
ЭЛЕКТРОННЫЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА

УДК 537.311.3; 621.3.028.2; 621.317.73
DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-4-340-345

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СВЕРХМАЛЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ

В. П. Ходунков

*Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева,
190005, Санкт-Петербург, Россия,
E-mail: walkerearth@mail.ru*

Представлена экспериментальная установка и приведена методика выполнения измерений малых и сверхмалых электрических сопротивлений изделий. В основу методики измерения положен известный метод амперметра-вольтметра. Новизной установки является применение в ней специальных прокладок, изготовленных из высокоориентированного анизотропного пирографита, которые устанавливаются между токоподводами, измерительными электродами и исследуемым образцом. В результате снижено контактное электрическое сопротивление на границе раздела „измерительный электрод—исследуемый образец“ и сведена к ничтожно малому значению паразитная термоЭДС. Повышена точность измерений с одновременным расширением динамического диапазона установки в область малых сопротивлений до 10 мОм. Представлены результаты измерений удельного электрического сопротивления пирографитовых колец, используемых в качестве нагревательных элементов высокотемпературной модели абсолютно черного тела типа ВВ3500УУ. Приведена оценка погрешности измерений.

Ключевые слова: *электрическое сопротивление, пирографит, термометрия*

Одной из составляющих задачи достижения высокой точности в эталонной радиационной термометрии является создание равномерного теплового поля в рабочей зоне размещения ампул высокотемпературных реперных точек, применяемых для воспроизведения термодинамической температуры [1]. Этим обусловлена тенденция создания новых моделей абсолютно черных тел (АЧТ) с улучшенными метрологическими характеристиками.

Наибольшие успехи в этой области достигнуты ВНИИОФИ, где разработаны конструкции высокотемпературных излучателей типа ВВ14, ВВ2500, ВВ3200, ВВ3500 и др. [2]. Указанные излучатели хорошо зарекомендовали себя и поэтому широко используются ведущими метрологическими центрами. Новизной этих технических решений является применение нагревателей сопротивления, выполненных в виде набора колец [3] из высокоориентированного пирографита марки ПВ-1 [4], благодаря чему обеспечивается уникальная возможность непрерывного совершенствования эталонной модели АЧТ.

Четко прописанная методика укладки пирографитовых колец для формирования равномерного температурного поля отсутствует, что заставляет искать оптимальные схемы размещения колец в АЧТ однако для этого следует знать их удельное электрическое сопротивление.

Отделом эталонов и научных исследований в области термодинамики ФГУП ВНИИМ им. Д. И. Менделеева излучатель ВВ3500 УУ используется в качестве составной части Государственного первичного эталона температуры ГЭТ 34-2007. Следуя главной задаче метрологии температурных измерений — обеспечить наивысшую точность воспроизведения единицы температуры, сотрудники отдела выполняют научно-исследовательские работы, в том числе по достижению максимальной равномерности температурного поля в рабочей зоне излучателя. Составная часть этих работ — получение достоверных данных об удельном электрическом сопротивлении пирографитовых колец.

Как оказалось, поставляемый разработчиком АЧТ блок измерения сопротивлений ввиду нестабильности, а также больших значений контактного сопротивления между испытываемым образцом и электродами (сопоставимых с сопротивлением образца) не позволяет получать точные результаты.

Кроме этого, контактный узел „измерительный электрод—исследуемый материал (пирографитовое кольцо)“ представляет собой не что иное, как термическую пару (термопару), а два таких узла, объединенных вместе — дифференциальную термопару, сигнал которой в случае разности температуры между торцами изделия (столбика материала) в виде помехи накладывается на измеряемый полезный сигнал. При измерении малых и сверхмалых сопротивлений с использованием больших измерительных токов изделие заметно нагревается, что значительно снижает точность измерений, а в ряде случаев не позволяет их выполнить.

С целью устранения указанных факторов выполнено усовершенствование измерительного блока, методики и схемы измерений.

На рис. 1 представлен общий вид пирографитового кольца и измерительной ячейки с помещенными в нее тремя пирографитовыми кольцами, на рис. 2 — структурная измерительная схема модифицированного измерительного блока.

