

## Нелинейная проводимость компенсированного поликристаллического металла в сильном магнитном поле

И.И. Логвинов, Ю.Н. Цзян

*Физико-технический институт низких температур им. Б.И. Веркина НАН Украины  
пр. Ленина, 47, г. Харьков, 61103, Украина*

E-mail: logvinov@ilt.kharkov.ua

Статья поступила в редакцию 4 октября 2002 г.

При гелиевых температурах в магнитном поле исследованы вольт-амперные характеристики (ВАХ) тонких поликристаллических образцов металла (чистого олова), помещенных в твердотельную среду для создания воспроизводимых условий эксперимента. При указанном характере теплоотвода на поверхности металла впервые в таких образцах реализована нелинейная  $S$ -образная вольт-амперная характеристика. Изучены условия возникновения температурно-электрической неустойчивости в металле с  $S$ -образной ВАХ в зависимости от реактивных параметров цепи.

При гелійових температурах в магнітному полі досліджено вольт-амперні характеристики (ВАХ) тонких полікристалічних зразків металу (чистого олова), вміщених в твердотільне середовище для створення умов експерименту, що відтворюються. При зазначеному характері тепловідведення на поверхні металу вперше в таких зразках реалізовано нелінійну  $S$ -образну вольт-амперну характеристику. Вивчено умови виникнення температурно-електричної нестійкості в металі з  $S$ -образною ВАХ в залежності від реактивних параметрів кола.

PACS: 72.15.Gd, 72.15.-v

Нелинейные явления в металлической проводимости, способные возникать при джоулевом разогреве образцов [1], остаются малоизученными из-за специфических условий их наблюдения. Последние состоят в том, что достижение нелинейного режима при указанной постановке эксперимента требует квазиadiaбатических условий для электрон-фононной системы металла, реализация которых приводит к необходимости использовать не слишком тонкие образцы, подводит к образцу токи порядка  $10^5 \text{ А/см}^2$  и в то же время поддерживать постоянной температуру в термостате, не допуская кризиса кипения жидкого гелия.

В экспериментах с непосредственным контактом металлических образцов с низкотемпературной охлаждающей жидкостью  $N$ - и  $S$ -образные вольт-амперные характеристики при джоулевом нагреве образца в большинстве случаев обусловлены нелинейностью теплоотвода в данных средах.

В случае с жидким гелием подобный режим возникает при удельных потоках тепла  $q$  через поверхность металла — от  $q \approx 0,1 \text{ Вт/см}^2$  («пузырьковое» кипение) до  $q \geq 0,5 \text{ Вт/см}^2$  («пленочное» кипение, характеризуемое образованием газовой пленки вокруг образца), которые соответствуют значительным подводимым в криостат мощностям (1–10 Вт) и большому расходу криогенной жидкости.

Однако использование кризиса кипения не единственный путь реализации нелинейного режима проводимости. В наших предыдущих работах было выяснено, что такое возможно и в отсутствие прямого контакта образцов с жидкостью [2,3]. При этом устраняется нестабильность теплоотвода посредством охлаждающей жидкости, связанная с конвективными потоками и кризисом кипения, что дает возможность изучать характеристики металла в воспроизводимом нелинейном режиме, включая эффекты, связанные с температурно-электрической неустойчивостью. При низких температурах тепло-

вой поток через диэлектрический теплоотвод — монотонно возрастающая функция температуры, причем существует область температур, где скорость возрастания удельного сопротивления  $\rho(T)$  больше, чем скорость роста теплового потока  $q(T)$  при увеличении температуры.

Действительно, из уравнения теплопроводности при тепловом балансе между удельной джоулевой мощностью, выделяемой в образце, и удельным тепловым потоком с поверхности образца вытекает следующее выражение для дифференциальной проводимости металла [1,4]:

$$\frac{dj}{dE} = \frac{\rho(T)[q(T)/\rho(T)]'_T}{[q(T)\rho(T)]'_T}. \quad (1)$$

Таким образом, из (1) следует, что для получения нелинейных ВАХ  $N(S)$ -образного вида поведение функций  $q(T)$  и  $\rho(T)$  должно обеспечивать изменение знака этого выражения. Как известно [5], для многих теплоотводящих сред тепловой поток  $q(T)$  от образца к термостату может быть аппроксимирован функцией вида  $q(T) \approx \alpha T^{m(T)}$ , где  $\alpha$  и  $m$  положительные числа. В результате, для металла можно приближенно записать  $\rho_{H=0}(T) = \rho_0 + \beta T^{n(T)} = \rho_0 + \rho_T$ , где  $\beta$  и  $n$  также положительны,  $(q\rho)'_T$  — всюду положительная функция, и знак выражения (1) для различных участков вольт-амперных характеристик можно определить из соотношения следующих параметров:

$$\frac{dj}{dE} = \{m\rho_0 + [m - n]\rho_T\}F_1(T), \quad (2)$$

где  $F_1(T)$  положительная функция.

