

05

Электросопротивление, термоэдс и коэффициент Холла чистого таллия при 100–550 К

© А.Т. Бурков, П.П. Константинов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: a.burkov@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 19 апреля 2023 г.
В окончательной редакции 13 мая 2023 г.
Принято к публикации 22 мая 2023 г.

Электрическое сопротивление, коэффициент термоэдс и коэффициент Холла чистого таллия измерены при температурах от 100 до 550 К, т.е. почти до температуры плавления. Приведен краткий обзор истории исследования этих свойств таллия. Результаты для коэффициента термоэдс и коэффициента Холла этого элементарного металла в столь широком диапазоне температур публикуются впервые.

Ключевые слова: электрическое сопротивление, коэффициент термоэдс, коэффициент Холла, таллий, температурные зависимости.

DOI: 10.21883/JTF.2023.08.55974.98-23

Введение

Несмотря на то что таллий это элементарный металл, многие свойства этого элемента в кристаллическом состоянии, в том числе электронные транспортные свойства, изучены очень слабо. При этом таллий входит в состав многих важных в практическом плане материалов, а также в состав соединений с интересными свойствами. В частности, таллий используется при создании новых высокоэффективных термоэлектрических материалов на основе таллий-содержащих соединений и многофазных композитов [1,2]. В последнее время таллий применяется при создании и исследовании свойств нанокластеров на поверхности полупроводниковых кристаллов как элементов нового поколения микроэлектроники и спинтроники [3,4]. В то же время достоверных экспериментальных данных о многих макроскопических электронных свойствах самого таллия, которые могут быть полезными при таких исследованиях, почти нет. В настоящей работе мы частично восполняем недостаток информации о таких важных свойствах металлического таллия как коэффициент термоэдс, коэффициент Холла и электрическое сопротивление.

Таллий кристаллизуется при температуре 577 К, в твердом состоянии существует в двух кристаллических модификациях: при $T < 504$ К это гексагональная плотно упакованная структура (ГПУ), при более высоких температурах — объемно-центрированная кубическая (ОЦК) структура [5]. Таллий является сверхпроводником, температура сверхпроводящего перехода 2.38 К [6,7]. Значительная доля экспериментальных результатов о свойствах таллия, доступных в литературе, получена в первой половине прошлого века. Помимо кристаллической структуры и термодинамических свойств, было изучено электрическое сопротивление

как в кристаллических фазах, так и в жидком состоянии этого металла. Первые измерения электрического сопротивления таллия были выполнены Дьюаром и Флемингом еще в 1893 г. [8]. Наиболее подробно изучены электрическое сопротивление и термодинамические свойства при низких температурах в окрестности перехода в сверхпроводящее состояние [9–12]. Электрическое сопротивление жидких простых металлов служило модельным свойством для проверки теории электронного транспорта в жидких металлах [13–17], это явилось стимулом для теоретических и для экспериментальных исследований кристаллических и жидких одновалентных и поливалентных простых металлов, включая таллий [12,15,18,19].

Однако другие транспортные свойства — коэффициент термоэдс, коэффициент Холла, теплопроводность — изучены очень фрагментарно. Первые сведения о коэффициенте термоэдс таллия содержатся в фундаментальной работе Бриджмена по изучению термоэлектрических свойств металлов и некоторых металлических сплавов под давлением [20]. Был определен коэффициент термоэдс для ряда металлов и сплавов при нормальном давлении при температурах от 273 до 373 К, измерено изменение коэффициента термоэдс, коэффициента Пельтье и коэффициента Томпсона при гидростатическом давлении до 12 kbar в этом же диапазоне температур. Позднее коэффициент термоэдс таллия был измерен при температурах от 273 до 573 К, т.е. для обеих кристаллических модификаций таллия [11], однако правильность этих результатов вызывает серьезные сомнения.

Коэффициент Холла изучен очень слабо. Коэффициент Холла таллия и сплавов таллия с оловом и индием был измерен при комнатной температуре в 1970 г. [21], однако есть основания полагать, что знак коэффициента определен не правильно. Имеется упоминание о резуль-

татах измерения коэффициента Холла таллия в книге Хурда, где приводится значение этого коэффициента при комнатной температуре [22]. Результаты подробных измерений температурной зависимости коэффициента Холла таллия (и многих других чистых металлов) при температурах от 80 до 500 К (до 1000 К для некоторых других металлов) были опубликованы в 1988 г., однако только в мало доступном препринте ФТИ им. А.Ф. Иоффе [23]. Мы приводим эти результаты для таллия ниже.

