q(h/R)$ для жидкостей с $\text{tg}\delta < 10^{-1}$ (толуол, бензол) отличается от подобного для жидкостей с $\text{tg}\delta > 10^{-1}$ (метанол, бутанол, вода). Для первых кривые $Q(h/R)$ с меньшим $\text{tg}\delta$ лежат выше, для вторых – ниже. Подобный характер имеют эти зависимости и для ОДР с металлическим зеркалом в экваториальной плоскости диэлектрического полушара. Такое «аномальное» поведение для сильно поглощаю-

щих жидкостей ($\text{tg } \delta > 10^{-1}$) наблюдалось в полусферовом ОДР с основным типом колебаний [15], в цилиндрическом ОДР с колебаниями типа ШГ [2] и объяснялось характером распределения электромагнитных полей в резонансной системе вдоль радиуса.

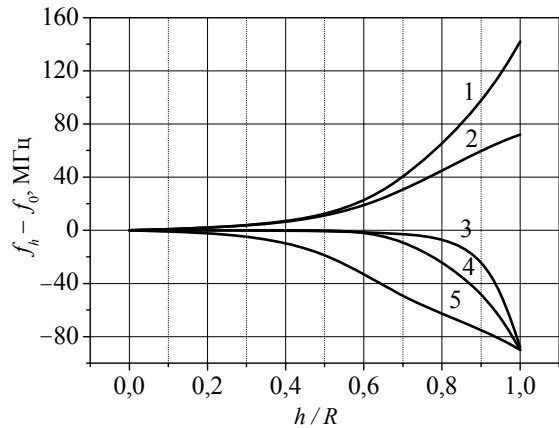


Рис. 2. Зависимость сдвига частоты $\Delta f = f_h - f_0$ от высоты h заполнения ячейки жидкостью: 1 – вода; 2 – метанол; 3 – толуол; 4 – бензол; 5 – бутанол

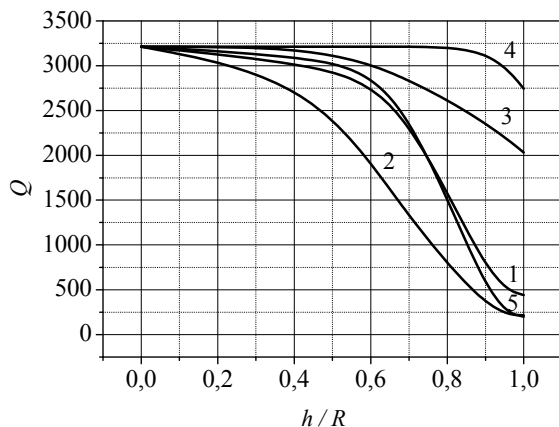


Рис. 3. Зависимость добротности Q от высоты h заполнения ячейки жидкостью: 1 – вода; 2 – метанол; 3 – толуол; 4 – бензол; 5 – бутанол

На рис. 4 и 5 показаны различия между характеристиками исследуемых ОДР. На них представлены зависимости сдвига частоты ($\Delta f = f_h - f_0$) (рис. 4) и добротности Q (рис. 5) от приведенной высоты (h/R) заполнения ячейки жидкостью. Данные рисунки приведены при заполнении ячейки дистиллированной водой при возбуждении H -колебаний. Видно, что при полном заполнении жидкостью значения Δf совпадают для обоих резонаторов, как и для значения Q . Различается поведение этих зависимостей при частичном заполнении ячеек. У ОДР с металлическим зеркалом зависимости $\Delta f(h/R)$ и $Q(h/R)$ начинают свое изменение при большем уровне заполнения ячейки жидкостью. При дальнейшем

заполнении эти зависимости изменяются «резче», что свидетельствует о различном распределении электромагнитного поля вдоль полярной координаты диэлектрической полусферы. Такое различие описывалось ранее [10].

