

Нестандартное поведение теплопроводности кристаллической решетки и числа Лоренца в системе $\text{YbIn}_{1-x}\text{Cu}_{4+x}$

© Л.С. Парфеньева, И.А. Смирнов, Х. Мисиорек*, Я. Муха*, А. Ежовский*, Ф. Риттер**, В. Ассмус**

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

* Институт низких температур и структурных исследований Польской академии наук,
50-950 Вроцлав, Польша

** Университет им. И.В. Гёте,
60-054 Франкфурт-на-Майне, Германия

E-mail: Igor.Smirnov@pop.ioffe.rssi.ru

(Поступила в Редакцию 3 октября 2001 г.)

В области гомогенности системы Yb-In-Cu ($\text{YbIn}_{1-x}\text{Cu}_{4+x}$) получены образцы различного состава — от стехиометрического (YbInCu_4) до $\text{YbIn}_{0.905}\text{Cu}_{4.095}$. Для них измерены постоянная кристаллической решетки (при 300 К и в интервале температур 20–100 К), общая теплопроводность и удельное электросопротивление (в интервале 4–300 К). Для всех исследованных составов при $T_v \simeq 40\text{--}80$ К наблюдался изоструктурный фазовый переход, обусловленный изменением валентности ионов Yb. Показано, что в области гомогенности $\text{YbIn}_{1-x}\text{Cu}_{4+x}$ теплопроводность кристаллической решетки (κ_{ph}) уменьшается с ростом x , κ_{ph} при $T > T_v$ растет с повышением температуры, а число Лоренца (входящее в закон Видемана–Франца для электронной компоненты теплопроводности) для „легкой“ тяжелофермионной системы, к которой при $T < T_v$ относится $\text{YbIn}_{1-x}\text{Cu}_{4+x}$, ведет себя так же, как и в классических тяжелофермионных системах. В результате термоциклирования (при переходе через T_v) в решетке $\text{YbIn}_{1-x}\text{Cu}_{4+x}$ возникают напряжения, которые приводят к росту удельного электросопротивления и уменьшению теплопроводности. „Мягкий отжиг“ („отдых“ образцов в течение длительного времени при комнатной температуре) приводит к исчезновению эффекта. Делаются заключения о природе обнаруженных эффектов.

Работа проводилась в рамках двусторонних соглашений между Российской академией наук, Немецким Научным Обществом (Германия) и Польской академией наук и выполнялась при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 99-02-18078) и Польского комитета научных исследований (грант № 2 P03В 129-19).

YbInCu_4 является интересным объектом исследования. В этом соединении, имеющем кубическую решетку типа AuBe_5 , при атмосферном давлении и $T_v \sim 40\text{--}80$ К происходит изоструктурный фазовый переход, который сопровождается изменением валентности Yb от 3 (в высокотемпературной фазе, $T > T_v$) до 2.9 (в низкотемпературной фазе, $T < T_v$). Высокотемпературная фаза является полуметаллом, а низкотемпературная относится к классу „легких“ тяжелофермионных систем (light heavy-fermion system). Параметр γ (коэффициент при линейном по температуре члене в электронной теплоемкости) для YbInCu_4 при $T < T_v$ равен ~ 50 мДж/моль · К². Подробнее со свойствами этого интересного материала можно ознакомиться в [1,2].

В литературе температуру фазового перехода $T_v \sim 40\text{--}80$ К часто относят к составу YbInCu_4 . Однако в системе Yb-In-Cu в области гомогенности ($\text{YbIn}_{1-x}\text{Cu}_{4+x}$) наблюдается отступление от точного состава. Стехиометрический YbInCu_4 имеет $T_v \sim 40$ К. При смещении состава к $\text{YbIn}_{0.8}\text{Cu}_{4.2}$ T_v возрастает до 70–80 К [3–6].

Фазовая диаграмма Yb-In-Cu была исследована в [5,6] в наиболее интересной области составов (рис. 1, а). Область гомогенности фазы Yb-In-Cu распространяется от номинального состава YbInCu_4 в сторону состава с большим содержанием Cu, причем Cu начинает занимать места In ($\text{Yb}(\text{In}_{1-x}\text{Cu}_x)\text{Cu}_4$), а T_v при этом

сдвигается с 40 К к 70–80 К. Одновременно изменяется и характер фазового перехода — от резкого до постепенного.

В [7,8] мы исследовали теплопроводность двух образцов, отвечающих составу $\text{YbIn}_{0.83}\text{Cu}_{4.17}$,¹ который, согласно фазовой диаграмме (рис. 1, а), находится вблизи $\text{YbIn}_{0.8}\text{Cu}_{4.2}$, имеющего максимальную температуру плавления.

