

Низкотемпературные аномалии омических потерь в диапазоне частот 0–100 МГц, теплоемкости и линейных размеров образцов урана и некоторых его соединений

В.М. Дмитриев^{1,2}, Н.Н. Пренцлау¹, А.М. Гуревич¹, Л.А. Ищенко¹,
В. Суски^{2,3}, А.В. Терехов¹, Р. Троч³

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

² Международная лаборатория сильных магнитных полей и низких температур
ул. Гайовицкая, 95, г. Вроцлав, 53-421, Польша

³ W. Trzebiatowski Institute for Low Temperature and Structure Research,
Polish Academy of Sciences, P.O. Box 1410, 50-950, Wrocław, Poland

Статья поступила в редакцию 11 февраля 2004 г.

Впервые на основании полученных экспериментальных данных по измерению теплоемкости и электросопротивления установлено существование их аномалий в α -уране и соединениях UCu_5Al , UCu_4Al_8 , UFe_4Al_8 и $U_3Ni_3Sn_4$ при температурах вблизи 60 К, а также в окрестности переходов α_1 (43 К), α_2 (37 К) и α_3 (23 К). Предполагается, что эти аномалии в соединениях, содержащих уран в качестве компонента, вызваны именно ураном. Найдено, что в UCu_5Al характер зависимости омических потерь изменяется с полупроводникового при $T > T_N$ ($T_N = 20$ К) на металлический при $T < T_N$. Обнаружено изменение размеров образцов α -урана и соединения UCu_5Al при их многократном термоциклировании от комнатной до низких температур.

Вперше на підставі отриманих експериментальних даних по вимірюванню теплоємності та електроопору виявлено існування їх аномалій в α -урані та сполуках UCu_5Al , UCu_4Al_8 , UFe_4Al_8 і $U_3Ni_3Sn_4$ при температурах поблизу 60 К, а також поблизу переходів α_1 (43 К), α_2 (37 К) та α_3 (23 К). Припускається, що ці аномалії в сполуках, що містять уран як компонент, викликані саме ураном. Знайдено, що в UCu_5Al характер залежності омичних втрат змінюється з напівпровідникового при $T > T_N$ ($T_N = 20$ К) на металевий при $T < T_N$. Виявлено зміну розмірів зразків α -урану та сполуки UCu_5Al при їх багаторазовому термоциклюванні від кімнатної до низьких температур.

PACS: 71.20.Gj, 72.10.Fk

1. Введение

Из работ [1,2] следует, что выше температуры сверхпроводящего перехода ($T_c = 1,5$ К) удельное электрическое сопротивление ρ α -урана с ростом температуры увеличивается практически линейно и монотонно. При этом на температурной зависимости удельного электрического сопротивления, а также теплоемкости отсутствуют какие-либо аномальные

отклонения этих величин. Однако в более поздней работе [3] показано, что на кривых $\rho(T)$ и $C(T)$ монокристаллического α -урана при температурах около 42, 37 и 23 К имеют место особенности как удельного электросопротивления, так и теплоемкости.

Укажем, что авторы некоторых работ, например [4–12], на температурных зависимостях других физических величин также наблюдали их аномалии при этих температурах. Так как впервые при ука-

занных температурах были обнаружены аномалии именно магнитной восприимчивости относительно регулярной зависимости $\chi(T)$, они получили название «магнитных переходов» и обозначаются как переход α_1 (43 К), α_2 (37 К) и α_3 (23 К) [4].

Кроме перечисленных особенностей температурных зависимостей физических величин урана, укажем еще на следующую. Согласно [1,13], при $T < 60$ К на монокристалле α -урана наблюдается увеличение линейных размеров образца при понижении температуры. Рентгеноструктурный анализ подтверждает аномальное увеличение параметра решетки a монокристаллического урана. Однако несмотря на то, что при $T \sim 60$ К меняется параметр решетки, в литературе практически нет сведений о том, что при этой температуре должны иметь место аномалии физических величин. Обратим внимание на то, что вблизи характерных для чистого α -урана температур аномалии различных физических величин имеют место и в некоторых его соединениях [14–24]. Обращает на себя внимание тот интересный факт, что изменения в магнитной структуре UP и UAs [16] возникают при температурах, характерных для чистого урана. Однако в соединении ThAs никакие аномалии физических величин на их температурных зависимостях не обнаружены [4]. Возникает естественный вопрос о том, не переносит ли уран свои особенности на соединения, в которые он входит?

Анализируя приведенный выше и далеко не полный перечень работ, посвященных низкотемпературным аномалиям физических величин урана и его соединений, можно прийти к некоторым заключениям и поставить следующие вопросы.

1. При исследованиях аномалий физических величин урана использовали монокристаллы. Поэтому неясно, будут ли иметь место особенности, например, омических потерь на их температурных зависимостях поликристаллического металла, а также будут ли они проявляться на высоких частотах как для урана, так и для его соединений.

2. В большинстве цитируемых выше работ на температурных зависимостях различных физических величин урана и его соединений наблюдается, как правило, одна-две аномалии. В то же время в работах [3,4,21] наблюдались три аномалии при характерных температурах 43, 37 и 23 К. Однако нам не известны работы, в которых на одних и тех же образцах наблюдались все четыре аномалии какого-либо физического параметра при характерных температурах 60, 43, 37 и 23 К.

3. Если, согласно [13], при $T \leq 60$ К имеет место аномальное увеличение параметра решетки a урана с понижением температуры, то, во-первых, почему

не наблюдали реакции изменения параметра решетки a на электрическое сопротивление урана при этой температуре. Во-вторых, известно [1], что многократное термоциклирование урана до высоких температур с последующим его охлаждением до комнатных приводит к изменению размеров исследуемых образцов. Природа этого явления до конца не выяснена. В связи с этим непонятно, будет ли иметь место изменение размеров образцов урана при их многократном термоциклировании не до высоких, а до криогенных температур, и каким образом будут происходить изменения размеров образца урана при многократном их термоциклировании до $T < 60$ К. В-третьих, будут ли наблюдаться аналогичные изменения размеров образцов соединений, содержащих уран, при их термоциклировании.

Цель настоящей работы — получить ответы на поставленные вопросы. Главным образом, на основе анализа экспериментальных результатов убедиться в том, что уран навязывает особенности своих электронной, магнитной и фононной систем тем соединениям, в которые он входит. Для этого были проведены исследования температурных зависимостей омических потерь и теплоемкости α -урана и некоторых его соединений в окрестности температур 60, 43, 37 и 23 К, а также измерения размеров поликристаллического α -урана и монокристалла соединения UCu_5Al при многократном их термоциклировании до криогенных температур.

2. Образцы и методика измерений

Исследовали образец поликристаллического α -урана цилиндрической формы диаметром 8 мм и длиной 10 мм. Исследуемые монокристаллы UCu_5Al выращены методом Бриджмена в виде цилиндра диаметром 5,6 мм и длиной 21,5 мм (№ 1), а также диаметром 3,7 мм и длиной 10 мм (№ 2).

Монокристалл UFe_4Al_8 имел форму цилиндра с диаметром 2,6 мм и длиной 7,6 мм. Поликристаллические образцы UCu_4Al_8 и соединений $U_3Ni_3Sn_4$ получены в виде тел сложного поперечного сечения по приведенной в [24] методике.

Эти соединения были выбраны для исследования температурной зависимости R_s материалов с различной кристаллической структурой (орторомбическая структура — уран, тетрагональная — UCu_5Al , тетрагональная с типом решетки $ThMn_{12}$ — UFe_4Al_8 и UCu_4Al_8 , структура типа $ThMn_{17}$ — $U_3Ni_3Sn_4$).

Температурную зависимость поверхностного сопротивления R_s на частотах до 100 МГц измеряли резонаторным методом с помощью приведенного в [25] устройства. Измерения ρ , а также полного сопротивления Z образцов до 10 МГц проводили четырехконтактным методом. Так как предполагалось,

что амплитуда аномалий поверхностного сопротивления на зависимости $R_s(T)$ может быть незначительна, проводили 10–15 кратное измерение параметров измерительного колебательного контура с образцами, после этого статистически обрабатывали полученные результаты. Теплоемкость образцов измеряли методом адиабатической калориметрии с точностью 0,5%. Изменение размеров образцов при их термоциклировании до криогенных температур определяли с помощью емкостного dilatометра с точностью ± 2 мкм.

3. Экспериментальные результаты

Омические потери поликристаллического α -урана

Экспериментально установлено, что ρ исследуемого образца α -урана линейно зависит от температуры (рис. 1, а, кривая 1), как и в [1]. При этом $\rho(300) = 33 \cdot 10^{-8}$ Ом·м, а $\rho(20) = 4,4 \cdot 10^{-8}$ Ом·м, т.е. $\rho(300)/\rho(20) = 7,5$. Таким образом, удельное электросопротивление измеряемого образца α -урана типично для поликристаллического металла [1].

