

# Сверхпроводимость, отрицательное магнитосопротивление и анизотропия электропроводности монокристаллов $\text{YFe}_4\text{Al}_8$ и $\text{ScFe}_4\text{Al}_8$ в диапазоне частот 0– $10^8$ Гц

В.М. Дмитриев<sup>1,2</sup>, Н.Н. Пренцлау<sup>1</sup>, И.В. Золочевский<sup>1</sup>, Л.А. Ищенко<sup>1</sup>,  
Б.Я. Котур<sup>3</sup>, В. Суски<sup>2,4</sup>, Е. Талик<sup>5</sup>, А.В. Терехов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Физико-технический институт низких температур им. Б.И. Веркина НАН Украины  
пр. Ленина, 47, г. Харьков, 61103, Украина  
E-mail: dmitriev@ilt.kharkov.ua*

<sup>2</sup>*International Laboratory of High Magnetic Fields and Low Temperatures  
95 Gajowicka Str., 53-421, Wroclaw, Poland*

<sup>3</sup>*Львовский государственный университет им. И. Франко  
ул. Кирилла и Мефодия, 6, г. Львов, 79005, Украина.*

<sup>4</sup>*W. Trzebiatowski Institute of Low Temperatures and Structure Research Polish Academy of Sciences,  
P.O. 1410, 50-950, Wroslaw, Poland*

<sup>5</sup>*Institute of Physics, University of Silesia, Uniwersytecka 4, 40-007, Katowice, Poland.*

Впервые исследована анизотропия электросопротивления монокристаллов  $\text{YFe}_4\text{Al}_8$  и  $\text{ScFe}_4\text{Al}_8$  в диапазоне частот 0– $10^8$  Гц в интервале температур 300–4,2 К. Обнаружено, что электропроводность вдоль оси роста кристаллов выше, чем в перпендикулярном направлении. Параметры, определяющие явления антиферромагнитного упорядочения, отрицательного магнитосопротивления и сверхпроводимости, обнаруженные в этих монокристаллах, оказываются изотропными. Обнаружены эффекты, известные ранее для поликристаллических ВТСП с магнитными примесями, оказавшиеся анизотропными в исследованных монокристаллах.

Вперше досліджено анізотропію електроопору монокристалів  $\text{YFe}_4\text{Al}_8$  та  $\text{ScFe}_4\text{Al}_8$  в діапазоні частот 0– $10^8$  Гц в інтервалі температур 300–4,2 К. Виявлено, що електропровідність вздовж осі росту кристалів вище, ніж в перпендикулярному напрямі. Параметри, які визначають явище антиферомагнітного упорядкування, від'ємного магнітоопору та надпровідності, виявлені в цих монокристалах, являються ізотропними. Виявлено ефекти, до цього відомі для полікристалічних ВТНП з магнітними домішками, які являються анізотропними в досліджених монокристалах.

PACS: 74.80.Dm, 72.15.Eb, 71.20.Eh

## Введение

Кристаллическая структура типа  $\text{ThMn}_{12}$  тройных соединений  $\text{RM}_4\text{Al}_8$  (R — редкая земля, M — переходной металл) впервые была установлена еще в 1962 году [1]. С тех пор магнитные и структурные свойства этих соединений интенсивно изучаются. В отличие от относительно простой тетрагональной объемно-центрированной кристаллической решетки

соединений типа  $\text{ThMn}_{12}$ , магнитная структура соединений  $\text{RFe}_4\text{Al}_8$  оказалась очень сложной, и по сей день результаты ее исследований различными методами далеки от завершения [2–4].

Не вызывает сомнения тот факт, что при некоторой температуре  $T_N$  железо и редкая земля, если она магнитна, в соединении испытывают антиферромагнитное (AFM) упорядочение, и при  $T < T_N$  соединения являются антиферромагнетиками, хотя и

не совсем идеальными с точки зрения магнитного упорядочения [2–5]. При этом особенно удобно изучать проблему магнитных взаимодействий, когда отсутствует собственный магнитный момент редкоземельного элемента. Этим объясняется тот факт, что большинство исследований посвящено соединениям с  $R = \text{Lu}, \text{La}, \text{Y}, \text{Sc}$ . Согласно [4,5], более простая магнитная структура реализуется в соединении  $\text{YFe}_4\text{Al}_8$ , и именно оно наиболее полно исследовано. Однако интерес представляет не только магнитная структура соединений, но и то обстоятельство, что при температурах ниже  $T_N$  в ряде поликристаллических соединений обнаружено два очень интересных явления: отрицательное магнитосопротивление в слабых магнитных полях [6,7] и сверхпроводимость [6–9]. В связи с этим соединения  $\text{RFe}_4\text{Al}_8$  вызывают еще больший интерес.

В работе [10] впервые исследованы резистивные и магнитные свойства монокристаллов  $\text{YFe}_4\text{Al}_8$ , выращенных методом Чохральского. До этого изучались лишь поликристаллические образцы  $\text{YFe}_4\text{Al}_8$ . Температура  $T_N$ , определенная как по максимуму на температурной зависимости магнитной восприимчивости  $\chi(T)$ , так и по отклонению температурной зависимости удельного электросопротивления  $\rho(T)$  от линейной, оказалась равной  $T_N = 195$  К. Как стало понятным из последующих исследований [2–5], такое высокое значение  $T_N$  свидетельствует о достаточно хорошем стехиометрическом составе монокристаллов. Правда, в работе [4] высказано утверждение о том, что выращенные методом Чохральского (путем вытягивания из стехиометрического расплава металлов) монокристаллы соединений  $\text{RFe}_4\text{Al}_8$  систематически растут нестехиометрическими и имеют избыток железа, что приводит к снижению значений  $T_N$  в область  $T \approx 100$  К. Важно, что избыток железа ( $x > 4$ ) приводит не только к снижению значения  $T_N$ , но и к изменению структуры магнитного упорядочения. Циклоидальная модуляция магнитных моментов Fe, характерная для стехиометрических образцов ( $x = 4$ ), превращается в амплитудно-модулированную волну с гораздо меньшим периодом [4].

В работе [10] также впервые исследованы элементы магнитной анизотропии в монокристаллах  $\text{YFe}_4\text{Al}_8$ . Довольно заметной оказалась анизотропия температурной зависимости магнитной восприимчивости  $\chi$ . Примечательно, что значения  $\chi(T)$ , измеренные выше  $T_N = 195$  К при ориентации внешнего магнитного поля  $\mathbf{H}$  параллельно ( $\chi_{\parallel}(T)$ ) или перпендикулярно ( $\chi_{\perp}(T)$ ) направлению роста кристалла, оказались одинаковыми. Заметная анизотропия  $\chi(T)$  возникала при  $T \leq T_N$ . При этом значение  $\chi_{\parallel}(T)$  оказалось выше значения  $\chi_{\perp}(T)$ . В области

гелиевых температур  $\chi_{\parallel}(T)/\chi_{\perp}(T) \approx 1,3$ . В работах [2,4] также отмечалось наличие слабой анизотропии магнитных свойств монокристаллов  $\text{LuFe}_4\text{Al}_8$  и  $\text{YFe}_4\text{Al}_8$ . Таким образом, в настоящее время данных об анизотропии магнитных свойств монокристаллов  $\text{RFe}_4\text{Al}_8$  явно недостаточно, а анизотропия электрических свойств вообще не исследована.

В настоящей работе впервые исследована анизотропия электрических свойств монокристаллов  $\text{YFe}_4\text{Al}_8$  и  $\text{ScFe}_4\text{Al}_8$  как на постоянном токе, так и в переменных полях частотой до  $10^8$  Гц. Эти соединения выбраны по следующим соображениям: оба содержат немагнитные редкие земли;  $\text{YFe}_4\text{Al}_8$  наиболее изучен и имеются некоторые сведения об анизотропии его магнитных свойств;  $\text{ScFe}_4\text{Al}_8$  по своим свойствам довольно близок к  $\text{YFe}_4\text{Al}_8$ , но о его анизотропных свойствах ничего не известно. Показано, что электропроводность вдоль оси роста кристаллов выше, чем в перпендикулярном направлении. Обнаруженные ранее [6,7] в поликристаллических образцах явления сверхпроводимости и отрицательного магнитосопротивления существуют и в исследованных монокристаллах и оказались изотропными относительно направления роста монокристаллов.

