Физика низких температур, 1995, т. 21, № 9, с. 906–911 УДК 538.945

Частота электромагнитного поля, на которой омическое сопротивление ВТСП не зависит от температуры

В. М. Дмитриев[1,2], М. Н. Офицеров[1], Н. Н. Пренцлау[1]

[1]*Физико-технический институт низких температур им. Б. И. Веркина НАН Украины, Украина, 310164, г. Харьков, пр. Ленина 47*
E-mail:dmitriev@ilt.kharkov.ua

[2]*International Laboratory of High Magnetic Field and Low Temperatures, 53529 Wroclaw, Poland*

К. Рогацки

Institute of Low Temperature and Structure Research, Polish Academy of Sciences, P.O.Box 937, 50-950, Wroclaw, Poland

В. Садовски

Department of Physics and Mathematics Technical University of Gdansk, 80-452, Gdansk, Poland

Статья поступила в редакцию 21 декабря 1994 г., после переработки 12 мая 1995 г.

Исследована особенность температурно-частотной зависимости омического сопротивления R ВТСП материалов, обусловленная изменением знака производной $\partial R/\partial T$ на некоторой частоте f_c. Показано, что f_c коррелирует с величиной $(\partial\rho/\partial T)/\rho_0$, где ρ_0 — удельное сопротивление исследуемого образца на постоянном токе при температуре T_0 начала линейной зависимости $\rho(T)$. Экспериментально установлено, что f_c зависит как от $|\partial\rho/\partial T|$, так и от ρ_0. Получена формула, устанавливающая связь между рассматриваемыми величинами.

Досліджено особливість температурно-частотної залежності омічного опору R ВТНП матеріалів, що обумовлена зміною знаку похідної $\partial R/\partial T$ на деякій частоті f_c. Показано, що f_c корелює з величиною $(\partial\rho/\partial T)/\rho_0$, де ρ_0 — питомий опір досліджуємого зразка на постійному струмі при температурі T_0 початку лінійної залежності $\rho(T)$. Експериментально встановлено, що f_c залежить як від $|\partial\rho/\partial T|$, так і від ρ_0. Одержано формулу, що встановлює зв'язок між розглянутими величинами.

Введение

Ранее [1,2] было обнаружено, что омическое сопротивление R керамики $YBa_2Cu_3O_x$ в нормальном состоянии, измеряемое на частотах 0–10^8 Гц, в некотором диапазоне Δf аномально велико. При этом $\partial R/\partial T$ в данном диапазоне частот становится отрицательной, а температурная производная удельного сопротивления ρ на постоянном токе остается положительной ($\partial\rho/\partial T > 0$). Частота, на которой $\partial R/\partial T = 0$, названа критической частотой f_c. Дальнейшие экспериментальные исследования показали, что описанным свойством на переменном токе обладают все ВТСП материалы, приготовленные в виде монокристаллов, пленок, керамик [3]. Модель двухзонного сверхпроводника [4] качественно описывает основные особенности зависимости $R(f, T)$, включая и изменение знака производной $\partial R/\partial T$ [5]. Установлено также, что аномальные зависимости $R(f, T)$ характерны для образцов с линейной зависимостью $\rho(T)$ при $f = 0$ и имеется связь между f_c и ρ в виде [6,7]

$$f_c = F\{(\partial\rho/\partial T)/\rho_0\}, \qquad (1)$$

где ρ_0 — удельное сопротивление образца при температуре T_0 начала линейной зависимости $\rho(T)$ при понижении температуры.

Цель настоящей работы состоит в том, чтобы путем технологических манипуляций с одним и тем же образцом изменять $\partial\rho/\partial T$ и ρ_0, контролировать f_c и установить количественную связь между рассматриваемыми параметрами.

Кроме того, известно, что можно получить ВТСП образцы с $\partial\rho/\partial T < 0$ в нормальном состоянии (с так называемой полупроводниковой зави-

© В. М. Дмитриев, М. Н. Офицеров, Н. Н. Пренцлау, К. Рогацки, В. Садовски, 1995

симостью сопротивления). Возникает вопрос: каким образом в этом случае будет проявляться аномальная частотная зависимость R.

