

М. С. ХАЙКИН

ИЗМЕРЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ  
СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО ОЛОВА НА ЧАСТОТЕ 9380 МЕГАГЕРЦ

(Представлено академиком М. А. Леоновичем 18 X 1950)

В настоящей статье описываются два метода измерения добротности резонаторов, разработанные с целью исследования свойств сверхпроводников, а также приведена зависимость  $R/R_0$  от  $T$  для перехода олова из нормального состояния в сверхпроводящее на частоте 9380 Мгц.

1. Для измерения сопротивления на частоте 9380 Мгц определялись резонансные свойства полого резонатора, изготовленного из химически чистого олова. Резонатор представлял собой круглый цилиндр диаметром и высотой 42 мм, изготовленный из отливки путем обработки на токарном станке. Полый цилиндр скреплялся с плоскими дисками оснований с помощью внешнего пружинного обжима. Качество электрического контакта в местах стыка дисков с цилиндром несущественно, так как примененный резонанс типа  $H_{011}$  не имеет токов, пересекающих линии стыка: токи текут на боковой поверхности цилиндра по окружностям, параллельным плоскостям оснований, а на основаниях — по концентрическим окружностям. Для устранения возможности возбуждения резонанса  $E_{111}$ , сопутствующего резонансу  $H_{011}$ , в резонатор сквозь центральные сверления оснований ввинтены на глубину 5 мм круглые (оловянные) штифты диаметром 5 мм, сильно сдвигающие резонанс  $E_{111}$  в сторону больших частот, почти не оказывая при этом влияния на резонанс  $H_{011}$ .

Возбуждение резонатора и связь с детектором осуществлялась раздельно через два отверстия диаметром 5 мм, просверленные в одном из оснований симметрично по отношению к центру на половине радиуса. Этими отверстиями оканчивались два отрезка круглого волновода диаметра меньше критического (5 мм), которые служили предельными аттенюаторами, включенными между резонатором и коаксиальными линиями возбуждения и детектора. Длина этих аттенюаторов могла меняться во время опыта, что обеспечивало возможность плавного изменения связи с резонатором.

2. Одним из возможных путей измерения добротности резонатора является определение ширины резонансной кривой. Для этой цели нами применялся метод качания частоты; блок-схема установки приведена на рис. 1. Генератор, дающий пилообразное напряжение частоты 50 гц, питает развертку осциллографа и синхронно с ней изменяет частоту кластрона. Когда частота кластрона проходит полосу пропускания резонатора, сигнал детектора, усиленный широкополосным линейным усилителем, подается на другую пару пластин осциллографа. Таким образом, луч осциллографа очерчивает на экране резонансную кривую (рис. 2, А).

Измерение ширины резонансной кривой требует нанесения на развертку осциллографа абсолютного масштаба частоты. Для этого на отражатель кластрона одновременно с пилообразным напряжением подается напряжение высокой частоты (10—1000 кгц) от стандарт-сигнал-генератора, приводящее (благодаря частотной модуляции кластрона) к проявлению в спектре излучения кластрона ряда спутников, отстоящих друг от друга на частоту модулирующего сигнала. В результате на экране осциллографа вместо одного резонансного пика появляются несколько дополнительных пиков (рис. 2, Б).

Расстояние между этими пиками и служит абсолютным масштабом частоты, с которым сравнивается ширина резонансной кривой.

Необходимая для расчета добротности собственная частота резонатора определяется его геометрическими размерами.

Измеренная при температуре 4,2° К добротность оловянного резонатора оказалась равной 80000 ( $\Delta f = 120$  кгц), что соответствует поверхностному сопротивлению  $R_s = 0,01$  ом. Максимальная величина добротности, измеренная этим методом, составляет 1 500 000 ( $\Delta f = 6,1$  кгц,  $T = 3,10$ ° К). Точность измерений в интервале добротностей 80 000—1 500 000 составляет 10—20%; для больших значений добротностей точность резко падает.