Активная составляющая R_s полного импеданса поликристаллического α -урана, измеренная на частоте 10 МГц, равна $8 \cdot 10^{-3}$ Ом, а реактивная $X_s = 7,9 \cdot 10^{-3}$ Ом при $T = 300$ К. При этом (R_s и X_s) $\sim (\rho f)^{0,5}$ (на рис. 1, а (кривая 2) показана зависимость $R_s(T)$). В то же время расчетные значения R_s

и X_s по приведенным в [26] уравнениям равны $3,6 \cdot 10^{-3}$ Ом, что в 2,2 раза ниже экспериментального.

Отметим, что глубина скин-слоя α -урана, вычисляемая по частоте, при которой начинается резкое увеличение значения полного сопротивления Z на его частотной зависимости при измерении четырехконтактным методом, также в 2 раза выше, чем определяемая по измеренным значениям ρ и R_s : $\delta = \rho/R_s$ [26].

На температурных зависимостях удельного электросопротивления, активной и реактивной частей импеданса α -урана имеет место ряд аномалий этих величин в окрестности характерных температур.

На рис. 1, б приведена температурная зависимость удельного сопротивления $\rho(T)$, а на рис. 2, а и 2, б поверхностного сопротивления R_s и реактивного сопротивления X_s поликристаллического образца α -урана на частоте 9 МГц в температурном интервале 62–50 К, приведенные к $\rho(62$ К), $R_s(62$ К) и $X_s(62$ К) ($R_s(62$ К) = $4,2 \cdot 10^{-3}$ Ом, $X_s(62$ К) = $4,15 \cdot 10^{-3}$ Ом).

На рис. 1, б, 2, а и 2, б видно, что в температурном интервале 60–56 К наблюдаются аномалии ρ , R_s и X_s , которые проявляются в виде «ступенек», т.е. в температурном диапазоне 60–58 К снижается крутизна $\partial(\rho, R_s, X_s)/\partial T$. Таким образом, в окрестности температуры ~ 60 К, т.е. при температуре, где, согласно [1,13], в α -уране были обнаружены аномалии коэффициента линейного расширения, наблю-

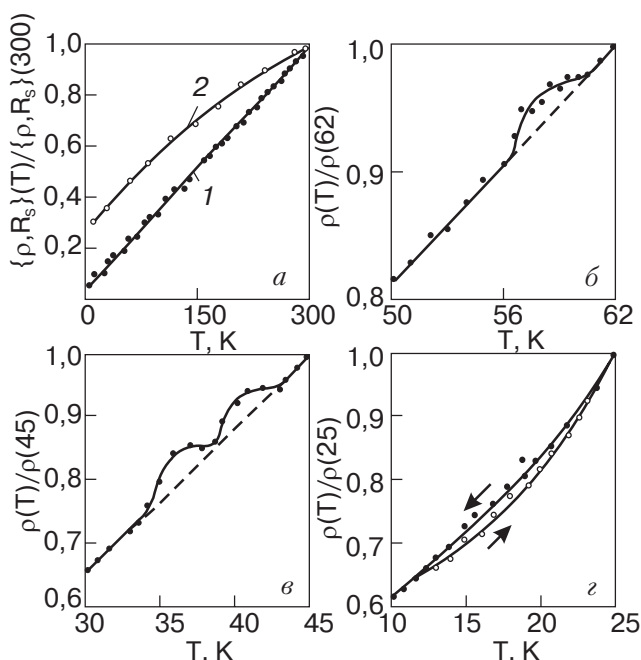


Рис. 1. Температурные зависимости удельного ρ (1) и поверхностного R_s (2) электросопротивлений, приведенных к $\rho(300)$ и $R_s(300)$ поликристаллического α -урана (а), а также зависимости $\rho(T)/\rho(62)$ (б), $\rho(T)/\rho(45)$ (в) и $\rho(T)/\rho(25)$ (г) этого же образца α -урана.

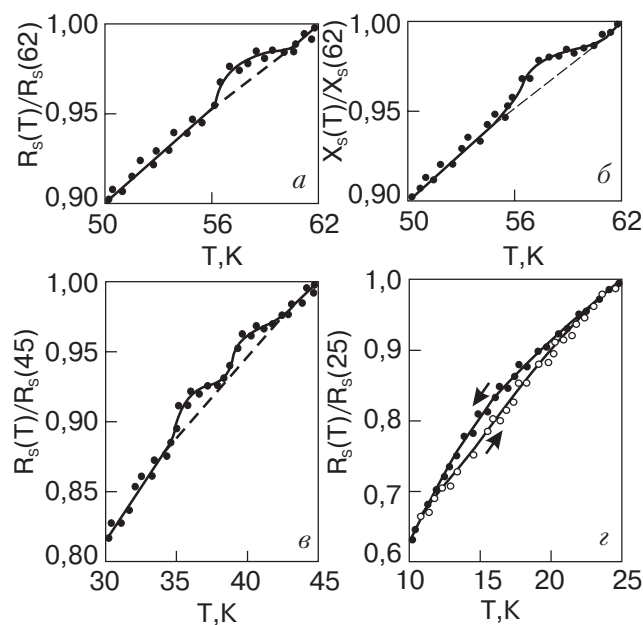


Рис. 2. Температурные зависимости $R_s/R_s(62)$ (а), $X_s/X_s(62)$ (б), $R_s/R_s(45)$ (в), $R_s/R_s(25)$ (г) α -урана на частоте 9 МГц.

даются особенности его удельного сопротивления и импеданса.

На рис. 1, в, г и на рис. 2, в, г приведены температурные зависимости, аналогичные показанным на рис. 1, б, рис. 2, а, б, но измеренные в температурных интервалах 45–30 К и 25–10 К. Из данных на рис. 1, в и 2, в следует, что при температурах 43 и 38 К, т.е. при температурах переходов α_1 и α_2 , наблюдаются аномалии ρ и R_s , подобные по форме аномалиям этих величин, которые наблюдаются при $T \sim 60$ К. Отметим, что в окрестности температур, где имеют место переходы α_1 и α_2 , температурный гистерезис ρ и R_s не был обнаружен.

В то же время при температурах, где обычно проявляется переход α_3 (23 К), аномалии ρ и R_s имеют такой же характер, как и в монокристаллическом уране [3], и наблюдается температурный гистерезис в интервале температур 12–23 К (рис. 1, г и рис. 2, г).

Температурные зависимости омических потерь и теплоемкости соединения UCu₅Al

На рис. 3, а приведена температурная зависимость удельного электросопротивления $\rho(T)$ поликристаллического образца UCu₅Al, взятая для сравнения из работы [20]. На рис. 3, б представлены зависимости $\rho(T)$ монокристаллического образца № 1 UCu₅Al, измеренные нами вдоль оси роста монокристалла ρ_{\parallel} (точки), и в перпендикулярном оси роста направлении ρ_{\perp} (кружки) (ось a отличается от оси роста монокристалла на незначительный угол).

Зависимость $\rho(T)$ и поликристалла UCu₅Al, и монокристалла в температурном интервале 300–100 К может быть описана одним выражением:

$$\rho(T) = \rho_0 - A \ln T, \quad (1)$$

но с разными коэффициентами. Так, для поликристалла $\rho_0 = 257 \cdot 10^{-8}$ Ом·м; $A = 23,1 \cdot 10^{-8}$ Ом·м, $\rho(300) = 125 \cdot 10^{-8}$ Ом·м, а для монокристалла $\rho_0 = 176,7 \cdot 10^{-8}$ Ом·м, $A = 16,3 \cdot 10^{-8}$ Ом·м, $\rho_0(300) = 83,7 \cdot 10^{-8}$ Ом·м. Таким образом, удельное сопротивление монокристаллического образца UCu₅Al в 1,5 раза ниже поликристаллического.