В настоящей работе мы представляем результаты измерений электрического сопротивления, коэффициента термоэдс и коэффициента Холла при температурах от 100 до 550 К, т.е. почти до температуры плавления этого металла (577 К).

1. Техника эксперимента

Образцы для измерений в виде пластинок с размерами около $0.5 \times 8 \times 12 \text{ mm}^3$ приготовлены из таллия чистой 99.99%. Электросопротивление и термоэдс были измерены одновременно на установке, описанной в [24,25], с использованием стандартного 4-х зондового метода измерения сопротивления и дифференциального метода для измерения термоэдс. При измерениях термоэдс в качестве электрода сравнения использовалась медь (медная ветвь медь-константановых термопар). Детальное описание методики измерения коэффициента термоэдс и электрического сопротивления приведено в наших публикациях [24,25]. Погрешность измерения удельного электросопротивления составляет $\pm 2\%$, погрешность измерения абсолютной термоэдс с учетом неопределенности существующей абсолютной шкалы термоэдс составляет $\pm(0.5 \mu\text{V/K} + 4\%)$.

Коэффициент Холла измерен с использованием двухчастотного метода (переменный ток, переменное магнитное поле), экспериментальная установка была описана в [26]. Заметим, что обе экспериментальные установки прошли многолетнюю апробацию. Установка, использованная для измерений термоэдс и электрического сопротивления, участвовала в международном межлабораторном тестировании (round robin test) методик измерения термоэдс и продемонстрировала высокую точность и надежность результатов измерений. Поэтому результаты, полученные с помощью этих приборов, можно обоснованно считать вполне надежными.

2. Результаты

Результаты измерений электрического сопротивления образца таллия при температурах от 100 до 550 К приведены на рис. 1. Вместе с результатами наших измерений приведены также литературные данные для этого диапазона температур. В литературе имеются данные для электросопротивления для температур от 2 К и до температур выше температуры плавления [10,15,19]. По данным [19] непосредственно до плав-

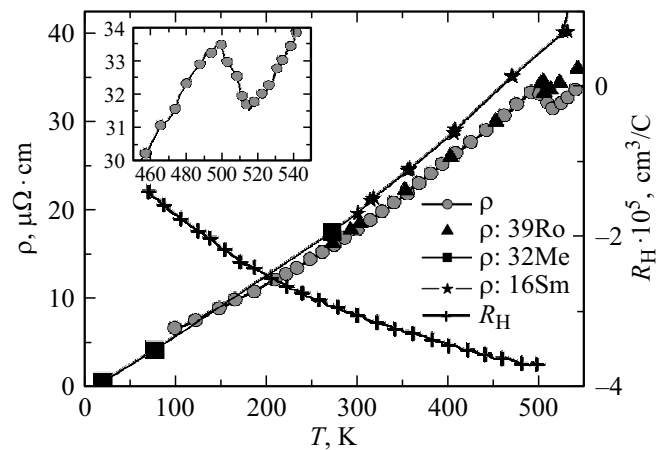


Рис. 1. Электрическое сопротивление и коэффициент Холла таллия. Наши данные: серые кружки — электросопротивление, крестики — коэффициент Холла. 39Ro — результаты [11], 32Me — [9], 16Sm — [18]. На вставке показана температурная зависимость электросопротивления в окрестности температуры структурного превращения.

ления и сразу выше температуры плавления электросопротивление равно 35.5 и $73.1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ соответственно. В целом наблюдается вполне удовлетворительное согласие между всеми доступными результатами. Величина аномалии в сопротивлении при структурном фазовом переходе из ГПУ в ОЦК структуру при 504 K по нашим данным заметно больше, чем в более ранних измерениях [11], возможно это связано с разной чистотой использованного металла (в статье Розенбома [11] нет данных о чистоте таллия, использованного при измерениях).

