

А. А. Баранник, С. А. Витусевич*, И. А. Проценко, М. С. Харченко, Н. Т. Черпак

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

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

E-mail: ira_protsenko@bk.ru

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

РАДИАЦИОННАЯ ДОБРОТНОСТЬ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРОВ РАЗЛИЧНОЙ ФОРМЫ С ИССЛЕДУЕМЫМИ ПРОВОДНИКАМИ И ЖИДКИМИ ДИЭЛЕКТРИКАМИ

При использовании диэлектрических резонаторов с волнами шепчущей галереи в качестве измерительных ячеек для определения электрофизических параметров веществ необходимо выбирать резонаторную структуру, характеризующуюся приемлемыми величинами радиационной добротности. Расчет радиационных добротностей аналитически возможен только для простых симметричных структур. В работе проведены численные исследования резонаторов различной конфигурации, изготовленных из лейкосапфира, как ограниченных проводящими торцевыми стенками, так и без них, в диапазоне частот 25...40 ГГц. Дискровые резонаторы с одной проводящей стенкой были исследованы также экспериментально. Показано, как влияет вносимый в электромагнитное поле образец исследуемого материала на распределение поля резонатора, резонансную частоту и радиационную добротность. В работе обсуждается возможность применения измерительных ячеек на основе таких резонаторов для определения микроволнового импеданса (сверх)проводников и диэлектрической проницаемости жидких диэлектриков. Полученные результаты позволяют выбрать в качестве измерительной ячейки резонаторную структуру с пренебрежимо малыми радиационными потерями. Ил. 10. Табл. 1. Библиогр.: 13 назв.

Ключевые слова: радиационная добротность, диэлектрический резонатор, сверхпроводник, диэлектрическая проницаемость жидкостей.

Квазиоптические диэлектрические резонаторы (КДР) с модами шепчущей галереи (ШГ) могут применяться для определения электрофизических параметров веществ [1, 2]. Особый интерес представляет определение микроволнового импеданса необычных сверхпроводников, которые были открыты в течение последних десятилетий (купраты, Fe-пниктиды, Fe-халькогениды и др. [1, 3, 4]). Отличительной чертой этих материалов являются низкие микроволновые потери, и поэтому для их исследования необходимо использовать резонаторы с высокими значениями добротности [1, 3]. Аналогичные и даже более жесткие требования к измерительной резонаторной ячейке предъявляются при исследовании других необычных проводников, таких как графен [5].

Проблема определения электрофизических параметров веществ актуальна также при исследовании жидкостей. Особые трудности вызывает определение комплексной диэлектрической проницаемости малых объемов растворов биологических жидкостей. Такие исследования могут быть осуществлены с помощью измерительной ячейки на основе высокодобротных резонаторов того же типа, а именно резонаторов с модами ШГ [2, 6].

Использование КДР в качестве измерительной ячейки для определения поверхностного импеданса (сверх)проводника или диэлектрической проницаемости жидкостей предполагает взаимодействие исследуемого образца с электромагнитным полем резонатора. Такое взаимо-

действие является причиной изменения распределения поля резонатора, его спектральных и энергетических характеристик. В то же время внесение образца малого размера в поле резонатора приводит к дополнительным радиационным потерям, а значит, к уменьшению радиационной добротности резонатора. Следовательно, для успешного применения измерительных ячеек на основе КДР необходимо оценить радиационные потери в резонаторной структуре. В качестве измерительной ячейки для определения электрофизических параметров веществ может быть использована резонаторная структура, которая обеспечивает высокую чувствительность измерений и в то же время характеризуется приемлемыми величинами радиационной добротности.

В данной работе проведены численные и экспериментальные исследования резонаторов, изготовленных из лейкосапфира, различной конфигурации, и рассмотрена возможность их применения для определения микроволнового импеданса (сверх)проводников и диэлектрической проницаемости жидкостей. Численно определена радиационная добротность дисковых резонаторов с двумя торцевыми проводящими стенками (ТПС) при различном расположении образца исследуемого проводника, в том числе резонаторов со срезом. Получены численные и экспериментальные значения частоты и радиационной добротности дисковых резонаторов с одной ТПС и предпринята попытка уменьшить радиационные потери в таких структурах путем изменения формы резонаторов. Также рассмотрен цилиндрический ре-

зонатор без ТПС, накрытый слоем пластика, в котором находится микрофлюидный канал, заполненный водой. Проведен расчет радиационных потерь и потерь в жидкости, заполняющей микрофлюидный канал. Показано, как влияет местоположение микрофлюидного канала на потери в структуре.