Как в поликристаллическом [20], так и в монокристаллическом образцах UCu₅Al при температуре $T \approx 18$ К происходит антиферромагнитный переход, сопровождающийся скачком ρ . Однако в поликристаллическом образце при $T < T_N$ ρ практически не зависит от температуры, в то время как в монокристалле оно снижается с температурой. Фрагменты кривых рис. 3, б в температурном интервале 28–4,2 К (в увеличенном масштабе) представлены

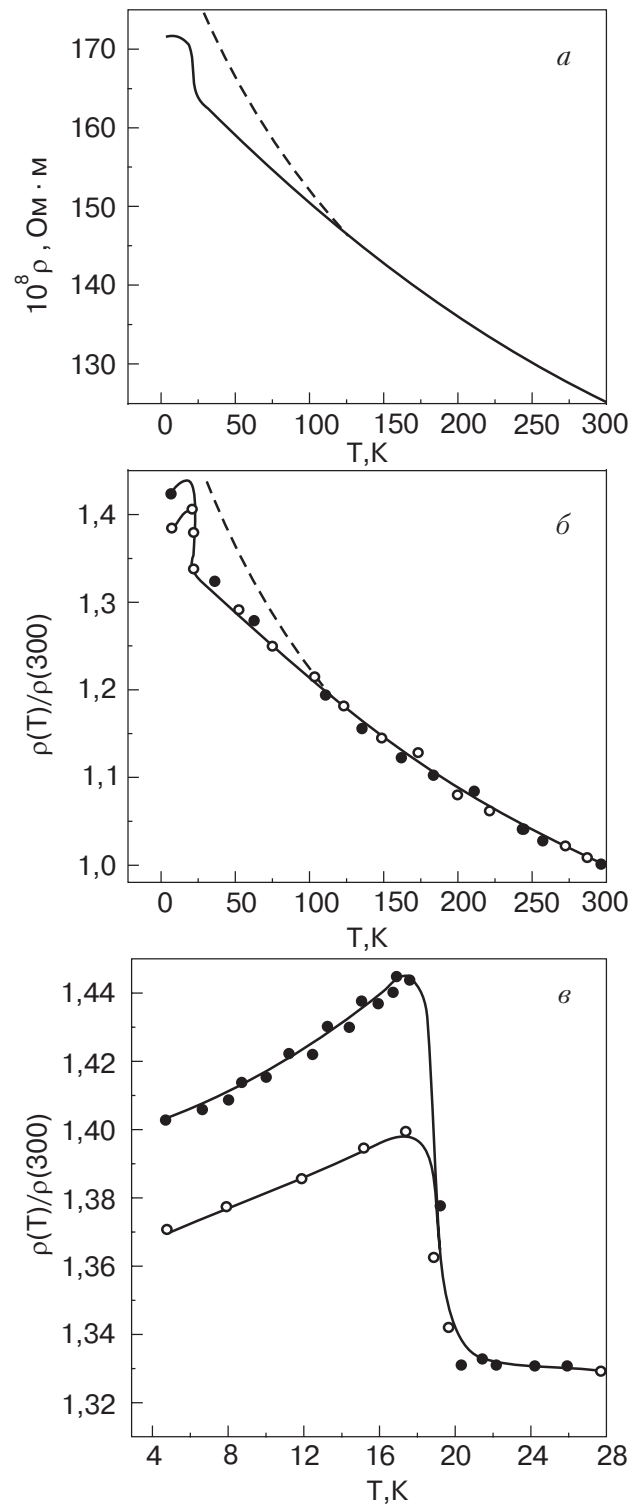


Рис. 3. Температурная зависимость удельного электросопротивления $\rho(T)$ поликристалла UCu₅Al согласно [20] (а). Зависимости $\rho(T)/\rho(300)$ в интервале температур 4,2–300 К (б) и 4,2–28 К (в) монокристалла UCu₅Al, измеренные вдоль оси его роста (точки) и перпендикулярно ей (кружки).

на рис. 3,в. Здесь при $T < 18$ К $\rho(T)$ вдоль оси роста монокристалла (точки) описывается зависимостью

$$\rho(T) = \rho_1 + BT^2, \quad (2)$$

где $\rho_1 = 117,7 \cdot 10^{-8}$ Ом·м, а $B = 1,3 \cdot 10^{-10}$ Ом·м·К⁻².

Из данных на рис. 3,б,в также следует, что при $T < T_N$ возникает небольшая, но вполне заметная анизотропия $\rho(T)$. При этом, как и вдоль оси роста монокристалла, в перпендикулярном ей направлении зависимость $\rho(T)$ приобретает металлический характер и также может быть описана уравнением типа (2), но $\rho_{\perp} < \rho_{\parallel}$. Укажем, что зависимость $\rho(T)$, описываемую (2), при $T < T_N$ имеют и другие подобные соединения урана, например, UCu_5In [27].

Исследования активной R_s - и реактивной X_s -компонент полного сопротивления соединения UCu_5Al в температурном интервале 300–5 К и частотном диапазоне 100 кГц–11 МГц показали, что частотная и температурная зависимости $R_s(f, T)$ и $X_s(f, T)$ могут быть описаны уравнениями

$$R_s = Df^{0,5}\rho^n, \quad X_s = Sf^{0,5}\rho^k, \quad (3)$$

где для измеряемых образцов D и S – некоторые константы, а n и k равны 0,135 и 0,007 соответственно.

На рис. 4 приведена зависимость теплоемкости образца № 2 UCu_5Al соединения в координатах C/T от T . Максимум теплоемкости, обусловленный антиферромагнитным упорядочением, наблюдается при $T = 16,37$ К, а начало перехода имеет место при $T = 18,7$ К.

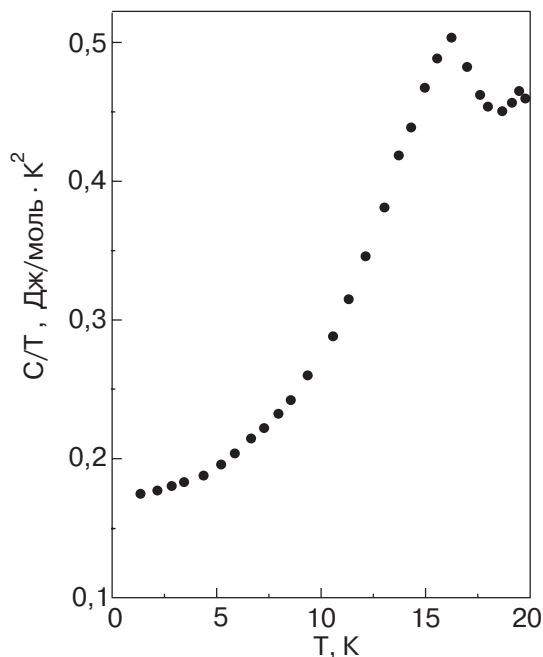


Рис. 4. Температурная зависимость C/T монокристалла UCu_5Al в интервале температур 1,5–20 К.

В области тех же температур, что и для чистого поликристаллического α -урана, на температурных зависимостях $\rho(T)$, $R_s(T)$ и $X_s(T)$ монокристаллического соединения UCu_5Al имеется ряд их аномалий.

На рис. 5,а,б приведены температурные зависимости $R_s(T)/R_s(62)$ монокристаллического образца UCu_5Al , измеренные при токе вдоль оси роста монокристалла (а) и в перпендикулярной плоскости (б). На рис. 5,в,г приведены те же зависимости, что на рис. 5,а,б, но для температурного диапазона 50–30 К. Измерения проводили на частоте 9 МГц.

Таким образом, при температурах вблизи 60 К, а также при температурах, где имеют место α_1 - и α_2 -переходы в α -уране, наблюдаются аномалии R_s в виде увеличения омических потерь относительно их регулярной зависимости. В области температур, где в чистом поликристаллическом α -уране обнаружен переход α_3 , в UCu_5Al соединении, согласно [20] и настоящей работе (рис. 3,б), наблюдается антиферромагнитное упорядочение, которое сопровождается значительным (до 6%) увеличением омических потерь.

$R_s(T)$ и $C(T)$ соединений урана со структурой типа $ThMn_{12}$

На частоте 9 МГц исследовали аномалии омических потерь $R_s(T)$ поликристаллических образцов соединений UCu_4Al_8 и монокристаллических UF_4Al_8 . Изучали также теплоемкость $C(T)$ соединения UCu_4Al_8 .

Температурные зависимости омических потерь и теплоемкости поликристаллического образца

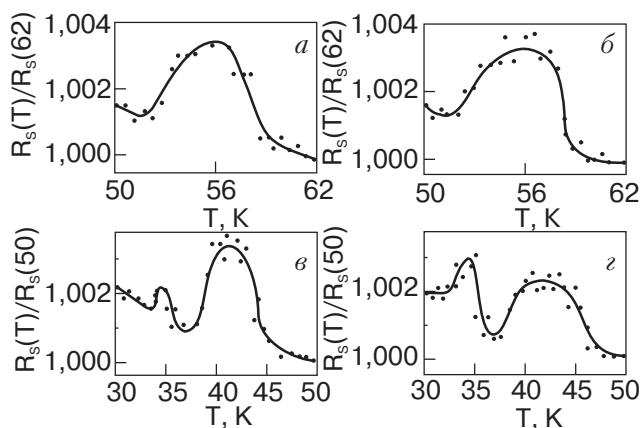


Рис. 5. Температурные зависимости $R_s/R_s(62)$ монокристалла UCu_5Al , измеренные на частоте 9 МГц при токе, протекающем вдоль (а) и перпендикулярно (б) оси роста монокристалла. Зависимости $R_s(T)/R_s(50)$, измеренные на частоте 9 МГц при токе, протекающем вдоль (в) и перпендикулярно (г) оси роста монокристалла.