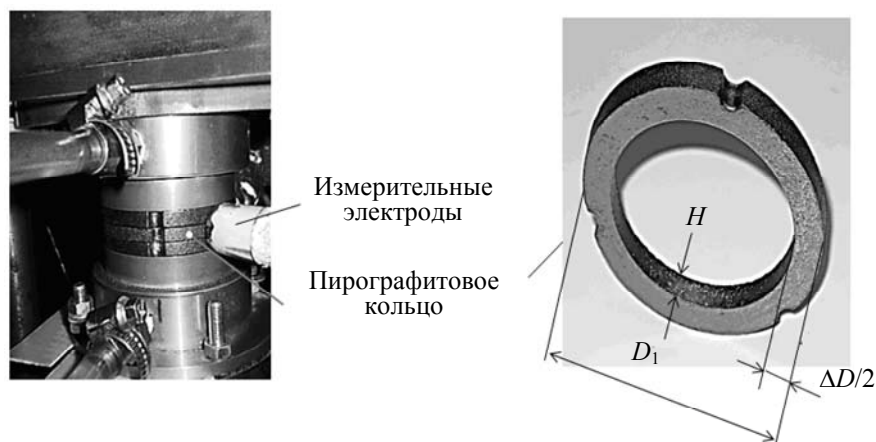


Рис. 1

Конструктивные особенности устройства заключаются в следующем. Испытуемое изделие 1 (пирографитовое кольцо) с помощью диэлектрической центрирующей втулки 5 (рис. 2) через пирографитовые прокладки под определенным давлением зажимается между двумя латунными электродами 2, расположенными между двумя диэлектрическими пластинами 3. Измерительные электроды планарного типа 4 установлены в противоположных торцах изделия между пирографитовыми прокладками. Падение напряжения на измерительных электродах 4 определяется с помощью мультиметра 10 и обрабатывается компьютером 13. Сила сжатия изделия контролируется при помощи тензодатчика 6 и мультиметра 8. Тензодатчик 6 установлен под нижним пуансоном и запитывается от блока питания 7. Через кольцо и пирографитовые прокладки пропускается постоянный электрический ток от источника 9. Величина пропускаемого тока измеряется с помощью образцового сопротивления 11 и высокоточного

мультиметра 12, а результат обрабатывается с помощью компьютера. Термостатирование пуансонов осуществляется с помощью термостата 14 с жидким теплоносителем, например, водой.

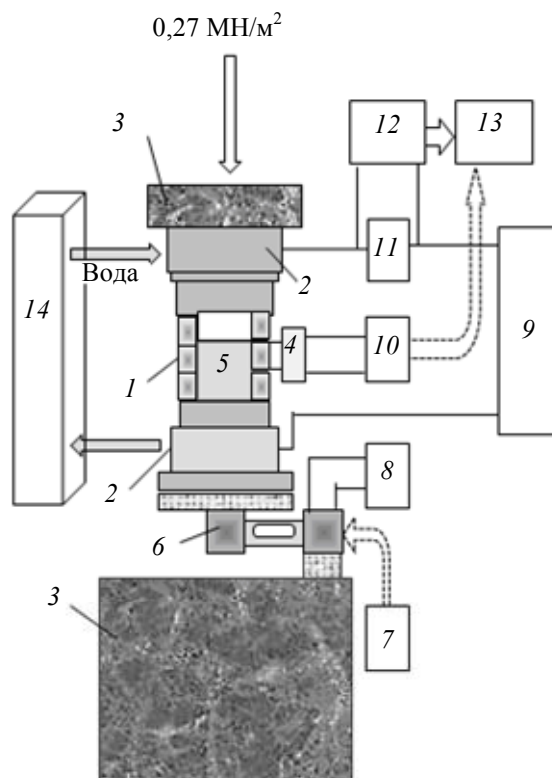


Рис. 2

Измерительные электроды 4 планарного типа размером $5 \times 8 \times 0,08$ мм выполнены из нержавеющей стали, расстояние между ними ~ 5 мм. Для обеспечения стабильности измерений латунные электроды (токовые вводы) термостабилизируются за счет прогонки через них теплоносителя (воды) постоянной температуры, что обеспечивается термостатом. Температура термостатирования в опытах 24 °С. Удельное электрическое сопротивление испытуемого образца рассчитывается по известному соотношению:

$$\rho = \frac{RS}{l} = \frac{\pi R}{4H} \Delta D (2D_1 - \Delta D),$$

R — измеренное электрическое сопротивление образца, Ом; S — площадь поперечного сечения кольца, м^2 ; $l=H$ — толщина кольца, м.