В [8] было показано, что 1) число Лоренца L в законе Видемана–Франца для электронной составляющей теплопроводности (κ_e) в „легкой“ тяжелофермионной системе (к которой при $T < T_v$ можно отнести $\text{YbIn}_{0.83}\text{Cu}_{4.17}$) ведет себя так же, как в классических тяжелофермионных системах; 2) решеточная составляющая теплопроводности (κ_{ph}) в $\text{YbIn}_{0.83}\text{Cu}_{4.17}$ при $T > T_v$ возрастает с ростом температуры по закону, близкому к $T^{0.3}$.

Такое поведение $\kappa_{\text{ph}}(T)$, характерное для аморфных или сильнодефектных материалов, в [8] связывалось с замещением в решетке YbInCu_4 индия медью и об-

¹ В [8] исследовались образцы, приготовленные в двух различных лабораториях: в ФТИ РАН (Санкт-Петербург, Россия) — образец 1P; в Университете Франкфурта-на-Майне (Германия) — образец 2F. Теплопроводность стехиометрического образца YbInCu_4 ($T \sim 40$ К) была измерена в Техническом университете (Вена, Австрия) [9]. Полученные в [9] экспериментальные данные подробно не анализировались.

разованием при этом достаточно большого количества дефектов, на которых могли рассеиваться фононы.

Из вышесказанного становятся ясными цели настоящей работы, которые состояли в следующем.

1) Приготовить набор образцов из области гомогенности, включая стехиометрический состав, отвечающий $T_v \sim 40$ К.

2) Провести исследование $\kappa_{ph}(T)$ и $L(T)$ образцов в области гомогенности системы $YbIn_{1-x}Cu_{4+x}$ и выяснить, как будет изменяться κ_{ph} в зависимости от x и как будут вести себя $\kappa_{ph}(T)$ при $T > T_v$ и $L(T)$ при $T < T_v$ в стехиометрическом образце. При этом было интересно установить, будет ли наблюдаться для этого состава рост κ_{ph} при $T > T_v$, поскольку, как следует из фазовой диаграммы, показанной на рис. 1, *a*, замещения индия медью в стехиометрическом составе не должно быть.

1. Приготовление образцов и методика эксперимента

В [5,6] было показано, что состав получающегося кристалла зависит от способа его приготовления. Поликристаллические литые образцы для исследования в настоящей работе были получены с помощью вертикального метода Бриджмена при направленной кристаллизации расплава с исходной концентрацией Cu, несколько меньшей по сравнению со стехиометрией. Затвердевание расплава начиналось с образования кристаллов, имеющих температуру фазового перехода $T_v \sim 70$ К. На следующей стадии роста начинал кристаллизоваться материал с T_v вблизи 40 К.

Плавление вещества проводилось в заваренных в атмосфере аргона танталовых тиглях [6]. Использовалась печь с нагревом с помощью электронного луча для того, чтобы при росте кристаллов обеспечить достаточно крутой температурный градиент в тигле на границе между жидкой и твердой фазами. Полученный слиток был разрезан на пять частей (образцы № 1–5 на рис. 1, *b*). Постоянная кристаллической решетки (*a*) этих образцов была измерена при 300 К (табл. 1) и в интервале температур 20–100 К (рис. 2). Зависимость $a(T)$ для образца № 5 хорошо совпала с данными работы [10] для $YbInCu_4$ с $T_v \sim 40$ К. Все образцы были монофазными и имели кубическую решетку типа $AuBe_5$.

Полная теплопроводность κ_{tot} и удельное электро-сопротивление ρ измерялись в интервале температур 4–300 К на установке, аналогичной использованной в [11].

Таблица 1. Значения постоянной кристаллической решетки (*a*) при 300 К для образцов № 1–4 системы $YbIn_{1-x}Cu_{4+x}$

Номер образца	<i>a</i> , Å
1	7.152 (2)
2	7.154 (5)
3	7.161 (3)
4	7.164 (4)

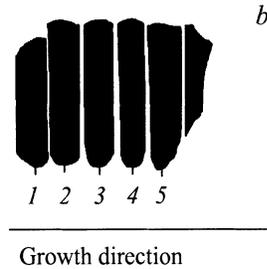
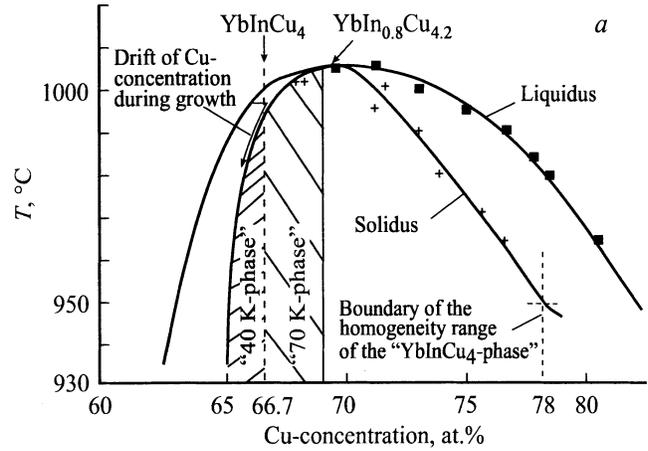