Экспериментальные результаты

На рис. 1 для многочисленных образцов показана зависимость $f_c = F\{(\partial\rho/\partial T)/\rho_0\}$ для положительных (точки) и отрицательных (квадраты) значений $\partial\rho/\partial T$. Видно, что зависимость частоты $f_c = F[(|\partial\rho/\partial T|)/\rho_0]$ практически симметрична относительно точки $\partial\rho/\partial T = 0$, в которой $f_c = 0$. Значения $f_c = 0$ при $\partial\rho/\partial T = 0$ были получены на образцах керамики $YBa_2Cu_3O_x$, допированной железом, а также на $YBa_2Cu_{3-y}Sc_yO_x$ керамиках. С увеличением $|\partial\rho/\partial T|/\rho_0$ частота f_c растет. В керамиках с $\partial\rho/\partial T > 0$ этот рост проявляется в виде некоторой зависимости $f_c = F\{(\partial\rho/\partial T)/\rho_0\}$ (рис. 1, кривая *1*). Замечено, что при повышении $(\partial\rho/\partial T)/\rho_0$ увеличивается разброс экспериментальных значений f_c относительно кривой *1*. При $(\partial\rho/\partial T)/\rho_0 > 3{,}3\cdot10^{-3}\ \mathrm{K}^{-1}$ этот разброс особенно заметен. Отметим, что, так как линейный участок зависимости $\rho(T)$ во многих исследуемых образцах керамики ограничен сверху температурой $\approx$ 300 K, то величина $(\partial R/\partial T)/\rho_0 \approx 3{,}3\cdot10^{-3}\ \mathrm{K}^{-1}$ соответствует случаю, когда при аппроксимации линейной части температурной зависимости ρ имеем

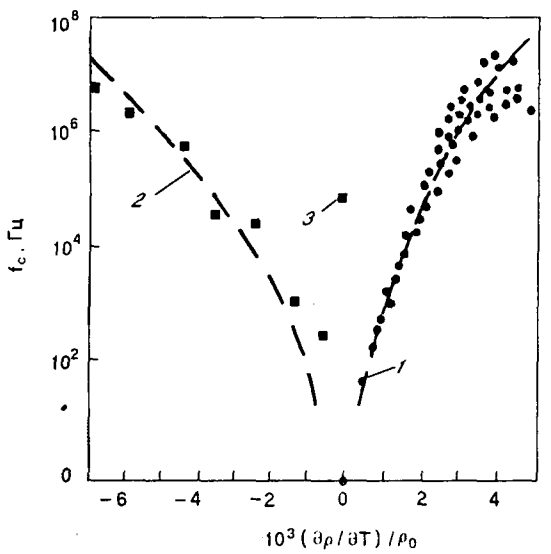

Рис. 1. Экспериментальные зависимости f_c от $(\partial\rho/\partial T)/\rho_0$ для образцов с $\partial\rho/\partial T > 0$ (●) и $\partial\rho/\partial T < 0$ (■). Кривые *1* и *2* рассчитаны по формулам (2) и (3) соответственно. Смысл точки *3* разъяснен в тексте.

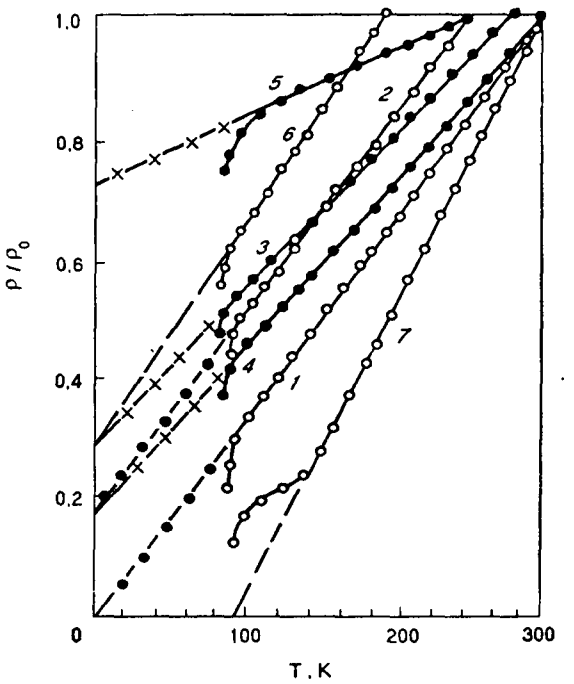

Рис. 2. Зависимость ρ/ρ_0 от температуры исследуемых образцов с различными крутизнами $\partial\rho/\partial T$.