1. Расчет радиационных потерь диэлектрических резонаторов. Расчет радиационных потерь КДР проводился путем численного моделирования в программе *COMSOL Multiphysics*. В данной программе моделирование открытой границы осуществляется заданием специальных граничных условий (отсутствие отражения от границы) в совокупности с согласующим поглощающим слоем, расположенным на некотором расстоянии от резонатора. Однако сравнение с результатами расчета радиационной добротности, полученными аналитически [7], показывает, что при использовании поглотителя, который состоит из слоев диэлектрика с разными значениями комплексной диэлектрической проницаемости, точность расчета возрастает. Именно такой подход, т. е. использование слоистого поглотителя, используется в данной работе.

При расчете собственной добротности КДР с ТПС программа *COMSOL Multiphysics* учитывает потери в диэлектрике, в проводнике и радиационные потери

$$Q_0^{-1} = k_c \operatorname{tg} \delta_c + A_s^{\text{ТПС}} R_s^{\text{ТПС}} + Q_{\text{рад}}^{-1},$$

где Q_0 – собственная добротность резонатора; $k_c \operatorname{tg} \delta_c$ – произведение коэффициента заполнения резонатора на тангенс угла потерь лейкосапфира (потери в лейкосапфире); $A_s^{\text{ТПС}} R_s^{\text{ТПС}}$ – произведение коэффициента включения проводника на поверхностное сопротивление проводника (потери в ТПС); $Q_{\text{рад}}$ – радиационная добротность [1].

Эти ТПС могут быть исследуемыми образцами [1].

При внесении в поле резонатора с ТПС дополнительного проводящего образца, который подлежит исследованию, учитываются также его потери:

$$Q_0^{-1} = k_c \operatorname{tg} \delta_c + A_s^{\text{ТПС}} R_s^{\text{ТПС}} + A_s^{\circ} R_s^{\circ} + Q_{\text{рад}}^{-1}. \quad (1)$$

Собственная добротность резонатора без ТПС с микрофлюидным каналом определяется как

$$Q_0^{-1} = k_c \operatorname{tg} \delta_c + k_d \operatorname{tg} \delta_d + k_n \operatorname{tg} \delta_n + Q_{\text{рад}}^{-1}, \quad (2)$$

где $k_n \operatorname{tg} \delta_n$ – потери в слое диэлектрика, в котором находится микрофлюидный канал; $k_d \operatorname{tg} \delta_d$ – потери в жидком диэлектрике, заполняющем микрофлюидный канал. Поэтому, чтобы получить с помощью программного продукта расчетные значения добротности, обусловленные только радиаци-

онными потерями, потери во всех элементах резонатора полагаются равными 0 ($\operatorname{tg} \delta = 0$, $R_s = 0$).

При выборе структуры для исследования следует руководствоваться критерием, чтобы радиационные потери были примерно на порядок ниже, чем потери в диэлектриках и проводниках, тогда радиационными потерями можно пренебрегать. Таким образом, приемлемой для структуры, состоящей из резонатора, изготовленного из лейкосапфира, и проводников, является величина радиационной добротности не менее 10^5 [1]. Собственная добротность резонатора с микрофлюидным каналом, заполненным водными растворами биологических жидкостей, составляет порядка нескольких тысяч [6], следовательно, для такого резонатора величина радиационной добротности $> 10^5$ также является приемлемой. Однако при исследовании сверхпроводников при низких температурах требуется более высокая радиационная добротность [8], так как тангенс угла диэлектрических потерь монокристалла лейкосапфира $\operatorname{tg} \delta_c$ при низких криогенных температурах намного меньше 10^{-5} [9].

2. Цилиндрический диэлектрический резонатор со срезом. На рис. 1 представлены цилиндрический КДР, ограниченный двумя идеально проводящими торцевыми стенками, и плоский прямоугольный образец исследуемого проводника.

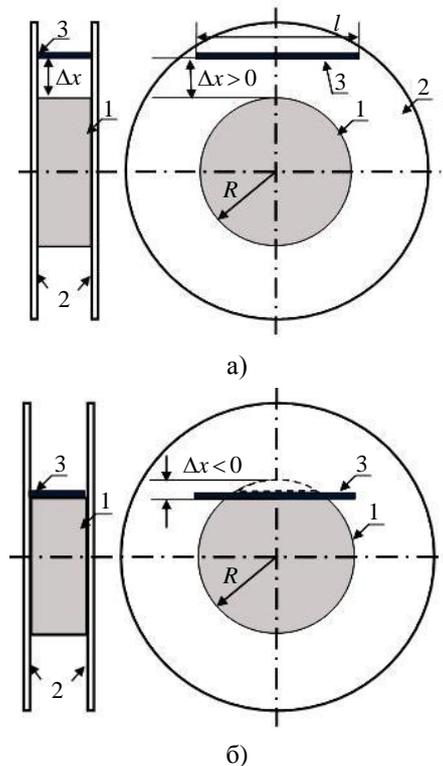


Рис. 1. Цилиндрический КДР (1), ограниченный двумя ТПС (2), и образец исследуемого проводника (3)