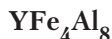
### Образцы и методика измерений

Монокристаллы  $\text{YFe}_4\text{Al}_8$  и  $\text{ScFe}_4\text{Al}_8$  выращены методом Чохральского — вытягиванием из стехиометрического расплава исходных металлов. Монокристалл  $\text{YFe}_4\text{Al}_8$  имел форму цилиндра диаметром 2,1 мм и длиной 4,7 мм. Монокристалл  $\text{ScFe}_4\text{Al}_8$  имел форму цилиндра диаметром 3,5 мм и длиной 7,7 мм.

Удельное  $\rho$  и полное  $Z_s = R_s + jX_s$  электросопротивления измерялись четырехконтактным методом на постоянном токе или резонаторным методом на соответствующих частотах, используя описанную в работе [11] методику ( $R_s$  и  $X_s$  — активная и реактивная составляющие полного импеданса  $Z_s$ ). Геометрический фактор  $G$  измерительного колебательного контура при высокой добротности конденсатора определяли по формуле  $G = 4\pi^2 f L r l^{-1}$ , где  $f$  — резонансная частота,  $L$  — индуктивность катушки,  $r$  и  $l$  — радиус и длина провода, из которого она изготовлена.

Аномалии сопротивления определяли по изменению добротности контура, которая, в свою очередь, измерялась по изменению амплитуды сигнала на резонансной частоте с помощью анализатора спектра типа СК4-59 в режиме длительной памяти и разового сканирования.

**Экспериментальные результаты**



На рис. 1,а представлены температурные зависимости удельного электросопротивления  $\rho$ , измеренные вдоль направления роста кристалла  $\rho_{\parallel}$  (кривая 1) и перпендикулярно этому направлению  $\rho_{\perp}$  (кривая 2).

Видно, что хорошая линейная зависимость  $\rho(T)$  в обоих случаях сохраняется до температуры AFM упорядочения  $T_N = 100$  К. Более низкое значение

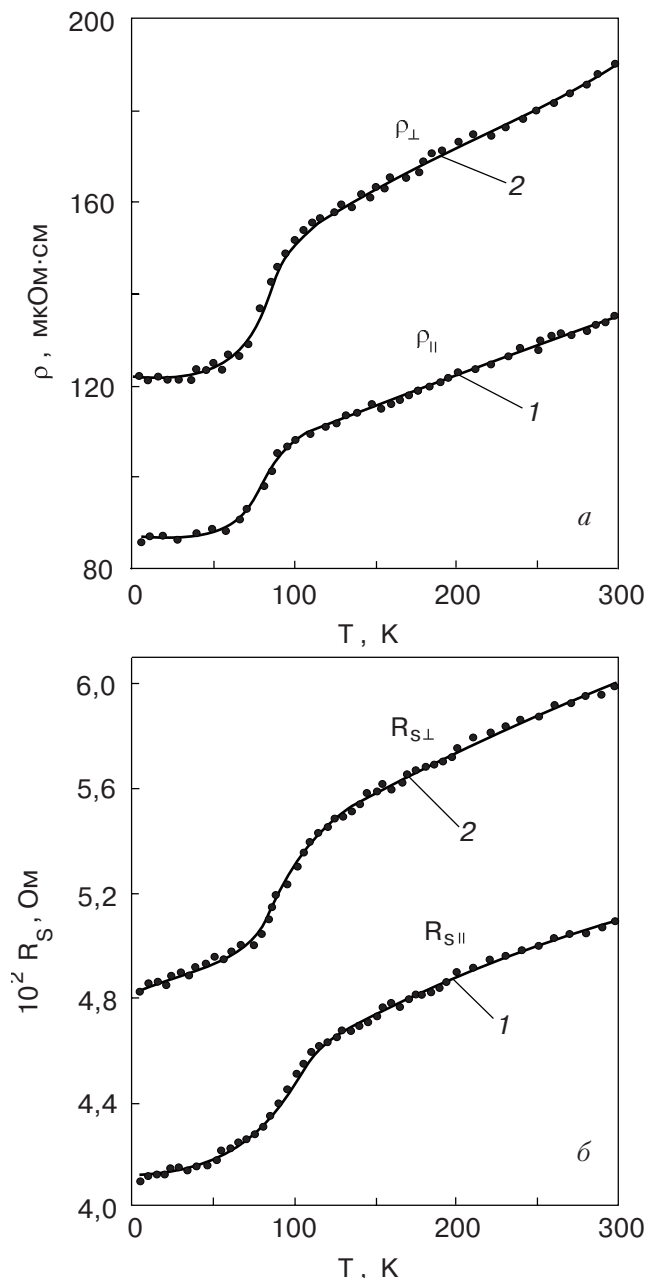


Рис. 1. Температурные зависимости удельного электросопротивления  $\rho$  (а) и поверхностного сопротивления  $R_s$  на частоте 45 МГц (б), измеренные вдоль ( $\parallel$ ) (кривые 1) и поперек ( $\perp$ ) (кривые 2) направления роста монокристалла YFe<sub>4</sub>Al<sub>8</sub>.

$T_N$ , по сравнению с полученным в работе [10] ( $T_N = 195$  К), указывает на некоторый избыток Fe .

На рис. 1,б представлены температурные зависимости активной части  $R_s$  полного импеданса  $Z_s = R_s + jX_s$  образца YFe<sub>4</sub>Al<sub>8</sub> при частоте измерения 45 МГц. Монокристалл ориентировался таким образом, что высокочастотный ток в одном случае направлен параллельно направлению роста кристалла ( $R_{s\parallel}$ , кривая 1), а во втором случае перпендикулярно этому направлению ( $R_{s\perp}$ , кривая 2).

Легко убедиться в том, что  $R_{s\parallel}/R_{s\perp} \sim (\rho_{\parallel}/\rho_{\perp})^{1/2}$  во всем температурном интервале измерений.

На рис. 1 видно, что  $\rho_{\perp} > \rho_{\parallel}$  ( $R_{s\perp} > R_{s\parallel}$ ) во всем температурном интервале измерений, т.е. в направлении роста монокристалла YFe<sub>4</sub>Al<sub>8</sub> удельная электропроводность примерно в 1,4 раза выше, чем в перпендикулярном направлении. Антиферромагнитное упорядочение не вызывает дополнительных анизотропных особенностей. На зависимостях  $\rho_{\parallel,\perp}(T)$  и

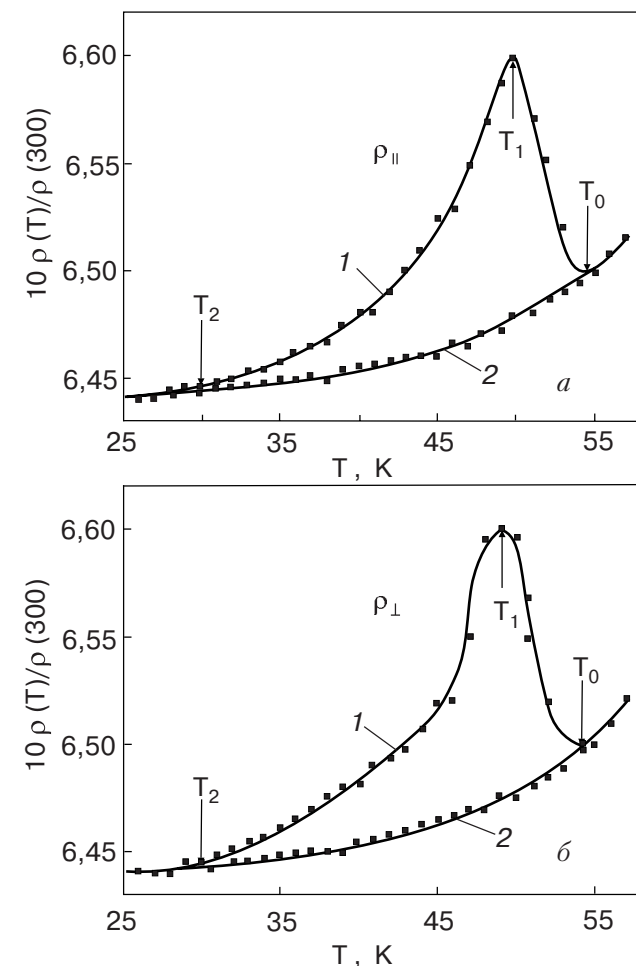


Рис. 2. Температурные зависимости удельного электросопротивления  $\rho$ , измеренные вдоль ( $\parallel$ ) (а) и поперек ( $\perp$ ) (б) направления роста монокристалла YFe<sub>4</sub>Al<sub>8</sub> в интервале температур, где наблюдается отрицательное магнитосопротивление (кривые 1). Зависимости 2 получены в постоянном магнитном поле  $H = 50$  Э.