$\rho = 0$ при $T = 0$ (рис. 2, кривая *1*). На рис. 2 сплошными линиями с точками и кружочками показаны температурные зависимости приведенного к ρ_0 удельного сопротивления ρ разных образцов ВТСП материалов до их перехода в СП состояние. Ниже начала *NS*-перехода зависимости $\rho = F(T)$ не показаны. Пунктирными линиями, штрих-пунктирными и пунктирными с крестом отрезками показаны аппроксимации линейной части удельного сопротивления к более низким температурам.

Отметим что частоты f_c образцов, имеющих T_0 = 300 K (кривая *1*, рис. 2) и 250 K (кривая *2*), но одинаковое значение приведенных крутизн, совпадают. Если $(\partial\rho/\partial T)/\rho_0 < 3{,}3\cdot10^{-3}\ \mathrm{K}^{-1}$ (кривые *3–5*, рис. 2), то f_c всех образцов имеет незначительный разброс вблизи зависимости (1) независимо от температуры T_0 (рис. 1). Для образцов, у которых $(\partial R/\partial T)/\rho_0 > 3{,}3\cdot10^{-3}\ \mathrm{K}^{-1}$ (кривые *6*, *7*, рис 2), разброс значений f_c относительно кривой *1* (рис. 1) значителен.

Для выяснения количественной зависимости между f_c, $\partial\rho/\partial T$ и ρ_0 исследовалось большое число различных керамик. Каждая из них подвергалась отжигу. В зависимости от типа керамики возникали три ситуации: изменялась величина как $\partial\rho/\partial T$, так и ρ_0; изменялось значение $\partial\rho/\partial T$, а ρ_0 изменя-

Таблица

Значения величин ρ, $\partial\rho/\partial T$ и частоты f_c до и после отжига различных керамик

№ кривых	$\rho_0 \cdot 10^3$, Ом·см	$\partial\rho/\partial T$, Ом·см·К$^{-1}$	$\frac{\partial\rho/\partial T}{\rho_0} \times 10^3 \cdot K^{-1}$	$\frac{\rho_0}{\rho_{02}}$	$\frac{\partial\rho/\partial T}{\partial\rho_2/\partial T}$	$\frac{\partial\rho/\partial T}{\rho_0} / \frac{\partial\rho_2/\partial T}{\rho_{02}}$	f_c, МГц	$\frac{f_c}{f_{c2}}$
I. $ErBa_2Cu_3O_x$								
1	2,8	$6,7 \cdot 10^{-6}$	2,40	1,75	1,79	1,025	4,6	1,07
2	1,6	$3,75 \cdot 10^{-6}$	2,34	1,0	1,0	1,0	4,3	1,0
II. $Bi_{2,16}Sr_{1,33}Ca_{0,566}CuO_x$								
1	20	$6,0 \cdot 10^{-5}$	3,0	1,25	2,7	2,1	7,0	875
2	16	$2,20 \cdot 10^{-5}$	1,4	1,0	1,0	1,0	$8 \cdot 10^{-3}$	1,0
III. $YBa_2Cu_{2,5}Ti_{0,5}O_x$								
1	3,8	$2,2 \cdot 10^{-6}$	0,58	0,91	0,45	0,49	$5 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-3}$
2	4,15	$4,9 \cdot 10^{-6}$	1,18	1,0	1,0	1,0	$7 \cdot 10^{-3}$	1,0
3	3,2	$1,5 \cdot 10^{-5}$	4,7	0,77	3,06	3,98	4	571
IV. $SmBa_2Cu_3O_x$								
1	2,5	$6,0 \cdot 10^{-6}$	2,40	2,2	1,32	0,6	0,25	0,17
2	1,13	$4,55 \cdot 10^{-6}$	4,0	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0

лось несущественно; практически не изменялась величина $\partial\rho/\partial T$, а ρ_0 изменялось заметно. Во всех случаях измерялось также значение f_c. Результаты таких исследований представлены на рис. 3–6 и приведены в таблице. Номера в первой колонке таблицы соответствуют номерам кривых на рис. 3–6. Символы ρ, ρ_0 и f_c без номеров относятся к кривой на рис. 3–6, обозначенной номером в первой колонке, а эти же символы с цифрой 2 — только к кривой *2* этих же рисунков.

На рис. 3,*а* представлены температурные зависимости удельного сопротивления на постоянном токе, а на рис. 3,*б* — частотные зависимости омического сопротивления $ErBa_2Cu_3O_x$. Эти зависимости измерены сразу же после синтеза керамики (кривые *1*) и после дополнительного отжига в среде кислорода (кривые *2*).

