

## КВАЗИОПТИЧЕСКИЙ КОЛЬЦЕВОЙ САПФИРОВОЙ РЕЗОНАТОР С ВНУТРЕННИМ ЦИЛИНДРИЧЕСКИМ ПРОВОДНИКОМ

А. А. Баранник<sup>2</sup>, К. И. Торохтий<sup>1,2</sup>, Н. Т. Черпак<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»  
21, ул. Фрунзе, Харьков, 61002, Украина  
E-mail: [toroktyki@mail.ru](mailto:toroktyki@mail.ru)

<sup>2</sup>Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины  
12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина  
E-mail: [barannik@ire.kharkov.ua](mailto:barannik@ire.kharkov.ua)

Исследуется новый подход к измерению поверхностного сопротивления  $R_s$  массивных проводящих образцов. Описана методика определения  $R_s$  с помощью открытого кольцевого квазиоптического диэлектрического резонатора, возбуждаемого на модах типа шепчущей галереи. Расчетным путем и экспериментально исследованы основные характеристики резонатора в интервале частот 30–40 ГГц. Показана возможность измерения  $R_s$  высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) с помощью кольцевого диэлектрического резонатора. Ил. 4. Табл. 1. Библиогр.: 6 назв.

**Ключевые слова:** поверхностное сопротивление, добротность.

В последнее время для измерения поверхностного сопротивления ( $R_s$ ) ВТСП стали применяться квазиоптические диэлектрические резонаторы (КДР) из-за их высокой добротности и удобства использования в миллиметровом (мм) диапазоне волн [1–3]. Но основная область их применения ограничивается пленками или объемными образцами с площадью основания, большей соответствующей площади самого резонатора. Нередко возникает необходимость в измерении  $R_s$  образцов с меньшими линейными размерами. Как правило, это происходит в случае синтеза новых сверхпроводящих материалов, когда еще не разработана технология синтеза этих материалов или когда они весьма дорогостоящи. В случае очень малых размеров сверхпроводников, в основном, используют резонатор из низкотемпературного сверхпроводника (метод «*hot finger in cavity*»), однако для работы с ним всегда необходим жидкий гелий [4]. Кроме того, для этого резонатора весьма сложно определять геометрический фактор измеряемого образца.

В нашей работе рассмотрена возможность применения кольцевого диэлектрического резонатора, возбуждаемого на модах типа шепчущей галереи, при измерении поверхностного сопротивления  $R_s$  сверхпроводников и проводников в мм диапазоне волн. При этом образец в форме цилиндра размещается в центральной части резонатора, что дает возможность достаточно просто определять геометрический фактор измеряемого образца. Ранее подобная конфигурация резонатора применялась для измерения диэлектрической проницаемости жидкости, заполняющей внутреннее пространство резонатора [5]. В работе поставлена задача определить характеристики кольцевого резонатора в зависимости от про-

димости исследуемого образца и оценить возможность применения такой модификации КДР для импедансных измерений сверхпроводящих материалов.

**1. Экспериментальная техника.** Для экспериментальных исследований был изготовлен кольцевой сапфировый резонатор с внешним диаметром  $d_{out} = 8,9$  мм и внутренним диаметром  $d_{in} = 5,25$  мм (рис. 1). Использовался монокристалл сапфира ( $\epsilon_{\perp} = 9,4$ ,  $\epsilon_{\parallel} = 11,59$ ) с оптической осью вдоль оси кольца.