Резонатор изготовлен из лейкосапфира, радиус резонатора $R = 7,25$ мм. Высота резонатора и высота образца $h = 2,5$ мм. Длина образца l . Расстояние от образца до цилиндрической поверхности резонатора Δx . Случаю, когда образец касается резонатора, соответствует величина $\Delta x = 0$, а случаю, когда образец «входит» в тело резонатора (резонатор со срезом) – величина $\Delta x < 0$. Резонатор со срезом представляет собой цилиндрический КДР, у которого выполнен срез параллельно оси цилиндра, и к срезу приставлен образец проводника.

На рис. 2 показано распределение E_z -компоненты поля TM_{1010} при разном расположении образца относительно цилиндрического КДР. На рис. 2, а изображено поле колебаний ШГ для случая, когда образец проводника расположен на некотором расстоянии от резонатора. Видно, что при перемещении образца на небольшое расстояние в тело резонатора (рис. 2, б) распределение поля ШГ деформируется, а при дальнейшем продвижении образца мода ШГ исчезает (рис. 2, в). Однако при $\Delta x = -7,25$ мм (соответствует полудисковому резонатору) в резонаторе снова могут существовать колебания ШГ (рис. 2, г).

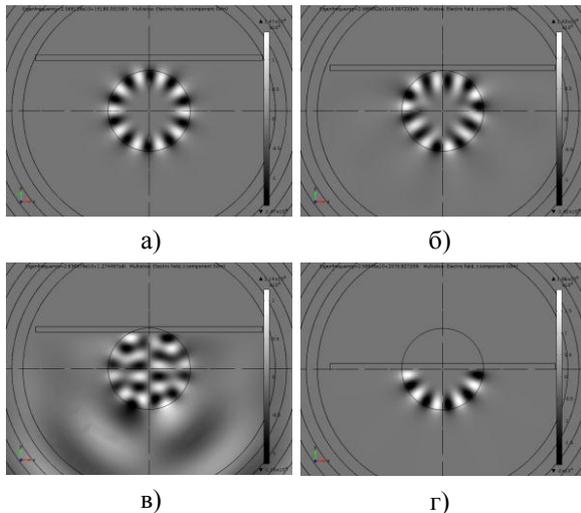


Рис. 2. Распределение E_z -компоненты электромагнитного поля ШГ TM_{1010} в КДР с двумя ТПС при различных положениях образца проводника: а) – $\Delta x > 0$; б) – $\Delta x = 0$; в) – $\Delta x < 0$; г) – $\Delta x = -7,25$ мм

Изменение электромагнитного поля резонаторов сопровождается изменением его спектральных и энергетических характеристик. На рис. 3 показано изменение частоты и радиационной добротности КДР с TM_{n10} -модой при изменении положения образца Δx для разных значений азимутального индекса колебаний n и длины образца l (сплошные кривые соответствуют случаю $l = 40$ мм, пунктирные – случаю $l = 4$ мм).

Горизонтальные прямые, к которым стремится радиационная добротность резонатора при удалении образца от поверхности, соответствуют случаю цилиндрического КДР без образца. Данные прямые хорошо согласуются с результатами, рассчитанными аналитически [7].

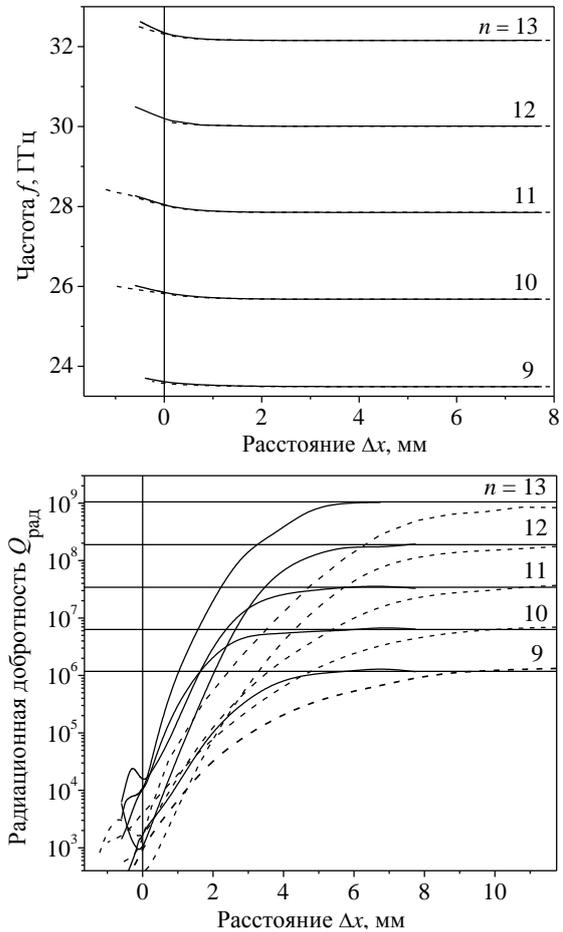


Рис. 3. Частота и радиационная добротность КДР при различном расположении проводящего образца. Номер кривой соответствует азимутальному индексу n