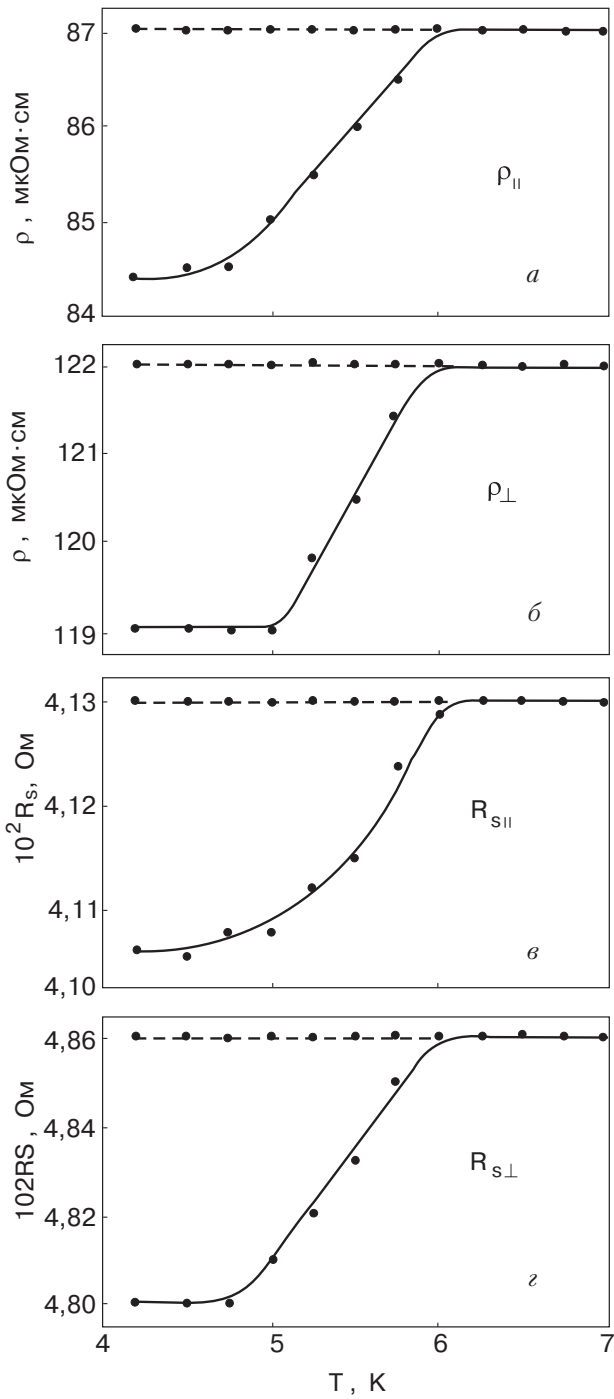


Рис. 3. Температурные зависимости удельного электро-сопротивления  $\rho$  (а,б) и поверхностного сопротивления  $R_s$  на частоте 45 МГц (в,г), измеренные вдоль ( $\parallel$ ) и поперек ( $\perp$ ) направления роста монокристалла  $YFe_4Al_8$  в области сверхпроводящего перехода. Пунктирные линии отражают зависимости, измеренные в постоянном магнитном поле  $H = 50$  Э.

$R_{s||,\perp}(T)$  имеются небольшие скачкообразные увеличения соответствующих значений, однако эти аномалии в образцах  $YFe_4Al_8$  выражены слабо и в масштабе рис. 1 не видны. Поэтому на рис. 2 в увеличенном масштабе представлены фрагменты зависимостей  $\rho(T)$  монокристалла  $YFe_4Al_8$  из рис. 1 так,

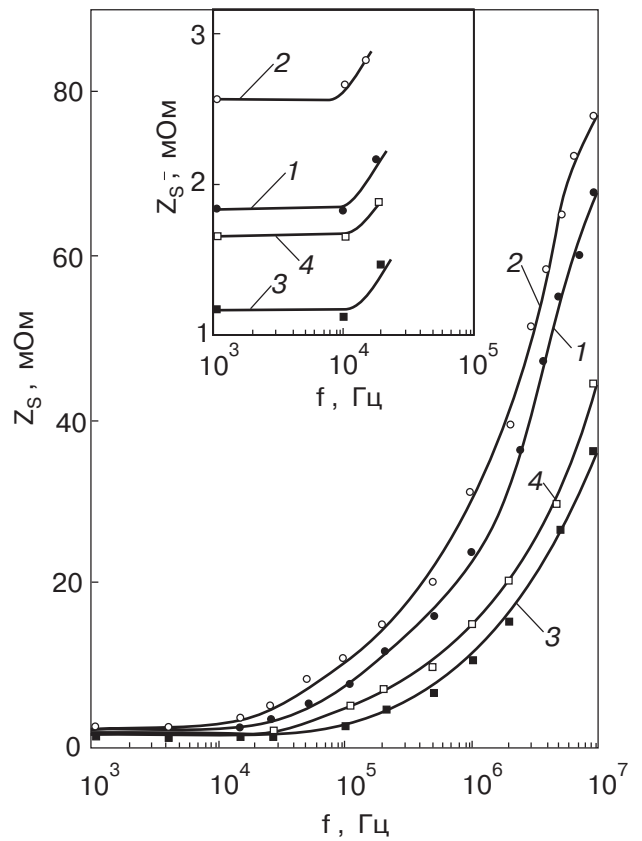


Рис. 4. Частотные зависимости полного импеданса  $Z_s$ , измеренные вдоль и поперек направления роста монокристалла  $YFe_4Al_8$  при температурах 300 К (кривые 1 ( $Z_{s||}$ ) и 2 ( $Z_{s\perp}$ )) и 10 К (кривые 3 ( $Z_{s||}$ ) и 4 ( $Z_{s\perp}$ )). На вставке приведены начальные участки этих зависимостей в увеличенном масштабе.

чтобы эти особенности были отчетливо выражены. Они характеризуются следующими температурами:  $T_0 = 55$  К – температура начала возрастания  $\rho$  и  $R_s$ ;  $T_1 = 50$  К – температура, при которой  $\rho$  и  $R_s$  достигают своих пиковых значений. При дальнейшем понижении температуры до  $T = 30$  К ( $T_2 < T_1 < T_0 < T_N$ ) значения  $\rho$  и  $R_s$  уменьшаются. В области температур  $T_0$ – $T_2$  обнаружено отрицательное магнитосопротивление в слабых магнитных полях (единицы и десятки эрстед). Кривые 1 сняты в нулевом магнитном поле, кривые 2 – в поле  $H = 50$  Э. Видно, что наблюдаемое явление изотропно. Особенности  $R_s(T)$  не показаны, но они имеют такой же вид и наблюдаются при тех же температурах. В диапазоне температур от 10 до 85 К в магнитном поле значения  $\rho_{\perp}(T)$  и  $\rho_{||}(T)$  увеличиваются с ростом температуры как  $T^{4,8}$ . При температуре  $T_c = 6$  К  $< T_2$  происходит переход части образца в сверхпроводящее состояние. Влияние магнитного поля на зависимости  $\rho(T)$  и  $R_s(T)$  в этой области температур показано в увеличенном масштабе на рис. 3. Точки на сплошных кривых получены при  $H = 0$ , а на пунктирных – при  $H = 50$  Э (кривые проведены для наглядности).