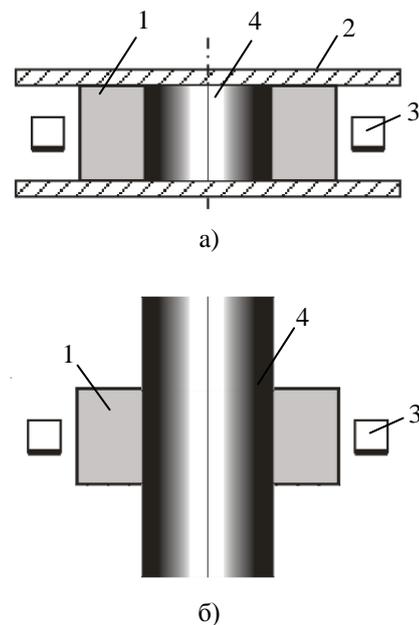


Рис. 1. Общий вид кольцевых квазиоптических резонаторов с цилиндрическим проводником с ТПС (а) и без них (б): 1 — кольцевой резонатор; 2 — проводящие торцевые стенки; 3 — диэлектрические волноводы; 4 — исследуемый образец

Исследовался кольцевой резонатор как с торцевыми проводящими стенками (ТПС), так и без них. В качестве материала для торцевых стенок использовалась бескислородная медь. Для определения электродинамических свойств резонатора были изготовлены образцы из меди, титана и нержавеющей стали, имеющие форму цилиндра диаметром  $d_{in} = 5,25$  мм. Высота стержней для измерений без торцевых стенок выбиралась более 5 мм, чтобы избежать влияния краев стержня.

При этом также были изготовлены ТПС в форме пластин из тех же материалов, что и цилиндрические образцы проводников, чтобы предварительно измерить их проводимость с помощью дискового сапфирового КДР, где эти образцы включались также в виде ТПС [1, 2]. Таким образом, становилась известной проводимость трех цилиндрических образцов различных проводников, а именно, меди, титана и нержавеющей стали.

Эта процедура необходима, так как проводимость образцов зависит от внешних факторов, следовательно, в данном случае нельзя пользоваться справочными данными для проводимости ТПС.

Резонатор возбуждался диэлектрическими сапфировыми волноводами прямоугольного сечения, металлизированными с одной стороны. Волноводы располагались так, чтобы в резонаторе возбуждались моды  $HE$ -типа. Измерения проводились в частотном диапазоне 30–40 ГГц с помощью векторного анализатора *Agilent E8362B*. Добротность определялась по резонансной частоте и ширине резонансной линии на уровне  $-3$  дБ при слабой связи резонатора с линиями передачи.

**2. Результаты вычислений.** Предварительно была оценена оптимальная конфигурация кольцевого резонатора. Для этого расчетным путем были получены зависимости основных параметров резонатора, таких как резонансная частота и добротность, от отношения внутреннего и внешнего диаметров кольца. Результаты этих расчетов представлены на рис. 2. Расчет выполнялся с помощью пакета *CST Microwave Studio 2008*.

Как видно из зависимостей  $Q(d_{in}/d_{out})$  и  $f_{res}(d_{in}/d_{out})$ , оптимальное для исследования отношение  $d_{in}/d_{out}$  находится в интервале 0,57–0,62. Выбор интервала обусловлен оптимальным выбором крутизны наклона обеих зависимостей. Этот интервал действителен при любой проводимости металлического образца в пределах от  $10^6$  до  $10^9$  См/м. Таким образом, значение внутреннего диаметра при  $d_{out} = 8,9$  мм лежит в пределах от 4,9 до 5,4 мм. По этой причине для исследования было взято кольцо с внутренним диаметром 5,25 мм. Этому значению соответствует также

достижимый размер некоторых новых сверхпроводящих материалов.

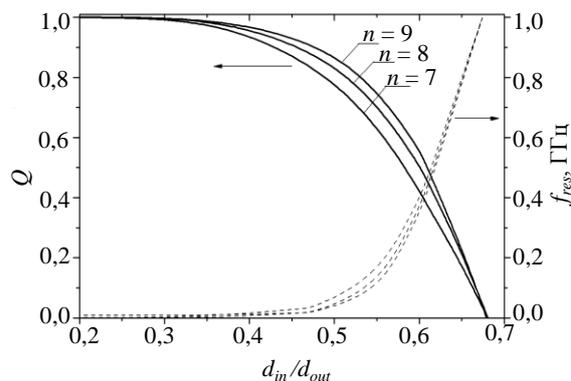


Рис. 2. Резонансная частота и добротности кольцевого резонатора с цилиндрическим медным стержнем внутри в зависимости от отношения внутреннего диаметра кольца к внешнему ( $d_{in}/d_{out}$ ) при  $HE_{n,1,0}$  ( $n = 7-9$ ) (точки означают результаты расчета)