Образец оказывает заметное влияние на частоту резонатора f при приближении к боковой поверхности КДР на расстоянии $\Delta x < 1$ мм. Влияние образца на радиационную добротность $Q_{\text{рад}}$ становится заметным на расстоянии $\Delta x < 5$ мм для $l = 40$ мм и на расстоянии $\Delta x < 9$ мм для $l = 4$ мм. Очевидно, что сильная деформация волны ШГ при приближении образца к диэлектрическому диску, сопровождающаяся резким увеличением радиационных потерь, сильно затрудняет исследование проводников с высокой проводимостью (таких, как графен [5]) при помощи данного резонатора. Увеличение же расстояния между образцом и резонатором до достижения приемлемых величин радиационной добротности $Q_{\text{рад}}$ приводит к уменьшению чувствительности метода.

Очевидно, что образец сверхпроводника должен быть отнесен от поверхности резонатора на расстояние не меньше 1 мм. Чтобы найти более точную оптимальную величину Δx , необходимо дополнительно исследовать зависимость коэффициента включения проводника A_s^0 [1] от расстояния Δx .

Пригодным для определения поверхностного сопротивления (сверх)проводников представляется полуцилиндрический резонатор с ТПС, ограниченный на срезе исследуемым образцом (рис. 2, г). Однако при использовании такого резонатора необходимо принимать во внимание влияние длины образца l на величину радиационной добротности $Q_{\text{рад}}$. На рис. 4 представлен график зависимости радиационной добротности резонатора от длины образца l . Если длина образца достаточно большая ($l > 35$ мм), радиационная добротность $Q_{\text{рад}}$ достигает величин, характерных для цилиндрического КДР с двумя ТПС на соответствующей моде.

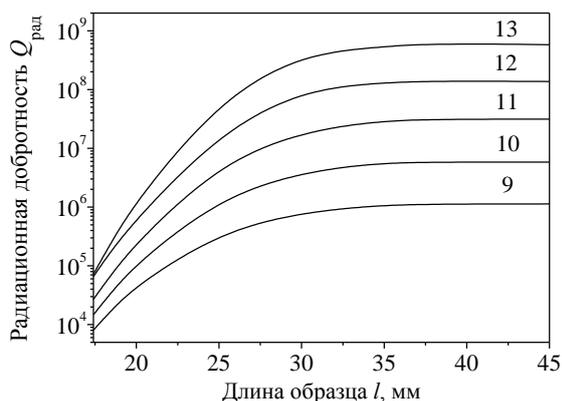


Рис. 4. Радиационная добротность полуцилиндрического резонатора (рис. 2, г). Номер кривой соответствует азимутальному индексу n

3. Резонаторы, ограниченные одной ТПС. В качестве сенсора микроволнового импеданса могут быть использованы резонаторы не только с двумя, но и с одной ТПС [10]. ТПС в таком случае также может выступать в качестве исследуемого образца. Радиационная добротность резонаторов, ограниченных ТПС с одной стороны, меньше, чем радиационная добротность резонатора, ограниченного с двух сторон. Была предпринята попытка уменьшить радиационные потери в цилиндрических КДР, ограниченных одной ТПС. Для этого была изменена форма резонатора. Была определена радиационная добротность КДР различной конфигурации с колебаниями ШГ HE -типа, изготовленных из лейкосапфира, ограниченных одной ТПС: цилиндрического (рис. 5, а), асферико-цилиндрического (рис. 5, б), асферического (рис. 5, в), полусферического (рис. 5, г). Радиусы дисков и полусферы равны

7,25 мм. Высота цилиндрического и асферического резонаторов равна 2,5 мм.