Рис. 1. *a*) Фазовая диаграмма системы Yb–In–Cu ($YbIn_{1-x}Cu_{4+x}$). *b*) Схематическое изображение образцов для исследований, вырезанных из полученного слитка. Цифры 1–5 соответствуют номерам образцов.

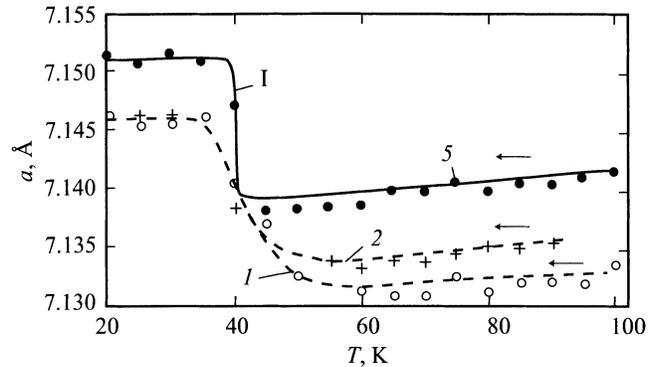


Рис. 2. Температурная зависимость постоянной кристаллической решетки *a* в системе $YbIn_{1-x}Cu_{4+x}$. Сплошная кривая I — данные работы [10]. Цифры у кривых — номера образцов.

2. Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис. 3, *a, b* приведены температурные зависимости κ_{tot} и ρ для образцов № 1 и 4,² полученные при цикле измерений от 300 до 4 К. Следует отметить, что $\kappa_{tot}(T)$

² Нами была измерена также зависимость $\rho(T)$ образца № 3.

Таблица 2. Значения T_v , полученные из измерений $a(T)$, $\rho(T)$ и $\kappa_{\text{tot}}(T)$ для образцов № 1–5, и соответствующие им величины x для системы $\text{YbIn}_{1-x}\text{Cu}_{4+x}$, определенные из зависимости $T_v(x)$ работы [12]

Номер образца	T_v , К			Среднее значение T_v , К	x	Состав образца
	$a(T)$	$\rho(T)$	$\kappa_{\text{tot}}(T)$			
1	60	60	60	60	0.095	$\text{YbIn}_{0.905}\text{Cu}_{4.095}$
2	55	–	–	55	0.060	$\text{YbIn}_{0.94}\text{Cu}_{4.06}$
3	–	48	–	48	0.038	$\text{YbIn}_{0.962}\text{Cu}_{4.038}$
4	–	44	42	43	0.015	$\text{YbIn}_{0.985}\text{Cu}_{4.015}$
5	40	–	–	40	0	YbInCu_4

для образца № 4 достаточно хорошо совпала с $\kappa_{\text{tot}}(T)$ для стехиометрического образца YbInCu_4 с $T \sim 40$ К из работы [9].

Прежде чем перейти к анализу полученных экспериментальных данных, попытаемся установить состав полученных нами образцов $\text{YbIn}_{1-x}\text{Cu}_{4+x}$. Для этого из зависимостей $a(T)$, $\rho(T)$ и $\kappa_{\text{tot}}(T)$ мы оценили (хотя и недостаточно точно) величины T_v для всех пяти исследованных образцов и затем с помощью графика $T_v(x)$, полученного в [12] для системы $\text{YbIn}_{1-x}\text{Cu}_{4+x}$, определили x и примерный состав образцов (табл. 2).

Для измерений $\kappa_{\text{tot}}(T)$ и $\rho(T)$ мы выбрали два крайних по составу образца: № 1 и 4. К сожалению, из-за

механических дефектов, возникших при резке слитка, образец № 5, который был стехиометрическим, оказался не пригодным для измерений $\rho(T)$ и $\kappa_{\text{tot}}(T)$.

