

*Краткие сообщения*

## Электро- и теплопроводность МАХ-фазы $Ti_3AlC_2$ при низких температурах

Г.Я. Хаджай<sup>1</sup>, Р.В. Вовк<sup>1,2</sup>, Т.А. Прихна<sup>3</sup>, Э.С. Геворкян<sup>2</sup>, М.В. Кислица<sup>2</sup>,  
А.Л. Соловьев<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, пл. Свободы, 4, г. Харьков, 61022, Украина  
E-mail: rvvovk2017@gmail.com; gkhadjai@univer.kharkov.ua

<sup>2</sup>Украинский государственный университет железнодорожного транспорта  
пл. Фейербаха, 7, г. Харьков, 61050, Украина

<sup>3</sup>Институт сверхтвердых материалов им. В. Бакуля НАН Украины  
ул. Автозаводская, 2, г. Киев, 04074, Украина

<sup>4</sup>Физико-технический институт низких температур им. Б.И. Веркина НАН Украины  
пр. Науки, 47, г. Харьков, 61103, Украина

Статья поступила в редакцию 27 декабря 2017 г., опубликована онлайн 27 марта 2018 г.

Экспериментально исследованы в интервале температур 15–300 К электро- и теплопроводность образца, содержащего 96% МАХ-фазы  $Ti_3AlC_2$  и 4% TiC. Максимум теплопроводности наблюдается около 75 К. При увеличении температуры доля фоновый теплопереноса уменьшается от ~90% при низких температурах до ~40% вблизи комнатной температуры.

Експериментально досліджено в інтервалі температур 15–300 К електро- та теплопровідність зразка, що містить 96% МАХ-фази  $Ti_3AlC_2$  та 4% TiC. Максимум теплопровідності спостерігається близько 75 К. При збільшенні температури частка фоновий теплопереносу зменшується від ~90% при низьких температурах до ~40% поблизу кімнатної температури.

PACS: 65.40.-b Тепловоє свойства кристаллических твердых веществ;  
72.80.-r Проводимость специфических материалов;  
84.37.+q Измерения электрических характеристик (включая напряжение, ток, сопротивление, емкость, индуктивность, импеданс, проводимость и др.).

Ключевые слова: МАХ-фаза, электропроводность, теплопроводность.

Получение новейших материалов полифункционального назначения с заданными технологическими характеристиками [1–5] является одной из наиболее важных задач современной физики твердого тела.

Весьма перспективным классом таких современных материалов являются так называемые МАХ-фазы [1,6–8] с общей формулой  $M_{n+1}AX_n$ , где М — переходной металл, А — элемент III-A или IV-A подгруппы периодической системы, Х — углерод или азот. Эти соединения обладают уникальным сочетанием свойств металлов и керамик, таких как высокие твердость, тугоплавкость и упругость, а также хорошие тепло- и электропроводность.

Большой интерес приобретает исследование механизмов электро- и теплопереноса в этих соединениях, что дает важнейший инструмент для проверки адекватности многочисленных теоретических моделей и поиска эмпирических путей улучшения их технологических характеристик.

В настоящей работе было проведено исследование тепло- и электропроводности образца МАХ-фазы  $Ti_3AlC_2$ .

Образец был изготовлен путем спекания исходного порошка на установке горячего прессования с одновременным пропусканием переменного тока порядка нескольких кА вдоль оси прессования через графито-

вую форму и сам порошок, благодаря чему производился как нагрев, так и очистка поверхности частичек порошка от окислов за счет микроразрядов. Полученный образец содержал 96%  $Ti_3AlC_2$  и 4% TiC.

Электросопротивление полученного образца измеряли по стандартной четырехзондовой методике, теплопроводность — методом одноосного стационарного теплового потока, перепад температуры вдоль образца — термопарой медь–константан.

Экспериментальные результаты для электросопротивления и теплопроводности образца  $Ti_3AlC_2$  в интервале 15–320 К приведены на рис. 1.

В исследованном интервале температур экспериментальные результаты по электрическому сопротивлению можно с высокой степенью точности аппроксимировать формулой [9], которая описывает рассеяние электронов на фононах и дефектах:

$$\rho(T) = \rho_0 + \rho_{ph}^{s-d}(T) = \rho_0 + C_3 \left(\frac{T}{\theta}\right)^3 \int_0^{\theta/T} \frac{x^3 e^x}{(e^x - 1)^2} dx. \quad (1)$$

Здесь  $\rho_0$  — остаточное сопротивление;  $\theta$  — температура Дебая;  $C_3$  — подгоночный коэффициент.

Минимальная погрешность аппроксимации,  $\Delta\rho/\rho \approx 0,5\%$  достигалась при значениях параметров  $\rho_0 = 36,7$  мкОм·см,  $\theta = 611,5$  К,  $C_3 = 161$  мкОм·см.

Полученное значение температуры Дебая согласуется с литературными данными [10].

Отметим, что температурная зависимость сопротивления образца характеризуется достаточно малой величиной  $RRR \approx 2$  ( $RRR = \rho_{ph}/\rho_0 \approx \rho(300\text{ К})/\rho_0(4,2\text{ К})$ ), что свидетельствует о большой концентрации дефектов.

Температурная зависимость теплопроводности образца демонстрирует максимум при  $T_m \approx 75$  К.