Основные характеристики электросопротивления монокристаллов

Соединение	$T_N$	$T_0$	$T_1$	$T_2$	$T_c$	$\rho_{\parallel}(300)$	$\rho_{\parallel}(4,2)$	$\rho_{\perp}(300)$	$\rho_{\perp}(4,2)$	$\frac{\rho_{\parallel}(300)}{\rho_{\parallel}(4,2)}$	$\frac{\rho_{\perp}(300)}{\rho_{\perp}(4,2)}$	$\partial\rho_{\parallel}/\partial T$	$\partial\rho_{\perp}/\partial T$
	К					мкОм·см				мкОм·см/К			
$YFe_4Al_8$	100	55	50	30	6	135	86	190	121	1,57	1,57	0,135	0,18
$YFe_4Al_8$ [10]	195	—	—	—	—	125	33	—	—	3,8	—	0,257	—
$ScFe_4Al_8$	210	50	43	25	6	153	118	243	121	1,3	2,0	0,111	0,37

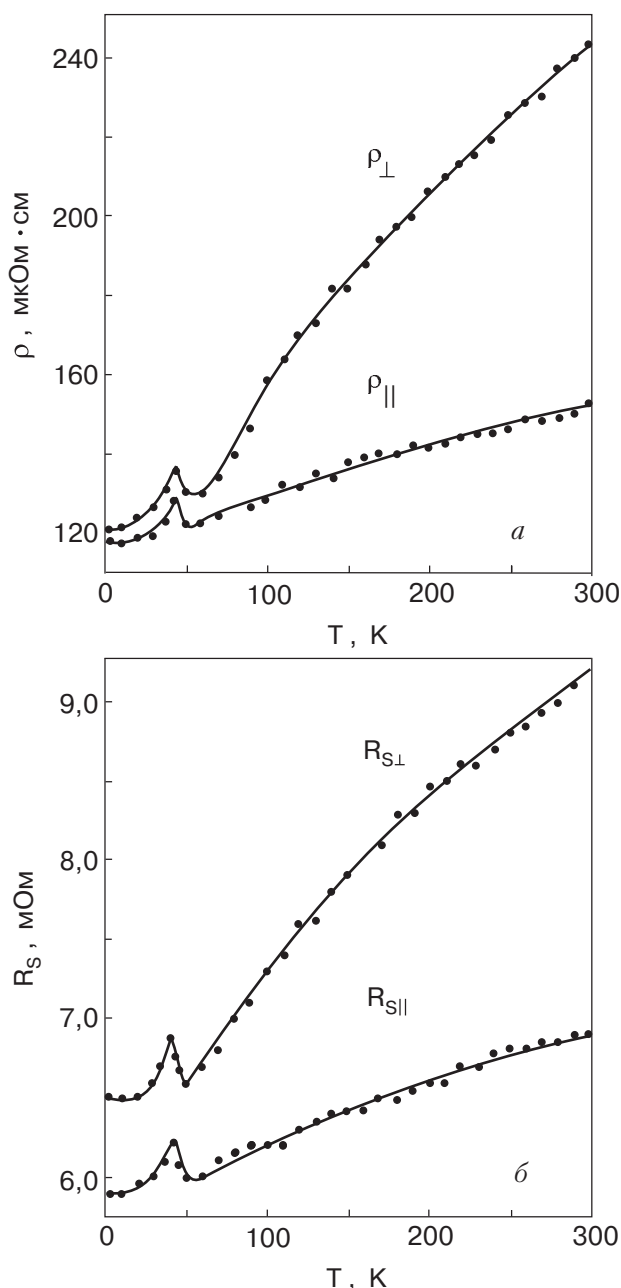


Рис. 5. Температурные зависимости удельного электросопротивления  $\rho$  (а) и поверхностного сопротивления  $R_s(T)$  на частоте 45 МГц (б), измеренные вдоль и поперек направления роста монокристалла  $ScFe_4Al_8$ .

Данные, характеризующие зависимости  $\rho(T)$ , измеренные как вдоль направления роста монокристалла, так и в перпендикулярном направлении, представлены в табл. 1. На рис. 4 приведены частотные зависимости полного импеданса  $Z_s$  монокристалла  $YFe_4Al_8$  при протекании токов вдоль направления роста кристалла  $Z_{\parallel}$  и в перпендикулярном направлении  $Z_{\perp}$ , измеренные при температурах 300 К (кривые 1 ( $\parallel$ ), 2 ( $\perp$ )) и 10 К (кривые 3 ( $\parallel$ ), 4 ( $\perp$ )). На вставке на рис. 4 начальные участки этих зависимостей представлены в увеличенном масштабе. Видно, что полный импеданс  $Z_{s\perp}$  выше, чем  $Z_{s\parallel}$ , так же, как это наблюдается для  $\rho$  и  $R_s$  (см.рис. 1).

**$ScFe_4Al_8$**

На рис. 5,а представлены температурные зависимости удельного электросопротивления  $\rho$ , измеренные вдоль направления роста кристалла  $\rho_{\parallel}(T)$  и перпендикулярно этому направлению  $\rho_{\perp}(T)$ . Линейные зависимости  $\rho_{\parallel}(T)$  и  $\rho_{\perp}(T)$  нарушаются при одной и той же температуре  $T_N \approx 210$  К. По литературным данным [12],  $T_N$  для различных образцов  $ScFe_4Al_8$  лежит в интервале температур 125–225 К в зависимости от их качества и методов измерений. Поэтому можно считать, что исследуемый нами монокристалл  $ScFe_4Al_8$  достаточно стехиометричен. На рис. 5,б представлены температурные зависимости  $R_{s\parallel}$  и  $R_{s\perp}$ , измеренные на частоте 45 МГц (вдоль и поперек направления роста монокристалла). Видно, что наблюдается анизотропия электросопротивлений:  $\rho_{\perp} > \rho_{\parallel}$  и  $R_{s\perp} > R_{s\parallel}$  во всем температурном интервале измерений. Отличаются не только сами сопротивления, но и их температурные зависимости:  $\partial\rho_{\perp}/\partial T > \partial\rho_{\parallel}/\partial T$  и  $\partial R_{s\perp}/\partial T > \partial R_{s\parallel}/\partial T$ . Из рис. 5 также следует, что на зависимостях  $\rho(T)$  и  $R_s(T)$  имеют место скачкообразные увеличения соответствующих сопротивлений. На рис. 6 для  $\rho(T)$  они представлены в увеличенном масштабе. Аномалии  $\rho(T)$  и  $R_s(T)$  характеризуются следующими температурами:  $T_0 = 50$  К и  $T_1 = 43$  К. При дальнейшем понижении температуры до  $25$  К =  $T_2 < T_1 < T_0 < T_N$  значения  $\rho$  и  $R_s$  уменьшаются. В области температур  $T_0$ – $T_2$  наблюдается отрицательное магнитосопротивление.

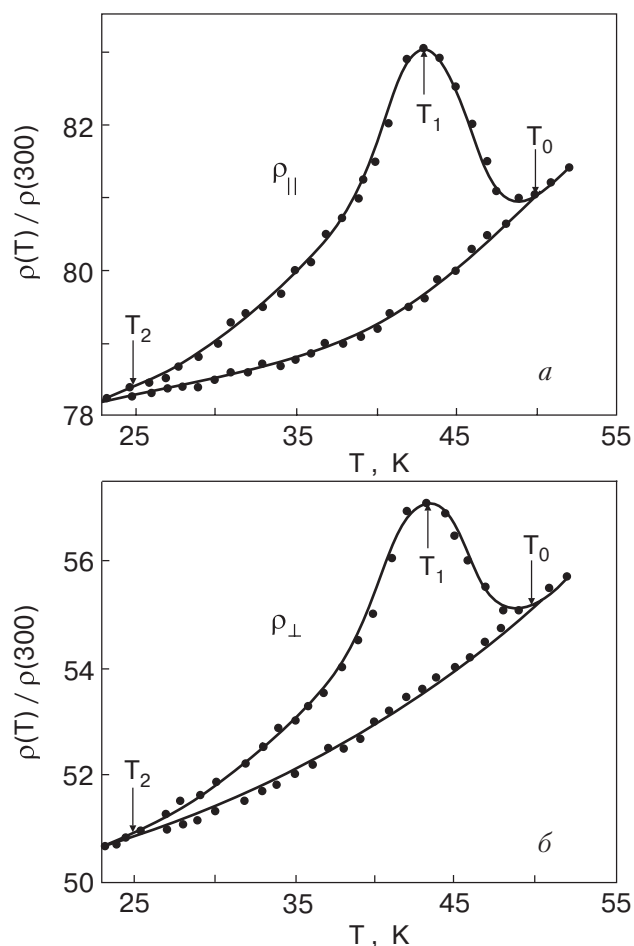


Рис. 6. Температурные зависимости удельного электро-сопротивления  $\rho$ , измеренные вдоль ( $\rho_{||}$ ) (а) и поперек ( $\rho_{\perp}$ ) (б) направления роста монокристалла  $\text{ScFe}_4\text{Al}_8$  в интервале температур, где наблюдается явление отрицательного магнитосопротивления (кривые 1). Зависимости 2 получены в постоянном магнитном поле  $H = 50$  Э.