Согласно литературным данным, все составы в области гомогенности $\text{YbIn}_{1-x}\text{Cu}_{4+x}$ в интервалах температур $T < T_v$ и $T > T_v$ соответственно являются металлами и полуметаллами, так что κ_{tot} должна включать в себя как электронную, так и решеточную составляющую

$$\kappa_{\text{tot}} = \kappa_e + \kappa_{\text{ph}}, \quad (1)$$

κ_e рассчитывается по закону Видемана–Франца

$$\kappa_e = LT/\rho. \quad (2)$$

Исследованные образцы нельзя отнести к разряду „чистых“ металлов и полуметаллов, поэтому, согласно классической теории теплопроводности, для них $L = L_0$ ($L_0 = 2.45 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \Omega/\text{K}^2$ — зоммерфельдовское значение числа Лоренца). Для выделения $\kappa_{\text{ph}}(T)$ из $\kappa_{\text{tot}}(T)$ и расчета $L_x/L_0(T)$ для области температур $T < T_v$ мы применили методику, которая была подробно изложена нами в [8].

2.1. Особенности поведения решеточной составляющей теплопроводности. Для области $T > T_v$, где все исследованные образцы являются „грязными“ полуметаллами, использование в (2) $L = L_0$ не вызывает сомнения. Для этого интервала температур зависимости $\kappa_{\text{ph}}(T)$ образцов № 1 и 4, вычисленные по (1) и (2) при $L = L_0$ так же, как и для образцов 1P и 2F состава $\text{YbIn}_{0.83}\text{Cu}_{4.17}$ [8], растут с повышением температуры по степенному закону $\kappa_{\text{ph}} \sim T^n$ с $n \sim 0.3–0.38$, что близко к значениям n для образцов 1P и 2F [8] (рис. 4, a).

Таким образом, мы получили ответ на один из вопросов, поставленных перед исследованием: $\kappa_{\text{ph}}(T)$ образца № 4, близкого к стехиометрическому ($T_v \sim 43$ К), при высоких температурах ведет себя так же, как и $\kappa_{\text{ph}}(T)$ $\text{YbIn}_{0.83}\text{Cu}_{4.17}$. Поэтому предположение о том, что рост $\kappa_{\text{ph}}(T)$ в образцах системы $\text{YbIn}_{1-x}\text{Cu}_{4+x}$ обусловлен их сильной дефектностью, возникающей при замещении меди индием, становится сомнительным. Однако, возможно, и в стехиометрическом YbInCu_4 имеются дефекты, связанные с наличием некоторого „разупорядочения“ в решетке. Но природа и источник такого „разупорядочения“ пока не установлены и требуют дополнительных исследований. Не исключено, что

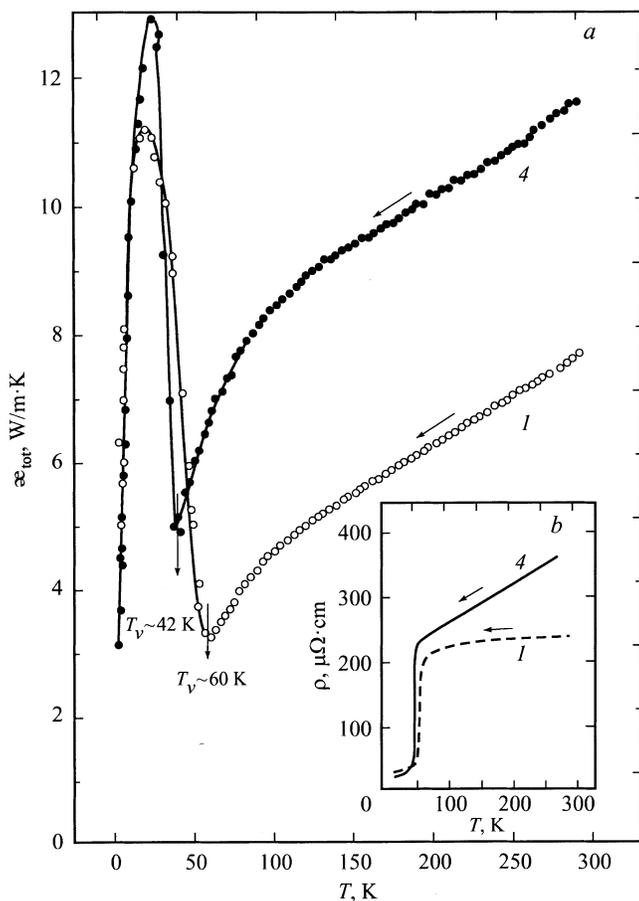


Рис. 3. Температурные зависимости κ_{tot} (a) и ρ (b) для образцов № 1 и 4.

