

## ОСОБЕННОСТИ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЯ РЕДКОЗЕМЕЛЬНОГО МЕТАЛЛА ТУЛИЯ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

*В.В. Деревянко, В.А. Финкель*

*Национальный научный центр “Харьковский физико-технический институт”,  
Харьков, Украина*

*E-mail: finkel@kipt.kharkov.ua*

Изучен характер температурной зависимости электросопротивления поликристаллических образцов редкоземельного металла тулия в диапазоне температур  $\sim 15 \dots 300$  К, включающем температуры магнитных фазовых переходов парамагнетизм  $\leftrightarrow$  спиральный антиферромагнетизм в точке Нееля,  $T_N \sim 55$  К, и спиральный антиферромагнетизм  $\leftrightarrow$  коллинеарный ферромагнетизм при  $T_{AF \leftrightarrow Ferri} \sim 30$  К. В  $T_N$  обнаружены перегиб на кривой температурной зависимости удельного электросопротивления  $\rho(T)$  и острый минимум на кривой  $\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT}(T)$ , характерный для фазовых переходов второго рода. При  $T_{AF \leftrightarrow Ferri}$  обнаружен широкий максимум на кривой температурной зависимости логарифмической производной электросопротивления  $\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT}(T)$ , наличие которого дает основания полагать, что магнитное превращение в  $T_{AF \leftrightarrow Ferri}$  является фазовым переходом первого рода.

Ранее нами были проведены исследования электрофизических свойств ряда тяжелых редкоземельных металлов (РЗМ) – Gd [1], Tb [2], Dy [3] – и установлен характер влияния магнитной структуры РЗМ на особенности температурных зависимостей электросопротивления этих металлов при низких температурах. Настоящая работа служит естественным продолжением данного цикла исследований.

Редкоземельный металл тулий (Tm) – единственный элемент Периодической системы, обнаруживающий при низких температурах ферромагнитное упорядочение: ниже  $\sim 30$  К вдоль главной оси с ГПУ-решетки попеременно чередуются антипараллельно направленные четыре и три магнитных момента:  $\uparrow\uparrow\uparrow\downarrow\downarrow$ . В диапазоне  $\sim 30$  ( $T_{AF \leftrightarrow Ferri}$ )...  $\sim 55$  К ( $T_N$ ) реализуется спиральная антиферромагнитная структура, выше  $T_N$  Tm находится в парамагнитном состоянии (см., например, [4, 5]). Исследованию магнитных и транспортных свойств моно- и поликристаллов, а также тонких пленок тулия посвящено значительное число работ [6–10].

Из-за наличия уникального низкотемпературного магнитного фазового перехода в ферромагнитное состояние тулий представляет значительный практический интерес для применения его в качестве рабочего тела термомагнитного преобразователя энергии [11] с высоким коэффициентом полезного действия.

Целью настоящей работы является изучение характера температурной зависимости электросопротивления поликристаллических образцов тулия при  $\sim 15 \dots 300$  К, т. е. в диапазоне, включающем температуры магнитных фазовых переходов парамагнетизм  $\leftrightarrow$  спиральный антиферромагнетизм и спиральный антиферромагнетизм  $\leftrightarrow$  коллинеарный ферромагнетизм.

Объектами исследования служили поликристаллические образцы Tm чистотой 99,7 % с характерными размерами  $1 \times 1 \times 10$  мм. Электросопротивление образцов изучали с помощью приборно-программного измерительного комплекса (ППИК) на базе персональной ЭВМ [12]. Установка ППИК для измерения электрофизических и магнитных свойств в диапазоне  $\sim 10 \dots 300$  К создана на основе криогенератора RGD-210 (Leybold). Датчиком температуры служил платиновый термометр сопротивления.

Результаты измерений температурной зависимости удельного электросопротивления  $\rho(T)$  тулия показаны на рис. 1 (на врезке в большем масштабе показан низкотемпературный участок кривой  $\rho(T)$ ).