тивление в слабых магнитных полях (единицы и десятки эрстед). Кривые 1 сняты в нулевом магнитном поле, а кривые 2 — в поле  $H = 50$  Э. При  $T_c = 6 \text{ K} < T_2$  происходит переход части образца в сверхпроводящее состояние. Влияние магнитного поля на зависимости  $\rho(T)$  и  $R_s(T)$  в области перехода в сверхпроводящее состояние для различных ориентаций кристалла относительно направления измерительных токов показано на рис. 7. Точки на сплошных кривых получены при  $H = 0$ , а на пунктирных — при  $H = 50$  Э. Видно, что, независимо от ориентации и способа измерения, анизотропия  $T_c$  отсутствует, не наблюдается и анизотропия свойств, обусловленных явлением отрицательного магнитосопротивления. Данные, характеризующие зависимости  $\rho(T)$ , представлены в табл. 1.

На рис. 8 приведены частотные зависимости полного импеданса  $Z_s$  монокристалла  $\text{ScFe}_4\text{Al}_8$ , измеренные вдоль направления роста кристалла  $Z_{s||}$  и в перпендикулярном направлении  $Z_{s\perp}$  при температу-

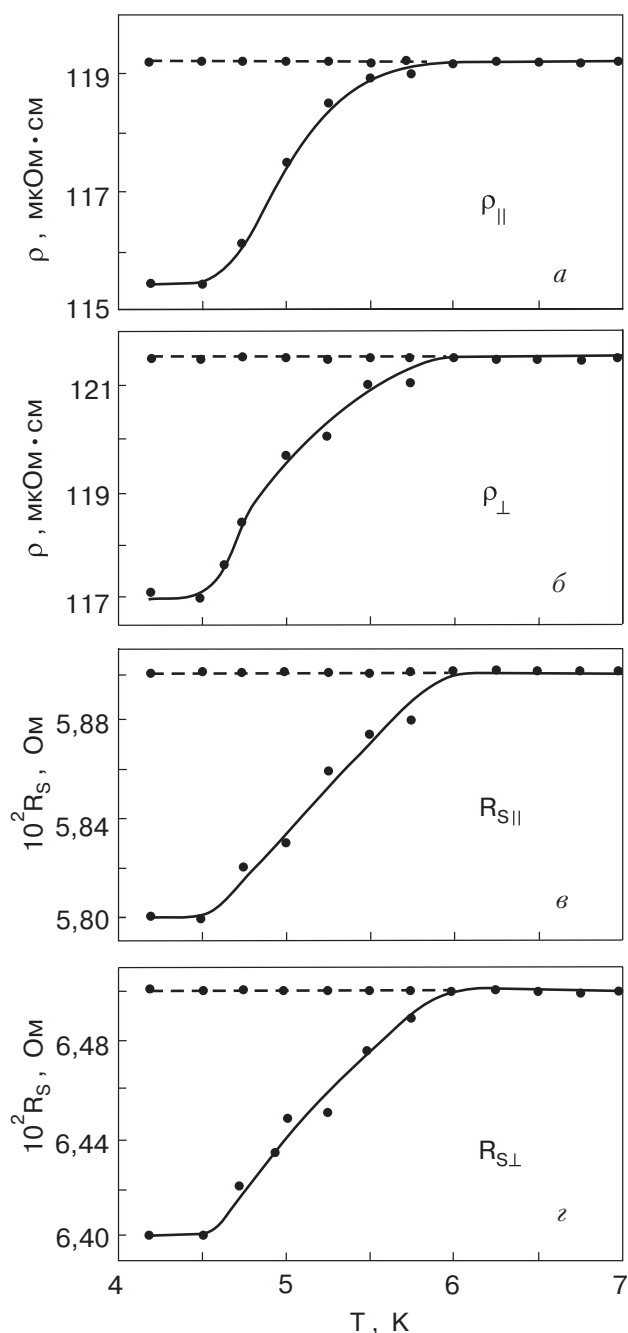


Рис. 7. Температурные зависимости удельного электро-сопротивления  $\rho$  (а, б) и поверхностного сопротивления  $R_s(T)$  на частоте 45 МГц (в, д), измеренные вдоль ( $||$ ) и поперек ( $\perp$ ) направления роста монокристалла  $\text{ScFe}_4\text{Al}_8$  в области сверхпроводящего перехода. Пунктирные линии отражают зависимости, измеренные в постоянном магнитном поле  $H = 50$  Э.

рах 300 К (кривые 1 ( $||$ ), 1' ( $\perp$ )), 100 К (кривые 2 ( $||$ ), 2' ( $\perp$ )) и  $T = 10$  К (кривые 3 ( $||$ ), 3' ( $\perp$ )). На вставке на рис. 8 начальные участки частотных зависимостей представлены в увеличенном масштабе. Наблюдается различие в зависимостях  $Z_{||}(f)$  и  $Z_{\perp}(f)$ . Кривые  $Z_{||}(f)$  не пересекаются при всех температурах измерения, но имеют минимумы вблизи частоты  $6 \cdot 10^4$  Гц. В отличие от зависимости  $Z_{||}(f)$ , на

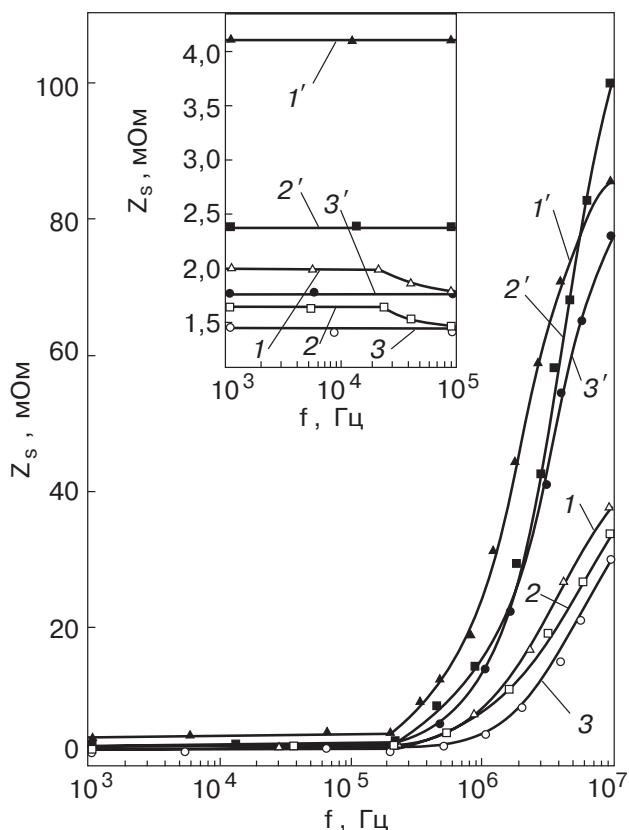


Рис. 8. Частотные зависимости полного импеданса  $Z_s(f)$ , измеренные вдоль ( $\parallel$ ) и поперек ( $\perp$ ) направления роста монокристалла  $\text{ScFe}_4\text{Al}_8$  при температурах  $T = 300$  К (кривые 1 ( $\parallel$ ) и 1' ( $\perp$ )),  $T = 100$  К (кривые 2 ( $\parallel$ ) и 2' ( $\perp$ )) и  $T = 10$  К (кривые 3 ( $\parallel$ ) и 3' ( $\perp$ )). На вставке приведены начальные участки зависимостей в увеличенном масштабе.

зависимости  $Z_{\perp}(f)$  минимум не наблюдается, но кривые, снятые при различных температурах, пересекаются. Последнее указывает на то, что температурные зависимости  $Z_{\perp}(T, f)$  на различных частотах отличаются друг от друга. Минимум  $Z_{\parallel}(f)$ , показанный на рис. 9 в увеличенном масштабе, может быть охарактеризован тремя частотами:  $f_0$  — частота, при которой начинается снижение значения  $Z_{\parallel}(f)$ ,  $f_{\min}$  — частота, при которой  $Z_{\parallel}(f)$  принимает минимальное значение,  $f_s$  — частота, при которой  $Z_{\parallel}(f_s) = Z_{\parallel}(f_0)$ .