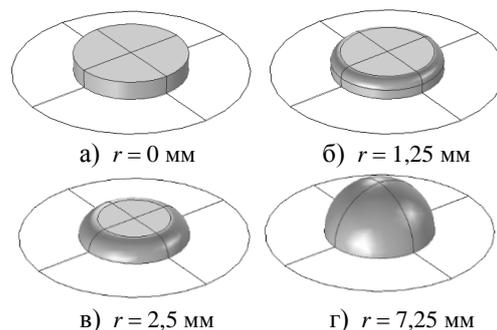


Рис. 5. Резонаторы разных конфигураций с различными значениями радиуса кривизны r , ограниченные одной ТПС

На рис. 6 представлены зависимости частоты и радиационной добротности КДР, изготовленных из лейкосапфира и ограниченных одной ТПС, от радиуса кривизны r их поверхности для разных значений азимутального индекса колебаний n . Следует отметить, что пунктирная линия, соединяющая точки, соответствующие различным значениям радиуса кривизны, приведена для лучшего визуального восприятия и не отражает действительной функциональной зависимости.

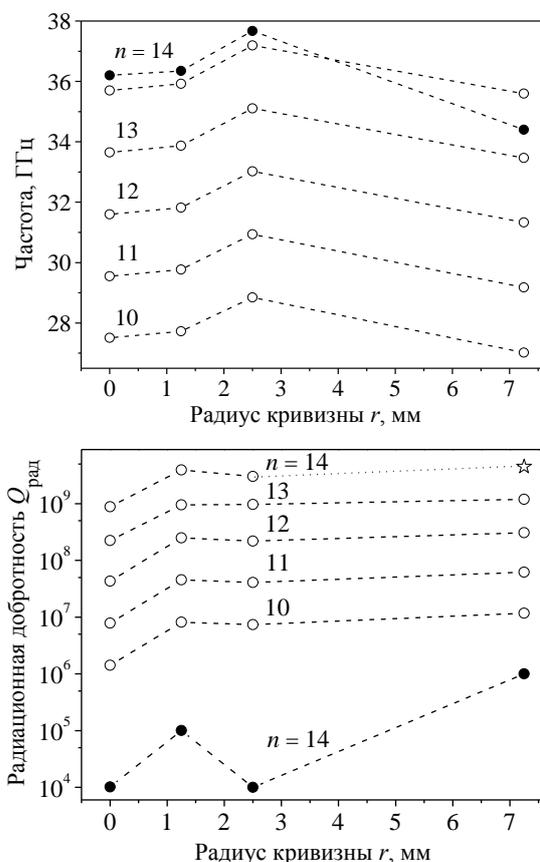


Рис. 6. Частота и радиационная добротность КДР различной конфигурации с колебаниями HE -типа с одной ТПС

Открытыми символами обозначены результаты численного эксперимента. При проведении численных исследований в программе COMSOL возникли сложности при расчете точек, где радиационная добротность принимает значения $> 10^9$. Возникновение сложностей связано с тем, что исследуемая модель разбивается на конечное число элементов. Точка, отмеченная звездочкой, получена путем аппроксимации с использованием результатов для более низких мод.

Величины радиационной добротности резонаторов с измененной формой (асферические и полусферические) больше, чем соответствующие значения для цилиндрического КДР. Среди рассмотренных КДР с одной ТПС наибольшей величиной радиационной добротности обладает полусферический резонатор ($r = 7,25$ мм). Имеется опыт применения такого резонатора для исследования свойств высокотемпературных сверхпроводящих пленок [8]. Также представляет интерес использование асферико-цилиндрического резонатора с радиусом кривизны $r = 1,25$ мм. Однако при дальнейшем увеличении радиуса кривизны ($r = 2,5$ мм) наблюдается уменьшение радиационной добротности КДР.

Значения частоты и радиационной добротности для КДР с одной ТПС для значения азимутального индекса $n = 14$, полученные из результатов эксперимента, обозначены закрытыми символами на рис. 6. Значения радиационной добротности резонаторов получены из значений их собственной добротности путем учета составляющих, обусловленных потерями в проводнике и диэлектрике (см. (1)). Данные, полученные численно и экспериментально, согласуются качественно, но значения радиационных добротностей, полученные экспериментально, значительно ниже. Это может быть объяснено дополнительными радиационными потерями в элементах связи, так как резонатор является открытой структурой. Также это может быть связано с отклонением от формы при изготовлении резонатора и с шероховатостями на его поверхности [11].

4. Резонаторы с микрофлюидным каналом. Для определения комплексной проницаемости малого объема жидкостей могут быть использованы различные КДР с колебаниями ШГ: радиально-слоистые резонаторы [12], а также резонаторы с капилляром [13] и с микрофлюидным каналом [6]. Достоинством резонатора с микрофлюидным каналом является возможность создания герметичной измерительной ячейки; кроме того, технология изготовления такой резонаторной системы не требует внедрения исследуемого образца в монокристалл, из которого изготовлен резонатор.