Расчетным путем определена собственная добротность резонатора в зависимости от проводимости металлического образца. При этом исследуемый образец полностью занимает внутренний диаметр резонатора. Рассчитать подобную зависимость для частоты с необходимой точностью невозможно из-за нечувствительности расчетной программы к изменению проводимости стержня, так как изменение частоты сравнимо с минимальным шагом по частоте, который составляет 2 МГц или меньше его, что приводит к значительным погрешностям. Расчеты показывают, что собственная добротность  $Q$  возрастает с ростом проводимости исследуемого образца  $\sigma_{sample}$ , что объясняется уменьшением потерь в резонаторе с металлическим стержнем. При увеличении проводимости зависимость выходит на «насыщение», которое соответствует идеальной проводимости стержня. При этом зависимость  $Q(\sigma_{sample})$  для резонатора без ТПС находится в области более высоких добротностей, так как в КДР с ТПС добавляются потери в торцевых пластинах. Полученные данные не учитывают радиационные потери в исследуемых резонаторах. Поэтому необходимым является экспериментальный подход, позволяющий оценить также и указанные потери.

**3. Результаты эксперимента и их анализ.** Результаты экспериментального исследования приведены в таблице. В резонаторе с ТПС возбуждались колебания  $HE_{n,1,0}$ -типа, а без ТПС возбуждались колебания  $HE_{n,1,1}$ , где  $n$  – азимутальный индекс.

Величину, обратную собственной добротности, можно представить как сумму слагаемых, определяющих потери в элементах резонансной системы

$$\frac{1}{Q} = A_s^{SAMPLE} R_s^{SAMPLE} + A_s^{CEP} R_s^{CEP} + ktg\delta + \frac{1}{Q_{rad}}, \quad (1)$$

где  $A_s^{SAMPLE}$  и  $A_s^{CEP}$  – коэффициенты включения металлического стержня и торцевых пластин;  $Q_{rad}$  – радиационная добротность резонатора;  $tg\delta$  – тангенс угла потерь в диэлектрике;  $k$  – коэффициент, близкий к 1 [6].

Результаты экспериментального исследования кольцевого сапфирового резонатора с проводящим стержнем внутри

Кольцевой резонатор с ТПС				
	Мода	$HE_{7,1,0}$	$HE_{8,1,0}$	$HE_{9,1,0}$
Медный (отожженный) стержень	$f_{res}$ , ГГц	32,49	35,93	39,38
	$Q_{exper}$	4600	6300	7700
	$Q_{est}$	6500	7100	7800
Титановый стержень	$f_{res}$ , ГГц	32,32	35,75	39,17
	$Q_{exper}$	2600	3600	4700
	$Q_{est}$	3500	4400	5300
Кольцевой резонатор без ТПС				
	Мода	$HE_{6,1,1}$	$HE_{7,1,1}$	$HE_{8,1,1}$
Медный стержень	$f_{res}$ , ГГц	31,54	34,6	37,76
	$Q_{exper}$	3100	10300	14200
	$Q_{est}$	14800	18500	22500
Стержень из нержавеющей стали	$f_{res}$ , ГГц	31,50	34,59	37,74
	$Q_{exper}$	1600	2800	4400
	$Q_{est}$	3200	4500	6400

На рис. 3 показаны зависимости добротности рассматриваемых резонаторов от  $R_s$  проводящего стержня при комнатной и азотной температурах. Добротность растет с уменьшением  $R_s$  и выходит на насыщение, которое соответствует потерям в диэлектрике. При этом кривые  $Q(R_s)$  для  $T = 77$  К при всех модах лежат выше, чем при комнатной температуре, так как при азотной температуре потери в сапфире на два порядка ниже. Это подтверждается линейной зависимостью  $Q(R_s)$  для  $T = 77$  К для резонатора без ТПС. Экспериментальные точки на рис. 3 получены для  $T = 300$  К

(табл.), а стрелочками отмечен расчетный уровень добротностей для резонатора с образцами  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  и меди при азотной температуре.

