

ВЛИЯНИЕ НЕКОТОРЫХ ЖИДКОСТЕЙ НА СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РЕЗОНАТОРА В ФОРМЕ ПОЛУШАРА

Г. В. Голубничая, А. Я. Кириченко, И. Г. Максимчук

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

Исследовано влияние жидкостей с большим уровнем поглощения электромагнитных волн на электродинамические характеристики открытого диэлектрического резонатора в форме полушара при возбуждении в нем колебаний шепчущей галереи H - и E -типов в диапазоне частот 34÷38 ГГц. Показано, что возмущение такого резонатора со стороны экваториального среза плоской поверхностью жидкостей приводит к сдвигу резонансных частот в десятки мегагерц и снижению добротности колебаний.

Установлено, что H -мода колебаний более чувствительна к поглощению электромагнитной энергии. При этом оптимальное расстояние между экваториальной поверхностью резонатора и поверхностью жидкости должно составлять примерно 3 мм на указанных частотах. Ил. 5. Библиогр.: 12 назв.

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

Открытые диэлектрические резонаторы благодаря своей высокой добротности на высших модах (типа шепчущей галереи) в последнее время все чаще применяются для исследования диэлектрических свойств не только веществ, находящихся в твердом состоянии, но также и жидкостей. Для этих целей, к примеру, измерительная ячейка в виде квазиоптического диэлектрического резонатора погружалась непосредственно в жидкость, электрические характеристики которой требовалось определить, и по сдвигу резонансной частоты и по изменениям добротности резонатора устанавливались ее диэлектрические свойства. Такие исследования выполнялись как с помощью дисковых диэлектрических резонаторов [1, 2], так и сферических [3]. Основными ограничениями методов, использующих такие измерительные ячейки, является то, что, во-первых, они применимы лишь к измерениям жидкостей с очень низким поглощением электромагнитной энергии и, во-вторых, - к жидкостям, диэлектрическая постоянная которых ниже значения диэлектрической постоянной материала измерительного резонатора. Вопрос о преодолении таких ограничений возникнул уже в этих работах, и ставилась задача создания специальных резонансных систем на основе диэлектрических резонаторов.

Более широкие возможности для изучения электрических свойств сильно поглощающих жидкостей открываются при использовании слоистых дисковых резонаторов, у которых одним из внутренних слоев может быть измеряемая жидкость [4], или слоистых шаровых резонаторов [5]. Новые подходы к созданию измерительных ячеек диэлектromетра, предназначенных для исследования жидкостей с большими потерями и повышенным значением диэлектрической постоянной, появились с созданием резонаторных структур, использующих отдельные

геометрические части диэлектрических дисков [6] и шаров [7].

Такие резонаторы в форме полудиска или полушара сначала создавались как “зеркальные”, так как использовали металлические зеркала на своих срезах. Однако последующими исследованиями было установлено, что необходимость в металлических зеркалах существует лишь для тех резонансных колебаний E -типа, при возбуждении которых электромагнитные поля концентрируются в пояске, проходящем через полюс полушара. Было установлено, что в диэлектрическом полушаре колебания H -типа с полями, концентрирующимися в форме поясков параллельных экваториальному срезу, возбуждаются и в отсутствие металлического зеркала. Металлические зеркала приводят лишь к сгущению спектра собственных колебаний резонатора [8].

Добротность собственных электромагнитных колебаний диэлектрического полушара без металлического зеркала превосходит добротность резонатора в форме диэлектрического диска. В связи с этим представляет интерес выяснить возможность использования полушарового резонатора как измерительной ячейки для определения диэлектрических свойств жидкостей с высоким электромагнитным поглощением, используя прием, аналогичный тому, который применялся при создании измерительной ячейки на дисковых диэлектрических резонаторах [9]. Однако прежде чем проводить измерения диэлектрических характеристик жидкостей необходимо установить: каким образом жидкость влияет на электродинамические характеристики диэлектрического резонатора в форме полушара; какой тип колебаний, E или H , более чувствителен к возмущению поверхностью жидкости; какой из параметров резонатора (добротность Q или частоту f) необходимо выбирать для того, чтобы устанавливать раз-

личие в жидкостях. Для поиска ответов на эти вопросы и поставлены настоящие исследования.