Из выражения (1) следует, что в случае обратной зависимости сопротивления от температуры, например, при  $\rho(T) \propto [\rho_T(H=0)]^{-1}$ , для дифференциального сопротивления мы получим выражение, аналогичное (2)

$$\frac{dE}{dj} = \{m\rho_0 + [m - n]\rho_T\}F_2(T), \quad (3)$$

где функция  $F_2(T)$  положительно определена.

Таким образом, ВАХ образца способна приобрести нелинейный вид, характеризуемый наличием участков отрицательной дифференциальной проводимости ( $N$ - или  $S$ -образная ВАХ), только при одновременном выполнении сразу нескольких условий. Во-первых,  $\rho_T \gg \rho_0$  для выполнения неравенства  $[n - m]\rho_T > m\rho_0$  и, во-вторых,  $m - n < 0$ , требующего более слабой зависимости функции  $q(T)$  от температуры, чем  $\rho(T)$ , а это возможно, когда температуры электронов и кристаллической решетки совпадают. Это соответствует режиму квазиadiaбатического разогрева образца, т. е. когда время ре-

лаксации электронов намного меньше тепловых времен. В результате область температур, где возможна реализация отрицательной дифференциальной проводимости (сопротивления) металлического образца, ограничена как снизу, так и сверху, что и обеспечивает  $N$ -образный либо  $S$ -образный вид ВАХ таких образцов.

Как следует из (1), при  $\rho(T) \propto \rho_T$ , т. е. при температурной зависимости сопротивления, которой металл обладает в отсутствие магнитного поля, дифференциальная проводимость снижается при увеличении температуры, проходит через нуль, достигая отрицательных значений, и снова возрастает — такие ВАХ имеют  $N$ -образный вид. Наличие обратной зависимости сопротивления от температуры по сравнению с зависимостью  $\rho(T)$  при  $H = 0$  приводит к снижению дифференциального сопротивления при увеличении температуры и при достижении отрицательных значений формирует  $S$ -образный вид ВАХ. Такую зависимость  $\rho(T)$  можно получить, применяя сильное магнитное поле, в котором у некоторых (компенсированных) металлов она близка к  $\rho_H(T) \propto H^2/\rho_{T(H=0)}$  даже при тех температурах, где выполнение необходимых неравенств  $\rho_T \gg \rho_0$  и  $[m - n] < 0$  достигается в условиях, при которых  $\omega\tau_{(H=0)}$  не слишком отличается от 1. Здесь  $\omega$  и  $\tau_{(H=0)}$  — циклотронная частота и время релаксации.

Известно, что при соответствующих геометрических параметрах металлических образцов в условиях рассмотренных нелинейных режимов могут возникать пространственно неоднородные распределения температуры, электрического поля и тока [1,4]. При ВАХ  $N$ -типа — по длине образца в виде температурно-электрического домена (ТЭД), а при ВАХ  $S$ -типа — по ширине образца в виде токового шнура (ТШ).

Ввиду перечисленных выше многочисленных ограничений в реализации нелинейного режима для металлических образцов явления, связанные с отрицательным дифференциальным сопротивлением в металлах, остаются до сих пор недостаточно изученными. В частности, в тонких металлических пластинках не удавалось наблюдать ВАХ  $S$ -типа.

В настоящей работе впервые исследован воспроизводимый нелинейный режим с ВАХ  $S$ -типа, полученный в поликристаллическом металле (олове) в отсутствие кризиса кипения на его поверхности и в криогенной системе в целом, и обнаружена неустойчивость напряжения на образце, связанная с его температурно-электрической неустойчивостью (без образования ТШ). Изучена возможность применения для реализации стабильного режима с отрицательным дифференциальным сопротивлением теплоотводящих сред разного вида — стеклопластика,

высокотеплопроводящего диэлектрика (аральдита) и кристаллической серы.

