

# ИССЛЕДОВАНИЕ ДОБРОТНОСТИ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ ОБЪЕМНЫХ РЕЗОНАТОРОВ НА ОСНОВНОМ И БЛИЖАЙШИХ К НЕМУ ТИПАХ КОЛЕБАНИЙ

*А. И. Зыков, Б. Р. Князев, А. И. Терещенко*

Харьков

Явление сверхпроводимости позволяет на несколько порядков повысить добротность объемных резонаторов. Именно благодаря этому они находят сейчас широкое применение [1]. Для работы с подобными резонаторами представляет интерес исследование добротности на основном и ближайших к нему типах колебаний. Целью данной работы является проведение расчетов и экспериментальное определение соотношений добротностей для некоторых часто используемых типов колебаний.

Добротность цилиндрического резонатора для заданного типа колебаний при обычных условиях определяется как [2]

$$Q = \frac{C\lambda}{\delta_s}, \quad (1)$$

где  $G$  — постоянная, зависящая от типа колебаний и геометрии резонатора;

$\lambda$  — длина волны;

$\delta_s$  — глубина скин-слоя.

Частотная зависимость добротности в этом случае имеет вид

$$Q \sim \frac{1}{\sqrt{f}}.$$

Соответствующее значение добротности для сверхпроводящего состояния [3, 4]

$$Q = \frac{G}{C\omega^2 e \frac{\Delta(T)}{2kT} \uparrow R_{\text{ост}}}, \quad (2)$$

где  $C$  — коэффициент, зависящий от поверхностного сопротивления материала применяемого сверхпроводника;

$\omega$  — круговая частота;

$\Delta T$  — ширина энергетической щели сверхпроводника;

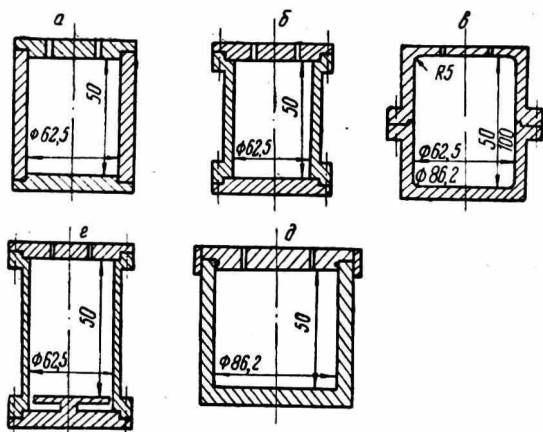
$T$  — приведенная температура;

$k$  — постоянная Больцмана;

$R_{\text{ост}}$  — учитывает остаточные потери в сверхпроводнике.

При этом зависимость добротности от частоты определяется зависимостью поверхностного сопротивления от частоты [4, 5]

как  $Q \sim \frac{1}{f^2}$ . Данная зависимость, полученная из теоретических соображений, достаточно хорошо согласуется с практическими результатами. Так, измерения, проведенные в работе [6], показали, что для резонаторов со свинцовым сверхпроводящим покрытием  $Q \sim \frac{1}{f^{1.73}}$ . Этим обосновывается возможность использования для расчетов формулы (2).



Величина добротности резонатора для любого типа колебаний зависит от поверхностного сопротивления сверхпроводника и конструктивного выполнения резонатора (влияние контактов и близлежащих типов колебаний). Чтобы исключить погрешность, связанную с различием величин поверхностного сопротивления разных образцов получающимся при нанесении сверхпроводящего покрытия и хранении образцов, измерения добротности для различных типов колебаний удобно проводить на одном резонаторе.