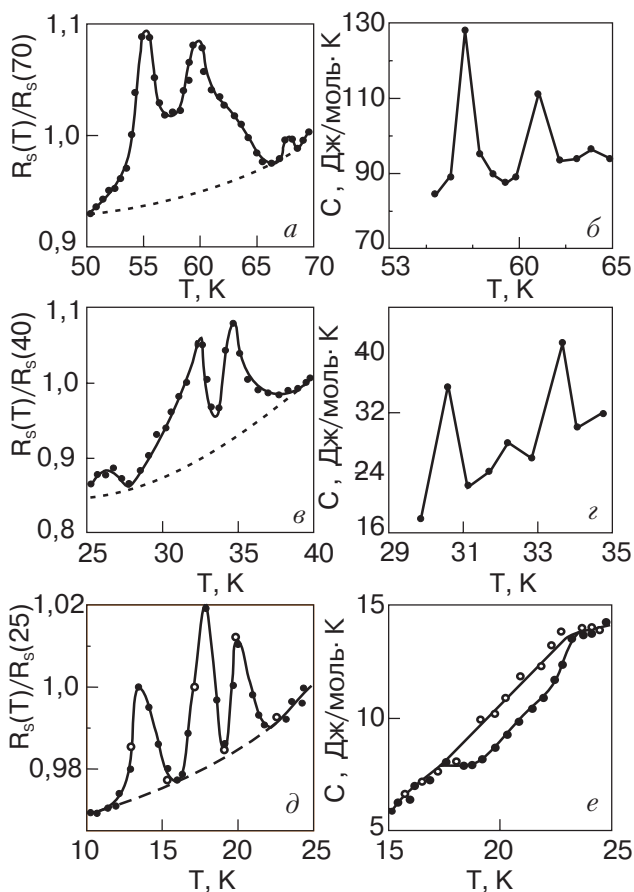


Рис. 6. Зависимости $R_s(T)/R_s(70)$ (a) и $C(T)$ в интервале температур 53–65 К (б), $R_s(T)/R_s(40)$ (б) и $C(T)$ в интервале температур 29–35 К (з), $R_s(T)/R_s(25)$ (д) и $C(T)$ в интервале температур 15–25 К (е) поликристалла UCu_4Al_8 (R_s измеряли на частоте 9 МГц).

UCu_4Al_8 в широком температурном интервале приведены в [21]. Из этой работы следует, что на зависимостях $R_s(T)$ и $C(T)$ в окрестности температур 60, 35, а также 20 К имеют место аномалии этих величин. Так как масштаб рисунков работы [21] не позволяет провести детальный анализ аномалий $R_s(T)$ и $C(T)$, то на рис. 6 в увеличенном масштабе приведены особенности этих величин, полученные нами в работе [21], а также дополнительными измерениями.

Аномалия R_s в температурном диапазоне 70–50 К проявляется в виде избыточного роста сопротивления с двумя максимумами при температурах 60 и 55 К (рис. 6,а). Такая же форма аномалий при температурах 62 и 57 К имеет место и на температурной зависимости теплоемкости (рис. 6,б).

На рис. 6,в,з видно, что аномалии R_s и C в области температур α_1 и α_2 имеют место не при температурах 43 и 38 К, как в уране, а несколько ниже. Так, максимумы R_s наблюдаются при 34,5 и 32 К, а теплоемкости — при 33,5 и 30,6 К.

В температурном интервале 25–10 К особенности R_s проявляются в виде серии пиков (рис. 6,д). При этом гистерезис R_s при охлаждении (точки) и отогреве (кружки) обнаружен не был. В то же время на зависимости теплоемкости $C(T)$ имеется неоднозначность значений для различных серий измерений, как это видно на рис. 6,е, где точками и кружками приведены различные серии измерений $C(T)$.

Так же, как и в случае UCu_4Al_8 , на температурной зависимости R_s UFe_4Al_8 имеют место особенности омических потерь, измеренных на частоте 70 МГц и представленных на рис. 7. В отличие от чистого поликристаллического α -урана, в темпера-

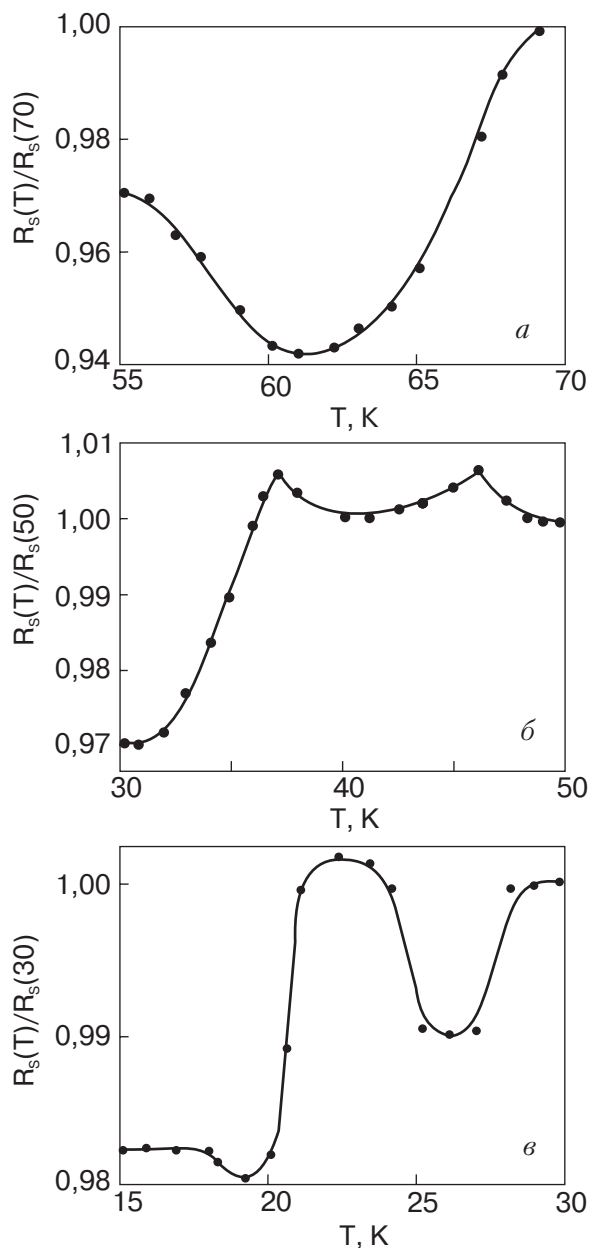


Рис. 7. Зависимости $R_s(T)/R_s(70)$ (a), $R_s(T)/R_s(50)$ (б) и $R_s(T)/R_s(30)$ (в) монокристалла UFe_4Al_8 , измеренные на частоте 9 МГц.

турном интервале 70–55 К наблюдается не увеличение, а снижение омических потерь с минимумом при 61 К. Аномалии R_s , характерные для температур α_1 - и α_2 -переходов, наблюдаются при 46 и 37 К (рис. 7,б).

В соединении UFe_4Al_8 также имеет место низкотемпературная особенность R_s , однако, в отличие от α -урана, она имеет вид не гистерезиса, а аномально-го увеличения омических потерь с максимумом при $T = 22,5$ К (рис. 7,в).

Аномалии омических потерь соединения $U_3Ni_3Sn_4$

На рис. 8,а кривой 1 представлена измеренная нами температурная зависимость $\rho(T)$ соединения $U_3Ni_3Sn_4$, а кривой 2 – $R_s(T)$ на частоте 9 МГц в интервале температур 300–4,5 К. Как видно на рис. 8,а, $R_s \sim \rho^{1/2}$ во всем температурном интервале измерений.

При исследовании зависимостей $\rho(T)$ и $R_s(T)$ соединения $U_3Ni_3Sn_4$ нами впервые был обнаружен гистерезис этих величин при $T > 60$ К (рис. 8,б). Кривой 1 (точки) показана зависимость $\rho(T)/\rho(300)$ при охлаждении соединения, а кривой 2 (кружки) – при нагревании образца. При этом $\rho(T)$ не зависит от температуры при нагревании выше 190 К. Таким образом, $T = 190$ К является некоторой характерной температурой. При одной и той же температуре удельное сопротивление охлаждаемого соединения меньше, чем отогреваемого (рис. 8,б). Если образец охлаждать не до $T < 60$ К, а до промежуточных температур (например, до $T = 130$ К, рис. 8,б), а затем его отеплять, то $\rho(T)$ также не будет зависеть от температуры при $T > 190$ К (кривая 3), но в интервале температур 190–130 К имеет другую зависимость. Если образец охлаждать после того, как он был отеплен только до 190 К (кривая 4), то гистерезис ρ также будет наблюдаться при $T > 60$ К и при нагревании повторяется (кривая 2) (на рис. 8,б охлаждение и отепление отмечено стрелками). Так же, как и в поликристаллическом α -уране, в соединении $U_3Ni_3Sn_4$ есть аномалии омических потерь вблизи температур, характерных для α -урана (рис. 9). Из данных на рис. 9,а,б следует, что при $T = 60, 43,5$ и 38 К имеют место особенности R_s в виде их увеличения относительно регулярной (пунктир) зависимости $R_s(T)$. В диапазоне температур 25–10 К имеет место гистерезис R_s (рис. 9,в) такого же типа, как и в поликристаллическом α -уране (см. рис. 2,г). В отличие от гистерезиса в области температур выше 60 К, рис. 8,б для $U_3Ni_3Sn_4$, на рис. 2,г и на рис. 9,в для гистерезисов в области температур 25–10 К меньшим оказывается сопротивление, измеряемое при отогреве образцов.

