

УДК 621.36.5

Метод определения эффективности термоэлектрических материалов

А. А. Ащеулов, О. Г. Даналакий, И. С. Романюк

Метод основан на определении потерь электрической мощности при возникновении вихревых токов в образце, помещенном в зазор сердечника катушки индуктивности, через которую протекают симметричный и асимметричный токи.

PACS: 81.05.-t; 06.30.-k

Ключевые слова: вихревой ток Фуко, сила Ампера, эффекты Пельтье и Джоуля, термоэлектрический материал, термоЭДС, теплопроводность, электропроводность, термоэлектрическая эффективность.

Введение

Одним из основных параметров термоэлектрических материалов, наряду с коэффициентами термоЭДС, электропроводности и теплопроводности, является эффективность [1]. В настоящее время известно достаточное количество методов ее определения [2, 3], в том числе и с помощью измерения электропроводности термоэлектрического образца в изотермических и адиабатических условиях [4, 5]. Однако следует отметить, что наличие электрических контактов ведет к повышению погрешности и некоторым неудобствам.

Ранее проведенные исследования возможностей нового вихретокового бесконтактного метода контроля электропроводности термоэлектрических материалов [6, 7] показали его перспективность, а также необходимость его дальнейшего углубленного исследования.

Целью настоящей работы является изучение физических особенностей указанного вихретокового бесконтактного метода контроля электропроводности термоэлектрических материалов.

Физический базис метода

В основу метода положены физические эффекты взаимодействия электромагнитных полей с исследуемым веществом.

Как известно [5], электрическая добротность Q_1 колебательного контура индуктивностью L и

активным сопротивлением R представляется следующим образом:

$$Q_1 = \frac{\omega L}{R} = \frac{\omega L I^2}{R I^2} = \frac{P_p}{P_a}, \quad (1)$$

где ω — круговая частота электрических колебаний контура, I — сила тока в нем, P_p — реактивная мощность, P_a — мощность активных потерь в контуре.

При внесении в этот контур образца термоэлектрического материала (рисунок) мощность вносимых им активных электрических P_{a0} добавляется к мощности активных потерь в контуре. В этом случае электрическая добротность контура с образцом определяется как

$$Q_2 = \frac{P_p}{P_a + P_{a0}}. \quad (2)$$

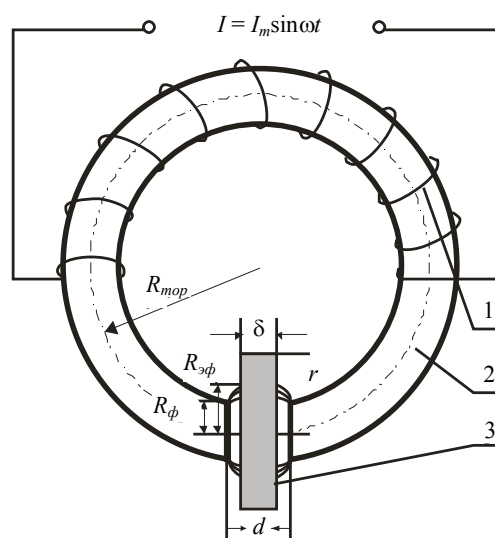


Схема колебательного контура с образцом: 1 — обмотка катушки индуктивности, 2 — тороидальное ферритовое кольцо, 3 — контролируемый образец

Ащеулов Анатолий Анатольевич, гл. научный консультант, профессор.

Даналакий Олег Григорьевич, начальник отдела.

Романюк Игорь Степанович, зам. гендиректора.

ОДО «Завод «Кварц».

Украина, 58032, г. Черновцы, ул. Головна, 246.

E-mail: ashchelovaa@rambler.ru

Статья поступила в редакцию 12 марта 2015 г.

© Ащеулов А. А., Даналакий О. Г., Романюк И. С., 2015

Выражение для мощности электрических потерь, вносимых образцом, имеет следующий вид:

$$P_{a0} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1 Q_2} P_p. \quad (3)$$

В общем случае, эти потери соответствуют электрической мощности, выделяемой в объеме термоэлектрического образца при циркуляции индуцированных токов Фуко, и вызваны, в основном, известными эффектами Джоуля и Пельтье.

