

Е. С. БОРОВИК

## ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ МЕТАЛЛОВ ПРИ БОЛЬШОЙ ПЛОТНОСТИ ТОКА

(Представлено академиком М. А. Леонтовичем 9 VI 1953)

При скорости упорядоченного движения зарядов в металле, достигающей скорости их хаотического движения, следует ожидать существенных отклонений от закона Ома. Для большинства металлов необходимые для этого значения плотности тока ( $j \sim 10^{11} - 10^2$  а/см<sup>2</sup>) лежат за пределами экспериментальных возможностей. Однако для металлов с малой концентрацией подвижных зарядов необходимые плотности тока могут быть существенно ниже. Оценка концентраций подвижных зарядов по гальваномагнитным явлениям<sup>(1)</sup> указывает, что у висмута имеется  $\sim 10^{-4} - 10^{-5}$  подвижных зарядов на атом, у бериллия и галлия  $\sim 10^{-2}$ . Таким образом, для висмута можно ожидать существенных отклонений от закона Ома уже при  $j \sim 10^6 - 10^7$  а/см<sup>2</sup>.

Исследований с висмутом при больших плотностях тока не производилось. В работе<sup>(2)</sup> усовершенствованным методом, разработанным ранее<sup>(3)</sup>, производилось исследование электропроводности золота до  $j = 2 - 3 \cdot 10^6$  а/см<sup>2</sup> и платины до  $j = 1,3 \cdot 10^5$  а/см<sup>2</sup>; отклонений от закона Ома не наблюдалось. В работе<sup>(4)</sup>, сделанной импульсным методом, при плотностях тока  $j \simeq 4 \cdot 10^6$  а/см<sup>2</sup> наблюдалось увеличение сопротивления платины в 4 раза и вольфрама в 2 раза.

В настоящей работе исследовались электропроводности висмута, платины, вольфрама и меди при  $j \sim 10^6$  а/см<sup>2</sup>. Исследование электропроводности висмута и платины проводилось на постоянном токе и на коротких импульсах тока. Для меди и вольфрама был использован лишь импульсный метод.

Измерения на постоянном токе производились при низких температурах в той области, где сопротивление почти не зависит от температуры. Для измерения сопротивления использовался малоомный потенциометр. Образцы имели форму пластинок толщиной 3—6  $\mu$ .

Платина исследовалась при  $T = 4^\circ$  К. Сопротивление образцов ее при этой температуре составляло от 0,006 до 0,02 сопротивления при  $0^\circ$  С. При наибольшей достигнутой плотности тока  $1,4 \cdot 10^5$  а/см<sup>2</sup> увеличения сопротивления платины не наблюдалось с точностью до 0,1%.

Висмут исследовался при  $T = 20,4^\circ$  К. Сопротивление образцов составляло величину  $\sim 0,2$  от сопротивления при  $0^\circ$  С. Наибольшая достигнутая плотность тока  $j = 2,4 \cdot 10^4$  а/см<sup>2</sup>. Наблюдаемое при этом увеличение сопротивления  $\sim 3\%$ , возможно, следует приписать нагреванию образца.

При исследовании электропроводности в импульсном режиме можно достичь плотностей тока существенно больших, чем в стационарном режиме, за счет уменьшения длительности импульса  $\tau$ . Однако возможности уменьшения  $\tau$  при измерении сопротивления ограничены возрастанием индуктивного сопротивления. Понижение температуры

здесь не всегда выгодно из-за уменьшения теплоемкости.

В качестве источника повторяющихся импульсов использовался тиратронный RC-генератор, в схему которого для ограничения крутизны переднего фронта импульса и уменьшения интенсивности высших гармоник была включена самоиндукция. Форма импульса наименьшей длительности дана на рис. 1а. Длительность импульса при сохранении его формы можно было изменить в пределах от 1,5 до 10 $\mu$  сек.

