

05

Тепло- и электропроводность текстурированных подложек для высокотемпературных сверхпроводников из сплавов Ni—Cr—W

© Л.Н. Ханов, А.Б. Батдалов, А.М. Алиев,
С.В. Самойленков, А.Р. Кауль

Институт физики ДагНЦ РАН, Махачкала
E-mail: hanov82@mail.ru

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

Поступило в Редакцию 28 февраля 2012 г.

Измерены электропроводность, теплопроводность, теплоемкость, термодиффузия тонких ленточных образцов из сплава $\text{Ni}_{87.8}\text{Cr}_{9.3}\text{W}_{2.9}$. Показано, что образцы с кубической текстурой обладают лучшими проводящими свойствами по сравнению с нетекстурированными. Разделены электронная и фононная составляющие теплопроводности и прослежена их температурная зависимость. Обнаружены аномалии, связанные с переходом образца в ферромагнитное состояние.

Открытие оксидных высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) с температурой перехода в сверхпроводящее состояние выше 77 К существенно расширило возможности применения сверхпроводников в электронике и электротехнике [1]. Для создания высокоомощного сверхпроводникового оборудования (кабелей, токоограничителей, генераторов, моторов, магнитов) необходимы гибкие провода большой длины. Так как оксидные ВТСП-материалы являются хрупкими соединениями, непосредственное изготовление из них проводов представляется сложной технической задачей. Поэтому наиболее перспективными в этом направлении являются так называемые ВТСП-провода второго поколения, представляющие собой тонкие, гибкие металлические ленты, на которые нанесены текстурированные сверхпроводящие пленки из ВТСП-материалов, преимущественно $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ [2]. Плотность тока в таких ВТСП-слоях достигает значений, представляющих практический

интерес ($> 10^6 \text{ A/cm}^2$ при $T = 77 \text{ K}$ [3,4]). Для предотвращения химического взаимодействия между ВТСП-пленкой и металлической лентой-подложкой располагается изолирующий оксидный буферный слой из таких материалов, как CeO_2 , MnO , LaMnO_3 и др. Обычно в качестве подложек используются сплавы ГЦК-металлов с острой кубической текстурой, формируемой путем холодной прокатки с последующим отжигом. Кубическая текстура металлической ленты крайне важна, так как она передается слою ВТСП через буферный слой, что и обуславливает высокие токонесущие характеристики сверхпроводника.

В последние годы активно ведется поиск немагнитных сплавов на никелевой основе с совершенной кубической текстурой для изготовления текстурированных лент-подложек, обладающих высокой прочностью и повышенной стойкостью к высокотемпературному окислению при нанесении буферных слоев. Отсутствие ферромагнитных свойств материала подложки необходимо для снижения потерь при применении ВТСП-проводов на переменном токе. Сплавы Ni-Cr-W являются перспективными с этой точки зрения материалами, так как можно подобрать такое соотношение компонент сплава, чтобы было возможно формирование кубической текстуры и в то же время температура Кюри подложки не превышала рабочей температуры сверхпроводника (77 K) [5].

Исследование теплопроводности и электропроводности таких подложек является актуальной практической задачей, так как без учета коэффициента теплопроводности используемых материалов нельзя рассчитать и создать ни одно техническое устройство, в том числе на основе высокотемпературных сверхпроводников. Вопросы теплопереноса в случае ВТСП-проводов являются крайне важными еще и потому, что в случае превышения критической плотности тока в сверхпроводнике он переходит в нормальное (резистивное) состояние, что сопровождается выделением большого количества тепла и может привести к перегоранию провода.

В данном сообщении приводятся результаты экспериментальных исследований электросопротивления (ρ), теплопроводности (κ), теплопроводности (C_p) и термодиффузии (η) подложек из сплава $\text{Ni}_{87.8}\text{Cr}_{9.3}\text{W}_{2.9}$ в широкой области температур. Были исследованы два образца данного состава, один из которых был вырезан из ленты сразу после холодной прокатки, а другой — после того, как лента

прошла рекристаллизационный отжиг при $T = 1273$ К, необходимый для получения острой кубической текстуры [5–7].