Из рис. 3,*а* и таблицы следует, что после отжига керамики значения удельного сопротивления ρ_0 и производной $\partial\rho/\partial T$ уменьшились практически в одно и то же число 1,75. Значение $(\partial\rho/\partial T)/\rho_0$ уменьшилось в 1,025 раза. При этом частота f_c уменьшилась в 1,07 раза. Таким образом, одновременное уменьшение значений величин $\partial\rho/\partial T$ и ρ_0 в одно и то же число раз практически не изменяет значение f_c.

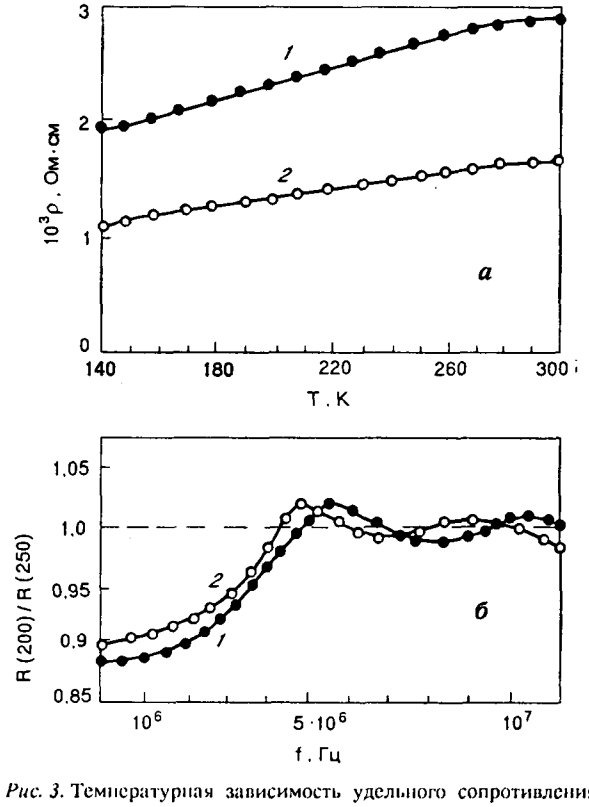

Рис. 3. Температурная зависимость удельного сопротивления (*а*) и частотная зависимость приведенного сопротивления эрбиевой керамики (*б*) после синтеза (*1*); после отжига в среде кислорода (*2*).

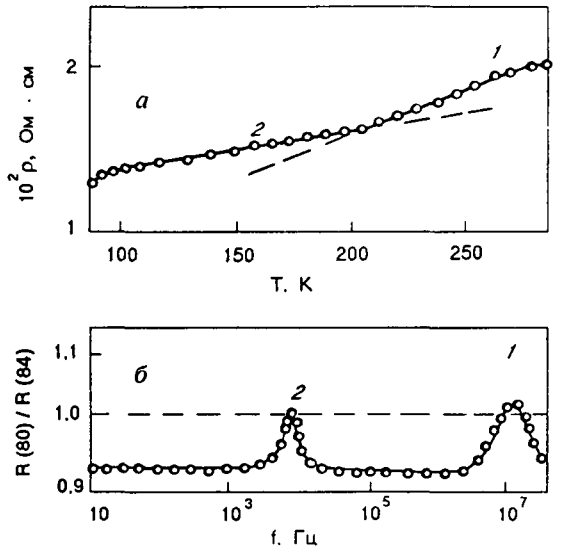

Рис. 4. Температурная зависимость удельного сопротивления (*а*) и частотная зависимость приведенного сопротивления (*б*) висмутовой керамики. Линейные участки $\rho(T)$ и связанные с ними аномалии R обозначены одинаковыми цифрами.

Исследовались также образцы висмутовой (рис. 4), и иттриевой (рис. 5) керамик.

На температурной зависимости ρ висмутовой керамики (рис. 4,*а*) наблюдается два линейных участка. При этом величине $(\partial R/\partial T)/\rho_0$ каждого из них соответствует своя частота f_c (рис. 4,*б*). На рис. 4 линейные участки $\rho(T)$ и связанные с ними аномалии R обозначены одинаковыми цифрами. В таблице приведены основные данные для этой керамики. Из рис. 4 и таблицы видно, что ρ_0 этих участков отличаются в 1,25 раза, а $\partial\rho/\partial T$ — в 2,7 раза. Частоты же f_c, соответствующие этим участкам $\rho(T)$, отличаются в 875 раз. Таким образом, функция F в выражении (1) должна быть нелинейной.