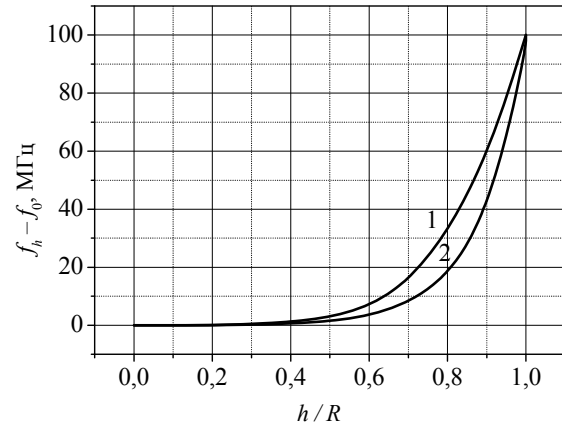


Рис. 4. Зависимость сдвига частоты измерительной ячейки (резонатора) от уровня заполнения его водой: 1 – без зеркала; 2 – с зеркалом

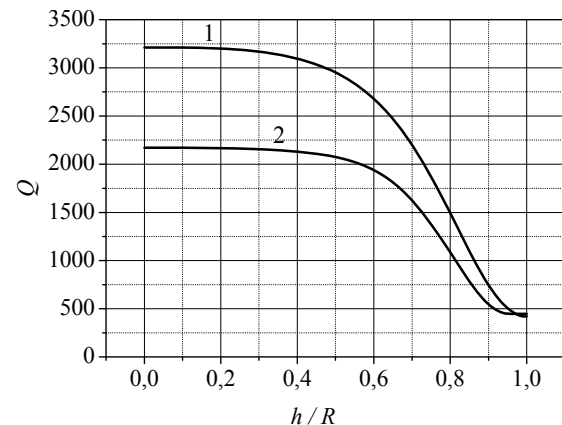


Рис. 5. Зависимость добротности измерительной ячейки (резонатора) от уровня заполнения его водой: 1 – без зеркала; 2 – с зеркалом

Выводы. Показано, что в мм диапазоне длин волн можно создать резонансную измерительную ячейку для определения диэлектрических свойств жидкостей с высокими электрическими потерями. Такой ячейкой могут служить предложенные ОДР с концентрической полусферической выборкой, возбуждаемой на волнах ШГ. При возмущении таких резонансных систем достигается сдвиг резонансной частоты от десятков до сотен мегагерц для различных жидкостей. Таким образом, возможно идентифицировать различные жидкости. Для исследований предпочтительней использовать колебания E -типа из-за их более высокой чувствительности. Представляет интерес проведение сравнительного анализа полученных результатов с численными исследованиями такой резонансной системы.

В заключение авторы выражают благодарность М. Н. Ольховскому за техническое обеспечение проведенных исследований.

1. *Диэлектрические резонаторы* / М. Е. Ильченко, В. Ф. Взятыешев, Л. Г. Гасанов и др. – М.: Радио и связь, 1989. – 328 с.
2. *Квазиоптические твердотельные резонаторы* / А. Я. Кириченко, Ю. В. Прокопенко, Ю. Ф. Филиппов, Н. Т. Черпак. – К.: Наук. думка, 2008. – 291 с.
3. *Брагинский В. Б.* Оптические микрорезонаторы с модами типа шепчущей галереи / В. Б. Брагинский, В. С. Ильченко, М. Л. Городецкий // *Успехи физ. наук.* – 1990. – 160, № 1. – С. 157–159.
4. *Власов С. Н.* О колебаниях шепчущей галереи в открытых резонаторах с диэлектрическим стержнем / С. Н. Власов // *Радиотехника и электрон.* – 1967. – 12, № 3. – С. 572–573.
5. *Возбуждение колебаний типа шепчущей галереи в квазиоптических металлодиэлектрических резонаторах через щель связи в зеркале* / А. Е. Когут, В. В. Кутузов, А. А. Харьковская, С. Н. Харьковский // *Радиофизика и электрон.*: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – Х., 1997. – 2, № 1. – С. 31–34.
6. *Когут О. С.* Коливання типу шепчучої галереї відкритих квазиоптичних металодіелектричних резонаторів, що збуджуються зосередженими джерелами випромінювання: автореф. дис. ... канд. фіз.-мат. наук / О. С. Когут; Ін-т радіофізики та електрон. НАН України. – Х., 1998. – 16 с.
7. *Вайнштейн Л. А.* Открытые резонаторы и открытые волноводы / Л. А. Вайнштейн. – М.: Сов. радио, 1966. – 475 с.
8. *Кириченко А. Я.* Твердотельный генератор с квазиоптическим зеркальным диэлектрическим резонатором / А. Я. Кириченко, С. Н. Харьковский // *Твердотельные генераторы и преобразователи мм и субмм диапазонов*: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. АН УССР. – Х., 1989. – С. 62–66.
9. *Филиппов Ю. Ф.* Квазиоптический зеркальный диэлектрический резонатор / Ю. Ф. Филиппов, С. Н. Харьковский // *Квазиоптическая техника мм и субмм диапазонов волн*: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. АН УССР. – Х., 1989. – С. 28–34.
10. *Влияние металлического зеркала на вынужденные колебания шепчущей галереи полусферического диэлектрического резонатора* / Г. В. Блудов, Г. В. Голубничая, А. Я. Кириченко и др. // *Радиофизика и электрон.*: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – Х., 2005. – 10, № 1. – С. 20–24.
11. *Ганопольский Е. М.* Квазиоптический метод измерения малых диэлектрических потерь в конденсированных средах / Е. М. Ганопольский, А. В. Голик, А. П. Королюк // *Физика низких температур.* – 1993. – 19, № 11. – С. 1255–1259.
12. *Еременко З. Е.* Квазиоптический слоистый шаровой резонатор для измерения диэлектрической проницаемости сильно поглощающей жидкости в миллиметровом диапазоне / З. Е. Еременко // *Радиофизика и электрон.*: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – Х., 2004. – 9, № 2. – С. 442–451.
13. *Eremenko Z. E.* Exact-calculated resonator method for permittivity measurement of high loss liquids at millimeter wave-