В области упругого рассеяния электронов выполняется закон Видемана–Франца [11]

$$\lambda_e \approx L_0 T / \rho. \quad (2)$$

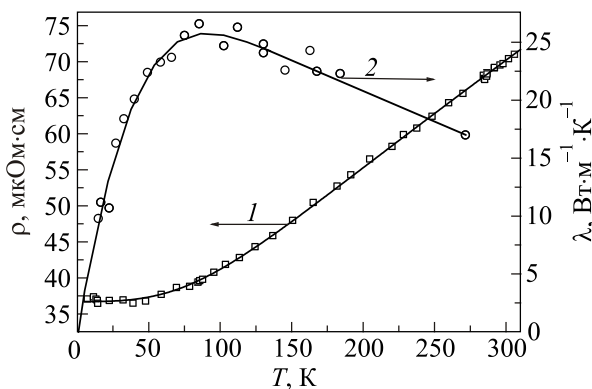


Рис. 1. Электросопротивление (1) и теплопроводность (2) МАХ-фазы  $Ti_3AlC_2$ . Символы — эксперимент, линии проведены: для  $\rho(T)$  — в соответствии с (1); для  $\lambda(T)$  — «на глаз».

Здесь  $\lambda_{e8}$  — электронная теплопроводность,  $L_0 = 2,45 \cdot 10^8$  Вт·Ом·К<sup>-2</sup> — зоммерфельдовское значение числа Лоренца.

Условия упругого рассеяния электронов выполняются при низких температурах, где преобладает упругое рассеяние электронов на дефектах. Соответственно,  $\rho(T) \approx \rho_0$ ,  $\lambda_e \approx L_0 T / \rho_0$ , что при  $T \approx 15$  К дает  $\lambda_e \approx 1$  Вт·м<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup>. Сравнение этой величины с полученным в эксперименте значением низкотемпературной теплопроводности ( $\approx 10$  Вт·м<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup>) показывает, что при низких температурах 90% тепла переносят фононы.

Справа от максимума теплопроводности при достаточно высоких температурах преобладает упругое рассеяние электронов на фононах [11]. Здесь  $\rho(T) \approx \rho_0(1 + \alpha T)$  и  $\lambda_e = L_0 T / \rho(T) \approx \text{const}$ . Оценка по (2) дает  $\lambda_e \approx 10$  Вт·м<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup> для  $T = 300$  К, что составляет около 60% экспериментального значения теплопроводности при этой температуре. Таким образом на долю фононов приходится около 40% перенесенного тепла.

Следовательно, доля фононного теплопереноса в МАХ-фазе  $Ti_3AlC_2$  с ростом температуры уменьшается. Этот результат согласуется с выводами теории [11], поскольку электронная теплопроводность при высоких температурах постоянна, а фононная уменьшается как  $1/T$ .

1. M.A. Hadi, R.V. Vovk, and A. Chroneos, *J. Mater. Science: Mater. Electron.* **27**, 11925 (2016).
2. O.V. Dobrovolskiy, V.V. Sosedkin, R. Sachser, V.A. Shklovskij, R.V. Vovk, and M. Huth, *J. Supercond. Nov. Magn.* **30**, 735 (2017).
3. A.L. Solovjov, L.V. Omelchenko, V.B. Stepanov, R.V. Vovk, H.-U. Habermeier, P. Przyslypski, and K. Rogacki *Phys. Rev. B* **94**, 224505 (2016).
4. E. Sgourou, Y. Panayiotatos, R. Vovk, and A. Chroneos, *Appl. Sciences* **7**, 674 (2017).
5. O.V. Dobrovolskiy, M. Huth, V.A. Shklovskij, and R.V. Vovk, *Scientific Rep.* **7**, 13740 (2017).
6. Т.А. Прихна, А.В. Старостина, Д. Лицендорф, И.А. Петруша, С.А. Ивахненко, А.И. Боримский, Ю.Д. Филатов, М.Г. Лошак, М.А. Серга, В.Н. Ткач, В.З. Туркевич, В.Б. Свердун, С.А. Клименко, Д.В. Туркевич, С.Н. Дуб, Т.В. Басюк, М.В. Карпец, В.Е. Моциль, А.В. Козырев, В.В. Ковыляев, Г.Д. Ильницкая, Т. Кабьюш, П. Шартье, *Сверхтвердые материалы*, № 1, 14 (2014).
7. M. Dahlqvist, B. Alling, and J. Rosén, *Phys. Rev. B* **81**, 220102(R) (2010).
8. M.A. Hadi, M. Roknuzzaman, A. Chroneos, S.H. Naqib, A.K.M.A. Islam, R.V. Vovk, and K. Ostrikov, *Comput. Mater. Science* **137**, 318 (2017).
9. L. Colquitt, *J. Appl. Phys.* **36**, P2454 (1965).
10. X.H. Wang and Y.C. Zhou, *J. Mater. Sci. Technol.* **26**, 385 (2010).
11. Р. Берман, *Теплопроводность твердых тел*, Мир, Москва (1979).

The electrical and thermal conductivity  
of the MAX phase of  $Ti_3AlC_2$  at low temperatures

G.Ya. Khadzhai, R.V. Vovk, T.A. Prichna,  
E.S. Gevorkyan, M.V. Kislitsa, and A.L. Solovjov

The electrical and thermal conductivity of the sample containing 96% of the MAX phase of  $Ti_3AlC_2$  and 4% TiC was experimentally studied in the temperature range 15–300 K. The maximum thermal conductivity is observed at about 75 K. As the temperature increases, the

fraction of phonon heat transfer decreases from ~90% at low temperatures to ~40% near room temperature.

PACS: 65.40.-b Thermal properties of crystalline solids;  
72.80.-r Conductivity of specific materials;  
84.37.+q Measurements in electric variables (including voltage, current, resistance, capacitance, inductance, impedance, and admittance, etc.).

Keywords: MAX phase, electrical conductivity, thermal conductivity.