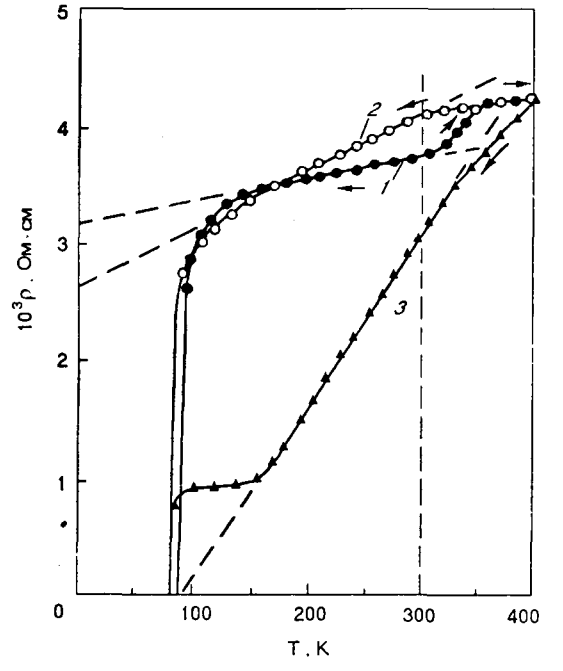

Рис. 5. Температурная зависимость удельного сопротивления, измеренная в процессе термоциклирования керамики $YBa_2Cu_{2,5}Ti_{0,5}O_x$, после синтеза (*1*), после первого отжига (*2*) и после второго отжига (*3*).

К такому же заключению можно прийти, рассматривая результаты измерений керамики $YBa_2Cu_{2,5}Ti_{0,5}O_x$ (см. рис .5 и часть III таблицы). Эта керамика характерна тем, что при малом изменении ρ_0 в результате отжига величина $\partial\rho/\partial T$ изменяется значительно. Зависимость $\rho(T)$, измеренная после синтеза керамики, представлена кривой *1* на рис. 5. При охлаждении и нагреве керамики никаких гистерезисных явлений не наблюдается. При нагреве керамики выше 300 К линейность $\rho(T)$ нарушается, и выше 350 К ρ слабо зависит от температуры. Отжиг керамики в среде кислорода при 400 К в течение пяти часов приводит к тому, что $\partial\rho/\partial T$ увеличивается более чем в два раза, в то время как ρ_0 возрастает всего в 1,1 раза (кривая *2*, рис. 5). Значение f_c при этом возрастает в 140 раз. Повторный отжиг приводит к снижению значения ρ_0 в 1,3 раза по сравнению с предыдущим значением (кривая *2*), а значение $\partial\rho/\partial T$ увеличивается более чем в три раза (кривая *3*). Частота f_c такого образца в 570 раз выше, чем f_c, измеренная после первого отжига.

Самариевые образцы характерны тем, что, в отличие от иттриевых, отжиг их в кислородной среде приводит к значительному изменению значения ρ_0, а значение $\partial\rho/\partial T$ при этом остается практически постоянным. Температурные зависимости ρ одного из таких образцов приведены на рис. 6 после синтеза (кривая *1*) и после дополнительного отжига (кривая *2*). Из рис. 6 и таблицы следует, что отжиг керамики приводит к снижению значения $\partial\rho/\partial T$ в 1,32 раза и к снижению значения ρ_0 в 2,2 раза. При этом значение f_c возрастает приблизительно в шесть раз.

Некоторые образцы керамики непосредственно после их синтеза, отжига в вакууме или деградации имеют так называемую полупроводниковую температурную зависимость $\rho(T)$, т.е. $\partial\rho/\partial T < 0$.