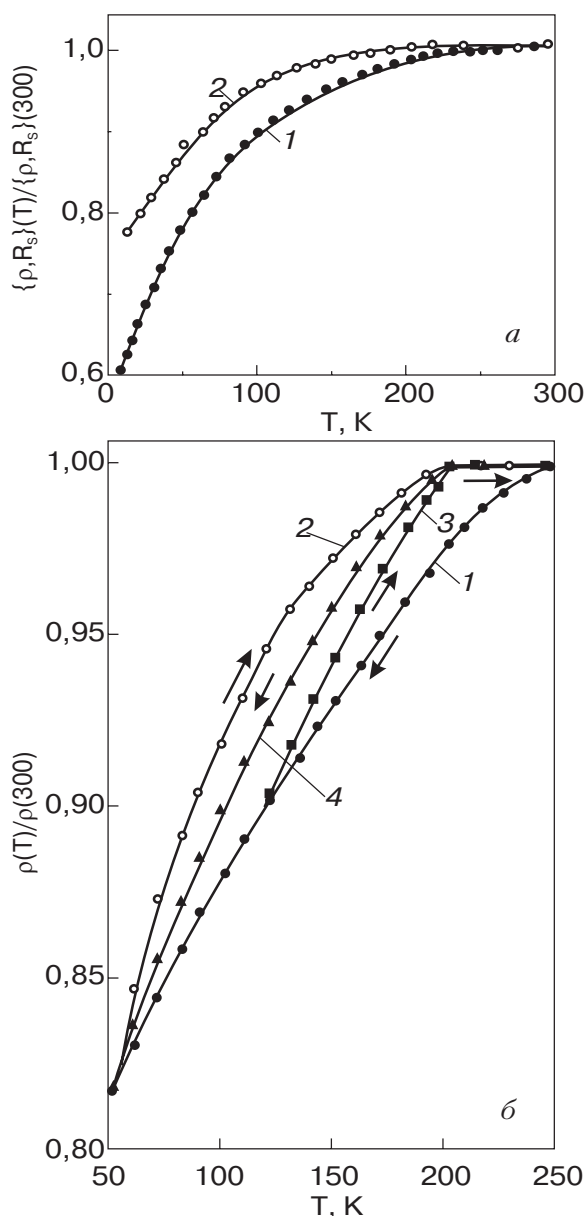


Рис. 8. Зависимость $\rho(T)/\rho(300)$ (1) и $R_s(T)/R_s(300)$ на частоте 9 МГц (2) образца $U_3Ni_3Sn_4$ (а). Зависимости $\rho(T)/\rho(300)$ $U_3Ni_3Sn_4$ в интервале температур 50–250 К (гистерезисные явления): охлаждение образца от 250 до 50 К (1); отогрев образца от 50 до 250 К (2); отогрев образца от 130 до 250 К (3); охлаждение образца от 190 до 50 К (4) (б).

Изменение линейных размеров α -урана и соединения UCu_5Al при их термоциклировании

На рис. 10 приведены значения: диаметра образца d α -урана (а), его длины l (б), а также объема V (в) в зависимости от количества термоциклов N , а на рис. 11 – те же зависимости от количества термоциклов для соединения UCu_5Al .

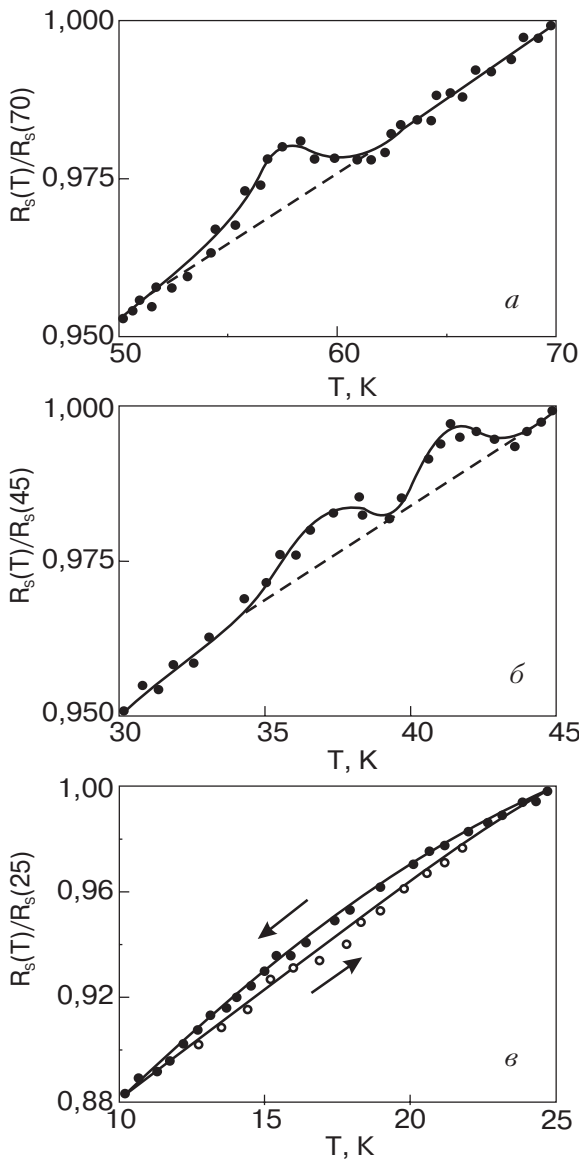


Рис. 9. Зависимости $R_s(T)/R_s(70)$, $R_s(T)/R_s(45)$ и $R_s(T)/R_s(25)$ $U_3Ni_3Sn_4$, измеренные на частоте 9 МГц.

Термоциклирование исследуемых образцов и измерение их размеров в процессе термоциклирования проводили в следующей последовательности.

Исследуемые образцы с диаметрами d_1 , длинами l_1 и объемами V_1 подвергли 150 термоциклам в интервале температур 300–77 К. Размеры контролировали через 25 термоциклов. После 50 циклов охлаждение – нагрев диаметры, длины и объемы образцов изменялись соответственно до значений d_2 , l_2 и V_2 (рис. 10, рис. 11, кривые 1). Далее образцы с размерами d_2 , l_2 и V_2 термоциклировали в интервале температур 300–4,2 К (150 циклов), в результате чего они изменили свои размеры до значений d_3 , l_3 и V_3 (рис. 10 и рис. 11, а, б, в, кривые 2).

После термоциклирования до гелиевых температур образцы с размерами d_3 , l_3 и V_3 снова термоцик-

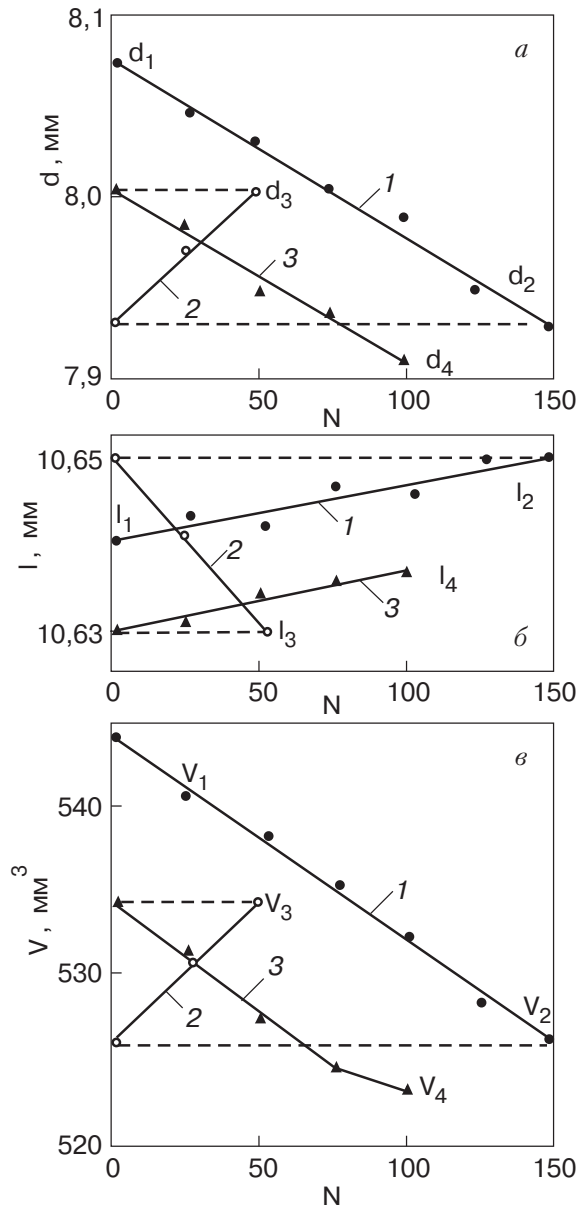


Рис. 10. Значения диаметра d (а), длины l (б) и объема V (в) поликристаллического образца α -урана в зависимости от количества термоциклов N ; термоциклирование в интервале температур T , К: 300–77 (1); 300–4,2 (2); повторное термоциклирование в интервале температур 300–77 К (3).