Для устранения паразитного контактного сопротивления и термоЭДС: 1) введены пирографитовые прокладки между испытуемым изделием и токоподводящими электродами (пуансонами) 2) выполнено термостатирование самих электродов (пуансонов), 3) в блок введены нагрузочное устройство, тензометрический датчик и измерительные электроды планарного типа, а для уменьшения контактного сопротивления на границе раздела „электрод—исследуемый образец“ предложено размещать образец между двумя аналогичными образцами и с определенным усилием сдавливать их в направлении, нормальном к их плоскости.

В процессе технологической отладки исследовано влияние степени надавливания (нагрузки) на результат показаний (рис. 3). При нагрузке более $0,3 \text{ MN/m}^2$ (масса ~ 30 кг) результат показаний мало зависит от величины сдавливания, поэтому для измерений рекомендована нагрузка $P \approx 0,27 \text{ MN/m}^2$. Для измерения малых сопротивлений использован традиционный косвенный метод — подключение амперметра-вольтметра по четырехпроводной схеме [5, с. 424].

Использование прокладок между изделием и пуансонами, а также тонких измерительных электродов планарного типа сводит к минимуму контактное электрическое сопротивление на границе раздела „измерительный электрод—изделие“. Это обеспечивается относительной мягкостью (низкой твердостью) пирографита в направлении, перпендикулярном плоскости главной анизотропии пирографитовой пластины (прокладки). Благодаря этому свойству пирографита планарные измерительные электроды „вминаются“ в прокладку, не нарушая целостность изделия и обеспечивая максимальный контакт с изделием. Установлено, что минимальное контактное удельное электрическое сопротивление, приходящееся на площадь контакта металл—пирографит под давлением, составляет приблизительно $1,6 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2$. Исходя из этой величины можно прогнозировать ожидаемую погрешность измерений. Например, при измерении электрического сопротивления столбика графита высотой 6 мм с площадью поперечного сечения 1300 мм^2 получено электрическое сопротивление образца 19 мОм, оценка величины контактного сопротивления дает $1,6/1300=1,2 \text{ мОм}$, погрешность измерений составляет $1,2/19=0,063$ (6,3 %). Для больших значений сопротивления образца величина погрешности намного меньше.

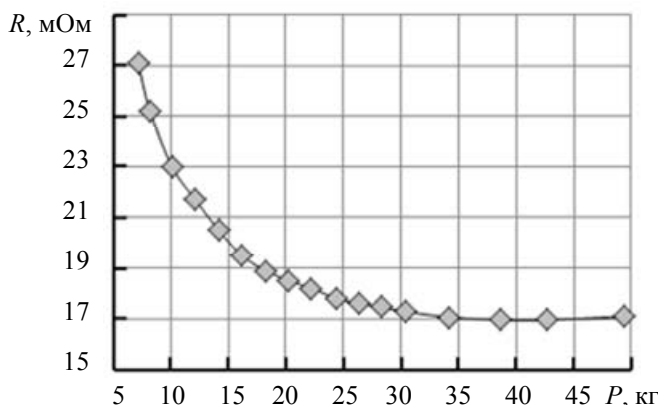


Рис. 3

Кроме этого, располагая пирографитовые прокладки таким образом, чтобы их главная плоскость анизотропии была параллельна плоскости торцов изделия, можно обеспечить максимальную равномерность распределения плотности электрического тока по поверхности торцов изделия. Это обеспечивается за счет высокой электропроводности пирографита в направлении главной оси (плоскости) анизотропии. Величина указанной электропроводности гораздо выше электропроводности меди.

Применение операции термостатирования пуансонов снижает до ничтожно малого (нерегистрируемого) значения термоЭДС, вырабатываемую термической парой „измерительный электрод—изделие“, что дополнительно повышает точность измерений в случае сверхмалых электрических сопротивлений.

Предварительные оценки показывают, что предложенное техническое решение позволяет измерять и изделия с электрическим сопротивлением свыше 10 мОм при относительной погрешности не более 6 %.

Для каждого пирографитового кольца выполнялось по пять измерений его электрического сопротивления. Относительная погрешность измерений: толщина — $2 \cdot 10^{-3}$, диаметр — $8 \cdot 10^{-4}$. Среднее квадратическое отклонение от среднего измеренного значения 3,1 %. Методическая составляющая неопределенности измерений не оценивалась. Полученные данные хорошо согласуются с литературными данными: например для пирографита марки УПВ-1 дается значение $\rho=6 \text{ мОм}\cdot\text{м}$ [6, с. 25]. Анализируемые пирографитовые кольца (56 шт.) обладали электрическим сопротивлением $R=12—30 \text{ мОм}$.