При прохождении через измерительный колебательный контур электрического тока вида

$$I_1(t) = 0,5 I_{\max} [1 + \text{sign}(\sin(2\pi Ft))] \cdot \sin(2\pi ft),$$

где I_{\max} — максимальное значение синусоидального тока, F и f — частоты высокочастотных колебаний импульсов следования и модуляции тока. Соответственно, в объеме образца радиуса r индуцируется вихревой электрический ток Фуко плотностью j_Φ , представляемый следующим выражением:

$$j_\Phi = \sigma_c E = \frac{\sigma_c}{2\pi r} \frac{d}{dt} \int B dS = \frac{\sigma_c}{2\pi r} \frac{d}{dt} \int \mu H_m [1 + \text{sign}(\sin 2\pi Ft)] \cdot \sin(2\pi ft) dS, \quad (4)$$

где σ_c — усредненная для переменного тока электропроводность материала образца, E — напряженность электрического поля, B — индукция магнитного поля в зазоре ферритового сердечника, S — площадь сечения сердечника, μ — магнитная проницаемость материала сердечника, H_m — напряженность магнитного поля.

Плотность теплового потока, вызванного эффектом Джоуля, в некоторой точке с координатами (x_0, y_0, z_0) определяется выражением:

$$q_{cpДж}(x_0, y_0, z_0) = \frac{\omega L I^2}{\pi R_{эф}^2} \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1 Q_2} = j_{cpФ}^2(x_0, y_0, z_0) \sigma_c^{-1}, \quad (5)$$

где $R_{эф}$ — эффективный радиус, $j_{cpФ}$ — плотность тока Фуко в точке с координатами (x_0, y_0, z_0) , принадлежащей одной из торцевых граней образца, расположенной в начале выбранной лабораторной системы координат XYZ .

Тепловые потери, вызванные эффектом Пельтье, а, следовательно, и осевой градиент температуры в этом случае, отсутствуют, т. е. $\frac{\partial T}{\partial z} = 0$.

Усредненное значение электропроводности материала образца равно:

$$\sigma_c = c \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1 Q_2 d \left(1 + 4 \ln \frac{R_{мор}}{R_{эф}} \right)}, \quad (6)$$

$$c = \frac{\pi \omega \mu_0 (\mu'_n)^2 R_{эф} l_{cp}}{8 \mu'_ф S}, \quad (7)$$

где Q_1, Q_2 — электрические добротности контура без образца и с образцом, соответственно; d и $R_{мор}$ — ширина зазора и средний радиус кольцевого датчика, соответственно; ω — круговая частота измерительного колебательного контура; $\mu'_ф$ и μ'_n — динамические магнитные проницаемости материала образца и ферритового сердечника контура, соответственно; S — площадь его сечения; l_{cp} — средняя длина магнитной силовой линии.

Асимметричный электрический ток, имеющий вид

$$I_1(t) = 0,5 I_{\max} [1 - \text{sign}(\sin(2\pi Ft))] \times [(1 - z/z_0) + \sin(2\pi ft)],$$

обуславливает возникновение в зазоре сердечника магнитного поля с индукцией, состоящей из суммы переменной (синусоидальной) и постоянной составляющих магнитного поля. Переменная составляющая $B_1(t)$ индуцирует в образце токи Фуко, каждый из полупериодов которого характеризуется собственной магнитной индукцией ($\pm \Delta B'$), взаимодействующей далее с постоянной составляющей B_0 индукции магнитного поля.