1. Объект и методика экспериментальных исследований. В опытах использовался резонатор в форме полушара радиусом 37 мм, изготовленный из фторопласта. Возбуждение резонатора в диапазоне 32 – 38 ГГц осуществлялось диэлектрическим волноводом с поперечным сечением $7,2 \times 3,4 \text{ мм}^2$, располагаемым вблизи диаметрального среза шара. СВЧ сигнал от клистрона через ферритовый вентиль и измерительный attenuатор поступал в диэлектрический волновод. Измерения могли проводиться как при включении резонатора на отражение, так и на проход. При включении диэлектрического резонатора на отражение в цепи возбуждения находился направленный ответвитель, измерительное плечо которого нагружалось на детектор, непосредственно подключаемый к осциллографу. При измерениях на проход сигнала через резонатор параллельно питающему диэлектрическому волноводу в диаметрально противоположной стороне полушара располагался принимающий волновод с детекторной секцией. Резонансная частота резонатора определялась с помощью резонансного волномера.

В измерительной установке была предусмотрена возможность изменения расстояния d между плоскостью среза шара и диэлектрическими волноводами (возбуждающим d_B и принимающим d_{II} на рис. 1) и поворот волновода относительно его собственной оси на 90° . Последняя операция позволяла осуществлять преимущественное возбуждение полушара на колебаниях E -типа (когда плоскость узкой стенки волновода была параллельна поверхности среза) или H -типа (когда плоскости среза была параллельна широкая стенка волновода). Изменение расстояния от волнопроводов до криволинейной поверхности резонатора позволяло варьировать коэффициент связи волнопроводов с резонатором.

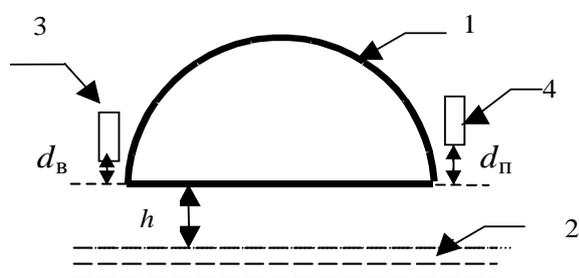


Рис. 1. Взаимное расположение диэлектрического резонатора - 1 и тестируемой жидкости - 2; 3 - возбуждающий диэлектрический волновод; 4 - принимающий диэлектрический волновод

Поля колебаний шепчущей галереи как H - так и E -типа, возбуждаемые в резонаторе, концентрировались в кольцевых поясках, параллельных экваториальному срезу. Методом возмущения поля малым пробным телом было установлено, что в полярном направлении (в направлении угла θ) эти пояски могли иметь одну или две вариации поля. Колебания с одной вариацией поля по θ , как правило, имели более высокую частоту и добротность, чем колебания с двумя вариациями (разность частот между высокочастотными и низкочастотными колебаниями составляла примерно 0,10 ГГц). В связи с этим основное внимание при исследованиях уделялось результатам, полученным при возбуждении более высокочастотных колебаний.

При изучении влияния жидкостей на электродинамические характеристики полушара важно было для используемого колебания обеспечить высокую добротность при отсутствии возмущения жидкостью. Это достигается как правильным выбором типа и моды используемых колебаний, так и созданием определенных условий связи резонатора с питающими и принимающими цепями. Как и для полушарового резонатора, расположенного на металлической поверхности [10], добротность колебаний H -типа обычно превышает добротность колебаний E -типа при одном и том же расположении элементов связи с резонатором.

Диэлектрические волноводы, служащие элементами, питающими резонатор, являются одним из видов неоднородности, возмущающей поля резонатора и приводящей к дополнительным радиационным потерям. Удаление диэлектрических волнопроводов от экваториального среза полушара хотя и снижает уровень мощности, подводимой к резонатору, однако позволяет повысить добротность возбуждаемых колебаний.