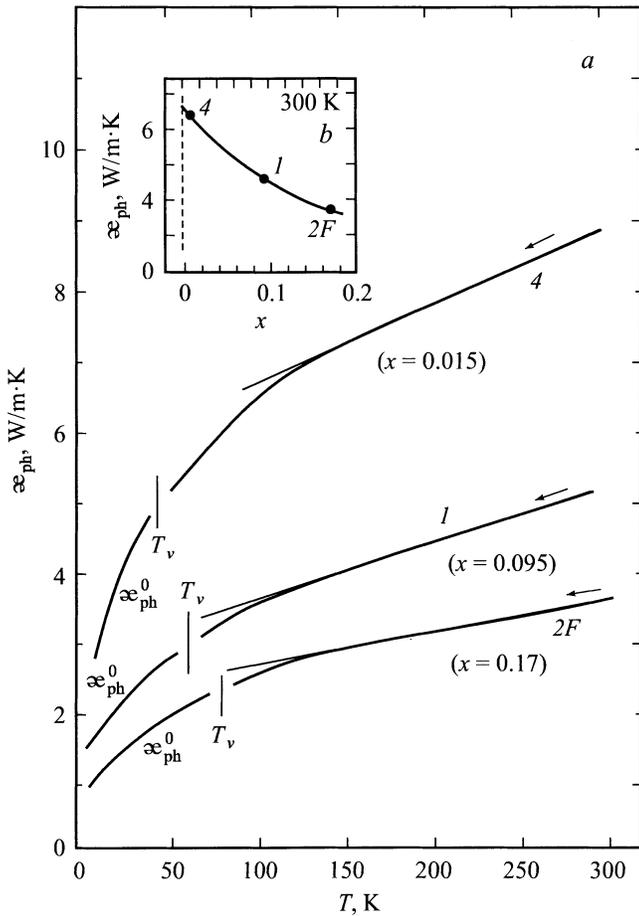


Рис. 4. Зависимости κ_{ph} от температуры (a) и от x при 300 K (b) для образцов № 1, 4 и образца 2F из [8] системы $\text{YbIn}_{1-x}\text{Cu}_{4+x}$. Пояснения для κ_{ph}^0 см. в тексте и работе [8].

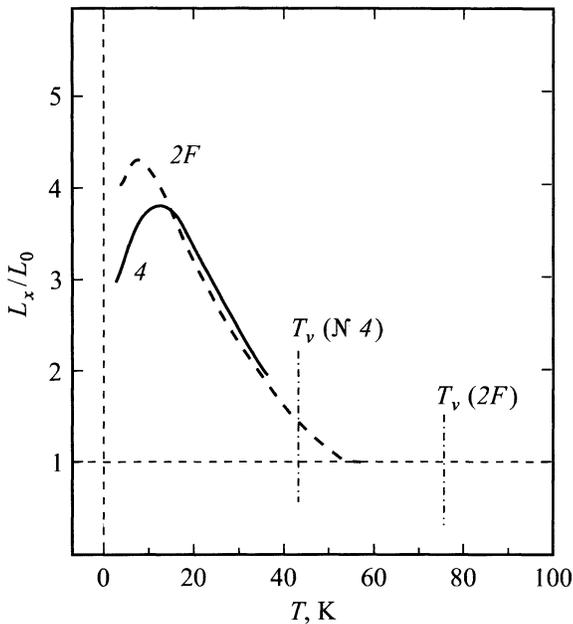


Рис. 5. Температурная зависимость L_x/L_0 для образцов № 4 ($\text{YbIn}_{0.985}\text{Cu}_{4.015}$) и 2F ($\text{YbIn}_{0.83}\text{Cu}_{4.17}$) [8].

такое поведение $\kappa_{ph}(T)$ присуще (по каким-то другим причинам) определенной группе тяжелофермионных материалов [8].

На рис. 4, b приведены значения κ_{ph} (300 K) для трех составов в области гомогенности системы $\text{YbIn}_{1-x}\text{Cu}_{4+x}$. Как и ожидалось, κ_{ph} уменьшается с ростом x.

2.2. Особенности поведения числа Лоренца. Исследуем теперь характер изменения отношения $L_x/L_0(T)$ в области $T < T_v$ для близкого к стехиометрии образца № 4. Следуя методике, разработанной в [8] (экстраполяция по степенному закону значения κ_{ph} из области высоких температур на область $T < T_v$ (κ_{ph}^0 на рис. 4) и определение $L_x/L_0(T)$ из зависимости $\kappa_e = L_x T / \rho = \kappa_{tot} - \kappa_{ph}$), мы вычислили $L_x/L_0(T)$ для образца № 4 в области температур 10–35 K ($T < T_v$) и сравнили полученные значения с $L_x/L_0(T)$ для образца 2F [8], имеющего состав $\text{YbIn}_{0.83}\text{Cu}_{4.17}$. Оказалось, что они практически совпадают друг с другом и ведут себя, как в классических тяжелофермионных системах [8,13] (рис. 5).