Экспериментальные исследования частотной зависимости сопротивления R таких образцов показывают следующее. Так же, как и в образцах с $\partial\rho/\partial T > 0$ [7], до определенных частот f_b, характерных для каждого образца, сопротивление R не зависит от частоты (рис. 7). Выше частоты f_b

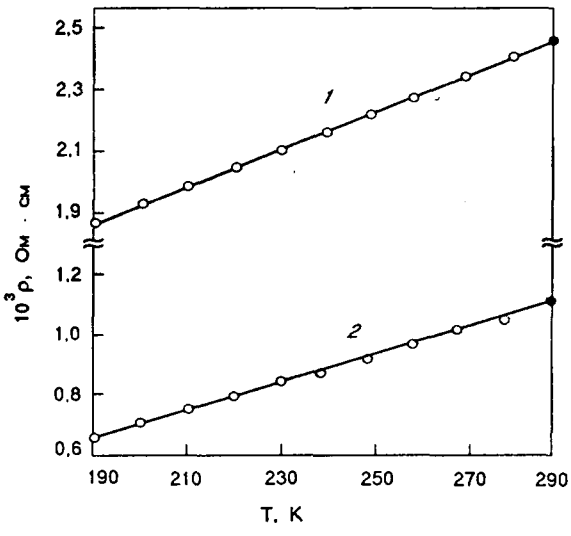

Рис. 6. Температурные зависимости удельного сопротивления самариевой керамики после синтеза (*1*) и после отжига в кислороде (*2*).

проявляется в разных образцах два вида зависимости $R = F(f)|_{T=\text{const}}$.

В первом случае с повышением частоты R сначала растет (рис. 7, кривая *1*), при некоторой частоте достигает максимума, затем снижается, приобретая значение $\partial R/\partial T > 0$ выше частоты f_c в диапазоне Δf. (Здесь следует отметить, что в данном случае f_c — частота, при которой $\partial R/\partial T = 0$ при переходе от отрицательного к положительному значению, в противоположность рассмотренному выше.)

Во втором случае на частотах выше f_b сопротивление R снижается, переходя в область с $\partial R/\partial T > 0$ на частоте f_c (рис. 7, кривая *2*).

Таким образом, в образцах с $\partial\rho/\partial T < 0$ также существует минимальная частота f_c, при которой $R \neq F(f)$. Ее зависимость от $(\partial\rho/\partial T)/\rho_0$ показана

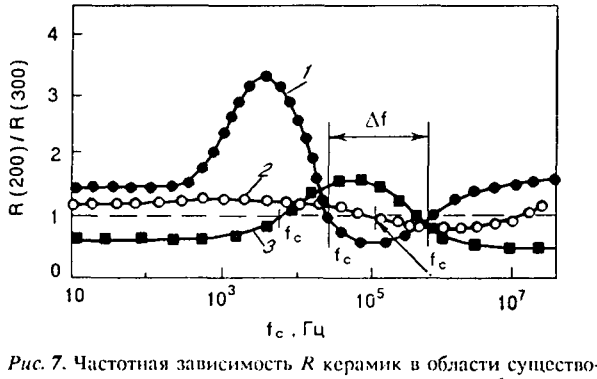

Рис. 7. Частотная зависимость R керамик в области существования аномалии омических потерь для образцов с $\partial\rho/\partial T < 0$ (*1*, *2*) и $\partial\rho/\partial T > 0$ (*3*).

квадратами на рис. 1 и представляет по виду зеркальное отражение этой же зависимости для образцов с $\partial R/\partial T > 0$ [7]. На рис. 7 кривой *3* для сравнения представлена частотная зависимость сопротивления R одного из ВТСП образцов с $\partial\rho/\partial T > 0$.

Расчетные соотношения

Наличие функциональной зависимости между f_c и $(\partial\rho/\partial T)/\rho_0$ в виде (1) и численный анализ полученных экспериментальных данных позволяют записать равенство между этими величинами в виде

$$f_c = f_k T_k^n [(\partial\rho/\partial T)/\rho_0]^n , \qquad (2)$$

где f_k и T_k — коэффициенты, имеющие размерность частоты и температуры соответственно.

На рис. 1 (кривая *1*) видно, что уравнение (2) удовлетворительно описывает зависимость f_c от $(\partial\rho/\partial T)/\rho_0$ при следующих значениях: $n = 7$, $f_k T_k^7 = 1{,}8 \cdot 10^{24}$ Гц·К^7. Если в уравнении (2) положить $T_k = T_0$ (и тем самым связать ρ_0 и T_0), то при $T_0 \approx 300$ К частота $f_k = 8{,}2 \cdot 10^6$ Гц. Из эксперимента следует, что это частота, в области которой зависимость (2) нарушается, и при более высоких частотах экспериментальные значения f_c имеют значительный разброс относительно кривой *1*.