Указанный режим исследовали в образцах чистого поликристаллического олова в виде полосок размером  $L \times W \times d \approx 100 \times 0,8 \times 0,09$  мм. Принцип и техника измерений аналогичны, описанным в работе [3], и дополнены оборудованием, позволявшим проводить измерения во внешнем поперечном магнитном поле с индукцией до 5 Тл. Все представленные результаты измерены при постоянном токе через образцы в интервале от 0 до 80 А.

На рис. 1 показана вольт-амперная характеристика образца, непосредственно погруженного в жидкий гелий, в магнитном поле 2 Тл. Видно, что в тонких поликристаллических образцах в условиях сравнительно небольших значений  $[\rho(T, H)]'_T \approx 0,3 \text{ Ом} \cdot \text{м}/\text{К}$  ( $\omega\tau_{(H=0)}$  чуть больше 1) при температурах, поддерживающих кризис кипения гелия на их поверхности, можно наблюдать режим отрицательного дифференциального сопротивления, который ранее не удавалось реализовать в подобных образцах в тех же магнитных полях [6]. Однако, как видно на рисунке, эффект сопровождается гистерезисом, что подтверждает температурную нестабильность нелинейного режима в этих условиях. Ранее нам приходилось сталкиваться с нестабильностью при изучении *N*-образного режима ВАХ (см., в частности, работу [7], когда кризис кипения на поверхности металлического образца значительно снижал ток, необходимый для получения температурно-электрического домена, и тоже приводил к гистерезису).

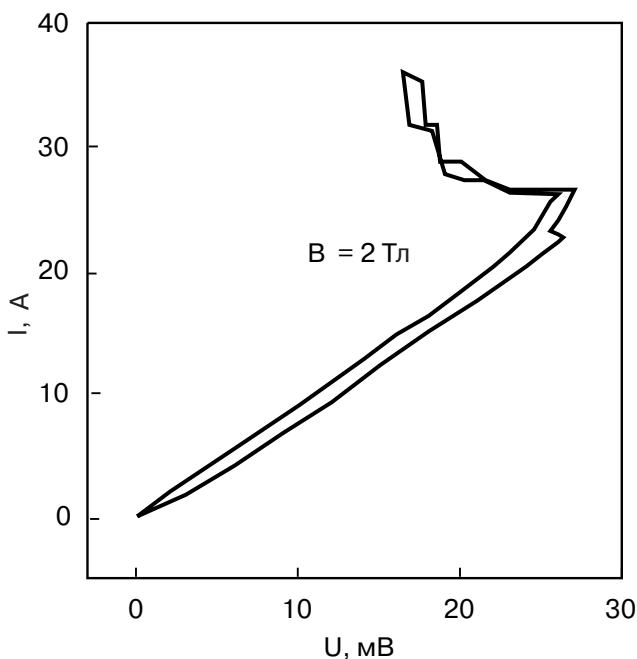


Рис. 1. ВАХ поликристаллической пластины олова в среде жидкого гелия.

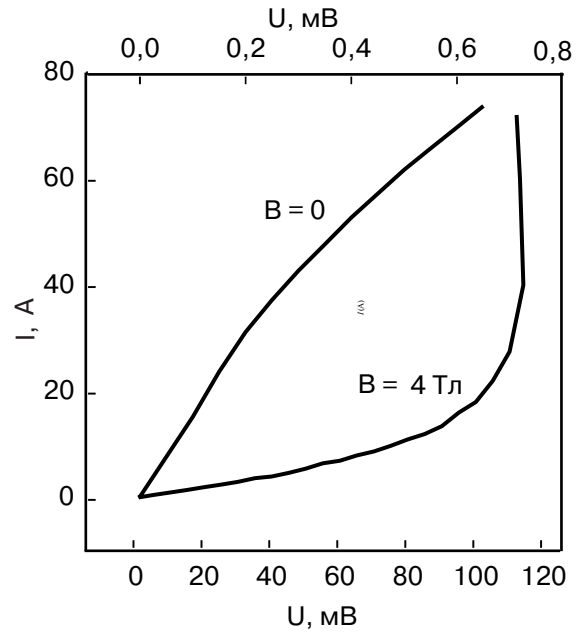


Рис. 2. ВАХ поликристаллической пластины олова с теплоотводящим стеклопластиком;  $T_0 = 4,2 \text{ К}$ .