Таким образом, мы получили ответ еще на один вопрос, поставленный в настоящей работе. Поведение $L_x/L_0(T)$ в области гомогенности имеет одинаковый характер для классических и „легких“ тяжелофермионных систем.

3. Влияние на κ_{ph} дефектов, возникающих при фазовом переходе

В YbInCu_4 при измерении температурной зависимости удельного электросопротивления был обнаружен интересный эффект [14]. При термоциклировании (прохождение через T_v) наблюдалось увеличение ρ в областях $T > T_v$ и $T < T_v$ (рис. 6, a), причем ρ возрастало значительно сильнее в области $T > T_v$ (более чем в 2 раза). Многократное циклирование приводило к более сильному росту ρ (особенно при $T > T_v$). В процессе термоциклирования микротрещины в образце не возникали и постоянная кристаллической решетки не изменялась [10]. Обнаруженный эффект авторы [14] связывали с появлением напряжений в решетке YbInCu_4 , поскольку при фазовом переходе происходит изменение валентности Yb с 3 до 2.9 (при переходе T_v из области высоких температур) и с 2.9 до 3 (при переходе из области низких температур).

Теплопроводность чувствительна к появлению в материале различного рода дефектов [14]. Поэтому логично исследовать влияние на теплопроводность дефектов, возникающих при термоциклировании в системе $\text{YbIn}_{1-x}\text{Cu}_{4+x}$.

На рис. 6, b и 7, a, b приведены температурные зависимости ρ и κ_{tot} , полученные нами при термоциклировании образцов № 3 и 4.³ Данные для $\rho(T)$ оказались аналогичными результатам работы [14] (ср. рис. 6, a и b).

³ Аналогичные измерения были проведены и для образца № 1.

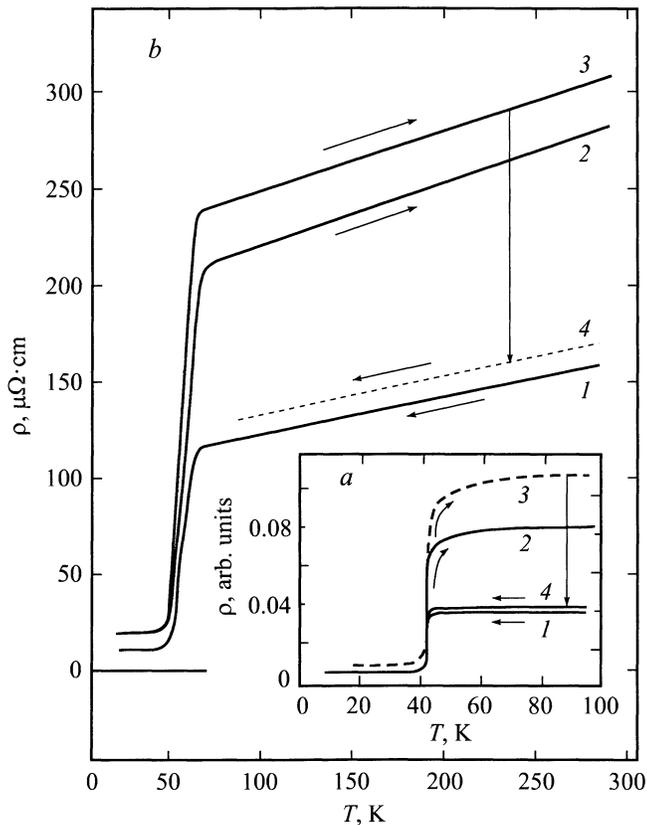


Рис. 6. *a*) Температурная зависимость ρ (в относительных единицах) при термоциклировании YbInCu_4 [4]. 1 — охлаждение от 100 до 4 К (прямой ход); 2 — первый цикл отогрева (обратный ход от 4 до 100 К); 3 — второй цикл отогрева (обратный ход от 4 до 100 К) образца, вновь охлажденного до 4 К после первого цикла отогрева; 4 — после отжига образца, прошедшего второй цикл отогрева (отжиг в течение нескольких часов при 300°C). *b*) Температурная зависимость ρ для образца № 3. 1 — измерение при охлаждении от 300 до 4 К (прямой ход); 2 — первый цикл отогрева (обратный ход от 4 до 300 К); 3 — второй цикл отогрева (обратный ход от 4 до 300 К) образца, который вновь охлаждается до 4 К после первого цикла отогрева; 4 — измерения от 300 до 4 К образца, прошедшего цикл 3, после выдержки его при комнатной температуре в течение месяца.

Заметное уменьшение κ_{tot} обнаружено для образцов № 4 (рис. 7, *a*) и № 1 как в области $T < T_v$, так и при $T > T_v$. Как и в случае термоциклирования для $\rho(T)$, больший эффект наблюдается для области $T > T_v$.

