

## СОСУЩЕСТВОВАНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ И АКТИВАЦИОННОЙ ПРОВОДИМОСТЕЙ В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СТЕКЛАХ

А.Ф.Прекул, В.А.Рассохин, С.В.Ярцев

Обнаружено, что температурная зависимость электропроводности металлических стекол может быть аппроксимирована формулой общего вида

$$\sigma(T) = \sigma_0 + A \exp(-B/T^n). \quad (1)$$

Высокая точность и математическая устойчивость описания достигаются при  $n = 1/2$ .

Образец аморфного сплава  $Zr_{75}Rh_{25}$  размером  $16,50 \times 2,14 \times 0,037$  мм<sup>3</sup> изучался нами в интервале температур 4,2 – 298 К. Для измерения электросопротивления использовалась 4-х контактная схема с прижимными точечными контактами из иридия. Специально принятые меры обеспечили нам измерение величины сопротивления с относительной погрешностью не более чем  $1 \cdot 10^{-3} \%$  и постоянство температуры во время измерения в любой точке диапазона с точностью выше, чем  $\pm 0,01$  К.

Полученные нами данные показаны на рис.1 светлыми кружками. Видно, что практически во всем изученном интервале температур у аморфного сплава  $Zr_{75}Rh_{25}$  наблюдается отрицательный температурный коэффициент сопротивления (ТКС). Падение электросопротивления в области низких температур связано с началом сверхпроводящей конденсации<sup>1</sup>.

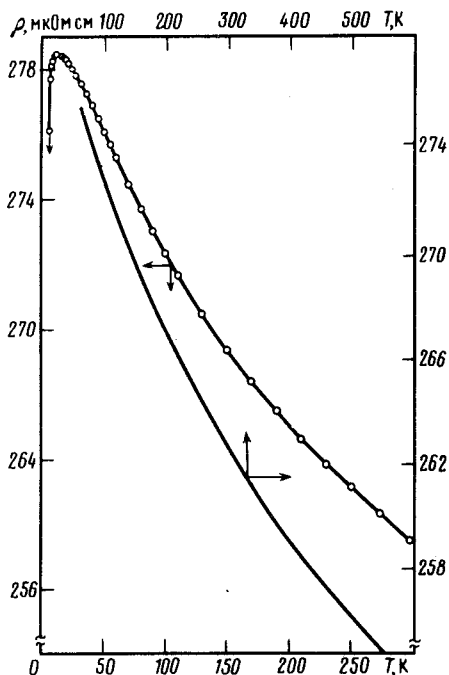


Рис.1. Температурные зависимости удельного электросопротивления аморфных сплавов  $Zr_{75}Rh_{25}$  (○) и  $Be_{40}Ti_{50}Zr_{10}$  (—)<sup>3</sup>

Известно, что для данного набора экспериментальных точек при наличии определенного числа подгоночных параметров, точность описания может быть достаточно высокой для целого ряда физически возможных формул регрессии. Поэтому, для их различия, была предпринята специальная процедура обработки с помощью ЭВМ, заключающаяся в поиске математически устойчивых решений, т.е. таких, когда коэффициенты регрессии не зависят от выбранного в интервале описания количества точек с точностью до статистического разброса. Обработка повторялась для значений коэффициента  $n = 1/4$ ;  $n = 1/2$  и  $n = 1$ , согласно существующим в настоящее время модельным представлениям<sup>2</sup>.

Величины и поведение коэффициентов формулы (1)  $\sigma_0$ ,  $A$  и  $B$ , а также коэффициента линейной корреляции  $r$  и средне квадратичной ошибки  $s$  при вариации числа обрабатываемых точек в интервале температур 12 – 298 К представлены на рис.2 в виде гистограмм (с увеличением числа точек температурный диапазон расширяется в область низких температур).

Видно, что, несмотря на возможность удовлетворительного приближения при любом  $n = 1/4$ ;  $n = 1/2$ ;  $n = 1$  (максимальная погрешность при этом составляет 0,15 %), устойчивость описания достигается только при  $n = 1/2$  в диапазоне температур 35 – 298 К. Максимальная погрешность при этом составляет  $4 \cdot 10^{-3}$  % и приближается к погрешности эксперимента. Вариация коэффициентов при малом числе точек, в левой части гистограммы 2, обусловлена закономерным статистическим разбросом.