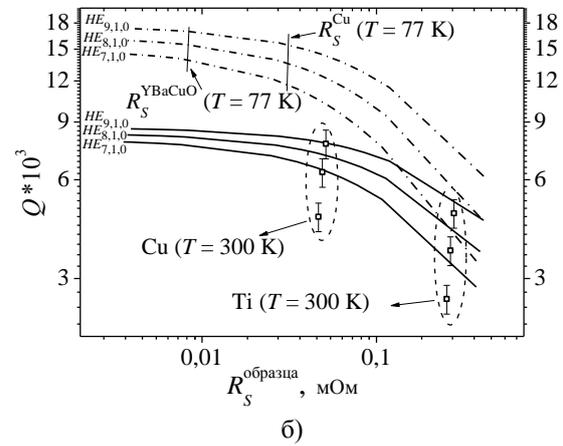
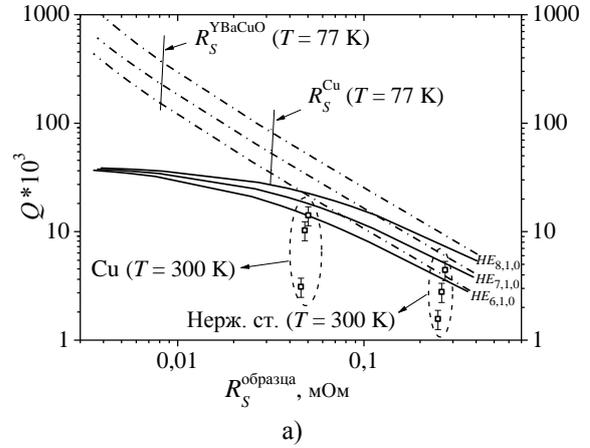


Рис. 3. Добротность кольцевого открытого резонатора (а) и кольцевого резонатора с ТПС (б) в зависимости от поверхностного сопротивления образца. Сплошной линией показаны расчетные зависимости при 300 К, а штрихпунктирной – при 77 К

Разница между экспериментальными и вычисленными значениями добротности (рис. 3) объясняется радиационными потерями, которые не учитываются при проведении расчета. Поэтому на основании экспериментальных данных можно оценить величину радиационных потерь в резонаторе, зная частотные зависимости поверхностного импеданса металлов, которые используются в резонаторной системе. Для этого необходимо измерить значения добротности резонатора  $Q_{S1}$ ,  $Q_{S2}$  с двумя различными известными цилиндрическими проводниками 1 и 2, расположенными в сапфировом кольце, и составить систему двух уравнений

$$\frac{1}{Q_{S1}} = A_s^{S1} R_s^{S1} + A_s^{CEP} R_s^{CEP} + ktg\delta + \frac{1}{Q_{rad}}, \quad (2)$$

$$\frac{1}{Q_{S2}} = A_s^{S2} R_s^{S2} + A_s^{CEP} R_s^{CEP} + ktg\delta + \frac{1}{Q_{rad}}$$

где  $A_S^{S1}$  и  $A_S^{S2}$  – коэффициенты включения образцов с разной проводимостью;  $R_s^{CEP}$ ,  $R_s^{S1}$ ,  $R_s^{S2}$  – поверхностные сопротивления ТПС и исследуемых образцов;  $Q_{S1}$ ,  $Q_{S2}$  – экспериментально полученные добротности резонатора с образцами.

Решая систему линейных уравнений (2), можно определить  $A_S^{SAMPLE}$  и  $Q_{rad}$  как для открытого резонатора, так и с торцевыми пластинами. При этом для кольцевого КДР с ТПС принимаем  $A_S^{CEP}$  таким же, как и в сплошном цилиндрическом резонаторе с торцевыми пластинами [1]

$$A_S^{CEP} = \frac{2}{2\pi f_{res} \mu_0 l R_{HE}}, \quad (3)$$

где  $f_{res}$  – резонансная частота;  $\mu_0$  – магнитная постоянная;  $l$  – продольный размер (высота) резонатора;  $R_{HE}$  – коэффициент, который зависит от  $\epsilon$  резонатора, возбуждаемой моды и геометрических размеров резонатора (для мм диапазона  $R_{HE} \approx 1$ ).