Наибольшее число измерений мы провели на образце № 4 (рис. 7). Как видно из этого рисунка, после термоциклирования наблюдается значительное уменьшение κ_{tot} (кривая 2 на рис. 7, *a*).⁴ Мы обнаружили интересный эффект. Дефекты, появившиеся в образце после термоциклирования, почти полностью исчезают после „мягкого отжига“ — „отдыха“ образца при ком-

⁴ Мы измерили постоянную кристаллической решетки образца № 4 до и после термоциклирования. Так же как и в [10], изменения ее величины мы не обнаружили.

натной температуре в течение месяца (кривая 3 на рис. 7, *a*). Было интересно оценить влияние дефектов, возникающих при термоциклировании, на κ_{ph} .

Рассмотрим область $T > T_v$, для которой, как уже отмечалось выше, при расчете κ_e можно с уверенностью считать, что $L = L_0$. На рис. 8 приведены данные для $\kappa_{\text{ph}}(T)$ образцов № 1 и 4, вычисленные по (1) и (2) с L/L_0 . Прямые 1, 4 (рис. 8) относятся к образцам № 1, 4, не прошедшим термоциклирование, а прямые 1а, 4а относятся к тем же образцам (№ 1, 4), прошедшим термоциклирование. Видно, что $\Delta\kappa_{\text{ph}}$ (рис. 8) для образца № 4, близкого по составу к стехиометрическому ($\text{YbIn}_{0.985}\text{Cu}_{4.015}$), во всем интервале температур больше, чем для образца № 1 ($\text{YbIn}_{0.905}\text{Cu}_{4.095}$).

Таким образом, можно сделать вывод, что дефекты, возникающие в $\text{YbIn}_{1-x}\text{Cu}_{4+x}$ при термоциклировании, уменьшают κ_{ph} . Электропроводность $\sigma = 1/\rho$ при термоциклировании снижается сильнее по сравнению с

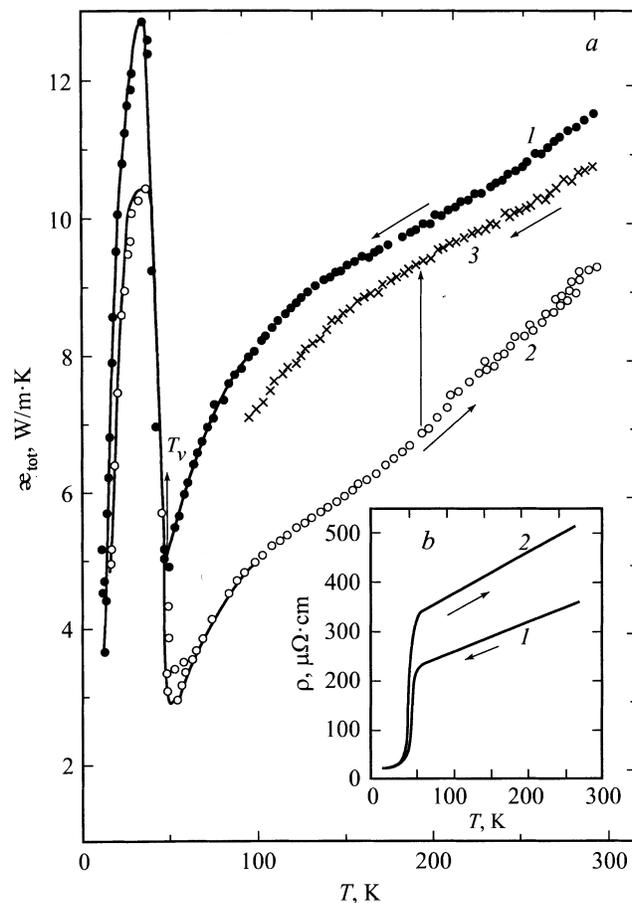


Рис. 7. Температурные зависимости κ_{tot} (*a*) и ρ (*b*) для образца № 4. *a*) 1 — прямой ход (300 → 5 К); 2 — обратный ход (5 → 300 К); 3 — прямой ход (300 → 80 К), измерение образца, который выдерживался 30 дней при комнатной температуре (предварительно был измерен в цикле 2). *b*) 1 — прямой ход (300 → 5 К), измерение образца, соответствующего кривой 3 на рис. 7, *a*; 2 — обратный ход (5 → 300 К), измерение образца, соответствующего кривой 2 на рис. 7, *a*. Часть полученных данных для $\rho(T)$ образца № 4 на графике не представлена.