Было установлено, что изменения расстояния d от экваториальной поверхности полушара до возбуждающего (d_B) и принимающего (d_{II}) волнопроводов не оказывают решающего влияния на сдвиг частоты и добротность колебаний резонатора. Однако наилучшие показатели достигались при расположении волнопроводов в середине пояска локализации полей мод ($4 < d < 12 \text{ мм}$). Азимутальный индекс - n исследуемых колебаний (в направлении угла φ) превышал 19 ($n > 19$). С ростом азимутального индекса колебаний добротность резонатора возрастала. Расстояние между резонансами в спектре колебаний полушарового резонатора составляло около 1 ГГц.

Фторопластовый полушар располагался экваториальной поверхностью на расстоянии h

над поверхностью возмущающей жидкости (см. рис. 1).

Расстояние h можно было плавно изменять и проводить измерения резонансной частоты (f) и добротности (Q) колебаний резонатора с интервалом $h \sim 0,1$ мм. Ориентация диэлектрических волноводов на рис. 1 соответствует возбуждению в резонаторе колебаний E -типа.

Для опытов было выбрано две жидкости с высокими потерями и диэлектрической постоянной, превышающей диэлектрическую постоянную фторопласта ($\epsilon_{\text{Ф}} = 2,04 + i 1,7 \cdot 10^{-4}$): дистиллированная вода ($\epsilon_{\text{В}} = 14,5 + i 9,2$) и 96%-ный этиловый спирт ($\epsilon_{\text{С}} = 4,05 + i 1,6$). Кроме того, для выяснения природы наблюдаемых зависимостей исследовалось изменение характеристик колебаний резонатора при приближении к экваториальному срезу полусфера поверхности металлической пластины, изготовленной из латуни.

2. Результаты эксперимента. При расположении поверхности жидкости параллельно диаметальному срезу полусфера на расстоянии $h > 5$ мм влияние жидкости на спектральные характеристики диэлектрического резонатора ничтожно мало. Приближение экваториального среза полусфера к поверхности жидкости при $h < 5$ мм приводит к заметному изменению частоты и добротности колебаний. При этом добротность колебаний при уменьшении h всегда снижается как для E -, так и для H -типов колебаний, в то время как резонансная частота полусфера в этом случае может как повышаться, так и понижаться. Как было установлено предыдущими исследованиями [11], металлическое зеркало, расположенное на диаметральном срезе полусфера, вносит дополнительные потери в резонатор и может снижать добротность H -типа колебаний примерно в два раза. Естественно, что соприкосновение экваториального среза полусфера с жидкостями, обладающими большим поглощением электромагнитных волн чем металл, приводит к разрушению высокодобротных колебаний резонатора. В связи с этим в опытах с жидкостями расстояние h не удалось снизить ниже 1,5 мм.

На рис. 2 представлены кривые зависимости изменения амплитуды A сигнала, проходящего через резонатор, при изменении расстояния h для колебаний E - и H -типов. Исследования проведены с использованием воды (о) и этилового спирта (•). Видно, что на колебаниях H -типа скорости уменьшения амплитуды A проходящего сигнала при изменении h мало различимы между водой и этиловым спиртом, в то время как на колебаниях E -типа это различие в амплитудах проходящего сигнала может превышать 30%.

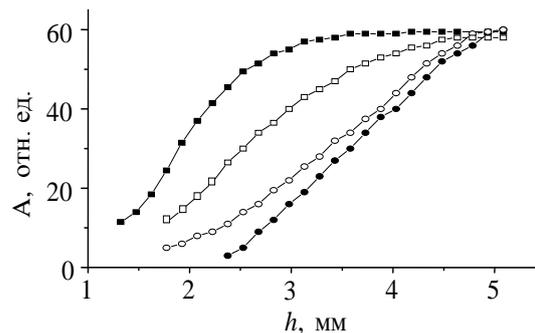


Рис. 2. Зависимости амплитуды колебаний E - ($f = 36,93$ ГГц) и H - ($f = 33,43$ ГГц) типов от изменения расстояния h между экваториальным срезом полусферы и поверхностью воды и спирта: - ■ - E (вода); - ● - H (вода); - □ - E (спирт); - ○ - H (спирт)

Для изучения влияния поверхности жидкости на спектральные характеристики диэлектрического резонатора, выполненного в форме полусфера, были проведены исследования сдвига резонансной частоты $df = f_0 - f$ (f_0 - собственная резонансная частота резонатора, расположенного в свободном пространстве; f - резонансная частота при возмущении резонатора поверхностью жидкости) в зависимости от расстояния h между поверхностью жидкости и поверхностью диаметального среза полусфера при разных азимутальных индексах колебаний (n) для E моды (рис. 3).