Результаты исследований ВАХ *S*-типа в условиях отсутствия кризиса кипения жидкости на поверхности образцов и в криогенной системе в целом приведены на рис. 2–4. Видно, что в таких условиях эксперимента *S*-образный режим нелинейности, получаемый при разогреве образца с обратной зависимостью  $\rho(T, H)$  от температуры по сравнению с температурной зависимостью  $\rho(T, H = 0)$ , проявляется наиболее выразительно при использовании в качестве теплоотводящей среды кристаллической серы

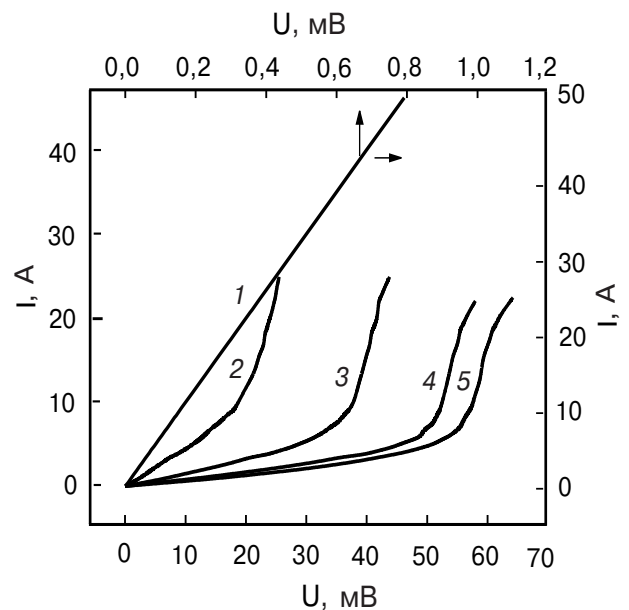


Рис. 3. ВАХ поликристаллической пластины олова в среде твердого диэлектрика (аральдит) в различных магнитных полях  $B$ , Тл: 0(1); 1(2); 2(3); 3(4); 4(5);  $T_0 = 4,2 \text{ К}$ .

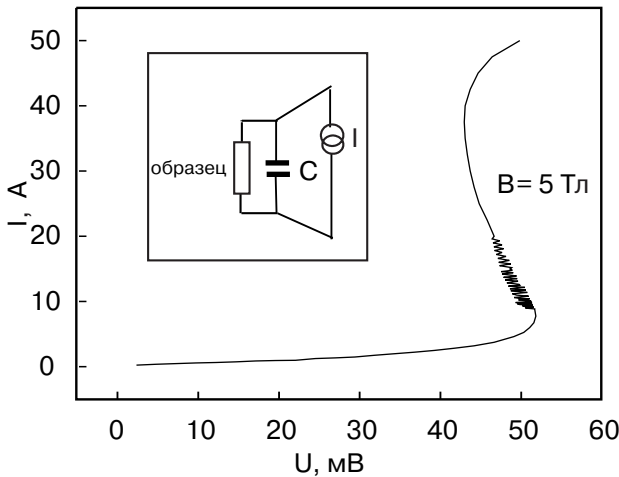


Рис. 4. ВАХ поликристаллической пластины олова в среде кристаллической серы.  $T_0 = 4,2$  К,  $B = 5$  Тл. Вставка — схема подключения электрической емкости.

(рис. 4). Этому случаю соответствует температурное поведение функций  $q(T)$  и  $R(T, H = 5$  Тл) (кр. 2 и 3, рис. 5), вычисленных по данным измерения ВАХ с использованием уравнения теплового баланса

$$R(T)I^2 = q(T)A$$

( $A$  — площадь поверхности образца). Температурная зависимость функции  $[qR](T)$  (кр. 1) дает представление о температурной области отрицательного дифференциального сопротивления исследованного образца.

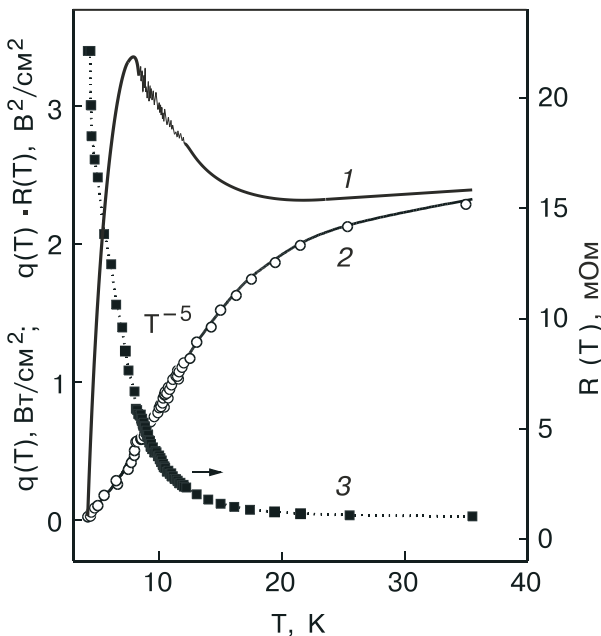


Рис. 5. Температурные зависимости функций  $[qR](T)$  (1),  $q(T)$  (2) и  $R(T)$  (3) для ВАХ поликристаллической пластины олова в среде кристаллической серы в магнитном поле 5 Тл.