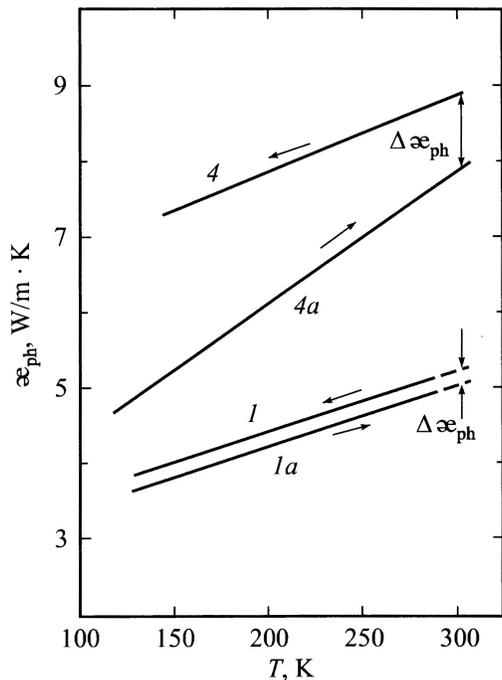


Рис. 8. Температурная зависимость α_{ph} образцов № 1 и 4 в области температур $T > T_v$. 4 и 1 — измерения от 300 до 5 К (прямой ход), 4а и 1а — измерения от 5 до 300 К (обратный ход). $\Delta\alpha_{ph}$ — изменение теплопроводности кристаллической решетки при термоциклировании.

уменьшением α_{ph} . Длительный „мягкий отжиг“ образцов при комнатной температуре приводит к исчезновению эффекта в $\rho(T)$, $\kappa_{tot}(T)$ и $\alpha_{ph}(T)$.

К сожалению, из анализа поведения $\alpha_{ph}(T)$ до и после термоциклирования не удастся определить вид возникающих дефектов. Возможно, справедливо утверждение авторов [14], что в решетке возникают напряжения, связанные с изменением валентности иона Yb при фазовом переходе. Однако не исключено, что при термоциклировании происходят лишь небольшие смещения Cu из мест равновесия.

Авторы выражают благодарность Н.Ф. Картенко и Н.В. Шаренковой за измерение постоянной кристаллической решетки образцов при 300 К.

Список литературы

- [1] J.L. Sarrao, C.D. Immer, Z. Fisk, C.H. Booth, E. Figueroa, J.M. Lawrence, R. Modler, A.L. Cornelius, M.F. Hundley, C.H. Kwei, J.D. Thompson, F. Bridges. *Phys. Rev.* **B59**, 10, 6855 (1999).
- [2] A.V. Goltsev, G. Bruls. *Phys. Rev.* **B63**, 15, 155 109 (2001).
- [3] B. Kindler, D. Finsterbusch, R. Graf, F. Ritter, W. Assmus, B. Lüthi. *Phys. Rev.* **B50**, 2, 704 (1994).
- [4] J.L. Sarrao, C.D. Immer, C.L. Benton, Z. Fisk, J.M. Lawrence, D. Mandrus, J.D. Thompson. *Phys. Rev.* **B54**, 17, 12 207 (1996).

- [5] A. Löffert, M.L. Aigner, F. Ritter, W. Assmus. *Cryst. Res. Technol.* **34**, 2, 267 (1999).
- [6] A. Löffert, S. Hautsch, F. Ritter, W. Assmus. *Physica* **B259**, 134 (1999).
- [7] И.А. Смирнов, Л.С. Парфеньева, А. Ежовский, Х. Ми-сёрек, С. Кремפל-Хессе, Ф. Риггер, В. Ассмус. *ФТТ* **41**, 9, 1548 (1999).
- [8] А.В. Голубков, Л.С. Парфеньева, И.А. Смирнов, Х. Ми-сиорек, Я. Муха, А. Ежовский, Ф. Риггер, В. Ассмус. *ФТТ* **44**, 6, 000 (2002).
- [9] T. Bauer, E. Gratz, G. Hutflesz, A.K. Bhattacharjee, B. Coqblin. *Physica* **B186/188**, 494 (1993).
- [10] J.M. Lawrence, S.M. Shapiro, J.L. Sarrao, Z. Fisk. *Phys. Rev.* **B55**, 21, 14 467 (1997).
- [11] A. Jezowski, J. Mucha, G. Pompe. *J. Phys. D: Appl. Phys.* **20**, 1500 (1987).
- [12] K. Yoshimura, N. Tsujii, K. Sorada, T. Kawabata, H. Mitamura, T. Goto, K. Kosuge. *Physica* **B281/282**, 141 (2000).
- [13] V.I. Belitsky, A.V. Goltsev, *Physica* **B172**, 459 (1991).
- [14] В.С. Оскотский, И.А. Смирнов. Дефекты в кристаллах и теплопроводность. Наука, Л. (1972). 151 с.