Исследованные образцы представляли собой тонкие прямоугольные гибкие пластинки размерами $15 \times 3 \times 0.1$ мм. Электросопротивление измерялось четырехзондовым методом, теплопроводность — методом стационарного теплового потока. В качестве датчиков температуры служили медь-константановые ($T > 77$ К) и хромель-константановые ($T < 77$ К) термопары.

Отдельно проводились измерения теплоемкости (C_p) и термодиффузии (η) методом модуляционной калориметрии [8], на основании которых также определялась теплопроводность

$$k = \frac{d}{M} C_p \eta,$$

где M — молярная масса, d — плотность образца. Определенные обоими методами значения теплопроводности согласуются друг с другом в пределах точности эксперимента.

Результаты экспериментальных исследований приведены на рис. 1–4.

Температурная зависимость электросопротивления $\rho(T)$ в исследованном интервале температур, как видно из рис. 1, носит металлический характер, а сами значения электросопротивления находятся в интервале обычных величин, характерных для сложных металлических сплавов.

Из рисунка также видно, что рекристаллизационный отжиг, приводящий к получению совершенной кубической текстуры [6], сопровождается уменьшением электросопротивления образца, что соответствует существующим представлениям о механизмах рассеяния электронов проводимости в металлических сплавах.

Такое поведение $\rho(T)$ характерно для металлических сплавов, в которых скорость рассеяния электронов определяют фононы, дающие в этой области вклад, пропорциональный T ($\tau_{e-ph}^{-1} \sim T$, τ — время релаксации), и статические дефекты, скорость рассеяния на которых не зависит от T , т.е. $\rho(T) = \rho_0 + \alpha T$ (α — температурный коэффициент сопротивления). Тенденция к ослаблению зависимости $\rho(T)$ с увеличением T может означать уменьшение вклада колебаний кристаллической решетки в рассеяние электронов.

Перейдем к обсуждению результатов по теплопроводности. В качестве подложек для ВТСП-пленок желательно иметь материалы с

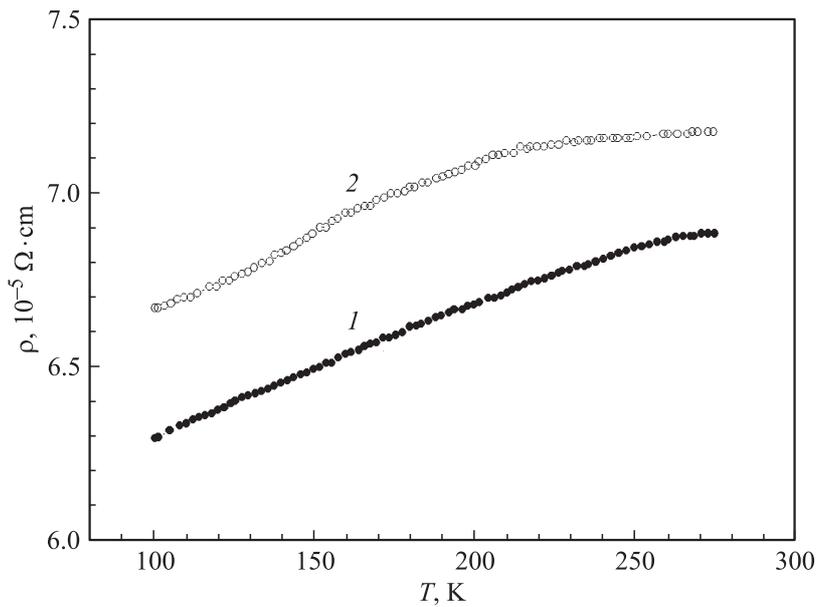


Рис. 1. Температурная зависимость электросопротивления образцов $\text{Ni}_{7.8}\text{Cr}_{9.3}\text{W}_{2.9}$: 1 — текстурированный, 2 — нетекстурированный.