### Обсуждение результатов

Сопоставим полученные нами результаты для зависимостей  $\rho_{\parallel}(T)$  монокристалла  $\text{YFe}_4\text{Al}_8$  с опубликованными ранее (см. [10], рис. 3). Как следует из наших измерений и данных работы [10], при понижении температуры ниже комнатной зависимость удельного электросопротивления  $\rho_{\parallel}(T)$  уменьшается по линейному закону до температуры антиферро-

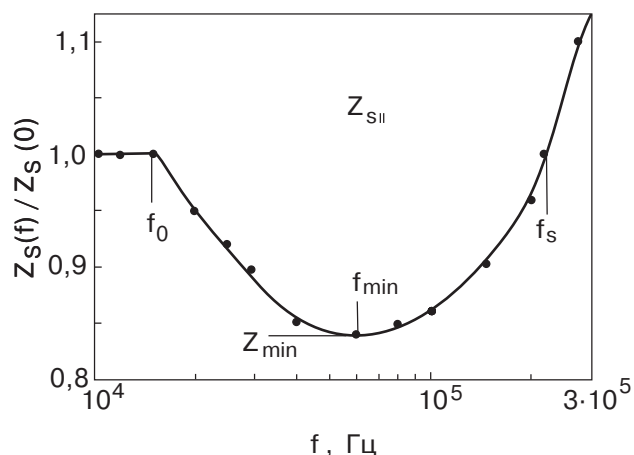


Рис. 9. Фрагмент частотной зависимости полного импеданса  $Z_s(f)$ , рис. 8, измеренного вдоль ( $\parallel$ ) направления роста монокристалла  $\text{ScFe}_4\text{Al}_8$  при температуре  $T = 300$  К.

магнитного упорядочения  $T_N$ . Ниже  $T_N$  величина  $\rho_{\parallel}(T)$  падает быстрее и при более низких температурах выходит на плато. Таким образом, можно констатировать качественное совпадение наших результатов измерения  $\rho_{\parallel}(T)$  с полученными в работе [10]. Количественно результаты измерений  $\rho_{\parallel}(T)$  отличаются, как это видно из табл. 1. Как уже отмечалось, по-видимому, исследованный нами монокристалл  $\text{YFe}_4\text{Al}_8$  содержит некоторый избыток железа, что заметно снижает  $T_N$ . Вместе с тем отметим, что избыток Fe приводит к росту  $\rho(T)$  по сравнению с зависимостью  $\rho(T)$  для стехиометрического образца [10]. Особенно это заметно при исследовании остаточного сопротивления при гелиевых температурах (см. табл. 1). Таким образом, транспортные свойства, в данном случае электросопротивление, достаточно чувствительны к стехиометрии образцов. Ее нарушение приводит к разупорядочению кристаллической решетки, изменению магнитных свойств и, как следствие, к усилению процессов рассеяния носителей заряда.

Как следует из рис. 1, а, существует анизотропия  $\rho(T)$ , причем  $\rho_{\perp}(T) > \rho_{\parallel}(T)$  при всех температурах от комнатной до гелиевой. На линейном участке зависимости  $\rho(T)$  выполняется неравенство  $\partial\rho_{\perp}/\partial T > \partial\rho_{\parallel}/\partial T$ , хотя отличие и небольшое. Как следует из зависимостей  $\rho_{\perp}(T)$  и  $\rho_{\parallel}(T)$ , для обоих направлений значение  $T_N = 100$  К. Интересно, что анизотропия электросопротивления наблюдается во всем диапазоне температур измерения. Анизотропия же магнитных свойств, как следует из [10], рис. 4, наблюдается только при  $T < T_N$ . При этом зависимость магнитной восприимчивости  $\chi_{\parallel}(T)$ , измеренная в магнитном поле, направленном параллельно оси роста кристалла, больше, чем  $\chi_{\perp}(T)$ , измеренная в магнитном поле, перпендикулярном оси роста

кристалла. Учитывая взаимную ориентацию электрических токов и их магнитных полей, видим, что знаки анизотропии электрических и магнитных свойств соответствуют друг другу. Из рис. 1,б следует, что анизотропия электросопротивления и ее знак сохраняются и в переменном электромагнитном поле, причем активная составляющая полного импеданса  $R_s \propto \rho^{1/2}$ , что характерно для чистых металлов.

Как видно на рис. 3, в области гелиевых температур анизотропия  $\rho(T)$  и  $R_s(T)$  сохраняется, но при этом критическая температура  $T_c$  сверхпроводящего перехода части образца во всех случаях остается одинаковой и равной 6 К.

Температурные зависимости  $\rho(T)$  и  $R_s(T)$ , представленные на рис. 5, свидетельствуют, что анизотропия  $\rho(T)$  и  $R_s(T)$  наблюдается и в  $\text{ScFe}_4\text{Al}_8$ , но имеется различие в количественных значениях для  $\text{YFe}_4\text{Al}_8$  и  $\text{ScFe}_4\text{Al}_8$ . Так, в  $\text{YFe}_4\text{Al}_8$  значения отношений  $\rho_{\perp}(T)/\rho_{\parallel}(T)$  и  $R_{s\perp}(T)/R_{s\parallel}(T)$  практически остаются неизменными в интервале температур от комнатных до гелиевых (см. рис. 1). В отличие от этого значения этих же отношений в  $\text{ScFe}_4\text{Al}_8$  уменьшаются с уменьшением температуры, т.е. при гелиевых температурах анизотропные свойства  $\text{ScFe}_4\text{Al}_8$  оказываются ниже, чем при комнатных. Можно полагать, что это является следствием различной крутизны как зависимостей  $\rho_{\perp}(T)$  и  $\rho_{\parallel}(T)$ , так и зависимостей  $R_{s\perp}(T)$  и  $R_{s\parallel}(T)$ . Связано ли это с качеством образца или является фундаментальным фактом, предстоит выяснить в дальнейшем.

На рис. 6 в увеличенном масштабе представлены фрагменты зависимостей  $\rho(T)$  из рис. 5 в диапазоне температур 23–52 К. Видно, что явление отрицательного магнитосопротивления оказывается изотропным и характерные амплитуды и температуры одинаковые в обоих направлениях. Явление отрицательного магнитосопротивления в слабых магнитных полях заслуживает отдельного исследования. Возможно, что его возникновение вызвано магнито-структурным фазовым переходом образцов в антиферромагнитном состоянии при  $T < T_N$ , и такой переход может приводить к фазовому расслоению (возникновению страйпового состояния) на очень малых расстояниях. В интервале температур от 10 до 100 К  $\rho_{\perp}(T)$  и  $\rho_{\parallel}(T)$  зависят от температуры как  $T^{2.5}$  и  $T^{2.2}$  соответственно. Различие в этом интервале температур температурных зависимостей  $\rho(T)$  для монокристаллов  $\text{YFe}_4\text{Al}_8$  и  $\text{ScFe}_4\text{Al}_8$ , скорее всего, вызвано различной степенью их стехиометричности. Как  $\rho(T)$ , так и  $R_s(T)$  указывают на наличие изотропного сверхпроводящего перехода части образцов при  $T_c = 6$  К (см. рис. 3 и 7).

Таким образом, анизотропные свойства удельного электросопротивления  $\rho(T)$  и активной части полного импеданса  $R_s(T)$  монокристаллов  $\text{YFe}_4\text{Al}_8$  и  $\text{ScFe}_4\text{Al}_8$  качественно похожи. Они ярче выражены в монокристалле  $\text{ScFe}_4\text{Al}_8$ , возможно, в силу его большей стехиометричности и меньшего влияния дефектов на магнитную и фононную подсистемы.