Таким образом, были получены зависимости  $A_S^{SAMPLE}$  от азимутального индекса  $n$  для обоих типов кольцевого резонатора (рис. 4, а).

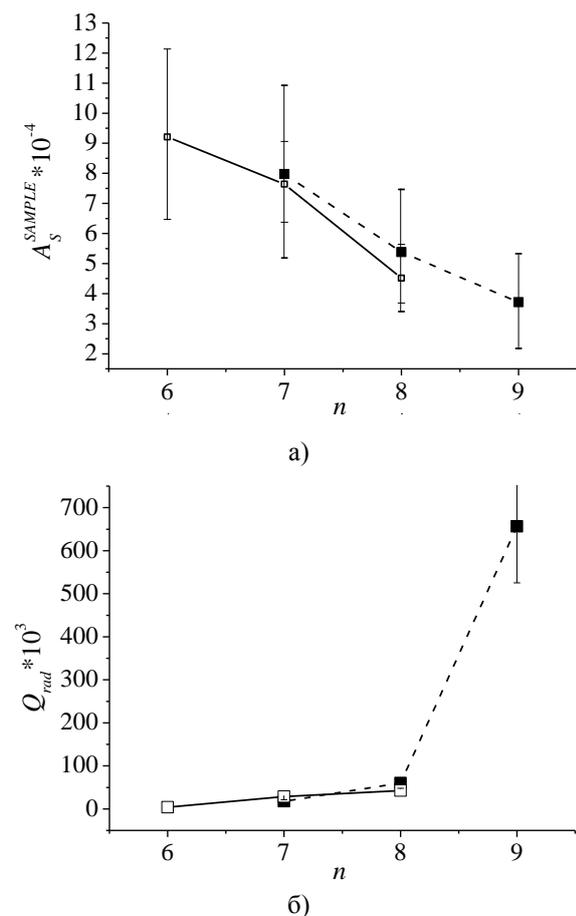


Рис. 4. Параметр  $A_S^{SAMPLE}$  (а) и радиационная добротность ( $Q_{rad}$ ) (б) в зависимости от азимутального индекса  $n$  возбуждаемого колебания для кольцевого резонатора с ТПС (пунктирная линия) и резонатора без ТПС (сплошная линия)

Учитывая зависимость  $A_S^{SAMPLE}(n)$ , можно оценить радиационную добротность резонатора для возбуждаемых колебаний. При увеличении индекса  $n$  добротность  $Q_{rad}$  возрастает, т. е. наблюдается значительное снижение потерь на излучение. Следовательно, для более точного измерения  $R_s$  необходимо использовать моды со значительно большим  $n$ : для данного резонатора необходимо переходить на более высокие рабочие частоты (либо при заданной частоте переходить на резонатор с большим диаметром).

Как видно из рис. 4, радиационные потери в обеих конфигурациях кольцевого резонатора равны в пределах погрешности измерений и допущения, что коэффициенты  $A_S$  одинаковы в дисковом и кольцевом КДР. Значительная погрешность в определении  $Q_{rad}$  при  $n \geq 9$  объясняется резким уменьшением радиационных потерь на фоне потерь в диэлектрике и проводниках, практически независимых от  $n$ .

Таким образом, для измерения  $R_s$  сверхпроводников более выгодно использовать открытый резонатор из-за отсутствия ТПС, что приводит к увеличению добротности, и следовательно, к большей чувствительности (рис. 3). Можно также минимизировать потери в ТПС, используя для их изготовления известный сверхпроводник.