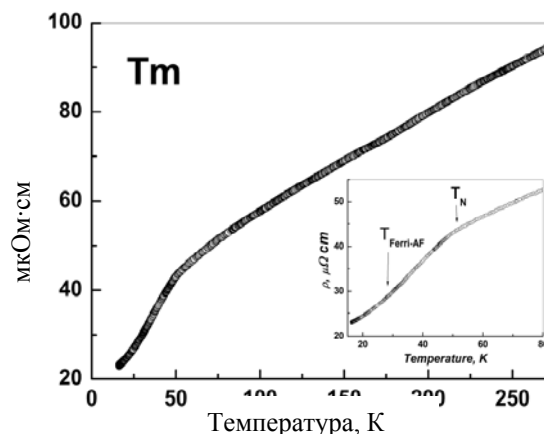


Рис. 1. Температурная зависимость удельного электросопротивления поликристаллического тулия. На врезке показан низкотемпературный участок кривой  $\rho(T)$

На температурной зависимости электропроводности тулия наблюдаются аномалии – два хорошо выраженных перегиба: при ~30 К и при ~55 К. При более высоких температурах зависимость  $\rho(T)$  носит практически линейный характер.

Очевидно, что для установления особенностей поведения температурной зависимости электропроводности в окрестности наблюдаемых аномалий целесообразно рассмотреть температурную зависимость логарифмической производной  $\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT}(T)$  (рис. 2).

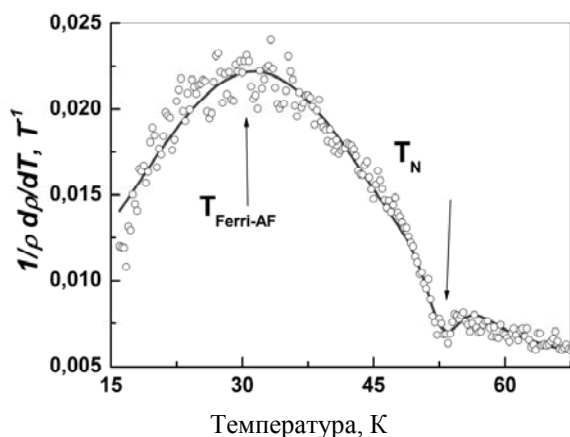


Рис. 2. Температурная зависимость логарифмической производной электропроводности  $\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT}(T)$  для поликристаллического тулия при низких температурах

Как видно, характер поведения производной  $\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT}(T)$  в окрестности аномалий существенно различен:

- при ~55 К - достаточно острый отрицательный “скачок”,
- при ~30 К - широкий положительный максимум.

Приведенные выше данные относительно зависимостей  $\rho(T)$  и  $\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT}(T)$  в окрестности температур фазовых переходов тулия дают все основания сделать следующие выводы.

## ВЫВОДЫ

1. Переход парамагнетизм ↔ спиральный антиферромагнетизм в точке Нееля,  $T_N$ , является фазовым переходом второго рода. Наблюдаемая аномалия на зависимости  $\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT}(T)$  подобна  $\lambda$ -аномалии вторых производных от термодинамических потенциалов, характерной для фазовых переходов второго рода [13].

2. Перегиб на зависимости  $\rho(T)$  и широкий максимум на зависимости  $\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT}(T)$  в окрестности

$T_{AF \leftrightarrow Ferri}$  свидетельствуют о том, что переход спиральный антиферромагнетизм ↔ коллинеарный ферромагнетизм является фазовым переходом первого рода. Наличие низкотемпературного фазового перехода первого рода в тулии открывает перспективы для создания эффективного термомагнитного генератора на основе этого редкоземельного металла.