На рис. 7 изображен цилиндрический КДР (1), на торцевой поверхности которого расположен слой пластика (2). В слое пластика находится микрофлюидный канал (3). Цилиндрический КДР изготовлен из лейкосапфира; радиус цилиндра $R = 7,25$ мм, высота цилиндра $h = 2,5$ мм. Толщина слоя пластика 0,69 мм. Численные расчеты проведены для случая микрофлюидного канала, заполненного водой, так как интерес для исследования представляют водные растворы биологических жидкостей. Микрофлюидный канал расположен на расстоянии a от центра резонатора. Диаметр микрофлюидного канала 0,2 мм.

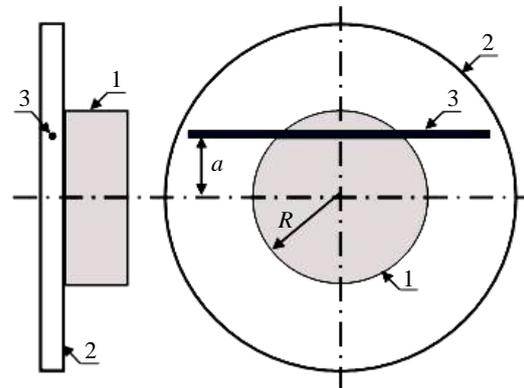


Рис. 7. Цилиндрический КДР (1) со слоем пластика (2), в котором расположен микрофлюидный канал (3)

Слой пластика и микрофлюидный канал вносят дополнительные радиационные потери в резонаторную структуру. В таблице представлены частота и радиационная добротность дискового КДР без ТПС с модой ШГ HE_{1211} и такого же резонатора, накрытого слоем пластика с микрофлюидным каналом и без него. Микрофлюидный канал расположен на расстоянии $a = 4,1$ мм от центра резонатора.

Частота и радиационная добротность резонаторов без ТПС

Тип резонатора	f , ГГц	$Q_{\text{рад}}$
КДР из лейкосапфира	35,728	$3,18 \times 10^7$
КДР из лейкосапфира со слоем пластика	35,394	$2,50 \times 10^7$
КДР с микрофлюидным каналом в слое пластика	35,392	$3,94 \times 10^5$

Местоположение микрофлюидного канала в слое пластика влияет на частоту и радиационную добротность резонатора. На рис. 8 представлен график зависимости частоты и радиационной добротности резонатора с микрофлюидным каналом от расстояния a до центра резонатора. Видно, что график зависимости имеет минимум в точке $a = 4,1$ мм.

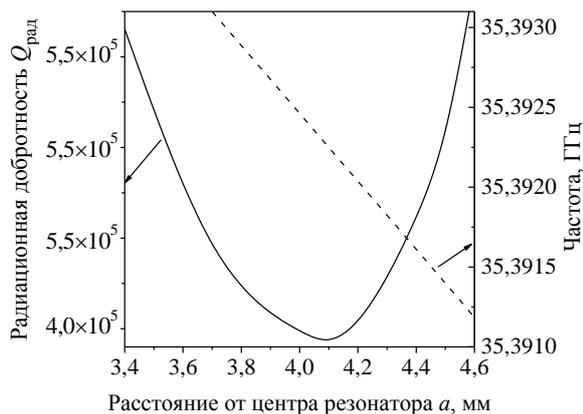


Рис. 8. Зависимость частоты (пунктирная линия) и радиационной добротности (сплошная линия) резонатора от расположения микрофлюидного канала

Распределение E_z -компоненты электромагнитного поля моды $HE_{12,1,1}$ при таком расположении микрофлюидного канала представлено на рис. 9.

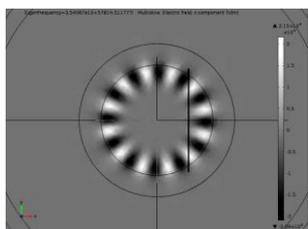


Рис. 9. Распределение E_z -компоненты электромагнитного поля моды $HE_{12,1,1}$ в КДР с микрофлюидным каналом

На рис. 10 представлены потери в резонаторе с микрофлюидным каналом при различных положениях микрофлюидного канала в слое пластика.

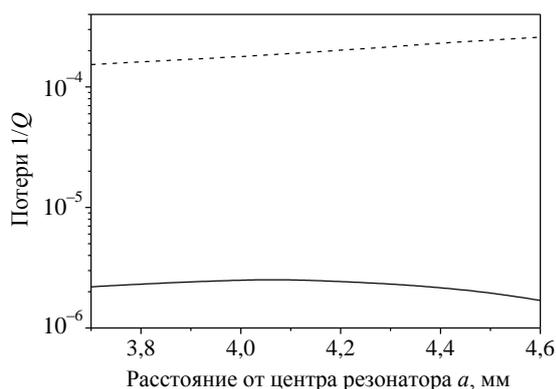


Рис. 10. Потери в резонаторе с микрофлюидным каналом, заполненным водой: потери в воде (пунктирная линия) и радиационные потери (сплошная линия)

Чтобы определить потери в воде, в модели для численных исследований потери в лейкосапфире ($\text{tg}\delta_c$) и в пластике ($\text{tg}\delta_n$) полагались равными 0, т. е. учитывались только потери в во-

де ($\text{tg}\delta_d \neq 0$) и радиационные потери. Затем потери в воде $k_d \text{tg}\delta_d$ рассчитывались по формуле (2). Поскольку радиационные потери более чем на порядок ниже, чем потери в жидкости (рис. 10), то при проведении измерений радиационными потерями можно пренебречь.