**Выводы.** Таким образом, показана возможность измерения поверхностного импеданса проводников и сверхпроводников с помощью кольцевого КДР. Экспериментальные исследования и численный анализ проведены для сапфирового резонатора в диапазоне частот 30–40 ГГц. При этом найдено, что необходимо выбирать резонатор с соотношением диаметров  $d_{in}/d_{out} = 0,6$ , где возбуждаются колебания шепчущей галереи HE-типа с высокими азимутальными индексами  $n$ . Определено, что радиационные потери в пределах погрешности равны у обоих резонаторов, по крайней мере, для  $n \leq 9$ .

Предложенный подход позволит измерять  $R_s$  объемных образцов сверхпроводников и других проводников умеренных размеров с достаточной высокой точностью, однако в случае применения резонатора с торцевыми стенками необходимы ТПС из сверхпроводника с уже известными свойствами.

1. Cherpak N., Barannik A., Filipov Yu. et al. Accurate microwave technique of surface resistance measurement of large-area HTS films using sapphire quasi-optical resonator // IEEE Trans. on Appl. Supercond. – 2003. – 13, no. 2. – P. 3570-3573.
2. Cherpak N. T., Barannik A. A., Prokopenko Yu. V. et al. Microwave properties of HTS films: measurements in the millimeter wave range // Low Temperature Physics. – 2006. – 32, no. 6. – P. 608–613.
3. Egorov V. N., Masalov V. L. et al. Dielectric Constant, Loss Tangent, and Surface Resistance of PCB Materials at K-Band Frequencies // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. – 2005. – 53, no. 2. – P. 627–635.

4. Шевчук А. Ф., Трунин М. Р. Метод измерения поверхностного импеданса сверхпроводников в температурном интервале 0,4-120 К // Радиотехника и электрон. – 2006. – № 5. – С. 82–89
5. Barannik A. A., Cherpak N. T., Prokopenko Yu. V. et al. Two-layered disc quasi-optical dielectric resonators: Electrodynamics and application perspectives for complex permittivity measurements of lossy liquids // Measurement Science and Technology. – 2007. – 18, no. 19. – P. 2231–2238.
6. Cherpak N. T., Barannik A. A., Bulyaev S. A. et al. Measurements of Millimeter-Wave Surface Resistance and Temperature Dependence of Reactance of Thin HTS Films Using Quasi-Optical Dielectric Resonator // IEEE Trans. Applied Supercond. – 2005. – 15, no. 2. – P. 2919–2922.

#### QUASI-OPTICAL RING SAPPHIRE RESONATOR WITH CYLINDRICAL CONDUCTOR INSIDE

A. A. Barannik, K. I. Torokhtyi, N. T. Cherpak

In this paper a new approach to surface resistance  $R_s$  measurements of the volumetric conducting samples is investigated. The technique of determination  $R_s$  by means of the open quasi-optical ring dielectric resonator, in which “whispering gallery” modes are excited, is presented. The basic properties of the

resonator are investigated experimentally and numerically in the frequency interval of 30–40 GHz. The possibility of high temperature superconductor  $R_s$  measurement by means of the ring dielectric resonator is displayed.

**Key words:** surface resistance,  $Q$ -factor.

#### КВАЗІОПТИЧНИЙ КІЛЬЦЕВИЙ САПФІРОВИЙ РЕЗОНАТОР З ВНУТРІШНІМ ЦИЛІНДРИЧНИМ ПРОВІДНИКОМ

О. А. Баранник, К. І. Торохтій, М. Т. Черпак

Досліджено новий підхід до вимірювання поверхневого опору  $R_s$  масивних провідних зразків. Описана методика визначення  $R_s$  за допомогою відкритого кільцевого квазіоптичного діелектричного резонатора, збуджуваного на модах типу шепочучої галереї. Шляхом розрахунку та експериментально досліджено основні характеристики резонатора в інтервалі частот 30–40 ГГц. Показано можливість вимірювання  $R_s$  високотемпературних надпровідників (ВТНП) за допомогою кільцевого діелектричного резонатора.

**Ключові слова:** поверхневий опір, добротність.

*Рукопись поступила 12 декабря 2008 г.*