

В. М. ДМИТРИЕВ, д-р физ.-мат. наук, *М. Н. ОФИЦЕРОВ*,
Н. Н. ПРЕНЦЛАУ, канд. техн. наук

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ РЕЗОНАТОРНЫМ МЕТОДОМ

Резонаторный метод определения поверхностного сопротивления R_s материалов обеспечивает наименьшую погрешность измерения. При его реализации образец измеряемого материала размещают в магнитном поле резонансной системы, выполненной из материала с известным во всех режимах измерения поверхностным сопротивлением R_p . По изменению добротности резонансной системы, обусловленному потерями в измеряемом материале, рассчитывают R_s методами электродинамики [1]. Эти расчеты громоздки даже при использовании простых типов резонаторов и форм образца, а с усложнением геометрии их поверхности трудность определения R_s возрастает. Однако использование резонаторов со сложной геометрией оправдано повышением точности измерения R_s , так как некоторые из них (например, запердельные, открытые, спиральные и т. п.) имеют высокую добротность. В связи с этим часто поверхностное сопротивление определяют не методами электродинамики, а по R_s эталонного образца [2]. Для этой цели из материала с известным поверхностным сопротивлением R_s изготавливают эталонный образец, размеры и форма которого идентичны образцу из измеряемого материала (далее — измеряемый образец). R_s рассчитывают по R_p , R_s и геометрическому фактору G , а также по измеренным значениям добротности резонансной системы без образцов Q_0 , с эталонным Q_s и измеряемым Q_p образцами. Здесь основная трудность определения поверхностного сопротивления состоит в сложности расчета геометрического фактора G . В принципе, его можно определить с достаточной степенью точности по Q_0 и R_p , если собственная добротность резонансной системы незначительно превосходит нагруженную Q_n . Однако при этом необходимо знать поверхностное сопротивление материала резонансной системы во всех режимах измерения, что также вызывает

трудности, связанные, например, со следующими обстоятельствами.

Сложно оперировать с резонансными системами, элементы которых изготовлены из разных материалов.

При измерении R_s в температурном интервале, например, криогенных температур необходимо знать зависимость $R_p = F(T)$, которая определяется многими факторами, и, в частности, термообработкой [3]. Осуществить же последнюю не всегда возможно, например, при отжиге проводников в изоляции, при наличии диэлектрических конструктивных элементов, которые разрушаются при высокой температуре термообработки.

Условие $Q_o \approx Q_n$ ограничивает возможность прецизионных температурных измерений R_s , так как в данном случае затруднительно измерение температуры образцов или ее стабилизация. Это связано с тем, что датчик температуры и проводники, соединяющие его с аппаратурой, вносят потери, так как, по сути, являются посторонними телами в полости резонансной системы.

Определить же R_s во всех режимах исследования не составляет труда, поскольку эталонный образец может быть выполнен из материала с заранее известными зависимостями поверхностного сопротивления, его форма и форма измеряемого образца могут быть выбраны удобным для обработки и исследования, при этом эталонный образец может подвергаться различным видам обработки.

В настоящей работе показано, что R_s можно определить по R_s , измеряя Q_n , Q_s и Q_n . При этом определение Q_o , G и R_p не обязательно.

Основные соотношения. Собственная добротность резонансной системы Q_o , вносимая $Q_{вн}$, нагруженная Q_n , геометрический фактор G , поверхностное сопротивление материала резонансной системы R_p и вносимое $R_{вн}$ связаны зависимостями:

$$\frac{1}{Q_o} + \frac{1}{Q_{вн}} = \frac{1}{Q_n} = \frac{R_p}{G} + \frac{1}{Q_{вн}} = \frac{R_p + R_{вн}}{G} = \frac{R_s}{G}. \quad (1)$$

Здесь под $R_{вн}$ подразумевается сопротивление, обусловленное потерями в диэлектрике и других конструктивных элементах, исключая элементы связи. Коэффициент связи при измерениях должен быть пренебрежимо мал.

При внесении в магнитное поле резонансной системы образцов в общем случае измеряемая добротность Q_n может быть представлена как

$$Q_n^{-1} + Q_{н.о}^{-1} = Q_n^{-1}. \quad (2)$$

Здесь $Q_{н.о}$ — вносимая добротность, обусловленная потерями в материале образцов.

Если в резонансной системе размещен эталонный образец, то:

$$Q_n^{-1} + Q_{н.э}^{-1} = Q_s^{-1}, \quad (3)$$

где $Q_{н.э}$ — добротность, обусловленная потерями в эталонном образце. $Q_{н.э}$ можно представить как $Q_{н.э} = G_s R_s^{-1}$ (4), где G_s — геометрический фактор эталонного образца с сопротивлением R_s ,

обеспечивающий добротность $Q_{\text{вн. э}}$. Он зависит от размеров и формы образца, от места расположения образца в резонаторе, от конструкции резонансной системы и ее размеров.