Выводы. Проведены численные расчеты радиационных потерь в дисковых КДР, изготовленных из лейкосапфира с двумя и одной ТПС, а также без ТПС. Расчеты проводились в программе COMSOL 4.2a.

В электромагнитное поле цилиндрического КДР с двумя ТПС вносился образец проводника. При этом наблюдалось изменение поля резонатора, резонансной частоты и радиационной добротности. Рассмотрены случаи, когда проводник находился на некотором расстоянии от боковой поверхности резонатора, касался боковой поверхности резонатора и вносился в тело резонатора (резонатор со срезом). Показано, что КДР с двумя ТПС может быть использован в качестве измерительной ячейки для исследования образцов (сверх)проводников, при этом расстояние от его боковой поверхности до образца должно быть не менее 1 мм для рассмотренных сапфировых резонаторов. Также определенные возможности для исследований представляет полудисковый резонатор с двумя ТПС, на срезе ограниченный образцом проводника. Спектральные и энергетические характеристики такого резонатора совпадают с характеристиками цилиндрического резонатора с двумя ТПС с соответствующей модой при достаточной (более 35 мм для данной структуры) длине образца.

Цилиндрические резонаторы с одной ТПС обладают меньшей радиационной добротностью, чем резонаторы с двумя ТПС. Предпринята попытка уменьшить радиационные потери в таких резонаторах, изменяя их форму. Проведены численные и экспериментальные исследования цилиндрического, полусферического и асферических резонаторов с различными радиусами кривизны. Наибольшей радиационной добротностью из перечисленных обладает полусферический резонатор. Следует отметить, что значения радиационной добротности, полученные в результате экспериментальных исследований, намного ниже соответствующих значений, полученных численно. Такое расхождение можно объяснить дополнительными радиационными потерями в элементах связи, недостаточной точностью воспроизведения формы резонатора и шероховатостью поверхности.

Резонатор без ТПС со слоем пластика используется для определения диэлектрической проницаемости малых объемов жидкостей. Исследуемая жидкость помещается в микро-

флюидный канал, находящийся в слое пластика. Проведены численные исследования такого резонатора при заполнении микрофлюидного канала водой (интерес представляют водные растворы биологических жидкостей малых концентраций). Определены потери в воде, заполняющей микрофлюидный канал, и радиационные потери. Показано, что радиационные потери по сравнению с потерями в воде пренебрежимо малы.