Рис. 1. Блок-схема установки для измерения ширины полосы резонатора

резонатора оказалась равной 80000 ( $\Delta f = 120$  кгц), что соответствует поверхностному сопротивлению  $R_s = 0,01$  ом. Максимальная величина добротности, измеренная этим методом, составляет 1 500 000 ( $\Delta f = 6,1$  кгц,  $T = 3,10$ ° К). Точность измерений в интервале добротностей 80 000—1 500 000 составляет 10—20%; для больших значений добротностей точность резко падает.

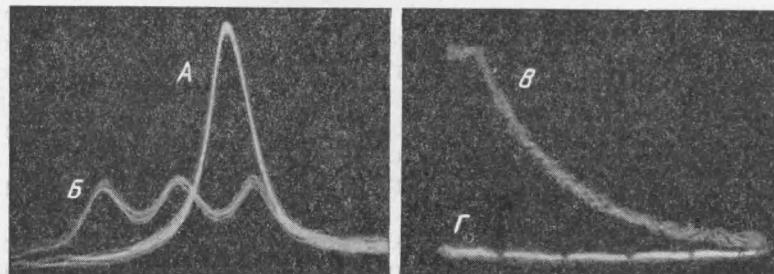


Рис. 2. Осциллограммы ширины полосы и времени звучания резонатора: А — пик резонанса! Б — масштаб частоты 250 кгц; В — кривая затухания; Г — марки времени 10  $\mu$  сек.

3. Для повышения точности измерения больших значений добротности был применен метод измерения длительности затухания собственных колебаний резонатора. В этом методе генерация кластрона, возбуждающего резонатор, срывалась, когда уровень возбуждения резонатора достигал некоторой, достаточной для наблюдения, величины. После прекращения возбуждения свободные колебания резонатора затухали и измерялась скорость их затухания.

Очевидно, что измеряемое время затухания резонатора определяется суммой внутренних потерь и потерь на излучение через отверстие связи. Потери на излучение могут быть уменьшены во много раз по сравнению с внутренними потерями путем уменьшения связи с резонатором, если

это допускает чувствительность схемы. В таком случае измерение добротности нагруженного резонатора дает результат, пренебрежимо мало отличающийся от собственной (ненагруженной) добротности резонатора. Эта возможность и была использована нами при измерениях как длительности затухания, так и ширина полосы методом качания частоты, к которому в равной мере относятся эти сопротивления. Влияние величины связи на измеряемую добротность было установлено отдельными экспериментами.

Блок-схема установки для измерения длительности затухания резонатора приведена на рис. 3. Возбуждение и последующее затухание резонатора повторяются с частотой генератора пилообразного напряжения. Рост напряжения на отражателе клистрона, обеспечиваемый плавным ходом пилообразного напряжения, постепенно меняя частоту клистрона, подводит ее к собственной частоте резонатора. Резонатор возбуждается, и вместе с ростом амплитуды его колебаний растет и детектированный и усиленный сигнал,