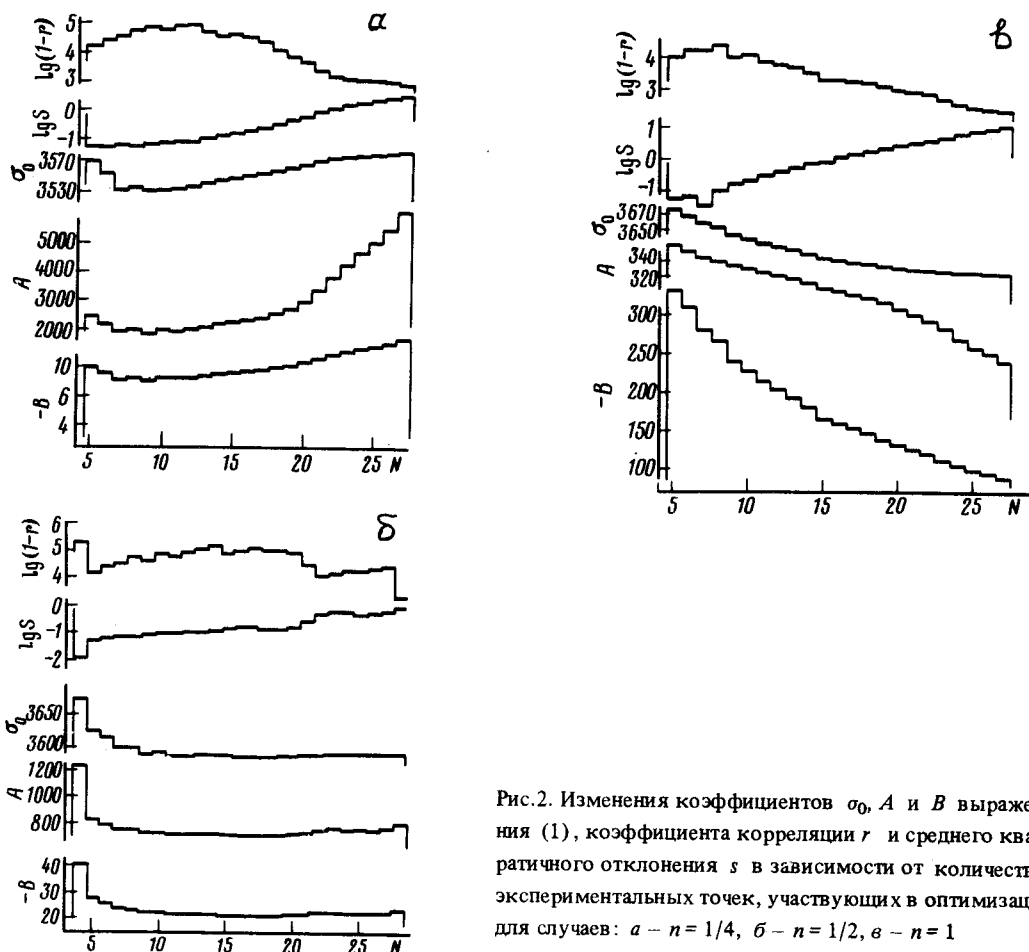


Рис.2. Изменения коэффициентов  $\sigma_0$ ,  $A$  и  $B$  выражения (1), коэффициента корреляции  $r$  и среднего квадратичного отклонения  $s$  в зависимости от количества экспериментальных точек, участвующих в оптимизации для случаев:  $a - n = 1/4$ ,  $b - n = 1/2$ ,  $c - n = 1$

Аналогичным образом были обработаны имеющиеся в литературе данные по температурной зависимости  $\rho(T)$  в металлическом стекле  $\text{Be}_{40}\text{Ti}_{50}\text{Zr}_{10}$ <sup>3</sup>. Эта зависимость приведена на рис.1 сплошной линией. Наилучшее описание было достигнуто в интервале 50 – 550 К также при  $n = 1/2$ . При этом оно также обладало математической устойчивостью по интервалу описания. Обе зависимости в координатах  $\ln(\sigma - \sigma_0)$  от  $T^{-1/2}$  показаны на рис.3.

Характерной особенностью выражения (1) является сосуществование в виде суммы температурно-независящего, металлического вклада  $\sigma_0$  и вклада активационного типа. Качественно, пригодность подобных сумм для описания экспериментальных зависимостей  $\rho(T)$ , имеющих отрицательный ТКС, обнаруживалась ранее в соединениях переменной валентности  $\text{SmB}_6$ <sup>4</sup>, в кристаллических неупорядоченных сплавах титана<sup>5</sup>, в металлических гра-

нулярных пленках <sup>6</sup>. Теперь это обнаружено в металлических стеклах. Кроме того, здесь, вероятно впервые, выполнен последовательный количественный анализ по определению показателя  $n$  и выражение

$$\sigma(T) = \sigma_0 + A \exp(-B/T^{1/2}) \quad (2)$$

может рассматриваться как эмпирический закон для температурной зависимости электропроводности металлических стекол.