Библиографический список

1. *Accurate* microwave technique of surface resistance measurement of large-area HTS films using sapphire quasi-optical resonator / N. Cherpak, A. Barannik, Y. Prokopenko et al. // IEEE Trans. Appl. Supercond. – 2003. – 13, N 2. – P. 3570–3573.
2. *Biochemical* liquids permittivity characterization technique based on whispering-gallery mode resonator with microfluidic channel / A. I. Gubin, A. A. Barannik, I. A. Protsenko et al. // Proc. of 43rd Europ. Microwave Conf. – Nuremberg, 2013. – P. 314–317.
3. *Millimeter-wave* surface impedance of optimally-doped Ba(Fe_{1-x}Co_x)₂As₂ single crystals / A. Barannik, N. T. Cherpak, M. A. Tanatar et al. // Phys. Rev. B. – 2013. – 87, N 1. – P. 014506(1–7).
4. *Unusual* microwave response and bulk conductivity of very thin FeSe_{0.3}Te_{0.7} film as a function of temperature / A. A. Barannik, N. T. Cherpak, Yun Wu et al. // Low Temperature Phys. – 2014. – 40, N 6. – P. 636–644.
5. *Krupka J.* Microwave Conductivity of Very Thin Graphene and Metal Films / J. Krupka, W. Strupinski, and N. Kwietniewski // J. Nanoscience and Nanotechnology. – 2011. – 11, N 4. – P. 3358–3362.
6. *Whispering-Gallery-Mode* Resonator Technique With Microfluidic Channel for Permittivity Measurement of Liquids / A. I. Gubin, A. A. Barannik, N. T. Cherpak et al. // IEEE Trans. on MW Theory and Tech. – 2015. – 63, N 6. – P. 2003–2009.
7. *Квазиоптические* твердотельные резонаторы / А. Я. Кириченко, Ю. В. Прокопенко, Ю. Ф. Филиппов, Н. Т. Черпак. – К.: Наук. думка, 2008. – 296 с.
8. *Barannik A. A.* About low-temperature microwave response of epitaxial YBa₂Cu₃O_{7-δ} film measured by a novel measurement technique / A. A. Barannik, S. O. Bunyayev, N. T. Cherpak // Low Temperature Physics. – 2008. – 34, N 12. – P. 977–981.
9. *Braginsky V. B.* Experimental observation of fundamental microwave absorption in high quality dielectric crystals / V. B. Braginsky, V. S. Ilchenko, K. S. Bagdassarov // Phys. Lett. A. – 1987. – 120, N 6. – P. 300–305.
10. *Hemispherical* and aspheric WGM dielectric resonators with conducting endplates: radiation and conductivity losses depending on shape of the resonators surface / A. A. Barannik, N. T. Cherpak, M. S. Kharchenko, S. A. Vitusevich // Радиофизика и электрон. – 2013. – 4(18), № 4. – С. 49–54.
11. *Брагинский В. Б.* Системы с малой диссипацией / В. Б. Брагинский, В. П. Митрофанов, В. И. Панов. – М.: Наука, 1981. – 144 с.
12. *Two-layered* disc quasi-optical dielectric resonators: electro-dynamics and application perspectives for complex permittivity measurements of lossy liquids / A. A. Barannik, N. T. Cherpak, Yu. V. Prokopenko et al. // Meas. Sci. Technol. – 2007. – N 18. – P. 2231–2238.
13. *Gubin A. I.* Dielectric resonators with „Whispering-gallery“ waves in investigations of small-volume binary solutions /

A. I. Gubin, A. A. Lavrinovich, N. T. Cherpak // Ukr. J. Phys. – 2006. – 51, N 7. – С. 723–727.

Рукопись поступила 01.07.2015.

A. A. Barannik, S. A. Vitusevich, I. A. Protsenko,
M. S. Kharchenko, N. T. Cherpak

RADIATION Q-FACTOR OF DIFFERENT SHAPE DIELECTRIC RESONATORS WITH TESTED CONDUCTORS AND LIQUID DIELECTRICS

While using whispering gallery modes dielectric resonators as measurement cells for finding the electrophysical parameters of materials it is necessary to choose the resonator structure, which is characterized by the acceptable radiation *Q*-factor values. Calculation of radiation *Q*-factor by analytical methods is possible for simple symmetric structures only. The numerical study of different shape resonators made of leucosapphire, which are limited with conducting end plates and without them are carried out in Ka-band. The disk resonators with one conducting end plate are studied experimentally too. The influence of tested material brought in the electromagnetic field on the resonator field distribution, frequency and radiation *Q*-factor is shown. The application opportunity of measurement cells based on such resonators for determination of (super)conductor microwave impedance and permittivity of dielectric liquids is analyzed. The obtained results make it possible to choose the resonator measurement cell with negligible radiation loss.

Key words: radiation *Q*-factor, dielectric resonator, superconductor, dielectric permittivity liquids.

О. А. Баранник, С. О. Вітусевич, І. О. Проценко,
М. С. Харченко, М. Т. Черпак

РАДІАЦІЙНА ДОБРОТНІСТЬ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ РЕЗОНАТОРІВ РІЗНОЇ ФОРМИ З ДОСЛІДЖУВАНИМИ ПРОВІДНИКАМИ ТА РІДКИМИ ДІЕЛЕКТРИКАМИ

При використанні діелектричних резонаторів з хвилями шепочучої галереї як вимірювальних комірок для визначення електрофізичних параметрів речовин необхідно обрати резонаторну структуру, яка характеризується припустимими величинами радіаційної добротності. Обчислення радіаційних добротностей аналітично можливе тільки для простих симетричних структур. У роботі проведено чисельні дослідження резонаторів із лейкосапфіру різної форми, як обмежених торцевими провідними стінками, так і без них, у діапазоні частот 25..40 ГГц. Діскові резонатори з однією провідною стінкою досліджувалися також експериментально. Показано вплив внесеного в електромагнітне поле зразка досліджуваного матеріалу на розподіл поля резонатора, його частоту і радіаційну добротність. Розглянуто можливість використання вимірювальних комірок на основі таких резонаторів для визначення мікрохвильового імпедансу (над)провідників і діелектричної проникності рідких діелектриків. Отримані результати дозволяють обрати резонаторну вимірювальну комірку з радіаційними втратами, якими можна знехтувати.

Ключові слова: радіаційна добротність, діелектричний резонатор, надпровідник, діелектрична проникність рідин.