лировали в температурном интервале 300–77 К (100 циклов), в результате чего они изменили свои размеры до значений d_4 , l_4 и V_4 (рис. 10, 11, кривые 3).

Такой порядок проведения серий термоциклов дает возможность на одних и тех же образцах определить знак производной $\partial(d, l, V)/\partial N$ при их термоциклировании в температурных интервалах 300–77 К и 300–4,2 К.

На рис. 10 видно, что при термоциклировании образца α -урана до азотных температур его диаметр

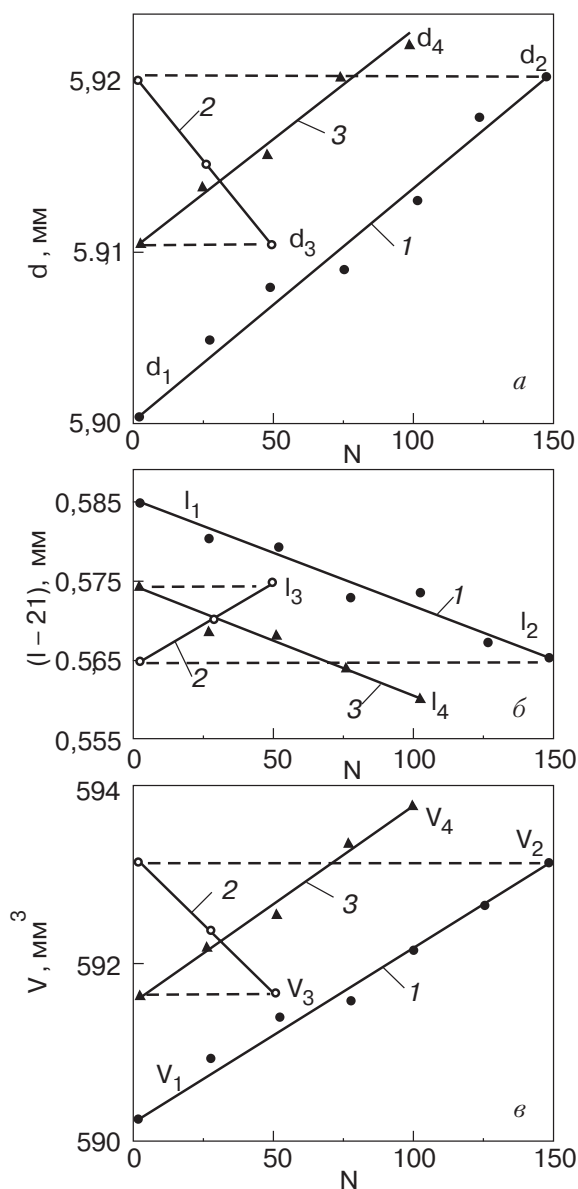


Рис. 11. Значения диаметра d (а), изменения длины $(l - 2l)$ относительно первоначальной (б), объема V (в) монокристалла UCu_5Al в зависимости от количества термоциклов N ; термоциклирование в интервале температур T , К: 300–77 (1); 300–4,2 (2); повторное термоциклирование в интервале температур 300–77 К (3).

и объем снижаются, а длина слабо увеличивается. В то же время при термоциклировании до гелиевых температур диаметр и объем увеличиваются, а длина снижается.

Что касается монокристаллического соединения UCu_5Al , то, как и в поликристаллическом α -уране, при термоциклировании его размеры изменяются. Однако, в отличие от образца α -урана, с увеличением количества термоциклов при охлаждении до

азотных температур увеличивается диаметр и объем, но снижается длина. При термоциклировании же до гелиевых температур диаметр и объем образца уменьшаются, а его длина увеличивается.

4. Обсуждение полученных результатов

Полученные нами результаты показывают, что функциональная связь между ρ , R_s , X_s и f исследуемых образцов α -урана подчиняется закону классической электродинамики [26]. При этом отметим, что во всем температурном диапазоне имеет место только классический скин-эффект. То, что реактивная часть импеданса на 10% ниже активной, характерно, согласно [26], для цилиндрических проводников всех металлов на частотах, соответствующих классическому скин-эффекту. Двукратное превышение экспериментальных значений R_s и X_s α -урана относительно их расчетных значений может свидетельствовать о неравномерности ρ образца α -урана вдоль его радиуса. При этом ρ может увеличиваться от центра к периферии образца и быть максимальным вблизи поверхности. Так как на постоянном токе измеряется интегральное значение ρ , оно меньше, чем ρ вблизи поверхности образца, которое и обуславливает увеличение R_s и X_s , т.е. величин, значения которых определяются поверхностью образца и состоянием физических величин вблизи нее.

В работах [20,28] показано, что в соединении UCu_5Al температурная зависимость $\rho(T)$ в интервале 300–100 К, где $\partial\rho/\partial T < 0$, обуславливается кондо-взаимодействием. При этом, согласно [28], зависимость $\rho(T)$ в диапазоне 100–20 К вызвана наличием в электронном спектре узкой электронной зоны. Из данных на рис. 3 следует, что при $T < T_N$ ρ поликристалла UCu_5Al практически не зависит от температуры, а у монокристалла снижается по квадратичному закону при понижении температуры, что может свидетельствовать о фермижидкостном поведении UCu_5Al при $T < T_N$. Таким образом, фазовый переход при $T = T_N$ принципиально перестраивает систему транспорта квазичастиц, меняя ее с так называемого полупроводникового на металлический тип.

Вышеприведенное свидетельствует о том, что в UCu_5Al электросопротивление обусловлено не только характерными для чистых металлов и соединений причинами (электрон-фононное взаимодействие, рассеяние на примесях, дислокациях и др.), но и магнитными, которые существенно изменяют привычный характер зависимости $\rho(T)$.

Возможно, что столь сложная зависимость ρ монокристалла UCu_5Al от многих физических факторов и является причиной того, что в различных мо-

нокристаллических образцах UCu_5Al может как иметь место, так и совсем не наблюдаться анизотропия значений ρ и $\partial\rho/\partial T$, измеренных в разных направлениях по осям кристаллической решетки (сравните, например, результаты настоящей работы и [29]).

Интересная особенность исследуемых монокристаллических образцов UCu_5Al состоит также в том, что при $T \leq T_N$ ρ_{\perp} оказывается меньше, чем ρ_{\parallel} (рис. 3,б,в) при одной и той же температуре. При этом отличие между ρ_{\parallel} и ρ_{\perp} начинается с середины перехода ($T = 18,8$ К), и их температурные максимумы совпадают при $T = 17,5$ К. Началом перехода можно считать $T = 20$ К. Таким образом, ширина фазового перехода $\Delta T_N = 2,5$ К.

Сравнивая результаты измерений теплоемкости, выполненные нами на монокристаллическом UCu_5Al , с результатами работы [20], полученными на поликристаллическом образце, можно показать, что значения величин γ и T_N близки по своим значениям: $\gamma = 0,175$ и $0,18$, $T_N = 16,4$ и $15,8$ К [20].

Из данных на рис. 3 следует, что скачкообразное увеличение сопротивления UCu_5Al начинается при 20 К, что совпадает с измерениями других авторов [20,28]. При этом $T_N = 17,5$ К, что также совпадает с результатами работы [30] (18 ± 1) К и близко к данным [20,31] (18 К). Самым существенным результатом сравнения явления магнитного упорядочения, изучаемого различными методами, является разница в значениях T_N . Данные по теплоемкости дают максимум теплопоглощения при температуре ниже, чем это следует из значений, полученных по магнитным и резистивным характеристикам. Так, максимум теплоемкости (рис. 4) наблюдается при $T = 16,4$ К, а в [20] — при 15,8 К. Таким образом, T_N , определяемые измерениями электросопротивления и теплоемкости одного и того же образца UCu_5Al , различны, что и было ранее отмечено в [20]. Этот факт к настоящему времени трудно объяснить. Однако можно сказать, что изменение электронного спектра в соединениях сильнее влияет на резистивные свойства UCu_5Al , чем на теплоемкость. Поэтому, возможно, температура начала перехода в антиферромагнитное состояние соответствует температуре, при которой сопротивления, измеренные в направлении разных осей, различны, а также имеет место минимум теплоемкости.

В работе [4] отмечено, что низкотемпературные фазы урана таят много неясного. В частности, непонятно, какой род фазовых переходов имеет место при характерных температурах. То же можно сказать и об изменении размеров образцов урана при их термоциклировании [1]. Поэтому эти вопросы заслуживают отдельного обсуждения.

В приведенной таблице систематизированы данные, касающиеся низкотемпературных аномалий α -урана и некоторых его соединений. Цифрами I и II обозначен род фазового перехода, а также то, что в указанном источнике при соответствующей температуре имеет место особенность того или иного физического параметра, указанного в таблице, без указания рода фазового перехода. Пустые клеточки обозначают, что в данном источнике при соответствующей температуре особенность физического параметра обнаружена не была.