высокой теплопроводностью для ускорения теплообмена. Эффективный теплоперенос крайне важен при переходе части сверхпроводника в нормальное состояние, например при превышении критической плотности тока. В то же время известно, что сплавы как правило, имеют относительно невысокую теплопроводность, причем электронная (κ_e) и фононная (κ_{ph}) составляющие теплопроводности — величины одного порядка [9].

На рис. 2 приведена температурная зависимость теплопроводности отожженного (1) и неотожженного (2) образцов. Как видно из рисунка, поведение κ_{exp} напоминает поведение теплоемкости (рис. 4), что характерно для некристаллических твердых тел [9], в которых основным, зависящим от температуры параметром, входящим в выражение для теплопроводности $\kappa_{ph} = (1/3)C_v l_{ph} v_s$ (C_v — теплоемкость единицы объема, l_{ph} — средняя длина свободного пробега фононов, v_s —

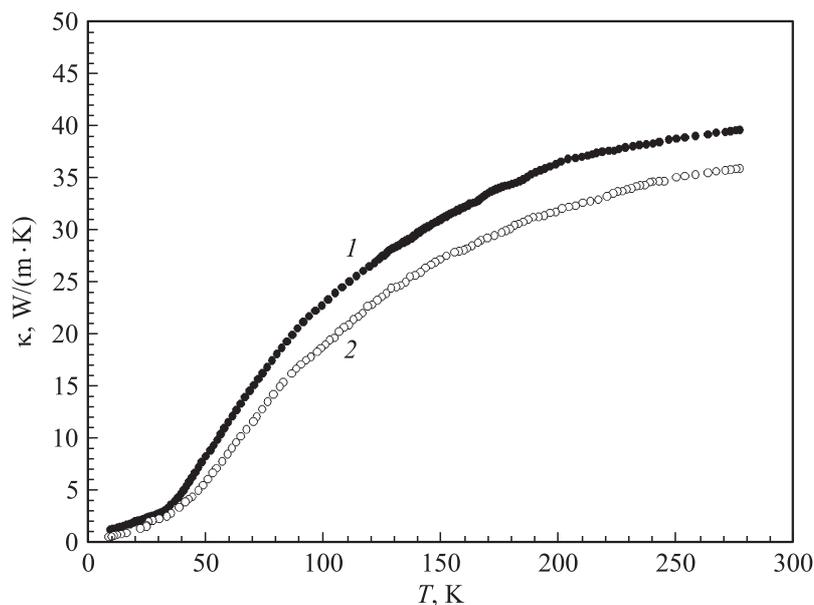


Рис. 2. Зависимость теплопроводности образцов $\text{Ni}_{87.8}\text{Cr}_{9.3}\text{W}_{2.9}$ от температуры: 1 — текстурированный, 2 — нетекстурированный.

скорость звука), является теплоемкость, при этом l_{ph} ограничена структурными несовершенствами решетки.

На рис. 3 приведены результаты разделения электронной и фоновой составляющих теплопроводности текстурированного образца. Отметим, что в чистых металлах $\kappa_e \gg \kappa_{ph}$, так что при анализе $\kappa(T)$ фоновой составляющей теплопроводности можно пренебречь, в то время как в сплавах κ_e и κ_{ph} — сопоставимые величины и такое допущение не правомочно.