Сравним теперь температурные и частотные зависимости полных импедансов  $Z_s$ , измеренных в различных направлениях монокристаллов  $\text{YFe}_4\text{Al}_8$  и  $\text{ScFe}_4\text{Al}_8$ . Из рис. 4 и 8 следует, что, как и для  $\rho$  и  $R_s$ , значения  $Z_{s\perp} > Z_{s\parallel}$  для обоих монокристаллов. Но в  $\text{YFe}_4\text{Al}_8$  между  $Z_{s\perp}$  и  $Z_{s\parallel}$  имеется лишь количественное различие. В  $\text{ScFe}_4\text{Al}_8$  между приведенными  $Z_{s\perp}$  и  $Z_{s\parallel}$  наблюдается и качественное отличие. Оно состоит в следующем: 1. Как уже отмечалось, на зависимости  $Z_{s\parallel}(f)$  имеется минимум (см. рис. 8 и 9). Это явление наблюдалось ранее на ВТСП материалах [13], но его анизотропия в исследуемых монокристаллах отмечается впервые. В  $\text{YFe}_4\text{Al}_8$  это явление не наблюдается (см. рис. 4). 2. Как видно на рис. 8, зависимости  $Z_{s\perp}(f)$ , измеренные при различных температурах, пересекаются. Это отражает тот факт, что не только значение  $\partial Z_{s\perp}/\partial T$ , но и знак этой производной зависит от частоты измерения. Это отчетливо следует из рис. 10. Здесь представлены зависимости  $Z_{s\perp}(T)$  для нескольких характерных частот. На этом рисунке кривые 2, 3 и 4 соответствуют частотам  $f_1$ ,  $f_{\max}$  и  $f_2$  на рис. 11, который отражает зависимости  $Z_{s\perp}(f, T)/Z_{s\perp}(f, 300)$  монокристалла  $\text{ScFe}_4\text{Al}_8$ , измеренные в перпендикулярном к росту кристалла направлении, при температурах 150 К (кривая 1), 100 К (кривая 2), 70 К (кривая 3) и  $T = 10$  К (кривая 4).

Рисунки 10 и 11 отражают явление, обнаруженное ранее в ВТСП материалах [14] и в  $\text{LuFe}_4\text{Al}_8$  [6] и исследованное в [15,16]. Оно состоит в том, что металлический ход сопротивления образца на постоянном токе и низких частотах (рис. 10, кривая 1) с увеличением частоты превращается в независимый от температуры (до 150 К, кривая 2), а затем становится полупроводниковым (кривая 3). При дальнейшем росте частоты температурный ход  $Z_{s\perp}(f, T)$  снова становится металлическим (кривая 5), проходя через  $Z_{s\perp}(f, T) = \text{const}$  на частоте  $f_2 = 2,5 \cdot 10^6$  Гц (кривая 4). При этом можно говорить о трех характерных частотах:  $f_1$  — частота, которая является точкой перегиба на зависимости  $Z_{s\perp}(f, T)$ ;  $f_{\max}$  — частота, на которой наблюдается максимальный эффект увеличения сопротивления;  $f_2$  — частота, на которой величина  $Z_{s\perp}(f, T)$  не зависит от температуры при  $T > 150$  К (рис. 10). Указанные характерные частоты от температуры практически не зависят, как это можно увидеть из рис. 11. Интересно,



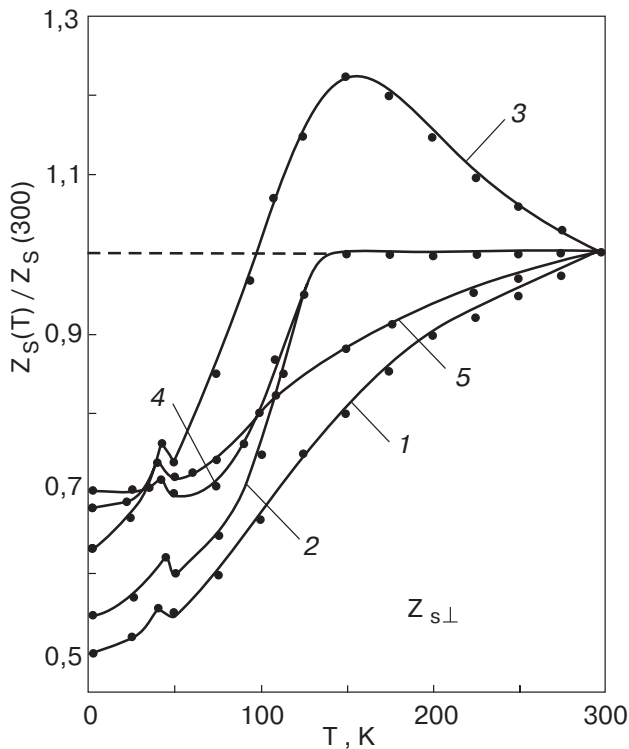


Рис. 10. Температурные зависимости полного импеданса  $Z_s(T)$ , измеренные в направлении, перпендикулярном ( $\perp$ ) направлению роста монокристалла  $\text{ScFe}_4\text{Al}_8$  на частотах, Гц:  $10^4$  (1);  $5 \cdot 10^4$  (2);  $2,5 \cdot 10^5$  (3);  $2,5 \cdot 10^6$  (4);  $10^7$  (5).

что зависимости  $Z_{s\perp}(f, T)$  на частотах  $f_1$  и  $f_2$  совпадают при температурах выше 125 К. Ниже этой температуры они расходятся (см. рис. 10, кривые 2 и 4). Однозначного физического объяснения этому явлению пока нет, хотя можно высказать предположение, что оно может быть результатом специфического взаимодействия носителей зарядов из двух или более различных зон проводимости [15,16]. Если указанное относится и к рассматриваемым системам (так как наблюдается в  $\text{LuFe}_4\text{Al}_8$  и  $\text{ScFe}_4\text{Al}_8$ ), то в дальнейших исследованиях следует обратить внимание на влияние взаимодействия различных групп электронов друг с другом, с магнитной и фононной подсистемами, а также с антиферромагнитными корреляциями, которые могут оказаться существенными, на электрические и магнитные свойства соединений  $\text{RM}_4\text{Al}_8$ . Интересным является не только обнаружение описанного выше явления в образцах  $\text{ScFe}_4\text{Al}_8$ , но и то, что оно в данном случае анизотропно и не наблюдается для  $Z_{s\parallel}$ , как это видно на рис. 8.

Отсутствие в  $\text{YFe}_4\text{Al}_8$  эффектов, обнаруженных в  $\text{ScFe}_4\text{Al}_8$  и представленных на рис. 8,9,10 и 11, может быть следствием как нестехиометричности от избытка Fe в монокристалле  $\text{YFe}_4\text{Al}_8$ , так и отличия магнитных и электронных взаимодействий в  $\text{YFe}_4\text{Al}_8$  и  $\text{ScFe}_4\text{Al}_8$  в принципе. Эти вопросы могут

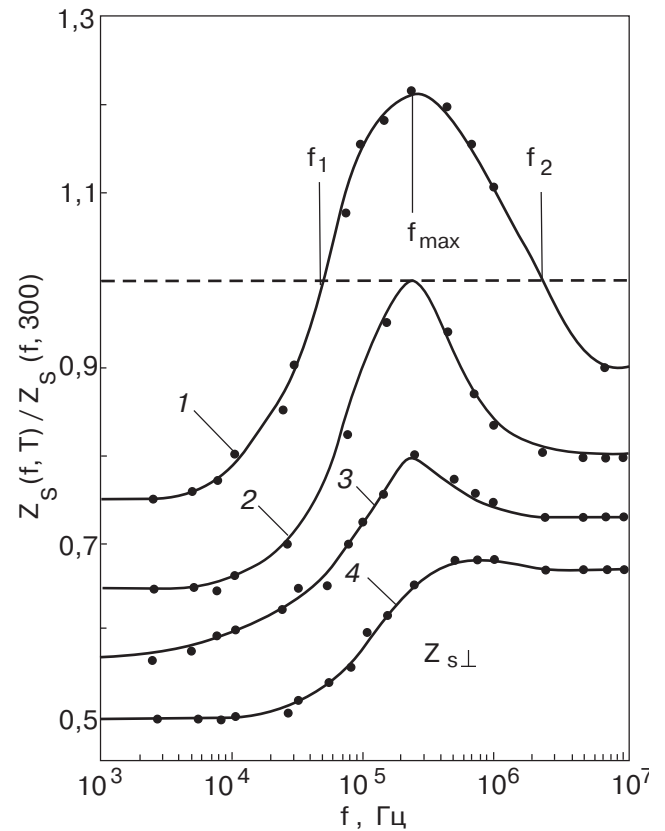


Рис. 11. Частотные зависимости полного импеданса  $Z_s(f)$ , измеренные в направлении перпендикулярном ( $\perp$ ) направлению роста монокристалла  $\text{ScFe}_4\text{Al}_8$  при температурах, К: 150 (1); 100 (2); 70 (3); 10 (4).