Анализируя приведенные в таблице данные, отметим следующее. В ранних источниках, касающихся переходов α -урана, указано только наличие фазовых переходов без указания их рода за исключением [12] и [32]. В первой отмечено, что α_2 -переход I рода, а во второй, что α_1 -переход II рода. В работе [3] на основании анализа температурных зависимостей теплоемкости и омических потерь показано, что α_1 , α_2 и α_3 — фазовые переходы I рода.

Отметим, что во всех цитируемых источниках указано наличие одного-двух переходов, как в уране, так и в его соединениях. И только в [3,4,21] показано наличие трех переходов. При температуре ~ 60 К в чистом α -уране имеет место только аномальное изменение размеров кристаллической решетки, что может свидетельствовать о фазовом переходе первого рода. В то же время в соединениях урана в окрестности этой температуры наблюдаются фазовые переходы, а для UAs показано, что здесь происходит именно фазовый переход I рода.

Согласно [23], в окрестности α_1 в соединении UNiGe имеет место фазовый переход второго, а согласно [33] — первого рода.

Укажем, что в большинстве цитируемых источников практически отсутствуют сведения о кристаллической структуре исследуемых материалов при температурах до и после переходов. Исключение составляют работы [1,4,6,11,14]. В [1] указано, что при $T < 60$ К размер оси a α -урана увеличивается. То же самое указано и в [4,6], только ось a начинает увеличиваться при 47 К. Согласно [11], ось a увеличивается ниже 43 К.

В [14] отмечено, что в соединении UP при 22 К коэффициент линейного температурного расширения становится отрицательным. В связи с этим следует отметить, что изменение размеров характерно именно для фазового перехода первого рода, и, во-вторых, изменение размеров может быть вызвано магнитоэлектрическими явлениями, которые, как известно, высоки в актиноидах. Однако последнее требует дополнительных экспериментальных данных.

В результате настоящих экспериментальных исследований температурных зависимостей R_s впер-

Характеристики низкотемпературных аномалий физических величин α -урана и его соединений

Соединение	~ 60 К	$\alpha_1(43$ К)	$\alpha_2(37$ К)	$\alpha_3(23$ К)	Ссылка	Год
α -U	a	α, ρ, a			[13]	1952
		a			[6]	1961
	a	ρ, α			[1]	1962
		χ	χ		[9]	1966
			I		[5]	1968
		ВЗП			[12]	1979
		ВЗП			[11]	1980
		χ, a	χ	χ	[10]	1981
		II, ВЗП			[4]	1990
		I, ρ, C	I, ρ, C	I, ρ, C	[32]	2000
	R_s, X_s, ρ	R_s, X_s, ρ	R_s, X_s, ρ	I	[3]	2001
				I	Настоящая работа	2004
UP				a	[14]	1980
				I	[15]	1987
UAs	C				[16]	1982
	I			I	[17]	1980
UNi ₂				ρ	[18]	1980
U _(1-x) Pr _x P				χ	[19]	1980
UNiGe		I, χ			[33]	1988
		II, c			[23]	1991
UCu ₅ Al				ρ	[20]	1998
	R_s, X_s, ρ	R_s, X_s, ρ	R_s, X_s, ρ	R_s, X_s, ρ	Настоящая работа	2004
UCu ₄ Al ₈	R_s, ρ	R_s, ρ	R_s, ρ		[21]	2001
	I, R_s, C	I, R_s, C	I, R_s, C	I, R_s, C	Настоящая работа	2004
UFe ₄ Al ₈	R_s	R_s	R_s	R_s	Настоящая работа	2004
U ₃ Ni ₃ Sn ₄	I, R_s	R_s	R_s	I, R_s	Настоящая работа	2004

вые установлено, что и в α -уране, и в его соединениях UCu₅Al, UFe₄Al₈, UCu₄Al₈ и U₃Ni₃Sn₄ аномалии поверхностного сопротивления имеют место как в окрестности температуры 60 К, так и в окрестности температур фазовых переходов α_1 -, α_2 - и α_3 -урана. Подчеркнем, что аномалии R_s мы наблюдали на образцах поликристаллического α -урана с характерными параметрами ρ для урана, а также в поли- и монокристаллических соединениях с различными типами кристаллических решеток.

На рис. 6,б,г,е приведены экспериментальные значения теплоемкости, полученные в разных сериях измерений. Дополнительными измерениями теплоемкости установлено, что в этих температурных интервалах характер зависимостей $C(T)$ обусловлен термической предисторией образца и кинетическими параметрами эксперимента (скоростью нагрева, температурным «шагом»). Это явление характерно для фазовых переходов I рода. То же самое можно утверждать об α_3 -переходе в α -уране, а также в со-

единении $U_3Ni_3Sn_4$, так как здесь наблюдается гистерезис на зависимости $R_s(T)$. Отметим, что при $T = 60$ К в этом соединении, видимо, также происходит фазовый переход I рода, что подтверждается наличием гистерезиса на $R_s(T)$ зависимости (рис. 8, б).

Таким образом, в настоящей работе, как и в некоторых цитируемых работах, показано, что фазовые переходы при характерных температурах урана и его соединений являются переходами I рода. Исключением является соединение $UNiGe$, для которого имеются противоречивые данные для перехода α_1 при 43 К [23,33].

Особо отметим следующее. Авторы работы [16] в соединении UAs на зависимости $C(T)$ при 62 К наблюдали аномалию теплоемкости, а в [17] показано, что при этой температуре здесь имеет место фазовый переход I рода. Как было указано выше, в соединении $ThAs$ в окрестности температуры 60 К аномалии физических величин отсутствуют. К тому же в работе [27] найдено, что на зависимостях $\chi(T)$, $\rho(T)$ и $C(T)$ соединения UCu_5In при $T = 25$ К имеют место аномалии этих величин. Из этой же работы видно, что при замене урана на торий ($ThCu_5In$) на зависимостях $\rho(T)$ и $C(T)$ аномалии этих величин уже не наблюдаются.

Авторы [21] исследовали ряд псевдобинарных соединений с кристаллической структурой $ThMn_{12}$. Из этой работы следует, что только в соединении UCu_4Al_8 в окрестности температуры 60 К, а также при температурах, соответствующих переходам α_1 , α_2 и α_3 (см. также рис. 6), обнаружены аномалии ρ и C . Из сравнения рис. 6 и материалов работы [21] можно прийти к заключению, что в соединении RFe_4Al_8 (R – редкоземельный металл) замена $R \rightarrow U$ приводит к появлению аномалий R_s при характерных температурах (см. рис. 7), в то время как при $R \equiv Lu, Y, Sc, Ce$ аномалии на зависимости $R_s(T)$ обнаружены не были.

Вышеприведенное свидетельствует о том, что во всех соединениях аномалии омических потерь и теплоемкости в окрестности температур 60, 43, 37 и 23 К обусловлены именно ураном, а не каким-либо другим элементом, т.к. при замене урана на другой элемент при сохранении той же кристаллической структуры указанные особенности не наблюдаются.

Известно [34], что причиной изменения размеров урана при его термоциклировании от комнатной до высоких температур являются либо фазовые превращения (если температурный цикл включает температуры, при которых они происходят) [35], либо анизотропия коэффициента линейного расширения [36].

При глубоком охлаждении относительно комнатной температуры, видимо, немаловажную роль

в изменении размеров образца играет именно анизотропия линейного расширения по осям кристаллической решетки. Это подтверждается тем, что при термоциклировании в пределах 77–300 К образца α -урана его диаметр снижается, а длина увеличивается, в то время как при термоциклировании в пределах 4,2–300 К его длина снижается, а диаметр растет (рис. 9). Как указано в [1,4,6,11,13,14], именно между азотной и гелиевой температурами (~ 60 К) происходит изменение знака крутизны линейного расширения урана по оси a (ось a начинает увеличиваться).

Сравнивая полученные результаты с известными, можно отметить много общих свойств в изменении размеров α -урана при его термоциклировании в пределах от комнатной до высокой и от комнатной до криогенных температур. В частности, то, что при термоциклировании до 4,2 К крутизна $\partial(l, d, V) / \partial N$ меняет знак, свидетельствует о том, что изменение размеров, как и при термоциклировании от комнатной до высоких температур, происходит в процессе охлаждения образца, а не его нагрева, что также следует из результатов работы [37].

Как при термоциклировании от комнатной до высоких температур [37], так и от комнатной до криогенных температур размеры изменяются линейно с увеличением количества термоциклов.

Экспериментально установлено, что изменение размеров α -урана происходит именно при быстром охлаждении образца и нагреве с любой скоростью. Так, изменение размеров образцов имеет место только при их охлаждении резким окунанием в жидкий азот или гелий. При этом время отепления – от единиц секунд до десяти минут. Если же образец охлаждать медленно (образец медленно опускался к уровню криогенной жидкости), то, независимо от скорости его нагрева (при быстром нагреве охлажденный до 77 К образец резко окунался в жидкость при комнатной температуре), изменение размеров образца замечено не было. Эти результаты совпадают с данными работ [1,37] в случае термоциклирования урана от комнатной до высоких температур.