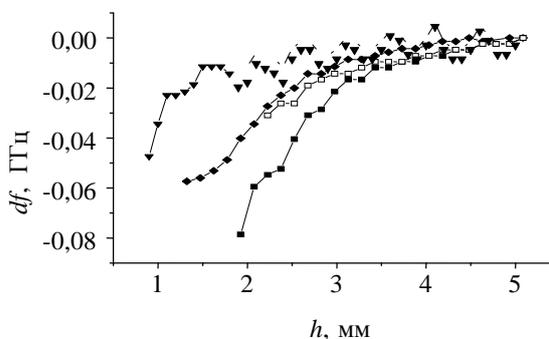


Рис. 3. Зависимости сдвига частоты df колебаний E -типа от изменения расстояния h между экваториальным срезом полусферы и поверхностью воды при различных азимутальных индексах n ($f = 34,96; 35,96; 36,94$ ГГц), а также поверхностью металла: - ■ - $n=39$ (вода); - □ - $n=40$ (вода); - ◆ - $n=41$ (вода); - ▼ - $n=41$ (металл)

Из рис. 3 видно, что величина отклонения частоты от исходной возрастает с уменьшением азимутального индекса колебаний. Это связано с тем, что при меньших n провисание электромагнитного поля в свободное пространство сильнее.

Для сравнительного анализа влияния поверхности жидкости на резонансные колебания E - и H -типов были выбраны два близких по частоте E - и H -колебания. При $h > 5$ мм невозму-

щенное значение частоты на колебаниях E -типа $f_E = 36,936$ ГГц; на колебаниях H -типа – $f_H = 37,602$ ГГц (рис. 4).

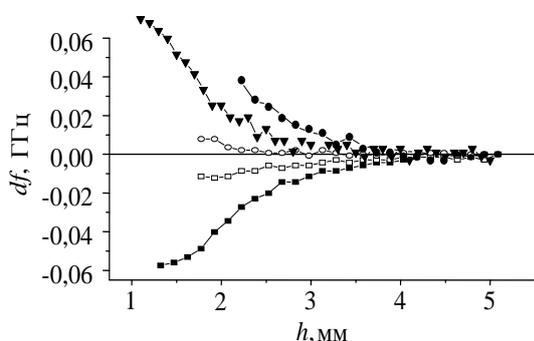


Рис. 4. Зависимости сдвига частоты df колебаний E - ($f=36,93$ ГГц) и H - ($f=37,61$ ГГц) типов от изменения расстояния h между экваториальным срезом полусферы и поверхностью воды и спирта, а также поверхностью металла для H - типа: – ■ – E (вода); □ – E (спирт); – ● – H (вода); – ○ – H (спирт); – ▼ – H (металл)

Также на рис. 4 приведены зависимости $df(h)$ при возмущении резонатора металлической плоскостью для H колебаний.

Обращает на себя внимание существенное различие в характере изменения частоты резонансных колебаний df при уменьшении расстояния h между диаметральной срезом полусфера и поверхностью жидкости. Уменьшение h для колебаний H -типа приводит к снижению частоты резонансных колебаний, тогда как для резонансных колебаний E -типа наблюдается возрастание частоты. Используя метод возмущения электромагнитных полей резонаторов [12], можно предполагать, что увеличение частоты (в случае колебаний E -типа) свидетельствует о влиянии возмущения в основном на магнитную составляющую поля при уменьшении объема, в котором сосредоточено электромагнитное поле резонатора. При этом наблюдаемое для H -типа колебаний снижение частоты может являться следствием влияния возмущения на электрическую составляющую поля резонатора.

Интересно отметить, что наблюдаемый эффект воздействия поглощающими жидкостями со стороны криволинейной поверхности шарового диэлектрического резонатора указывает на преимущественное возмущение для колебаний H -типа магнитной составляющей поля, а для E -типа - электрической [5].