Для выделения κ_e в сильно разбавленных сплавах можно воспользоваться соотношением Видемана–Франца $\kappa_e = L_0 T / \rho$, где $L_0 = 2.44 \cdot 10^{-8} \text{ V}^2/\text{K}^2$ — число Лоренца [9]. В таком случае фоновая составляющая находится как разность

$$\kappa_{ph} = \kappa_{exp} - \kappa_e.$$

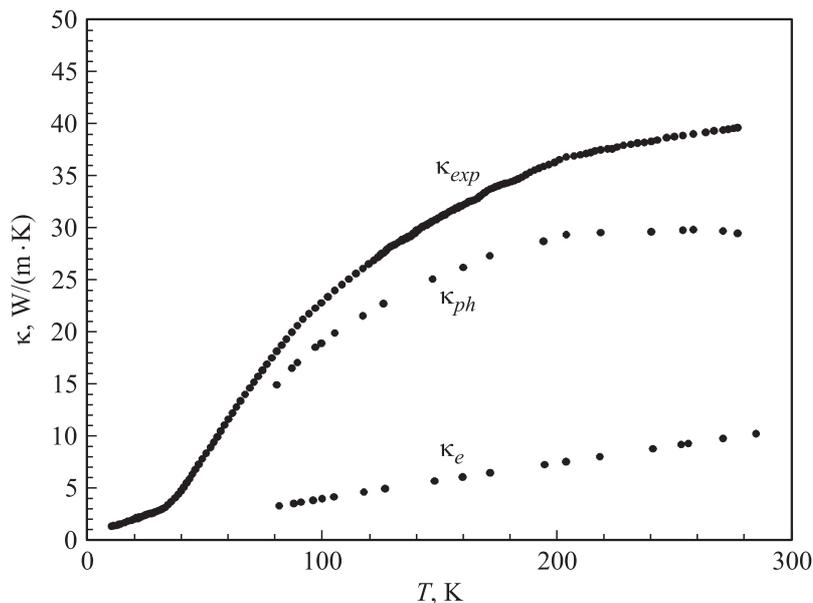


Рис. 3. График зависимости $\kappa = f(T)$ $\text{Ni}_{87.8}\text{Cr}_{9.3}\text{W}_{2.9}$ (текстурированный).

Как видно из рис. 3, κ_e и κ_{ph} — величины одного порядка, причем $\kappa_{ph} > \kappa_e$. Количественное соотношение между ними меняется с температурой: при $T = 100$ К $\kappa_e/\kappa_{exp} = 0.15$, а при $T = 280$ К это отношение равно 0.26. Такое поведение объясняется тем, что при высоких температурах $\kappa_{ph} \sim 1/T$, в то время как κ_e либо постоянна, либо слабо растет с T .

Отсюда следует, что разница в значениях κ_{exp} для текстурированного и нетекстурированного образцов может быть связана с изменением скорости рассеяния как фононов, так и электронов. Анализ показывает, что $\Delta\kappa_e$, оцененное на основании данных по $\rho(T)$ с использованием соотношения Видемана—Франца, на порядок меньше экспериментально наблюдаемой разницы в теплопроводности ($\Delta\kappa_e \approx 0.22$ $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, $\Delta\kappa_{exp} \approx 3.5$ $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ при 100 К), т.е. формирование острой кубической текстуры влияет в основном на фоновую теплопроводность.