При термоциклировании от комнатной до криогенных температур изменяются не только размеры образца, но и его объем, как и при термоциклировании от комнатной до высоких температур [1].

Все вышеуказанное для поликристаллического α -урана относится и к монокристаллу UCu_5Al (рис. 11). Однако, согласно [1], монокристаллы α -урана при их термоциклировании размеров не изменяют, так как для изменения размеров при термоциклах требуется наличие границ зерен с большой взаимной разориентацией. То, что мы наблюдали изменение размеров монокристалла, свидетельству-

ет о том, что-либо условия для роста последних могут быть иные, или термоциклировали монокристалл с дефектами.

5. Заключение

Впервые установлено, что на температурных зависимостях удельного электросопротивления ρ и поверхностного сопротивления R_s образцов α -урана, а также его соединений UCu_5Al , UCu_4Al_8 , UFe_4Al_8 и $U_3Ni_3Sn_4$ при температурах вблизи 60 К, а также в окрестности переходов α_1 (43 К), α_2 (37 К) и α_3 (23 К) наблюдаются аномалии. Ранее подобные аномалии других физических величин были обнаружены при двух-трех характерных температурах в различных образцах, что не давало оснований для вывода об общности таких аномалий для урана и его соединений. На основании наших экспериментальных результатов и анализа имеющихся литературных данных мы считаем, что аномалии различных физических величин в соединениях, содержащих уран в качестве компонента, определяются ураном. Из литературных источников и наших измерений следует, что, как правило, эти аномалии вызваны фазовыми переходами первого рода при соответствующих характерных температурах. Выяснено, что фазовый переход при $T = T_N$ в соединении UCu_5Al кардинально перестраивает систему рассеяния квазичастиц, что изменяет характер температурной зависимости омических потерь с полупроводникового при $T > T_N$ на металлический при $T < T_N$. При $T < T_N$ $\rho(T)$ соединения спадает по квадратичному закону, что может быть показателем фермижидкостного поведения. При $T < T_N$ наблюдается осевая анизотропия удельного и поверхностного сопротивлений: сопротивления, измеренные в направлении, перпендикулярном оси роста монокристалла, ниже, чем вдоль оси роста монокристалла.

Обнаружено, что при многократном термоциклировании от комнатной до низких температур изменяются размеры образцов урана и соединения UCu_5Al . По своей форме и свойствам эти изменения подобны тем, которые наблюдаются при термоциклировании от комнатной до высоких температур. Показано, что изменение размеров образцов происходит только при их захлаживании с большой скоростью.

Авторы благодарны А.И. Прохватулову за прочтение рукописи, ценные замечания и полезные обсуждения.

1. А.Н. Холден, *Физическое металловедение урана*, Госнаучтехиздат по черной и цветной металлургии, Москва (1962).
2. P.Ch. Sahu, M. Yosuf, and K. Govinda Rajan, *Physica* **B183**, 145 (1993).
3. J.C. Lashley, B.E. Lang, J. Boerio-Goates, B.F. Woodfield, G.M. Schmiedeshoff, E.C. Gay, C.C. McPheeters, D.J. Thoma, W.L. Hulst, J.C. Cooley, R.J. Hanrahan, and J.L. Smith, *Phys. Rev.* **B63**, 224510-1 (2001).
4. Л.Г. Чачхиани, З.Б. Чачхиани, *Интерметаллические соединения урана*, Изд-во Мецниереба, Тбилиси (1990).
5. J.W. Ross and D.J. Lam, *Phys. Rev.* **165**, 617 (1968).
6. E.S. Fisher and H.J. McSkimin, *Phys. Rev.* **124**, 67 (1961).
7. E.S. Fisher and D. Dever, *Solid State Commun.* **8**, 649 (1970).
8. E.S. Fisher and D. Dever, *Phys. Rev.* **170**, 607 (1968).
9. J.C. Jousset, *Acta Metall.* **14**, 193 (1966).
10. C.A. Cornelius and T.F. Smith, *Solid State Commun.* **38**, 599 (1981).
11. H.G. Smith, N. Wakabayashi, W.N. Crummett, R.M. Nichlow, G.H. Lander, and E.S. Fisher, *Phys. Rev. Lett.* **44**, 1612 (1980).
12. J.M. Fournier, A. Delapalme, C. Leyen, and G.H. Lander, *J. Phys. (Paris)* **40**, 4 (1979).
13. A.F. Schuch and H.L. Laquer, *Phys. Rev.* **86**, 803 (1952).
14. F. Hulliger and O. Vogt, *Physica* **B102**, 316 (1980).
15. P.G. Thérond, J.M. Fournier, J. Schoenes, and O. Vogt, *J. Magn. Magn. Mater.* **64**, 45 (1987).
16. O. Vogt and H. Barthalim, *J. Magn. Magn. Mater.* **29**, 291 (1982).
17. J. Rossat-Mignod, D. Burlet, S. Quezell, and O. Vogt, *Physica* **B102**, 237 (1980).
18. L. Havela, J. Hřebík, J. Sternberk, A. Meňovsky, and A. Zentko, *Phys. Status Solidi* **A59**, K165 (1980).
19. R. Troć, *Physica* **102**, 233 (1980).
20. R. Troć, R. Andruszkiewicz, R. Pietri, and B. Andraka, *J. Magn. Magn. Mater.* **183**, 132 (1998).
21. 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).
22. B. Ptasiewicz-Bak, A. Baran, W. Suski, and J. Leciewicz, *J. Magn. Magn. Mater.* **76–77**, 939 (1988).
23. V.M. Dmitriev, V.N. Eropkin, A.M. Gurevich, A.P. Isakina, V.M. Kobelev, A.J. Prokhvatilov, L.V. Shlyk, R. Troć, and V.H. Tran, *Fiz. Nizk. Temp.* **17**, 1051 (1991).
24. M. Drulis, A. Baran, B. Stalinski, W. Suski, R. Felten, F. Stedlich, and L. Pawlak, *Thermochem. Acta* **139**, 219 (1989).
25. А.М. Гуревич, В.М. Дмитриев, В.Н. Еропкин, Л.А. Ищенко, Н.Н. Пренцлау, Л.В. Шлык, *ФНТ* **25**, 15 (1999).
26. С. Рамо, Дж. Уиннери, *Поля и волны в современной радиотехнике*, ОГИЗ, Москва—Ленинград (1948).

27. D. Kaczorowski, R. Troć, A. Czopnik, A. Jezowski, Z. Henkie, and W. Zaremba, *Phys. Rev.* **63**, 144401 (2001).
28. Е.М. Левин, в кн.: *Отчет о научно-исследовательской работе международной лаборатории сильных магнитных полей и низких температур*, Вроцлав, Польша (1998), с. 21.
29. V.H. Tran, R. Troć, J. Stepien-Damm, T. Komatsubara, F. Steglich, R. Hauser, and E. Bauer, *Phys. Rev.* **B66**, 054421 (2002).
30. R. Troć, V.H. Tran, M. Wolczynz, G. André, and F. Bourée, *J. Magn. Magn. Mater.* **190**, 251 (1998).
31. B. Nowak and R. Troć, *Solid State Nuclear Magnetic Resonance* **14**, 157 (1999).
32. J.-C. Marmeggi, R. Currat, A. Boutet, and G.H. Lander, *J. Phys. Soc. Jpn.* **70**, 22 (2001).
33. R. Troć and V.H. Tran, *J. Magn. Magn. Mater.* **73**, 389 (1988).
34. С.Ф. Ковтун, В.С. Коган, *ФММ* **13**, 316 (1962).
35. А.М. Косевич, Л.В. Танатаров, *ФММ* **8**, 255 (1959).
36. Р.И. Гарбер, С.Я. Заливадный, В.М. Михайловский, *ФТТ* **2**, 1052 (1960).
37. Б.Г. Лазарев, А.И. Судовцев, Л.Г. Смирнов, *ФММ* **7**, 122 (1959).

Low-temperature anomalies of Ohmic losses in a frequency range 0–100 MHz, heat capacity and linear sizes of samples of uranium and some of its compounds

V.M. Dmitriev, N.N. Prentslau, A.M. Gurevich,
L.A. Ischenko, W. Suski,
A.V. Terekhov, and R. Troć

On the basis of experimental results, the anomalies of heat capacity and electrical resistance were detected for the first time in α -uranium and UCu_5Al , UCu_4Al_8 , UFe_4Al_8 , $\text{U}_3\text{Ni}_3\text{Sn}_4$ compounds in the vicinity of 60 K and α_1 (43 K), α_2 (37 K) and α_3 (23 K) transitions. The anomalies in these compounds are presumably attributed to the effect of uranium. It is found that in UCu_5Al the dependence of Ohmic losses changes its nature from semiconducting at $T > T_N$ ($T_N = 20$ K) to metallic at $T < T_N$. The dimensions of the α -U and UCu_5Al samples vary on repeated thermocycling from room to low temperatures.