Для уменьшения среднего нагрева параметры схемы

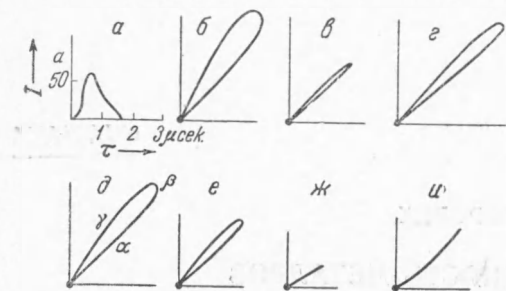


Рис. 1. Вид осциллограмм. а — форма импульса; б) — Cu,  $j = 8,4 \cdot 10^6$  а/см<sup>2</sup>,  $\tau \approx 10 \mu$  сек.; в) — Cu,  $j = 6,2 \cdot 10^6$  а/см<sup>2</sup>,  $\tau \approx 1,5 \mu$  сек.; г) — W,  $j = 5,5 \cdot 10^6$  а/см<sup>2</sup>; д) — Pt,  $j = 5,1 \cdot 10^6$  а/см<sup>2</sup>; е) — Pt,  $j = 3,8 \cdot 10^6$  а/см<sup>2</sup>; ж) — Pt,  $j = 2,3 \cdot 10^6$  а/см<sup>2</sup>. и) — W, Pt и W продолжительность импульса  $\tau = 1,5 \mu$  сек.

подобраны так, что длительность импульса составляет  $10^{-3} - 10^{-4}$  от промежутка времени между импульсами.

Для измерения сопротивления был принят метод безвременной осциллограммы. Импульсы тока проходили через последовательно соединенные исследуемое сопротивление  $r_x$  и нормальное сопротивление  $r_n$ , изготовленное из манганина достаточного сечения. Разности потенциалов с  $r_x$  и  $r_n$  без усиления подавались на взаимно-перпендикулярные пластинки осциллографа.

Если исследуемое сопротивление не меняет своей величины во время импульса, то осциллограмма имеет вид прямой. Такой вид имели осциллограммы для платины при длительности импульса  $\tau \approx 1,5 \mu$  сек. до плотности тока  $j \approx 2 \cdot 10^6$  а/см<sup>2</sup> (рис. 1 ж), для вольфрама до  $j \approx 3 \cdot 10^6$  а/см<sup>2</sup> и для меди до  $j \approx 4 \cdot 10^6$  а/см<sup>2</sup>.

При больших плотностях тока осциллограммы приобретают вид петли (рис. 1 в, г, д). Обратный ход луча из-за увеличения сопротивления, вызванного нагреванием, идет выше. Если вычислить сопротивление по нижней ветви кривой, то для платины при  $j \approx 5 \cdot 10^6$  а/см<sup>2</sup> получается увеличение сопротивления на 30—40%. Можно, однако, приблизительно исключить влияние нагревания следующим приемом. Верхняя половина импульса почти симметрична (рис. 1 а). Поэтому нагревание от точки  $\alpha$  до  $\beta$  почти равно нагреванию от  $\beta$  до  $\gamma$  (рис. 1 д). Следовательно, если взять половину разности сопротивлений образца в точках  $\alpha$  и  $\gamma$  при значении тока, равном половине амплитудного, и вычесть ее из значения сопротивления в точке  $\beta$ , то этим мы исключим влияние нагревания на участке  $\alpha - \beta$  и получим приблизительно правильное значение  $r_x$  при амплитудном значении тока.

Пригодность этого приема была проверена измерениями с медью при увеличенной длительности импульса. Вид осциллограмм дан на рис. 1 б и в. Исправленные значения сопротивлений совпадают, хотя неисправленные отличаются на 35%.

Результаты измерений с медью, вольфрамом и платиной приведены в табл. 1. Здесь  $r_{0f}$  — сопротивление при малой плотности тока, измеренное потенциометром;  $j$  — максимальное значение плотности тока;

$r_j$  — наблюдаемое при этом значение сопротивления;  $r_j^*$  — значение сопротивления с поправкой на нагревание. Измерения производились при комнатной температуре и продолжительности импульса  $\tau \cong \cong 1,5 \mu$  сек.; исключения отмечены в примечаниях.