С учетом (4) из (3) имеем

$$G_s = \frac{R_s Q_s Q_n}{Q_n - Q_s} \quad (5)$$

Если размеры, форма измеряемого образца и место его расположения в резонансной системе соответствует эталонному, тогда их геометрические факторы одинаковы. В этом случае для определения R_s можно использовать (2) с учетом того, что $Q_{\text{вн. о}} = G_s \cdot R_s^{-1}$ (6). Из (2), (5) и (6) имеем

$$R_s = R_s \frac{Q_n - Q_n}{Q_n - Q_s} \cdot \frac{Q_s}{Q_n} \quad (7)$$

Равенство (7) позволяет определить R_s через известное сопротивление эталонного образца R_s и измеренные значения добротностей Q_s , Q_n и Q_n . Так как уравнение (7) не учитывает ни конфигурацию полей в резонансной системе, ни ее геометрический фактор, оно справедливо для любого ее типа — колебательных контуров или объемных резонаторов.

Рассмотрим случай малых вносимых потерь в резонансную систему ($Q_{\text{вн}} \rightarrow \infty$), тогда

$$R_s = R_s \frac{Q_0 - Q_n}{Q_0 - Q_s} \cdot \frac{Q_s}{Q_n} \quad (8)$$

Если резонансная система изготовлена из материала с известным R_p , то по измеренной $Q_n \approx Q_0$ легко вычисляется G . Тогда

$$R_s = \frac{1}{K} \left(\frac{G}{Q_n} - R_p \right), \quad (9)$$

что соответствует выражению для определения R_s из работы [2] при коэффициенте включения эталонного образца

$$K = \frac{R_p}{R_s} \left(\frac{Q_0}{Q_s} - 1 \right). \quad (10)$$

Естественно, что при измерении температурной зависимости $R_s(T)$ в уравнения (7) или (8) необходимо подставлять значения всех величин, соответствующие измеряемой температуре. В связи с этим представляет интерес случай, когда и резонансная система, и эталонный образец выполнены из одного материала с известной температурной зависимостью, т. е. $R_s(T) = R_p(T)$ (11). Представим (8) в виде

$$R_s(T) = R_s(T) \left(\frac{Q_0(T)}{Q_s(T)} - 1 \right)^{-1} \cdot \left(\frac{Q_0(T)}{Q_n(T)} - 1 \right), \quad (12)$$

из которого следует, что первое выражение в скобках определяется Q_n и Q_s , а второе — Q_0 и Q_n , т. е. потерями в измеряемом материале.

Тогда с учетом (1), (4) и (11) имеем

$$\frac{Q_0(T)}{Q_3(T)} - 1 \neq F(T) = \text{const.} \quad (13)$$

Это значит, что при измерении $R_s(T)$ в широком температурном интервале нет необходимости определять температурную зависимость $Q_3(T)$. Здесь достаточно измерить ее при температуре с известным значением Q_n . Так как для расчета R_s используются косвенные совокупные измерения добротностей, оценим погрешность его определения, обусловленную погрешностью измерения Q . Для этой цели определим чувствительность измерения:

$$\frac{dR_s}{dQ_n} = \frac{R_s Q_3}{Q_n} \cdot \frac{Q_n - Q_3}{(Q_n - Q_3)^2}. \quad (14)$$

$$\frac{dR_s}{dQ_3} = \frac{R_s (Q_n - Q_n)}{Q_n} \cdot \frac{Q_n}{(Q_n - Q_3)^2}. \quad (15)$$

$$\frac{dR_s}{dQ_n} = - \frac{R_s Q_3 Q_n}{(Q_n - Q_3) Q_n^2}. \quad (16)$$

Здесь необходимо учитывать, что чувствительность должна быть минимальной по Q_n и Q_3 и максимальной по Q_n . Это связано с тем, что погрешность измерения Q_n и Q_3 (или их изменение во времени) должна слабо сказываться на R_s , в то же время должна существовать зависимость $R_s = F(Q_n)$.

Анализ уравнений (14), (15) и (16) показывает, что, как для снижения влияния изменения Q_n и Q_3 на измерения, так и для повышения чувствительности необходимо следующее.