Коэффициент Холла также показан на рис. 1. Мы воспроизводим здесь результаты, полученные в ходе систематического исследования коэффициента Холла чистых металлов, которые были опубликованы ранее в виде препринта [23]. Коэффициент Холла отрицателен во всем диапазоне температур, а амплитуда его сильно зависит от температуры. При комнатной температуре $R_H \approx -3 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^3/\text{C}$. В то же время по данным, приведенным в книге Хурда [22], $R_H \approx +2.3 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^3/\text{C}$, т.е. амплитуды близки, а знаки противоположны. По данным [21] коэффициент Холла положителен, а амплитуда при комнатной температуре равна $R_H \approx 1.2 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^3/\text{C}$. Мы полагаем, что результаты, полученные в работе [23], правильны, они получены в ходе систематического исследования коэффициента Холла 30 чистых металлов, для многих из которых существовали достаточно подробные и надежные литературные данные. Во всех таких случаях наблюдалось, по крайней мере, хорошее качественное согласие между литературными результатами и результатами новых измерений. Сильная температурная зависимость коэффициента Холла видимо связана со сложной электронной структурой этого металла. Поверхность Ферми таллия состоит из листов в 3–6 зонах и содержит как дырочные,

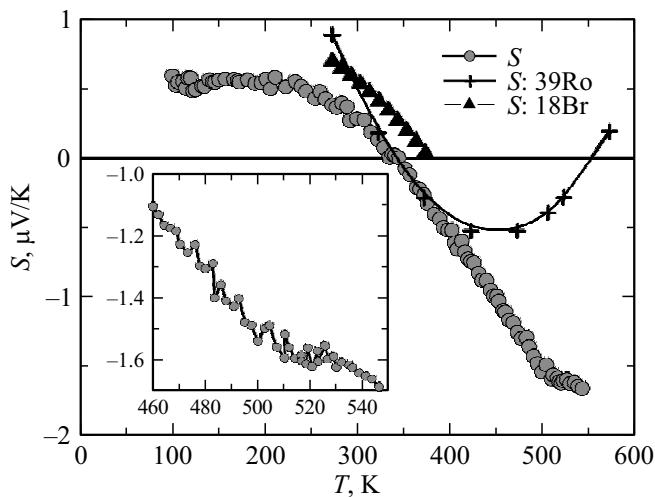


Рис. 2. Коэффициент термоэдс таллия. Наши данные: серые кружки, 39Ro — результаты [11], 18Br — результаты [20]. На вставке показана температурная зависимость термоэдс в окрестности температуры структурного превращения.

так и электронные поверхности [27–29]. Экспериментально измеряемый эффект Холла является взвешенной с подвижностью суммой вкладов от всех листов поверхности Ферми. Поскольку поверхность Ферми таллия содержит много мелких деталей, средневзвешенное значение вкладов в эффект Холла может сильно меняться с изменением температуры.

Результаты измерений коэффициента термоэдс вместе с доступными литературными данными показаны на рис. 2. Результаты Бриджмена [20] хорошо согласуются с нашими данными. Небольшое различие по величине, почти не зависящее от температуры, находится в пределах экспериментальной погрешности измерений коэффициента термоэдс (см. [24]). Результаты Розенбома [11] качественно отличаются как от нашей температурной зависимости термоэдс, так и от данных Бриджмена. Совпадение данных Розенбома с нашими при температурах 300–400 К является случайным.

Заметим, что и коэффициент Холла и коэффициент термоэдс являются знакоуказующими коэффициентами. При этом термоэдс при температурах ниже 350 К положительна, а коэффициент Холла отрицателен при всех температурах, т. е. в широком интервале температур эти коэффициенты имеют разные знаки. Эта ситуация однако не уникальна. Различие в знаках этих двух эффектов довольно часто наблюдается в металлах. Наиболее известными примерами являются три благородных металла: золото, серебро и медь. У всех трех коэффициент Холла отрицателен, а термоэдс положительна. Причина различия связана с разными физическими механизмами возникновения этих эффектов. Термоэдс отражает среднюю энергию диффузионного потока носителей заряда, а эффект Холла определяется геометрией поверхности

Ферми и чувствителен к мелким деталям этой поверхности с большой кривизной.