Для выяснения влияния конструктивного выполнения были измерены добротности для  $H_{011}$ - $E_{010}$  и  $H_{111}$ -типов колебаний на резонаторах, эскизы которых представлены на рис. 1. Здесь а и б — наиболее часто используемые конструкции сверхпроводящих резонаторов. Они удобны для полировки и покрытия сверхпроводящим слоем, однако неплотный контакт из-за эллиптичности корпуса (а) и конусности крышек (б) приводит к снижению добротности при колебаниях  $H_{111}$  и  $E_{010}$ ; в — резонатор, менее удобный для полировки и нанесения сверхпроводящего покрытия, но он не имеет контактирующих поверхностей для СВЧ тока на  $H_{111}$ -типе колебаний, а при колебаниях  $H_{011}$  сопутствующий им тип колебаний благодаря узкой резонансной полосе резонатора в сверхпроводящем состоянии достаточно удален по

частоте и не влияет на добротность основного типа колебаний; г — резонатор с фигурной нижней крышкой для большего разнесения частот  $H_{011}$  и  $E_{111}$ -типов колебаний; он использовался при измерениях добротности на колебаниях типа  $H_{011}$  при комнатной температуре и в сверхпроводящем состоянии для контроля величины добротности резонаторов других конструкций; д — сборная конструкция резонатора для колебаний типа  $E_{010}$ . Здесь надежный контакт крышки и корпуса достигался за счет температурной посадки и наличия в крышке канавки, заполняющейся свинцом при сжатии.

Сверхпроводящее покрытие из свинца наносилось методом катодного распыления (рис. 1, б, в, г), либо электролитически (рис. 1, а), а резонатор, показанный на рис. 1, д, выточен из монолитного свинцового слоя, направленного на латунную поверхность.

В табл. 1 приводятся расчетные и измеренные значения собственной добротности, а также отношения измеренных значений для колебаний типа  $H_{011}$  и  $H_{111}$ . Поскольку были использованы резонаторы с различным покрытием, наносимым в разное время и различными способами, для сравнения добротностей удобно было использовать отношения добротностей.

Таблица 1

Тип колебаний	$f_0$ Мггц	$Q_0$ расчет	$Q_0$ измерения	$\frac{Q_{H_{011} \text{ изм}}}{Q_{H_{111} \text{ изм}}}$	Конструкция резонатора
$H_{011}$ $H_{111}$	6580 4100	$4,56 \cdot 10^7$ $4,97 \cdot 10^7$	$1,8 \cdot 10^7$ $8,8 \cdot 10^6$	2,1	рис. 1, а, в
$H_{011}$ $H_{111}$	6810 4100	$4,0 \cdot 10^7$ $4,97 \cdot 10^7$	$1,86 \cdot 10^7$ $1,3 \cdot 10^7$	1,43	рис. 1, б, в
$H_{011}$ $H_{111}$	6580 4100	$4,56 \cdot 10^7$ $4,97 \cdot 10^7$	$1,8 \cdot 10^7$ $1,8 \cdot 10^7$	~1	рис. 1, в, в

Для колебаний  $E_{010}$  в связи с сильным влиянием контакта, разрывающего линии СВЧ тока, измеренные значения добротности значительно отличались от рассчитанных (для резонатора рис. 1, д — примерно в два раза, для резонатора рис. 1, б — почти в семь раз, а для рис. 1, а — более чем на порядок). Трудность выполнения достаточно хорошего контакта для сверхпроводящих поверхностей вызывается не только необходимостью получения плотного и надежного соприкосновения двух поверхностей, но и усугубляется тем, что для сверхпроводящего свинца при сильном сжатии ( $\frac{\Delta V}{V} = 22\%$   $T_k = 0$ ) уменьшается температура перехода  $T_k$  в сверхпроводящее состояние [7], что приводит к уменьшению добротности, согласно (2).

Измерения добротности проводились на резонаторах описанных конструкций при  $4,2^{\circ}\text{K}$  с помощью генератора на ЛБВ [8], а также динамическим методом [9] с использованием схемы сочетания быстрой и медленной перестройки частоты.

Таблица 2

Размеры резонатора, см	$\frac{Q_{H_{011}}}{Q_{X_{\text{мпр}}}}$	Расчет		Измерения	
		$293^{\circ}$	$4,2^{\circ}$	$293^{\circ}$	$4,2^{\circ}$
$d = 6,25$ $h = 5,0$	$\frac{Q_{H_{011}}}{Q_{H_{111}}}$	1,72	0,91	1,92	0,96
$\frac{d}{h} = 1,25$	$\frac{Q_{H_{011}}}{Q_{E_{010}}}$	2,17	1,05	2,6	6
$d = 8,6$ $h = 10$	$\frac{Q_{H_{011}}}{Q_{H_{111}}}$	1,84	0,925	1,86	1,1
$\frac{d}{h} = 0,86$	$\frac{Q_{H_{011}}}{Q_{E_{010}}}$	1,825	0,98	1,87	17
	$\frac{Q_{H_{011}}}{Q_{H_{111}}}$	1,93	1,5	1,8	1,48