Как известно из теории нелинейных цепей, при наличии в цепи источника постоянного тока, накопителя энергии и элемента с отрицательным дифференциальным сопротивлением (ОДС) возможно получить релаксационные автоколебания. Известно, что для образцов с ВАХ  $S$ -типа подключение параллельно к образцу достаточно большой электрической емкости  $C$  приводит к автоколебательной неустойчивости, что и удалось реализовать в эксперименте на участке ВАХ с наибольшей величиной ОДС. При записи ВАХ самописцем неустойчивость проявлялась, как видно на рис. 4, в виде немонотонности, возникавшей в этом месте. На вставке показана схема измерения с использованием конденсатора. В отличие от случая с  $N$ -образной ВАХ, когда автоколебательный процесс может быть возбужден в режиме фиксированного напряжения с соответствующей индуктивностью в цепи [8], в ситуации с  $S$ -образной ВАХ автоколебания способны возникать в режиме заданного тока и могут быть описаны системой уравнений, включающей, кроме уравнения теплового баланса, следующее дифференциальное уравнение цепи:

$$C \frac{dU}{dt} + \frac{U}{R(T, H)} = I_0, \quad R(T, H) = \rho(T, H) L/Wd. \quad (4)$$

Период обнаруженных колебаний  $\Delta t$  для образцов с сопротивлением  $R(293 \text{ К}) \approx 0,16$  Ом составляет  $\approx 0,1$  с в согласии со следующей зависимостью от параметров системы:

$$\Delta t \sim R(T, H)C + c_V(T)/q(T),$$

где  $c_V(T)$  — удельная теплоемкость образца. Условие возникновения колебаний сводится к требованию выполнения соотношений  $R < -dU/dI$  и  $RC > [c_V(T)/q(T)]$ . Значение  $c_V(T)/q(T)$  не превосходит  $10^{-3}$  с.

В заключение подытожим основные результаты работы. При гелиевых температурах впервые экспериментально получены нелинейные вольт-амперные характеристики тонких поликристаллических образцов металла (чистого олова) в магнитном поле в отсутствие кризиса кипения жидкости на границе образцов при различных типах теплоотвода. Обнаружено, что использование кристаллического диэлектрика в качестве теплоотводящей среды позволяет реализовать в чистом компенсированном металле в магнитном поле в интервале до 5 Тл нелинейный режим проводимости, соответствующий  $S$ -образной вольт-амперной характеристике. В этом режиме исследована динамика обнаруженной температурно-электрической неустойчивости в зависимости от реактивных параметров цепи.

1. А.А. Слуцкий, А.М. Кадигробов, *Письма в ЖЭТФ* **28**, 219 (1978).
2. Ю.Н. Цзян, А.Г. Ордынец, *ФНТ* **6**, 1279 (1980).
3. И.И. Логвинов, Ю.Н. Цзян, *ФНТ* **21**, 867 (1995).
4. А.М. Кадигробов, А.А. Слуцкий, И.В. Кривошей, *ЖЭТФ* **87**, 1314 (1984).
5. *Теплопередача при низких температурах*, У. Фрост (ред.), Мир, Москва (1977).
6. В.А. Бондарь, А.М. Кадигробов, В.Н. Моргун, Н.Н. Чеботаев, *Металлофизика* **13**, 49 (1991).
7. Ю.Н. Цзян, И.И. Логвинов, *ФНТ* **8**, 774 (1982).
8. Ю.Н. Цзян, И.И. Логвинов, А.М. Кадигробов, *ФНТ* **12**, 1248 (1986).

## Nonlinear conductivity of compensated polycrystal metal in high magnetic field

I.I. Logvinov and Yu.N. Chiang

The current-voltage characteristics of thin polycrystalline samples of a metal (pure tin) were measured at helium temperatures in magnetic field. The samples were placed into a solid-state medium to create reproducible experimental conditions. With the above heat removal from the metal surface, a nonlinear S-shaped current-voltage characteristic (IVC) was first realized in such samples. The conditions for thermal-electric instability as a function of circuit reactive parameters are studied in the metal with the S-shaped IVC.