Для контроля концентрации электрической или магнитной составляющих поля у поверхности среза проведены опыты по изучению возмущения резонансной частоты металлической плоскостью. Установлено, что приближение поверхности металла к экваториальному срезу по-

лушара также приводит к понижению частоты в случае возбуждения колебаний H -типа и повышению частоты колебаний при возбуждении колебаний E -типа (рис. 3 и 4) как и в случае металлических резонаторов.

Естественно, что возмущение резонансной частоты полусфера поверхностью этилового спирта оказывается в несколько раз слабее возмущения поверхностью воды. При сравнении зависимостей частотного сдвига резонатора с изменением h для воды и этилового спирта можно заключить, что чувствительность колебаний H - и E -типов к изменению величины диэлектрической проницаемости приблизительно одинакова.

Аналогичные зависимости изменений добротностей колебаний представлены на рис. 5, откуда видно, что изменение добротности более ярко выражено для колебаний H -типа. При приближении к поверхности спирта наблюдаемые изменения добротности намного ниже, чем при приближении к поверхности воды.

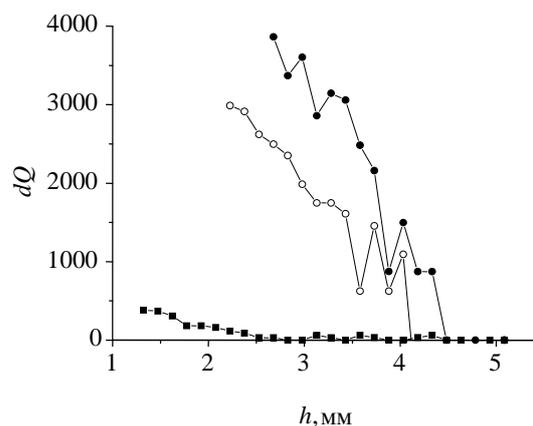


Рис. 5. Зависимости изменения добротности dQ колебаний E - ($f=36,93$ ГГц) и H - ($f=37,61$ ГГц) типов от изменения расстояния h между экваториальным срезом полусферы и поверхностью воды и спирта: – ■ – E (вода); – ● – H (вода); – ○ – H (спирт)

Выводы. Проведенными исследованиями установлено, что в миллиметровом диапазоне можно создать резонансную измерительную ячейку для определения диэлектрических свойств жидкостей с высокими электрическими потерями. Такой измерительной ячейкой может служить диэлектрический резонатор в форме полусфера, возбуждаемый на волнах шепчущей галереи. При возмущении такого резонатора с плоской поверхности среза поверхностью жидкости (дистиллированная вода, этиловый спирт) достигается сдвиг резонансной частоты в десятки мегагерц. Предпочтительно при определении мнимой составляющей диэлектрической проницаемости (ϵ'') выбирать колебания H -типа, а чувствительность к диэлектрической постоянной (ϵ') практи-

чески одинакова для колебаний E - и H -типов. Расстояние h между поверхностью среза и поверхностью жидкости должно составлять 2 - 3 мм.