## ЛИТЕРАТУРА

1. V.V. Derevyanko, V.A. Finkel. Magnetic contribution to electric resistance of gadolinium single crystal at low temperature // *Functional Materials*. 2004, v. 11, p. 30 – 34.
2. В.В. Деревянко, В.А. Финкель. Фазовая H-T-диаграмма поликристаллического тербия // *ФТТ*. 1985, т. 27, с. 2341–2345.
3. V.M. Arzhavtin, V.V. Derevyanko, T.V. Sukhareva, V.A. Finkel. Anomalies of kinetic, magnetic and relaxation properties of dysprosium in the region of helicoidal antiferromagnetic structure // *Functional Materials*. 2006, v. 13, p. 30 – 34.
4. W.C. Koehler, J.W. Cable, E.O. Wollan, M.K. Wilkinson. Magnetic structures of thulium // *Phys. Rev.* 1962, v. 126, p. 1672–1678.
5. T.O. Brun, S.K. Sinha, N. Wakabayashi, et al. Temperature dependence of the periodicity of the magnetic structure of thulium metal // *Phys. Rev. B*. 1970, v. 1, p. 1251–1253.
6. D.D. Davis, B.M. Bozorth. Magnetic properties of thulium metal // *Phys. Rev.* 1960, v. 118, p. 1543–1254.
7. M. Ellerby, K.A. McEwen, J. Jensen. Magnetoresistance and magnetization study of thulium // *Phys. Rev. B*. 1998, v. 57, p. 8416–8423.
8. L.R. Eswards, S. Legvold. Transport properties of thulium single crystals // *Phys. Rev.* 1976, v. 176, p. 753–60.
9. Š. Jánoš, A. Feher, J. Dudáš. The effect of magnetic structure on the electrical resistivity of thulium // *Czech. J. Phys. B*. 1987, v. 37, p. 5–10.
10. J. Dudáš, M. Guzan, S. Gabán, et al. Electrical charge transport anomalies in Ho and Tm thin films at low temperatures // *Czech. J. Phys.* 2004, v. 54, suppl. 4, p. 253–256.
11. Т.В. Сухарева, В.А. Финкель. Термомагнитное преобразование энергии: разработка физических основ и опытная реализация ТМГ на основе редкоземельного металла диспрозия // *ВАНТ. Серия ФРП и РМ*. 2009, № 2, с. 185–190.
12. В.В. Торяник, В.А. Финкель, В.В. Деревянко. Получение ВТСП-материалов с высокой степенью текстуры при помощи магнитной обработки порошков // *ФиХОМ*. 1995, в. 5, с. 55–60.
13. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. *Статистическая физика*. М: «Наука», 1976, 584 с.

Статья поступила в редакцию 09.10.2009 г.

## ОСОБЛИВОСТІ ТЕМПЕРАТУРНОЇ ЗАЛЕЖНОСТІ ЕЛЕКТРООПОРУ РІДКОЗЕМЕЛЬНОГО МЕТАЛУ ТУЛІУ ПРИ НИЗЬКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

*В.В. Дерев'янка, В.А. Фінкель*

Вивчено характер температурної залежності електроопору полікристалічних зразків рідкоземельного металу тулію в діапазоні температур  $\sim 15 \dots 300$  К, що включає температури магнітних фазових переходів парамагнетизм $\leftrightarrow$ спіральний антиферомагнетизм в точці Нееля,  $T_N \sim 55$  К, і спіральний антиферомагнетизм $\leftrightarrow$ колінеарний ферімагнетизм при  $T_{AF \leftrightarrow Ferrim} \sim 30$  К. У  $T_N$  виявлені перегин на кривій температурній залежності питомого електроопору  $\rho(T)$  і гострий мінімум на кривій  $\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT}(T)$ , характерний для фазових переходів другого роду. При  $T_{AF \leftrightarrow Ferrim}$  виявлений широкий максимум на кривій температурній залежності логарифмічної похідної електроопору  $\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT}(T)$ , наявність якого дає підстави вважати, що магнітне перетворення у  $T_{AF \leftrightarrow Ferrim}$  є фазовим переходом першого роду.

## THE FEATURES OF TEMPERATURE DEPENDENCE OF THE ELECTRORESISTANCE OF RARE-EARTH METAL THULIUM AT LOW TEMPERATURES

*V.V. Derevyanko, V.O. Finkel*

The aim of the work is the study of the character of temperature dependence of the electroresistance of polycrystalline specimens of rare-earth metal thulium in the range of temperatures  $\sim 15 \dots 300$  K, including the temperatures of magnetic phases transitions “paramagnetism $\leftrightarrow$ spiral antiferromagnetism” in the Néel point,  $T_N \sim 55$  K, and “spiral antiferromagnetism $\leftrightarrow$ colinear ferrimagnetism” at  $T_{AF \leftrightarrow Ferrim} \sim 30$  K. In  $T_N$  discovered bend on the crooked temperature dependence of resistivity,  $\rho(T)$ , and sharp minimum on to the curve  $\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT}(T)$ , which is characteristic for the phases transitions of the second kind. At  $T_{AF \leftrightarrow Ferrim}$  found out a wide maximum on the curve of the temperature dependence of logarithmic derivate of electroresistance  $\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT}(T)$ . The presence of the effect grounds to suppose that the magnetic transition at  $T_{AF \leftrightarrow Ferrim}$  is the phase transition of the first kind.