Таким образом, можно утверждать, что рассмотренные выше модернизированная установка и схема измерений электрического сопротивления могут быть успешно применены для изучения свойств материалов данного класса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Куинн Т. Температура / Пер. с англ. под ред. Д. Н. Астрова. М.: Мир, 1985. 448 с.
2. Хлевной Б. Б., Огарев С. А., Саприцкий В. И. и др. Эталонные источники типа «черное тело» в диапазоне 100—3500 К для прецизионных измерений в радиометрии, фотометрии и оптической термометрии // Измерительная техника. 2005. № 11. С. 29—34.
3. Пат. 2148801 РФ. Модель черного тела / Б. Б. Хлевной, В. Б. Хромченко, Н. А. Ибрагимов, В. И. Шаповал, В. И. Саприцкий. Опубл. 10.05.2000.
4. Убеллоде А. Р., Льюис Ф. А. Графит и его кристаллические соединения / Пер. с англ. Е. С. Головина, О. А. Цуханова. М.: Мир, 1965. 256 с.
5. Душин Е. М. Основы метрологии и электрические измерения. М.: Энергоатомиздат, 1987. 480 с.
6. Шешин Е. П. Структура поверхности и автоэмиссионные свойства углеродных материалов. М.: Изд-во МФТИ, 2001. 285 с.

Сведения об авторе

Вячеслав Петрович Ходунков

— канд. техн. наук, старший научный сотрудник; Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева

Поступила в редакцию
26.06.18 г.

Ссылка для цитирования: Ходунков В. П. Экспериментальная установка для измерения сверхмалых электрических сопротивлений // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 4. С. 340—345.

EXPERIMENTAL SETUP FOR MEASURING ULTRA-LOW ELECTRIC RESISTANCES

V. P. Khodunkov

*D.I. Mendeleev Institute for Metrology, 190005, St. Petersburg, Russia,
E-mail: walkerearth@mail.ru*

An experimental setup for measuring low and ultra-low electrical resistances is presented, method of performing measurements of samples resistance is described. The measuring method is based on the known principle of amperemeter-voltmeter. The novelty of the setup is the use of special gaskets made of highly oriented anisotropic pyrographite and installed between the current leads, measuring electrodes, and the sample under study. As a result, the contact electrical resistance at the interface "measuring electrode-test sample" is diminished, and parasitic thermopower is reduced to a negligible value. Along with expansion of the dynamic range of the setup in the area of low resistances, the measurement accuracy is improved up to 10 mΩ. Results of measurements of the electrical resistivity of graphite rings used as heating elements of the high-temperature blackbody model of BB3500YY type are presented. An estimation of measurement error is given.

Keywords: electrical resistance, pyrographite, measurement

REFERENCES

1. Quinn T.G. *Temperature*, London etc., 1983.
2. Khlevnoi B.B., Ogarev S.A., Sapritskii V.I., Morozova S.P., Samoilov M.L., Sakharov M.K., Khromchenko V.B., Shapoval V.I. *Measurement Techniques*, 2005, no. 11(48), pp. 1083–1089.
3. Patent 2148801 RU, *Model' chernogo tela* (Black Body Model), B.B. Khlevnoy, V.B. Khromchenko, N.A. Ibragimov, V.I. Shapoval, V.I. Sapritskiy, Published 05.2000 (in Russ.)
4. Ubbelohde A. R. & Lewis F. A. *Graphite and its crystal compounds*, Oxford, Clarendon Press, MLA Citation, 1960.
5. Dushin E.M. *Osnovy metrologii i elektricheskoye izmereniya* (Fundamentals of Metrology and Electrical Measurements), Moscow, 1987, 480 p. (in Russ.)
6. Sheshin E.P. *Struktura poverkhnosti i avtoemissionnyye svoystva ugleodnykh materialov* (Surface Structure and Field Emission Properties of Carbon Materials), Moscow, 2001, 285 p. (in Russ.)

Vyacheslav P. Khodunkov — **Data on author**
PhD, Senior Scientist; D.I. Mendeleev Institute for Metrology;
E-mail: walkerearth@mail.ru

For citation: Khodunkov V. P. Experimental setup for measuring ultra-low electric resistances. *Journal of Instrument Engineering*. 2019. Vol. 62, N 4. P. 340—345 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-4-340-345