length / Z. E. Eremenko, E. M. Ganapolskii, V. V. Vasilchenko // *Measurement science and technology.* – 2005. – 16, N 8. – P. 1619–1627.

14. *Eremenko Z. E.* Microwave hemiball resonator for measurement of dielectric permittivity in small volume of high lossy liquid / Z. E. Eremenko, E. M. Ganapolskii // *Proc. of the 5th Intern. Kharkov Symp. MSMW'2004.* – Kharkov, 2004. – P. 850–852.
15. *Еременко З. Е.* Объемный полусферический резонатор для измерения диэлектрической проницаемости в малом объеме сильно поглощающей жидкости / З. Е. Еременко, Е. М. Ганопольский // *Радиофизика и электрон.*: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – Х., 2003. – 8, № 2. – С. 187–196.
16. *Ахадов Я. Ю.* Диэлектрические свойства бинарных растворов / Я. Ю. Ахадов. – М.: Наука, 1977. – 400 с.
17. *Гинзтон Э. Л.* Измерения на сантиметровых волнах / Э. Л. Гинзтон; пер. с англ. под ред. Г. А. Ремеза. – М.: Изд-во иностр. лит., 1960. – 620 с.
18. *Голубничая Г. В.* Разрежение спектра колебаний шепчущей галереи *H*-типа полусферического диэлектрического резонатора / Г. В. Голубничая, А. Я. Кириченко, И. Г. Максимчук // *Письма в Журн. техн. физики.* – 2005. – 31, № 15. – С. 36–43.

A. Ya. Kirichenko, A. E. Kogut, V. V. Kutuzov,
I. G. Maksimchuk, S. O. Nosatyuk, V. A. Solodovnik

HEMISPHERICAL DIELECTRIC RESONATOR WITH CONCENTRIC HEMISPHERICAL HOLLOW FOR LIQUID DIELECTRICS INVESTIGATIONS

A new type of cell was suggested for dielectric constant measurements of liquids. Next liquids were investigated: methanol, butanol, toluol, benzol and water. It is shown that these resonators are suitable for research of dielectric properties of liquids.

Key words: whispering gallery modes, dielectric resonator, liquids.

О. Я. Кириченко, О. С. Когут, В. В. Кутузов,
И. Г. Максимчук, С. О. Носатюк, В. А. Солодовник

ПОРОЖНИСТІЙ ПІВКУЛЬОВИЙ ДІЕЛЕКТРИЧНИЙ РЕЗОНАТОР ДЛЯ ДІЕЛЕКТРОМЕТРІЇ РІДИН

Запропоновано нову вимірвальну комірку для діелектрометрії рідин. Досліджено діелектричні властивості наступних рідин: метанол, бутанол, толуол, бензол і вода. Показано, що дані резонатори придатні для дослідження діелектричних властивостей рідин.

Ключові слова: коливання шепчучої галереї, діелектричні резонатори, рідина.

Рукопись поступила 17.02.11 г.