Таблица 1

Образец	$j, \frac{a \cdot 10^6}{\text{см}^2}$	$r_{0t}, \Omega$	$r_j, \Omega$	$r_j^*, \Omega$
Cu-2	6,2	1,25	1,4	1,3
Cu-2*	8,2	1,25	1,9	1,3
Pt-1	2,3	2,35	2,6	—
Pt-2	3,1	2,01	2,0	—
Pt-3	4,9	0,77	1,2	1,0
Pt-5	3,5	1,95	2,3	1,9
Pt-6	5,1	1,71	2,4	1,8
Pt-6	3,8	1,71	2,1	1,8
W-1	1,7	3,56	3,6	—
W-2	1,2	3,34	3,8	—
W-2**	2,4	0,75	0,7	—
W-5	5,5	6,72	8,3	6,8
W-5	3,5	6,72	7,2	6,6

\*  $\tau = 10^{-5}$  сек. \*\*  $t = -196^\circ \text{C}$ .

Точность измерений сопротивления в импульсе 5—10%. Индуктивное сопротивление образцов меди и вольфрама в расчете на основную частоту импульса с  $\tau = 1,5 \mu$  сек. составляло несколько процентов. Для платины и висмута (см. ниже) индуктивное сопротивление меньше 1% от омического. Влияние скин-эффекта и увеличения сопротивления в магнитном поле тока для меди, платины и вольфрама меньше 0,1%.

Измерение сопротивления висмута велось при температурах 90 и  $78^\circ \text{K}$  при длительности импульса  $\tau \cong 1,5 \mu$  сек. Образцы в виде пластинок толщиной 3—12  $\mu$  приготовлены из висмута, содержащего  $< 0,002\%$  примесей. Образец Vi-5 не отжигался, остальные образцы отжигались при  $t = 200^\circ \text{C}$  4—6 час. Сопротивление отожженных образцов при  $T = 20^\circ \text{K}$  равно 0,2—0,4 от сопротивления при комнатной температуре.

Вид осциллограммы для Vi-3 при  $j = 1,2 \cdot 10^6 \text{ а/см}^2$  и  $T = 20,4^\circ \text{C}$  приведен на рис. 1. Как видно, в этом случае величина сопротивления зависит от тока. Результаты измерений для двух типичных образцов даны в табл. 2. Толщина образца Vi-3  $b = 7,5 \mu$ , а толщина Vi-6  $b = 2 \mu$ .

Таблица 2

Vi-3				Vi-3				Vi-6			
$T=78^\circ \text{K}, r_{0t}=2,90 \Omega$				$T=20,4^\circ \text{K}, K_{0t}=1,39 \Omega$				$T=20,4^\circ \text{K}, r_{0t}=3,60 \Omega$			
$j, \frac{a \cdot 10^6}{\text{см}^2}$	$\frac{\Delta r}{r}$	$\left(\frac{\Delta r}{r}\right)_H$	$\left(\frac{\Delta r}{r}\right)_j$	$j, \frac{a \cdot 10^6}{\text{см}^2}$	$\frac{\Delta r}{r}$	$\left(\frac{\Delta r}{r}\right)_H$	$\left(\frac{\Delta r}{r}\right)_j$	$j, \frac{a \cdot 10^6}{\text{см}^2}$	$\frac{\Delta r}{r}$	$\left(\frac{\Delta r}{r}\right)_H$	$\left(\frac{\Delta r}{r}\right)_j$
3,2	0,06	0,015	0,05	2	0,09	0,01	0,08	7,7	0,35	0,02	0,33
4,4	0,13	0,027	0,1	4	0,27	0,05	0,22	10,3	0,42	0,05	0,37
4,9	0,2	0,035	0,17	6,8	0,45	0,13	0,32				
				12	0,63	0,30	0,33				

Здесь  $\Delta r/r$  — наблюдаемое относительное увеличение сопротивления при плотности тока  $j$ . Для учета влияния магнитного поля тока были сделаны измерения увеличения сопротивления образцов в поперечном магнитном поле. Величину  $-(\Delta r/r)_H$  — полученное из этих