В настоящее время имеется простое объяснение тому факту, что  $n \neq 1$  и что  $n = 1/2$ . Это может означать, что осуществляется прыжковая проводимость с переменной длиной прыжка. При этом учет корреляционных эффектов изменяет закон  $T^{1/4}$  по Мотту <sup>2</sup> в закон  $T^{1/2}$  по Эфросу – Шкловскому <sup>7</sup>. Однако, одноэлектронные однородные модели неупорядоченных систем не объясняют факт сосуществования проводимостей.

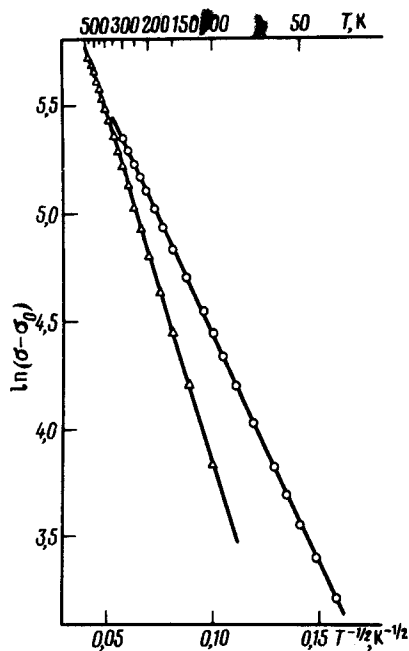


Рис.3. Зависимости  $\ln(\sigma - \sigma_0)$  от  $T^{-1/2}$ . Линии соответствуют расчету согласно выражению (2).  $\circ$  — экспериментальные значения для  $Zr_{75}Rh_{25}$ ,  $\Delta$  — метки, соответствующие экспериментальной кривой для  $Be_{40}Ti_{50}Zr_{10}$  <sup>3</sup>

С другой стороны имеется простая возможность пояснить сосуществование проводимостей. Такое сосуществование в виде

$$\sigma(T) = \sigma(0) + a T \exp(-\Delta/T) \quad (3)$$

было предсказано Абрикосовым <sup>8</sup> для экситонной фазы редуцированного металла, возникающей в полуметаллах при наличии нескольких групп носителей (несколько минимумов энергии в зоне проводимости). Принципиальная возможность частичной диэлектризации носителей для изотропных веществ с большой плотностью носителей, к которым металлические стекла, по-видимому, могут быть отнесены, обсуждалась в работах Келдыша и Копаева (см., например, <sup>9</sup>).

Достижению компромисса может способствовать следующее обстоятельство. Не исключено, что металлические стекла являются пространственно неоднородными системами. Сумма проводимостей и закон  $T^{1/2}$ , обнаруженные нами в этих материалах, наблюдались ранее Мак-Лином и соавторами <sup>6</sup> в некотором промежуточном режиме гранулярных систем металл — изолятор. При всей кажущейся разнородности металлических стекол и гранулярных металлов имеются признаки, объединяющие их в один класс: они являются сугубо неравновесными. Более подробно свидетельства их морфологической общности будут обсуждаться в последующей статье.

Авторы благодарят Р.В.Поморцева и В.В.Дякина за обсуждение работы и полезные замечания, а также Г.Х.Панову и Б.И.Савельева за предоставленные образцы.

## Литература

1. *Johnson W.L.* Phys. Rev., 1978, В17, 2884.
2. *Мотт Н., Дэвис Э.* Электронные процессы в некристаллических веществах (перевод под ред. Б.Т.Коломийца) М.: Мир, 1982.
3. *Nagel S.R.* Phys. Rev. Lett., 1978, 41, 990.
4. *Kasuya T., Takegahara K., Fujita T., Tanaka T., Bannai E.* J. Phys. (Paris), 1979, 40, C5-308.
5. *Shcherbakov A.S., Prekul A.F., Pomortsev R.V.* Philosophical Mag., 1983, 47, 63.
6. *McLean W.L., Lindenfeld P., Worthington T.* AIP Conference 40, 1977, "Elektrical transport and optical properties of inhomogeneous media", N.Y., 1978, p. 403.
7. *Шкловский Б.И., Эфрос А.Н.* УФН, 1975, 117, 401.
8. *Abrikosov A.A.* J. Low Temp. Phys., 1973, 10, 3.
9. *Конаев Ю.В.* Труды ФИАН СССР, 1975, 86, 3.

Институт физики  
Академии наук СССР  
УНЦ

Поступила в редакцию  
4 августа 1983 г.