быть разрешены в дальнейшем при исследовании качественных монокристаллов с различным, но известным содержанием железа. В этом контексте мы хотели бы обратить внимание на тот факт, что при проведении различных экспериментов требования к образцам различны. Например, нейтронные, мессбауэровские, магнитные, рентгеновские исследования, исследования теплоемкости не требуют высокой плотности и однородности образцов. Для исследования электрических и тепловых транспортных свойств требования к плотности и однородности образцов очень высокие. К сожалению, современные технологии не очень этим требованиям удовлетворяют. Из таблиц 1 и 2 видно, что, как правило, электрические характеристики монокристаллов мало отличаются от таковых для сплавов. Более того, в монокристаллах значения  $\rho(T)$  даже выше, чем в сплавах, а отношение  $\rho(300)/\rho(4,2)$  у них примерно одинаковое и низкое при значительном разбросе значений. Монокристаллы выгодно отличаются от поликристаллов лишь более крутым падением  $\rho(T)$  на линейном участке этой зависимости. При всех разбросах измеренных значений для различных образцов крутизна  $\rho(T)$  на линейном участ-

Таблица 2

Основные характеристики электросопротивления поликристаллических сплавов

Соединение	$\rho(300)$ , мкОм·см	$\rho(4,2)$ , мкОм·см	$\frac{\rho(300)}{\rho(4,2)}$	$\frac{\partial\rho}{\partial T}$ , мкОм·см/К	Лит- ра
$\text{YFe}_4\text{Al}_8$	114	58	1,96	0,078	[17]
$\text{ScFe}_4\text{Al}_8$	104	47	2,2	0,08	[18]
$\text{ScFe}_4\text{Al}_8$	—	—	1,33	—	[19]
$\text{ScFe}_4\text{Al}_8$	—	—	1,78	—	[20]
$\text{Ce}_{0,1}\text{Sc}_{0,9}\text{Fe}_4\text{Al}_8$	110	73	1,5	0,053	[21]

ке в монокристаллах примерно в два раза выше. Хорошим исключением является монокристалл  $\text{YFe}_4\text{Al}_8$ , исследованный в работе [10]. Его параметры говорят о том, что методом Чохральского можно выращивать монокристаллы довольно хорошего качества.

В связи с изложенным мы рассматриваем количественные результаты настоящей работы как предварительные и рассчитываем уточнить их при дальнейшей работе с качественными и хорошо ориентированными монокристаллами.

### Заключение

Отметим основные результаты настоящего исследования. Впервые на примере монокристаллов  $\text{YFe}_4\text{Al}_8$  и  $\text{ScFe}_4\text{Al}_8$  исследована анизотропия электропроводности тетрагональной объемно центрированной кристаллической решетки типа  $\text{ThMn}_{12}$ . Обнаружено, что электропроводность вдоль направления роста монокристаллов выше, чем в перпендикулярном направлении. Исследованы особенности анизотропии температурных и частотных зависимостей электропроводности вдоль и поперек направления роста монокристаллов. На фоне анизотропии электропроводности явления антиферромагнитного упорядочения, отрицательного магнитосопротивления и сверхпроводимости в монокристаллах оказались изотропными. Известные ранее для поликристаллических образцов ВТСП [13,14] и  $\text{LuFe}_4\text{Al}_8$  [6] особенности частотно-температурных зависимостей электропроводности обнаружены в монокристалле  $\text{ScFe}_4\text{Al}_8$  и оказались анизотропными, наблюдается изменение знака зависимости электропроводности от температуры на некоторых характерных частотах, а на некоторых частотах сопротивление образца может стать меньшим, чем на постоянном токе. Оба эффекта пока не имеют убедительного и полного объяснения, но то, что они анизотропны, в настоящей работе показано впервые.

Авторы признательны В.Н.Самоварову за прочтение рукописи, ценные замечания и доброжелательное и полезное обсуждение.

1. O.S. Zarechnyuk and P.I. Kripyakevich, *Sov. Phys. Crystallogr.* **7**, 436 (1963). *Кристаллография* **7**, 543 (1962).
2. J.A. Paixão, S. Langridge, S.A. Sørensen, B. Lebech, A.P. Gonçalves, G.N. Lander, P.J. Prown, P. Burlet, and E. Talik, *Physica* **B234–236**, 614 (1997).
3. J.C. Waerenborgh, P. Salamakha, O. Sologub, A.P. Gonçalves, C. Cardoso, S. Serio, M. Godinho, and M. Almcida, *Chem. Mater.* **12**, 1743 (2000).
4. J.A. Paixão, M. Ramos Silva, J.C. Wacrenborgh, A.P. Gonçalves, G.N. Lander, P.J. Brown, M. Godinho, and P. Burlet, *Phys. Rev.* **B63**, 054410 (2001).
5. P. Schobinger-Papamantellos, K.H.K. Buschow and C. Ritter, *J. Magn. Magn. Mater.* **186**, 21 (1998).
6. А.М. Гуревич, В.М. Дмитриев, В.Н. Еропкин, Л.А. Ищенко, Н.Н. Пренцлау, Л.В. Шлык, *ФНТ* **25**, 15 (1999).
7. А.М. Гуревич, В.М. Дмитриев, В.Н. Еропкин, Б.Ю. Котур, Н.Н. Пренцлау, В. Суски, А.В. Терехов, Л.В. Шлык, *ФНТ* **27**, 1308 (2001).
8. V.M. Dmitriev, L.F. Rybaltchenko, R. Wyder, A.G.M. Jansen, N.N. Prentslau, and W. Suski, *Fiz. Nizk. Temp.* **28**, 374 (2002) [*Low Temp. Phys.* **28**, 260 (2002)].
9. H. Drulis, P. Gaczynski, W. Iwasieczko, W. Suski, and B.Ya. Kotur, *Solid State Commun.* **123**, 391 (2002).
10. A. Chelkowski, E. Talik, J. Szade, J. Heimann, A. Winiarska, and A. Winiarski, *Physica* **B168**, 149 (1991).
11. В.М. Дмитриев, М.Н. Офицеров, Н.Н. Пренцлау, *Радиотехника* вып. 97, 91 (1993).
12. P. Gaczynski, F.G. Vagizov, W. Suski, B. Kotur, W. Iwasieczko, and H. Drulis, *J. Magn. Magn. Matter.* **225**, 351(2001).
13. В.М. Дмитриев, М.Н. Офицеров, Н.Н. Пренцлау, К. Рогачки, В. Садовски, *ФНТ* **21**, 397 (1995).
14. В.М. Дмитриев, М.Н. Офицеров, Н.Н. Пренцлау, *ФНТ* **16**, 387 (1990).
15. В.П. Галайко, В.М. Дмитриев, М.Н. Офицеров, Н.Н. Пренцлау, *ФНТ* **19**, 135 (1993).
16. В.П. Галайко, Е.Н. Братусь, *ФНТ* **28**, 460 (2002).
17. М.Д. Котерлин, Б.С. Морохівський, І.Д. Щерба, Н.В. Герман, *УФЖ* **38(2)**, 362 (1993).
18. W. Suski, K. Wochowski, and B.Ya. Kotur, *Czech. J. Phys.* **52**, A180 (2002).
19. B.Ya. Kotur, D. Badurski, W. Suski, K. Wochowski, A. Gelewski, and T. Mydlarz, *Physica* **B254**, 107 (1998).
20. W. Suski, B. Kotur, and K. Wochowski, *Physica* **B281–282**, 81 (2000).
21. P. Gaczynski, F.G. Vagizov, W. Suski, B. Kotur, K. Wochowski, and H. Drulis, *J. Magn. Magn. Matter.* **214**, 37(2000).

Superconductivity, negative magnetoresistance and electrical conduction anisotropy in  $\text{YFe}_4\text{Al}_8$  and  $\text{ScFe}_4\text{Al}_8$  single crystals in the frequency range  $0\text{--}10^8$  Hz

V.M. Dmitriev, N.N. Prentslau, I.V. Zolochevsky, L.A. Ishchenko, B.Ya. Kotur, W. Suski, E. Talik, and A.V. Terekhov

The electrical resistance anisotropy of  $\text{YFe}_4\text{Al}_8$  and  $\text{ScFe}_4\text{Al}_8$  single crystals was first investigated in the frequency range  $0\text{--}10^8$  Hz at

$300\text{--}4,2$  K. It is found that the electrical conductivity along the crystal growth axis is higher than that in the perpendicular direction. The parameters describing the effects of antiferromagnetic ordering, negative magnetoresistance and superconductivity revealed in these single crystals are isotropic. The effects previously observed in polycrystalline HTSC with magnetic impurities, are detected in the single crystals under consideration, they appearing to be anisotropic.