Для образцов с $\partial\rho/\partial T < 0$ (рис. 1) f_c представляет частоту, при которой $\partial R/\partial T = 0$ при переходе от отрицательного к положительному значению этой величины (рис. 7). Такая частота, по аналогии с (2), может быть представлена в виде

$$f_c = f_k' T_k^n |(\partial\rho/\partial T)/\rho_0|^n . \qquad (3)$$

Это уравнение также удовлетворительно описывает зависимость f_c от $(\partial\rho/\partial T)/\rho_0$ при $n = 7$ и $f_k' T_k^7 = 2{,}4 \cdot 10^{22}$ Гц·К^7 (кривая *2*, рис. 1). Однако при $T_k = T_0$ величина $f_k' \approx 10^5$ Гц. Это частота, при которой также в некоторых образцах наблюдается отклонение экспериментальных значений f_c от зависимости (2) (например точка *3* для образца $YBa_2Cu_3O_x$, рис. 1). Таким образом, зависимость f_c от $(\partial\rho/\partial T)/\rho_0$ можно описать степенной функцией со степенью 7 как для материалов с $\partial\rho/\partial T > 0$, так и с $\partial\rho/\partial T < 0$.

Заключение

Таким образом, экспериментально установлено следующее:

1. При измерении температурной зависимости сопротивления R нормального состояния различ-

ных ВТСП образцов на переменном токе на некоторой частоте f_c сопротивление не зависит от температуры. Это наблюдается как в образцах с $\partial\rho/\partial T > 0$, так и $\partial\rho/\partial T < 0$, где ρ — удельное сопротивление на постоянном токе.

2. Частота f_c и $\partial\rho/\partial T$ связаны степенным уравнением $f_c = A|(\partial\rho/\partial T)/\rho_0|^7$. Для $\partial\rho/\partial T > 0$ и $\partial\rho/\partial T < 0$ уравнения отличаются коэффициентом A.

3. В образцах с $\partial\rho/\partial T > 0$ зависимость $f_c = A[(\partial\rho/\partial T)/\rho_0]^7$ выполняется для значений $(\partial\rho/\partial T)/\rho_0 \le 3{,}3\cdot 10^{-3}\ \mathrm{K}^{-1}$. При больших значениях этого параметра наблюдается большой разброс экспериментальных данных.

Настоящая работа частично финансирована Государственным комитетом Украины по вопросам науки и технологий по программе «Высокотемпературная сверхпроводимость» (Проект 9,1.1/045), грантом Сороса UG134, присужденным Американским физическим обществом, а также грантами Сороса N296, 1273 и 1483.

1. В. М. Дмитриев, М. Н. Офицеров, Н. Н. Прентслау, *ФНТ* **16**, 387 (1990).
2. V. M. Dmitriev, V. N. Eropkin, A. M. Gurevich, M. N. Ofitserov, and N. N. Prentslau, *Bull. Mater. Sci.* **14**, 669 (1991).
3. В. М. Дмитриев, М. Н. Офицеров, Н. Н. Прентслау, К. Рогацки, В. Садовски, *ФНТ* **21**, 397 (1995).
4. В. Н. Галайко, *ФНТ* **19**, 123 (1993).
5. В. Н. Галайко, В. М. Дмитриев, М. Н. Офицеров, Н. Н. Прентслау, *ФНТ* **19**, 135 (1993).
6. V. M. Dmitriev, M. N. Ofitserov, and N. N. Prentslau, *Physica* **B194–196**, 1511 (1994).
7. V. M. Dmitriev, M. N. Ofitserov, N. N. Prentslau, V. V. Demirskii, K. Rogacki, and W. Sadovski, *ФНТ* **20**, 203 (1994).

The electromagnetic field frequency at which the Ohmic HTSC resistance is temperature-independent

V. M. Dmitriev, M. N. Ofitserov, N. N. Prentslau, K. Rogacki, and V. Sadowski

The feature of the temperature-frequency dependence of the Ohmic resistance R in HTSC materials, namely the change of the sign of the derivative $\partial R/\partial T$ at a certain frequency f_c, is studied. It is shown that f_c correlates with the $(\partial\rho/\partial T)/\rho_0$ value, where ρ_0 is the dc resistivity of the sample measured at the temperature T_0 of the onset of the linear dependence $\rho(T)$. It is found experimentally that f_c is dependent on $|\partial\rho/\partial T|$ and on ρ_0. The formula is derived, which relates the parameters considered.