Таким образом, в результате этого исследования получены экспериментальные данные об электрическом сопротивлении, коэффициентах термоэдс и Холла чистого металлического таллия в широком диапазоне температур от 100 до 550 К. Экспериментальные данные о коэффициенте термоэдс в столь широком интервале температур публикуются впервые.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] K. Kurosaki, A. Kosuga, H. Muta, S. Yamanaka. *Mat. Trans.*, **46**, 1502 (2005).
- [2] T. Parashchuk, B. Wiendlocha, O. Cherniushok, R. Knura, K.T. Wojciechowski. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **13**, 49027 (2021).
- [3] K. Sakamoto, T. Oda, A. Kimura, K. Miyamoto, M. Tsujikawa, A. Imai, N. Ueno, H. Nimatame, M. Taniguchi, P.E.J. Eriksson, R.I.G. Uhrberg. *Phys. Rev. Lett.*, **102**, 096805 (2009).
- [4] P. Kocán, P. Sobotík, I. Ošťádal. *Phys. Rev. B*, **84**, 233304 (2011).
- [5] H. Lipson, A.R. Stokes. *Nature*, **148**, 437 (1941).
- [6] H. Kamerlingh Onnes, W. Tuyn. *Comm. Leiden Nr. 160a* (1922).
- [7] W. Meissner, B. Voigt. *Ann. Phys. Lpz.*, **7**, 794 (1930).
- [8] J. Dewar, J.A. Fleming. *Phil. Mag.*, **5** (36), 271 (1893).
- [9] W. Meissner, H. Franz, H. Westerhoff. *Ann. Phys. Lpz.*, **13**, 505 (1932).
- [10] W.J. De Haas, J. De Boer, G.J. Van den Berg. *Comm. Leiden*, **236d**, 453 (1935).
- [11] E. Rosenbohm. *Physica*, **6**, 337 (1939).
- [12] J. Bass. *Pure Metal Resistivities from 10...15 K Till Melting Point*, in: Landolt-Bornstein. Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology. New Series. Group III, v. 15a, Metals (Springer Verlag, NY, Tokio, 1985), p. 13–99.
- [13] А.И. Губанов. *ЖЭТФ*, **28**, 401 (1955).
- [14] J.M. Ziman. *Phil. Mag.*, **6**, 1013 (1961).
- [15] N.E. Cusack. *Rep. Prog. Phys.*, **26**, 361 (1963).
- [16] L.J. Sundström. *Phil. Mag.*, **11** (112), 657 (1965).
- [17] N.C. Halder, C.N.J. Wagner. *J. Chem. Phys.*, **45**, 482 (1966).
- [18] A.W. Smith. *The Ohio Journal of Science*, **XVI**(6), 244 (1916).
- [19] A. Roll, H.Z. Motz. *Metallkunde*, **48**, 272 (1957).
- [20] P.W. Bridgman. *Proc. Am. Acad. Arts Sci.*, **53** (4), 269 (1918).
- [21] I. Shiozaki, T.J. Sato. *Phys. Soc. Jpn.*, **29**, 259 (1970).
- [22] C.M. Hurd. *The Hall Effect in Metals and Alloys* (Plenum Press, NY, London, 1972).
- [23] Н.С. Хамраев, М.В. Ведерников, П.П. Константинов. *Эффект Холла в чистых металлах* (Препринт № 1283 ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН СССР, 1988).
- [24] А.Т. Burkov, A. Heinrich, P.P. Konstantinov, T. Nakama, K. Yagasaki. *Mes. Sci. Techn.*, **12**, 264 (2001).

- [25] А.Т. Бурков, А.И. Федотов, А.А. Касьянов, Р.И. Пантелеев, Т. Накама. Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики, **15** (2), 1735 (2015).
- [26] Б.Ф. Грузинов, П.П. Константинов. ПТЭ, **5**, 225 (1972).
- [27] J.A. Rayne. Phys. Rev., **131** (2), 653 (1963).
- [28] P. Soven. Phys. Rev., **137** (6A), A1706 (1965).
- [29] P.M. Holtham, M.G. Priestley. J. Phys. F: Metal Phys., **1**, 621 (1971).