измерений увеличение сопротивления при среднем значении поля тока внутри образца — можно считать приближенно равной увеличению сопротивления образца за счет магнитного поля тока  $(\Delta r/r)_j = \Delta r/r - (\Delta r/r)_H$  — исправленное значение увеличения сопротивления,

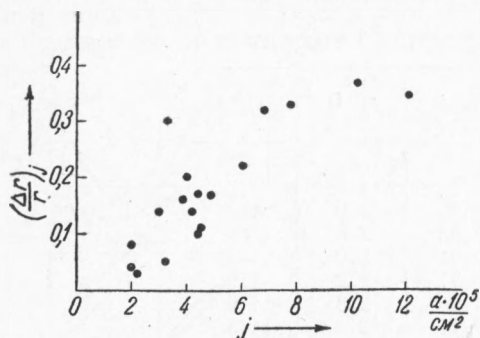


Рис. 2. Отклонения от закона Ома у висмута для отожженных образцов В1-3, В1-12 толщиной 2—12  $\mu$  при  $T = 78$  и  $20,4^\circ \text{K}$

которое можно отнести за счет отклонения от закона Ома. Величина поправки  $(\Delta r/r)_H$  равна 10—20% от величины эффекта, за исключением образца В1-3 при  $T = 20,4^\circ \text{K}$ , где она достигает 50%. Зависимость  $(\Delta r/r)_j$  от  $j$  для всех исследованных отожженных образцов висмута дана на рис. 2. Для неотожженного образца В1-5 отклонений от закона Ома не обнаружено. Малая точность измерений (5—10%) позволяет лишь установить наличие отклонений от закона Ома у висмута при  $j \sim 5-10 \cdot 10^5$  а/см<sup>2</sup>, но не позволяет пока установить вид зависимости  $(\Delta r/r)_j$  от  $j$ . Необходимость применения тонких образцов и исключительная чувствительность свойств висмута к наличию малых примесей заставляют считать не вполне исключенным влияние примесей. Наличие примесей само по себе не может вызвать отклонения от закона Ома, но может изменить величину эффекта.

Величина плотности тока, при которой наблюдаются отклонения от закона Ома в висмуте, не противоречит оценкам концентраций подвижных зарядов в нем по гальваномагнитным явлениям (1).

Сопротивления меди, платины и вольфрама, как видно из табл. 1, остаются с точностью измерений (5—10%) постоянными до наибольших достигнутых плотностей тока. Для платины это подтверждается и результатами измерений на постоянном токе в данной работе и работе (2). Однако они расходятся с результатами (4) (см. выше). В связи с этим не лишнее будет заметить следующее. Приведенные в (4) кривые зависимости сопротивления от введенной во время импульса энергии дают в точке начала и конца плавления характерные изгибы. Величины сопротивлений, соответствующих этим точкам, как отмечают и сами авторы (4), не зависят от плотности тока. Однако при большой плотности тока они оказываются сдвинутыми по энергиям (см. рис. 9 (4)). Если принять за реперную точку не начальную точку импульса, в определении которой возможна ошибка, а точку конца плавления и совместить в этой точке все кривые, то окажется, что они почти совпадут во всем интервале температур. Следовательно, закон Ома будет соблюдаться во всем интервале температур, а не только в точке плавления.

Подводя итоги, можно констатировать, что для платины, вольфрама и меди до плотностей тока  $5-8 \cdot 10^6$  а/см<sup>2</sup> не наблюдается отклонений от закона Ома. Для висмута при плотности тока  $0,5-1 \cdot 10^6$  а/см<sup>2</sup> наблюдаются отклонения от закона Ома, достигающие десятков процентов.

В заключение автор выражает благодарность действительному члену АН УССР Б. Г. Лазареву за интерес к работе.

Поступило  
12 III 1953

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> Е. С. Боровик, ЖЭТФ, 23, 91 (1952). <sup>2</sup> Н. М. Barlow, Phil. Mag., 9, 1041 (1930). <sup>3</sup> Р. W. Bridgman, Proc. Am. Acad. Arts Sci., 57, 131 (1922). <sup>4</sup> Л. А. Игнатъева, С. Г. Калашников, ЖЭТФ, 22, 385 (1952).