1. Добромислов В. С., Береза А. Е. Особенности собственных колебаний пластинчатых диэлектрических резонаторов // Тр. МЭИ. - 1984. - Вып. 48. - С.38-44.
2. Annino G., Bertolini D., Fittipaldi M., Longo J., Martinelli M. Dielectric properties of materials using whispering gallery dielectric resonators. Experiments and perspectives of ultrawaveband characterization // Journal of Chemical Physics. - 2000. - 112, N5. - P. 2308-2314.
3. Ганопольский Е. М., Голик А. В., Королюк А. П. Квазиоптический метод измерения предельно малых диэлектрических потерь в конденсированных средах // Физика низких температур. - 1993. - 19, №11. - С.1255-1259.
4. Баранник О. А., Прокопенко Ю. В., Черняк М. Т., Шафрот О. М. Мікрохвильові "аномалії" в радіально двохшаровому квазіоптичному діелектричному резонаторі, заповненому рідиною з великими втратами // Доп. НАН України. - 2005. - 11. - С.68-72.
5. Еременко З. Е. Квазиоптический слоистый шаровой резонатор для измерения диэлектрической проницаемости сильно поглощающей жидкости в миллиметровом диапазоне // Радиофизика и электроника. - Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. - 2004. - 9, №2. - С.442-451.
6. Кириченко А. Я., Харьковский С. Н. Твердотельный генератор с квазиоптическим зеркальным диэлектрическим резонатором // Твердотельные генераторы и преобразователи мм и субмм диапазонов. - Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. АН УССР. - 1989. - С.62-66.
7. Харьковский С. Н., Козут А. Е., Солодовник В. А. Фокусировка волн типа шепчущей галереи в квазиоптическом полусферическом диэлектрическом резонаторе // Письма в Журн. техн. физики. - 1995. - 21, №18. - С. 38-42.
8. Голубничая Г. В., Кириченко А. Я., Максимчук И. Г. Разрежение спектра колебаний шепчущей галереи H -типа полусферического диэлектрического резонатора // Письма в журн. техн. физики. - 2005. - 31, №15. - С.36-43.
9. Кириченко А. Я., Мартынюк С. П., Моторненко А. П., Скуратовский И. Г. Азимутальные колебания в составном дисковом диэлектрическом резонаторе // Радиофизика и электроника. - Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. - 2006. - 11, №3. - С.339-343.
10. Прокопенко Ю. В., Филиппов Ю. Ф., Шитилова И. А., Яковенко В. М. Моды «шепчущей галереи» в полусферическом изотропном диэлектрическом резонаторе с идеально проводящей плоской поверхностью // Журн. техн. физики. - 2006. - 76, №2. - С.102-111.
11. Кириченко А. Я., Козут А. Э., Блудов Ю. В. и др. Влияние металлического зеркала на возбуждение колебаний шепчущей галереи полусферического диэлектрического резонатора // Радиофизика и электроника. - Харьков: Ин-т ра-

диофизики и электрон. НАН Украины. - 2005. - 10, №1. - С.20-24.

12. Гуревич А. Г. Полые резонаторы и волноводы. - М.: Сов. радио, 1952. - 256 с.

INFLUENCE OF SOME LIQUIDS ON SEMISPHERE DIELECTRIC RESONATOR SPECTRAL CHARACTERISTICS

G. V. Golubnichaya, A. Ya. Kirichenko,
I. G. Maximchuk

The influence of the liquids with high level of absorption of electromagnetic waves on electrodynamic characteristics of the open dielectric resonator with the shape of a hemisphere, when the whispering-gallery oscillations of H - and E -types are excited in it in the range of frequencies 34÷38 GHz, has been investigated.

It is shown that the perturbation of this resonator from the side of the equatorial cut by the flat surface of liquids leads to the shift of the resonant frequencies about several tens of megahertz and at the decrease in the Q -factor of the oscillations.

It is found out that the H -mode is more sensitive to the absorption of the electromagnetic energy. For the optimum a distance between equatorial plane of the resonator and liquid surface must be equal approximately to 3 mm at these frequencies.

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

ВПЛИВ ДЕЯКИХ РІДИН НА СПЕКТРАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДІЕЛЕКТРИЧНОГО РЕЗОНАТОРА В ФОРМІ ПІВКУЛІ

Г. В. Голубничая, О. Я. Кириченко,
І. Г. Максимчук

Досліджено вплив рідин з великим рівнем поглинання електромагнітних хвиль на електродинамічні характеристики резонатора в формі півкулі при збудженні в ньому коливань шепчущої галереї H - та E -типів у діапазоні частот 34÷38 ГГц. Показано, що при збудженні такого резонатора зі сторони екваторіального зрізу плоскою поверхнею рідин виникає зміщення резонансних частот в десятки мегагерц та зниження добротності коливань.

Встановлено, що H -тип коливань більш чутливий до поглинання електромагнітної енергії. При цьому оптимальна відстань між екваторіальною поверхнею резонатора і поверхнею рідини повинна становити приблизно 3 мм на зазначених частотах.

Ключові слова: коливання шепчущої галереї, діелектричний резонатор, рідина.

Рукопись поступила 27 февраля 2007 г.