Во-первых, увеличивать Q_n или Q_0 при малых вносимых потерях. Во-вторых, необходимо по сравнению с Q_n или Q_0 снижать Q_n и Q_3 , при этом должно $Q_n \approx Q_3$. Это связано с тем, что при значительном отличии Q_n и Q_n слабее сказывается погрешность измерения добротностей. Для этой цели необходимо выбирать соответствующий материал для эталонного образца, а также конструкцию резонансной системы, обеспечивающую значительную величину Q_0/Q_n .

Экспериментальные результаты. Для подтверждения возможности определения R_s материалов в широком частотном и температурном диапазоне по измеренным добротностям, сравнивались значения κ_s , полученные из выражений, приведенных в настоящей статье и в [2]. В качестве исследуемых материалов использовали латунь и высокотемпературный сверхпроводник — керамику $YBa_2Cu_3O_x$, а в качестве эталонного — медь, отожженную при оптимальном режиме [3]. Образцы были выполнены в виде цилиндров $\varnothing 10,5 \times 5,5$ мм.

Экспериментальные результаты приведены на рис. 1, 2. Кружками обозначены значения R_s , рассчитанные методом, приведенным в работе [2], а знаком \times — в настоящей работе. При расчете использовались одни и те же значения измеренных добротностей.

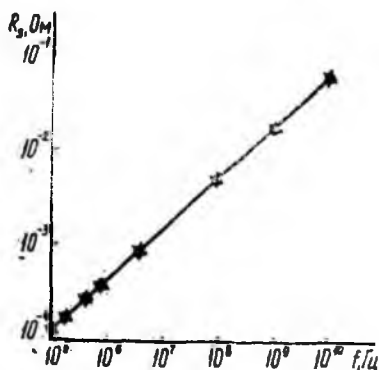


Рис. 1

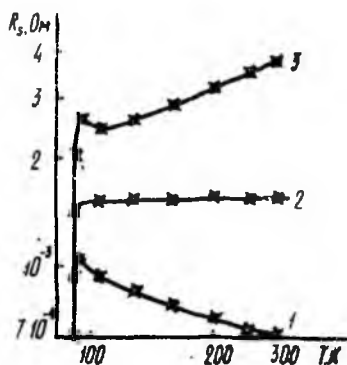


Рис. 2

Зависимость R_s латуни в диапазоне частот $10^5 \dots 10^{10}$ Гц при 300 К показана на рис. 1. При измерениях использовались следующие резонансные системы. На частотах $10^5 \dots 10^8$ Гц — колебательные контуры, в полости катушки индуктивности которых размещались образцы. На частотах $10^8 \dots 4 \cdot 10^9$ Гц использовались полуволновые спиральные резонаторы с разомкнутыми концами спирали. Образцы размещались в полости спирали по ее продольной оси. На частотах выше $4 \cdot 10^9$ Гц образцы размещались в максимуме магнитного поля объемных резонаторов с типом колебаний H_{011} .

На рис. 2 приведена температурная зависимость $R_s = F(T)$ образца керамики $YBa_2Cu_3O_x$ на частотах $4 \cdot 10^5$ Гц (кривая 1), $7,5 \cdot 10^5$ Гц (кривая 2) и $22 \cdot 10^5$ Гц (кривая 3) в температурном диапазоне (300...91) К. При $T = 91$ К керамика переходит в сверхпроводящее состояние.

Температуру образца регулировали и стабилизировали пропуская газобразного азота через полость или экран резонансной системы, а измеряли медь — константановой термопарой. Холодный спай термопары размещали как на экране, так и непосредственно на поверхности образца. При этом проводники термопары, проходящие через катушки индуктивности или полость резонансной системы, хотя и несколько снижали добротность Q_n , но не вносили погрешность при определении R_s приведенными в статью соотношениями.

Несовпадение значений R_s исследуемого материала, полученных расчетным путем по (7) и (8) и по [2], не превышает 5—7%. Это свидетельствует о возможности использования для измерения поверхностного сопротивления резонансных систем различного типа без необходимости расчета их геометрического фактора или потерь в их материале.

Список литературы: 1. Linhart J. G., Templeton J. M., Dunsmuir R. A microwave resonant cavity method for measuring the resistivity of semi-conducting materials // British Journ. of applied physics. 1956. Vol. 7, № 1. P. 36—38. 2. Поверхностное

сопротивление сверхпроводниковой керамики $\text{Ba}(\text{Pb}, \text{Bi})\text{O}_3$ // М. Бельски, О. Г. Вендик, А. П. Гаевский и др. // Журн. техн. физики. 1986. Т. 56. С. 389—391. 3. Влияние термообработки на добротность охлаждаемых резонансных систем / Н. Н. Пренцлау, А. П. Бескорый, И. Ф. Харченко и др. // Радиотехника. 1988. Вып. 84. С. 54—60.

Поступила в редколлегию 29.01.90