При положительном полупериоде тока Фуко благодаря силе Ампера эти составляющие суммируются ($B_1 = B_0 + \Delta B'$), при отрицательном — вычитаются ($B_2 = B_0 - \Delta B'$). Это ведет к пространственно-временному перераспределению носителей зарядов в объеме термоэлектрического образца. Магнитная индукция разных направлений приводит к протеканию токов Фуко различных полярностей на противоположных торцевых гранях образца. Такое зональное расслоение протекающих полупериодов токов Фуко ведет к соответствующему объемному перераспределению выделенных разнонаправленных потоков тепла Пельтье $q_{cpП}$. Значение плотности теплового потока в некоторой точке (x_0, y_0, z_0) в этом случае равно

$$q_{cp}(x_0, y_0, z_0) = q_{cpДж}(x_0, y_0, z_0) + q_{cpП}(x_0, y_0, z_0). \quad (8)$$

При этом плотность теплового потока представляется выражением

$$q_{cp\Pi}(x_0, y_0, z_0) = \frac{\omega LI_2^2}{\pi R_{эф}^2} \frac{Q_2 - Q_3}{Q_2 Q_3}, \quad (9)$$

а усредненное значение электропроводности материала σ_a контролируемого образца равно

$$\sigma_a = c \frac{Q_1 - Q_3}{Q_1 Q_3 d \left(1 + 4 \ln \frac{R_{мор}}{R_{эф}} \right)}, \quad (10)$$

где Q_3 — электрическая добротность контура с образцом в случае асимметричного периодического тока.

Таким образом, асимметричный характер тока I_2 колебательного контура вызывает тепловые потери, обусловленные как эффектом Джоуля, так и эффектом Пельтье, причем их соотношение определяется величиной плотности вихревых токов Фуко j_ϕ и термоэлектрическими параметрами материала образца. Если значение плотности тока Фуко $j_{cp\phi}$, протекающего в точке образца с координатами (x_0, y_0, z_0) , принадлежащей интервалу $(0 < r < R_{эф})$, ограничено условием $0 < j_{cp\phi} < 0$ (например, $j_{cp\phi} = \alpha_{cp} \sigma_a$), то это ведет к выполнению неравенства

$$q_{cpДж}(x_0, y_0, z_0) \ll q_{cp\Pi}(x_0, y_0, z_0).$$

В этом случае осевой градиент температуры образца не равен нулю $\left(\frac{\partial T}{\partial z} \neq 0 \right)$, что обуславливает появление вдоль его толщины δ разности температуры

$$\Delta T(x_0, y_0, z_0) = \frac{\chi}{\delta} q_{cp\Pi}(x_0, y_0, z_0), \quad (11)$$

где χ — теплопроводность материала образца.

Известно [1], что удельная мощность Пельтье, выделяемая в единице объема термоэлектрического материала, равна

$$q_{y\partial\Pi} = \alpha_{cp} j T, \quad (12)$$

а ее приведенное значение для данного случая с учетом (11) составляет

$$q_{cp\Pi}(x_0, y_0, z_0) = \frac{\alpha^2 \sigma_a T \Delta T}{\delta} = \frac{\omega LI_2^2}{\pi R_{эф}^2} \frac{Q_2 - Q_3}{Q_2 Q_3}. \quad (13)$$

Усредненное значение коэффициента термоЭДС определяется следующим образом:

$$\alpha_{cp} = \sqrt{\frac{\chi_{cp}}{\sigma_a T}}, \quad (14)$$

где χ_{cp} — усредненное значение коэффициента теплопроводности материала образца.

С другой стороны, из [1] следует

$$\alpha_{cp} = \sqrt{\frac{\chi_{cp} Z_{cp}}{\sigma_c}}, \quad (15)$$

где Z_{cp} — коэффициент термоэлектрической эффективности материала образца.

Приравняв (14) и (15), с учетом (6), (7) и (10) получаем выражение для термоэлектрической эффективности:

$$Z_{cp} = \frac{\sigma_c}{\sigma_a} \frac{1}{T} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1 - Q_3} \frac{Q_3}{Q_2} \frac{1}{T}. \quad (16)$$

Таким образом, в рамках принятых допущений, вихретоковый метод позволяет бесконтактно определять эффективность термоэлектрических материалов [8].

Исследования образцов на основе кристаллов твердых растворов Bi-Te-Se-Sb, проведенные на соответствующим образом модифицированной установке [6, 7] с использованием вихретоковых датчиков [9, 10], подтверждают эти выводы. Численные оценки погрешности показывают, что она не превышает 3 %.