В табл. 2 даны расчетные и измеренные соотношения добротностей некоторых типов колебаний при комнатной температуре и в сверхпроводящем состоянии для резонаторов с отношением диаметра к длине  $\frac{d}{n} = 1,25$  и  $0,86$ . Расчетные значения  $Q_0$  при обычных условиях найдены для меди по выражению (1), в котором  $G$  вычислено при помощи соотношений, приведенных в работе [2]. В сверхпроводящем состоянии значения  $Q_0$  для  $4,2^{\circ}\text{K}$  рассчитаны для свинцовых покрытий по формуле (2). Коэффициент  $S$  определяется по результатам работы [10].

Для этих измерений использован резонатор конструкции рис. 1, в, а для контроля добротности на  $H_{011}$ -типе колебаний — рис. 1, г. Сверхпроводящее свинцовое покрытие наносилось методом катодного распыления с предварительной откачкой до  $(2-3) \cdot 10^{-6}$  тор при рабочем давлении аргона  $(3-4) \cdot 10^{-2}$  тор.

Как видно из табл. 2, добротность при колебаниях типа  $H_{111}$  и  $E_{010}$  в сверхпроводящем состоянии близка к добротности колебаний  $H_{011}$ , тогда как для комнатных температур добротность при колебаниях  $H_{011}$  существенно выше. При колебаниях  $H_{111}$  расчетные и измеренные значения соотношения добротностей хорошо согласуются, а для  $E_{010}$  большое влияние оказывает контакт деталей в месте прохождения СВЧ тока.

Отсутствие контакта позволяет получить очень высокие значения добротности и для колебаний типа  $E_{010}$  [11].

На основании изложенного можно сделать следующие выводы.

При переходе покрытия объемного резонатора в сверхпроводящее состояние происходит изменение соотношения добротностей различных типов колебаний, обусловленное изменением частотной зависимости поверхностного сопротивления.

Величина добротности и их соотношения для различных типов колебаний зависят от конструктивно-технологического выполнения резонаторов. Эти обстоятельства необходимо учитывать при разработке различных охлаждаемых СВЧ-устройств.

### ЛИТЕРАТУРА

1. И. А. Баранов, З. Ф. Каплун. «Электронная техника», серия 1. «Электроника СВЧ», вып. 4, 14, 1971.
2. А. Ф. Харвей. Техника сверхвысоких частот, т. 1. Изд-во «Советское радио», 1965.
3. P. V. Wilson. Nuclear instruments and methods; vol. 20, 336, 1963.
4. H. Hahn, H. J. Halama. Theoretical properties of microwave cavities at low temperatures, Brookhaven National laboratory, AADD-129, Jan. 6, 1967.
5. А. А. Абрикосов, Л. П. Горьков, И. М. Халатников. ЖЭТФ, 8, 182, 1959.
6. L. Srecci. Measurement of the dependence on frequency of the Residual resistance of superconducting laves of lead. Материалы 7-й международной конференции по ускорителям. Ереван, 1969.
7. J. S. Rajput. Solid-State Communs, vol. 8, № 9, 711, 1970.
8. А. И. Зыков, Б. Р. Князев, М. И. Хейфец, А. Д. Кузнецов, Имение добротности сверхпроводящих резонаторов с помощью ЛБВ. ХФТИ-70-30, Изд-во ФТИ АН УССР, Харьков, 1970.
9. К. П. Иваницкий, А. Н. Лукьянов, И. Иткин. «Электронная техника», серия 1. «Электроника СВЧ», вып. 6, 72, 1966.
10. H. A. Schwettman, P. V. Wilson, J. M. Pierce, W. M. Faibank. Internat. Advances Cryogen. Engin., vol. 10, sec. M-U, New-York Plenum Press, Discuss, 97, 1965.
11. J. P. Turneure, Weissman, J. Appl. Phys., vol. 39, № 9, 4417, 1968.