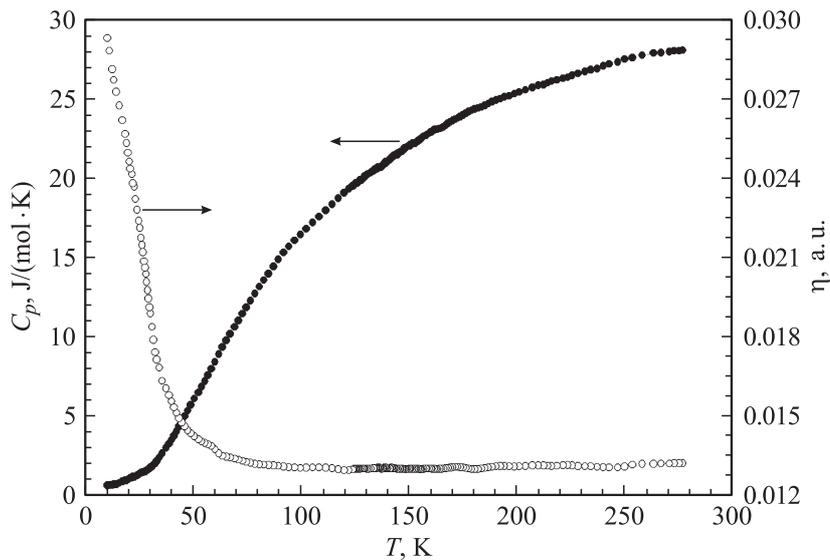


Рис. 4. Температурная зависимость теплоемкости и термодиффузии $\text{Ni}_{87.8}\text{Cr}_{9.3}\text{W}_{2.9}$ (образец № 1).

Из рис. 3 также следует, что κ_{ph} проходит через растянутый по температуре максимум, что может означать смену доминирующего механизма рассеяния фононов от фонон-дефектного к фонон-фононному.

Отметим еще одну особенность в поведении $C_p(T)$ и $\kappa(T)$ при низких температурах, которая хорошо видна на рис. 3 и 4 в виде изломов на кривых при $T \approx 40$ К. Согласно [3], при $T = 45$ К ленточный образец $\text{Ni}_{87.8}\text{Cr}_{9.3}\text{W}_{2.9}$ переходит в ферромагнитное состояние, с чем, по-видимому, и связана наблюдаемая особенность.

В чистых диэлектриках, где фононный механизм теплопереноса является доминирующим, термодиффузия η , по сути, представляет собой среднюю длину свободного пробега фононов ($\eta = (1/3)v_S l_{ph}$). В данном случае в теплопередаче участвуют и фононы и электроны, а наблюдаемый ход $\eta(T)$ является суммарным эффектом. Тем не менее примечательно, что суммарная длина свободного пробега носителей тепла в широкой области температур остается постоянной величиной

(рис. 4, справа), что согласуется с нашими предыдущими рассуждениями.

Таким образом, измерены κ , ρ , C_p , η ленточных образцов сплава на основе никеля в холоднокатанном и текстурированном виде. Обнаружены различия в поведении $\kappa(T)$ и $\rho(T)$, связанные с образованием кубической текстуры в исследованных образцах при отжиге. Выделены электронная и фононная составляющие теплопроводности, обнаружены особенности, связанные с переходом образцов в ферромагнитное состояние.

Показано, что формирование кубической текстуры сопровождается увеличением фононной составляющей теплопроводности.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 09-08-96533) и в рамках программы ОФН РАН „Сильнокоррелированные электроны в твердых телах и структурах“.

Список литературы

- [1] *Голя А.* Токонесущие ленты второго поколения на основе высокотемпературных сверхпроводников / Пер. с англ. М.: Изд-во ЛКИ, 2009. 432 с.
- [2] *Eickemeyer J., Huhne R., Rodig C.* et al. // *Supercond. Sci. Technol.* 2008. V. 21. P. 1–7.
- [3] *Toton R.I., Kursumovic A., Majoros M.* et al. // *Physica C.* 2003. V. 383. P. 323–336.
- [4] *Huhne R., Subramanya Sarma V., Okai D.* et al. // *Supercond. Sci. Technol.* 2007. V. 20. P. 709–714.
- [5] *Родионов Д.П., Гервасьева И.В., Хлебникова Ю.В.* и др. // *Физика металлов и металловедения.* 2009. Т. 107. № 2. С. 198–206.
- [6] *Родионов Д.П., Гервасьева И.В., Хлебникова Ю.В.* и др. // *Письма в ЖТФ.* 2010. Т. 36. В. 9. С. 1–10.
- [7] *Досовицкий Г.А.* / Дис. . . канд. хим. наук. М.: МГУ, 2009.
- [8] *Абдулвагидов Ш.Б., Шахшаев Г.М., Камилев И.К.* // *ПТЭ.* 1996. № 5. С. 134.
- [9] *Берман Р.* Теплопроводность твердых тел. М.: Мир, 1979. 286 с.