Заключение

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования показывают, что вихретоковый метод позволяет бесконтактно определять эффективность термоэлектрических материалов. При этом численные оценки погрешности измерений не превышают 3 %.

В дальнейшем предполагается разработать конкретные методики определения термоэлектрической добротности Z для случаев термоэлектрически изотропных и анизотропных, а также для периодически-неоднородных структур и функционально-градиентных материалов, которые будут представлены в последующих публикациях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иоффе А. Ф. Полупроводниковые термоэлементы. — М. — Л.: Изд. АН СССР, 1960.
2. Harman T. C., Cahn J. H., Loganm J. // J. Appl. Phys. 1950. V. 30. No. 9. P. 1351.
3. Павлов Л. П. Методы измерения параметров полупроводниковых материалов. — М. В.-Ш. 1987.
4. Вайнер А. Л. Термоэлектрические параметры и их измерение. — Одесса: "Негоциант", 1998.

5. Сурин Ю. В., Шимко В. И., Матвеев В. В. // Заводская лаборатория, 1966. Т. 32. № 9. С. 1086.

6. Ащеулов А. А., Бучковский И. А., Романюк И. С. // ТКЭА. 2007. № 2. С. 55.

7. Ащеулов А. А., Бучковский И. А., Величук Д. Д. и др. // Сенсорная электроника и микросистемные технологии. 2008. № 1. С. 38.

8. Ащеулов А. А., Бучковский И. А., Величук Д. Д. Патент UA29213. Оpubл. 10.012008. Бюл. № 1.

9. Ащеулов А. А., Бучковский И. А. Патент UA32279. оpubл. 12.05.2008. Бюл. № 9.

10. Ащеулов А. А., Бучковский И. А., Величук Д. Д. и др. Автогенераторные датчики электропроводности. Материалы НПК «Сенсор 2008», Одесса, 2008.

The method of determining the effectiveness of thermoelectric materials

A. A. Ashcheulov, O. G. Danalaky, and I. S. Romanyuk

Quartz, LLC.

246 Golovna str., Chernivtsi, 58032, Ukraine

E-mail: ashchelovaa@rambler.ru

Received March 12, 2015

The method is based on determining the electrical power loss in the event of eddy currents in the sample placed in the gap of the core inductors, which nourishes the asymmetrical current.

PACS: 81.05.-t; 06.30.-k

Keywords: eddy current, Foucault, Ampere, thermoelectric material, thermoelectric power, thermal conductivity, electrical conductivity, thermoelectric efficiency.

REFERENCES

1. A. F. Ioffe, *Semiconductor Thermoelements* (Izd. AN SSSR, M-L, 1960) [in Russian].
2. T. C. Harman, J. H. Cahn, and J. Loganm, *J. Appl. Phys.* **30**, 1351 (1950).
3. L. P. Pavlov, *Methods of Measurement of Semiconductor Materials Parameters* (Vyssh. Shkola, Moscow, 1987) [in Russian].
4. A. L. Vainer, *Thermoelectric Parameters and Its Measurement* (Negotsiant, Odessa, 1998) [in Russian].
5. Yu. V. Surin, V. I. Shimko, and V. V. Matveev, *Zavod. Labor.* **32**, 1086 (1966).
6. A. A. Ashcheulov, I. A. Buchkovsky, and I. S. Romanyuk, *ТКЭА, ТКЭА.* No. 2, 55 (2007).
7. A. A. Ashcheulov, I. A. Buchkovsky, D. D. Velichuk, et al., *Sensorn. Elektron. Mikrosystemn. Tekhnol.*, No. 1, 38 (2008).
8. A. A. Ashcheulov, I. A. Buchkovsky, and D. D. Velichuk., *UA Patent No.29213.* January 10, 2008. Bull. No. 1. (2008).
9. A. A. Ashcheulov, I. A. Buchkovsky, *UA Patent No. 32279.* May 12, 2008. Bull. No. 9 (2008).
10. A. A. Ashcheulov, I. A. Buchkovsky, D. D. Velichuk, et al., *Self-Excited Oscillator Sensors of Electrical Conduction.* In *Proc. NPK Sensor-2008* (Odessa, 2008) [in Russian].