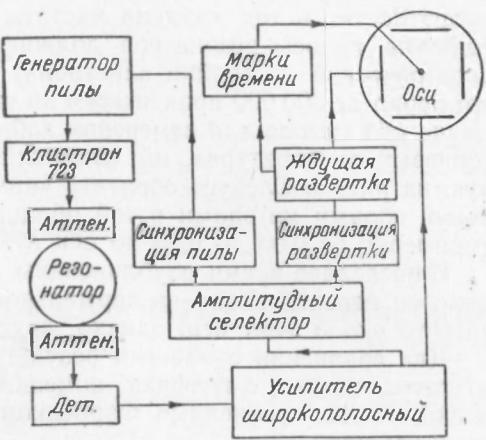


Рис. 3. Блок-схема установки для измерения времени звучания резонатора

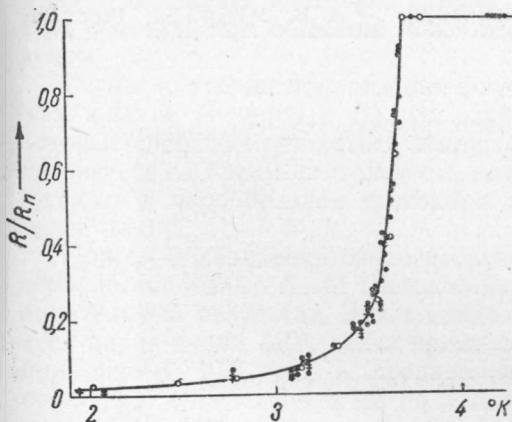


Рис. 4. Кривая перехода оловянного резонатора из нормального в сверхпроводящее состояние. Точками обозначены измерения методом качания частоты, крестиками — измерения методом звучания, кружками — результаты Фэрбенка (1)

подаваемый на пластины вертикального отклонения луча осциллографа и амплитудный селектор. Последний при достижении сигналом достаточной величины дает два узких импульса с интервалом в 3  $\mu$ сек. Первый импульс спускает ждущую развертку осциллографа, на экране которого, начиная с этого момента, видна зависимость уровня возбуждения резонатора от времени. Второй импульс возвращает напряжение генератора пильы к исходному значению, выводя при этом частоту клистрона из полосы резонатора в течение малой доли микросекунды. После этого резонатор колеблется свободно, и экспоненциальное затухание уровня его колебаний видно на экране осциллографа (рис. 2, Г).

Максимальная добротность нашего резонатора, измеренная при  $1,95^{\circ}$  К методом звучания, составила 5 100 000 (время  $\tau$  затухания вдвое равно 60  $\mu$ сек.). Точность измерений добротностей такого порядка вели-

лографа (рис. 2, В). Резонатор перестает «звукать» гораздо раньше, чем наступает новое возбуждение. В качестве абсолютного масштаба времени для измерения длительности звучания резонатора служат марки времени (1, 10 или 100  $\mu$ сек.), наносимые на развертку путем тушения луча осциллографа (рис. 2, Г).

Максимальная добротность нашего резонатора, измеренная при

чины около 15%. Наименьшая добротность, измеренная методом звучания (с несколько меньшей точностью), равна 300 000 ( $T = 3,49^\circ$  K;  $\tau = 3,5$  мсек.).

4. Описанные выше два метода измерения добротности резонатора, дополняя друг друга, позволяют измерять практически любые величины добротности: метод качания частоты — примерно от нескольких тысяч (ширина полосы резонатора должна быть значительно уже интервала электрической настройки кристалла) до 1 500 000, и метод звучания — примерно от 300 000 практически до сколь угодно больших величин. Применив оба метода для измерения добротности оловянного резонатора при гелиевых температурах, мы измерили зависимость  $R/R_n$  от  $T$ , приведенную на рис. 4. Следует обратить внимание на хорошее совпадение измерений обоими методами в той области кривой, где они равно пригодны (примерно от 0,05 до 0,25 по оси  $R/R_n$ ).

В последнее время опубликованы две работы <sup>(1, 2)</sup>, в которых также измерен переход олова из нормального в сверхпроводящее состояние на частоте около 9400 мгц, однако, другими методами.

Для сравнения с нашими результатами на рис. 4 нанесены несколько точек, снятых с графика, помещенного в статье Фэрбенка <sup>(1)</sup>. Как видно, точки, полученные Фэрбенком, хорошо ложатся на полученную нами кривую.

Автор выражает глубокую благодарность А. И. Шальникову за постоянное руководство работой.

Институт физических проблем  
Академии наук СССР

Поступило  
18 X 1950

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

<sup>1</sup> W. M. Fairbank, Phys. Rev., **76**, 1106 (1949). <sup>2</sup> A. B. Pippard, Proc. Roy. Soc., A **203**, № 1072, 98 (1950).