

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ВЕЩЕСТВ ПРИ ПОСТОЯННОМ ОБЪЕМЕ

Т. С. ЗОЛАН

Рассматривается электропроводность при постоянном давлении и объеме для жидкого состояния, исследуемая методом безконтактного вращающегося магнитного поля. Показано, что при постоянном объеме может происходить резкое изменение термического коэффициента электропроводности.

Исследование температурной зависимости электрического сопротивления обычно не связывается с изменением объема рассматриваемого образца (полупроводник, металл и т. д.).

В то же время оно может быть существенно, особенно в жидком состоянии, когда изменение объема жидкости может достигать значительной величины, доходя до 30—40%.

Действительно, рассмотрим сопротивление образца R как зависящее от термодинамических величин: температуры $T = T(P, V)$; давления $P = P(T, V)$ и объема $V = V(P, T)$; таким образом, чтобы каждая пара величин определялась полностью, если задана другая пара, то есть имеется зависимость $R = R(V, P) = R(T, P) = R(T, V)$. Используя известные соотношения между такими величинами [1],

$$\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_V = \frac{\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P}{\left(\frac{\partial V}{\partial P}\right)_T}$$

и

$$\left(\frac{\partial R}{\partial T}\right)_V = \left(\frac{\partial R}{\partial T}\right)_P + \left(\frac{\partial R}{\partial P}\right)_T \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_V,$$

легко получить соотношение между термическим коэффициентом сопротивления при постоянном объеме $\frac{1}{R} \left(\frac{\partial R}{\partial T}\right)_V$ и термическим коэффициентом сопротивления при постоянном давлении $\frac{1}{R} \left(\frac{\partial R}{\partial T}\right)_P$, учиты-

вая, что $\alpha = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P$ — коэффициент термического расширения, $\kappa =$

$= -\frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial P}\right)_T$ — термический коэффициент сжимаемости материала рас-

сматриваемого образца с сопротивлением R , а $\beta = \frac{1}{P} \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_V$ — термиче-

ский коэффициент давления, т. е.

$$\frac{1}{R} \left(\frac{\partial R}{\partial T}\right)_V = \frac{1}{R} \left(\frac{\partial R}{\partial T}\right)_P - \frac{1}{R} \left(\frac{\partial R}{\partial P}\right)_T \cdot \frac{\alpha}{\kappa}.$$

Полученное выражение показывает, что в зависимости от величины $\frac{1}{R} \left(\frac{\partial R}{\partial P} \right)_T$ — члена, определяющего изменение электропроводности от давления и коэффициентов α и χ , термический коэффициент сопротивления при постоянном давлении $\frac{1}{R} \left(\frac{\partial R}{\partial T} \right)_P$ — величина, обычно измеряемая в эксперименте, может значительно отличаться от термического коэффициента при постоянном объеме (плотности) $\frac{1}{R} \left(\frac{\partial R}{\partial T} \right)_v$.

В работе [2], посвященной исследованию температурной зависимости жидкой ртути при почти постоянном объеме показано, что тогда как температурный коэффициент сопротивления при постоянном давлении $\frac{1}{R} \left(\frac{\partial R}{\partial T} \right)_P$ равен величине $9.4 \cdot 10^{-4} \text{ град}^{-1}$, величина температурного коэффициента сопротивления при постоянном объеме $\frac{1}{R} \left(\frac{\partial R}{\partial T} \right)_v$ достигает лишь $1 \cdot 10^{-4} \text{ град}^{-1}$, а при соответствующих условиях может практически быть равна нулю. К сожалению, методические трудности, связанные в основном с герметичностью впайки в измерительный стеклянный капилляр со ртутью подключаемых к схеме измерения токовых и потенциальных электродов, способных выдержать большие давления и температуры, не позволили, видимо, авторам развить работы в этом направлении. В самом деле, уже при перепаде в 10°C , после заполнения объема капилляра давление в нем достигает 460 ат , в чем нетрудно убедиться, подставляя в выражение для термического коэффициента давления $\frac{1}{P_0} \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_v$ данные для ртути $\alpha = 1,8 \cdot 10^{-4} \text{ град}^{-1}$,

$$\chi = -3,9 \cdot 10^{-6} \text{ ат}^{-1} [3],$$

где P_0 — нормальное давление, равное 1 ат ,

$$\frac{1}{P_0} \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_v = - \frac{\left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P}{P_0 \left(\frac{\partial V}{\partial P} \right)_T} = \frac{\alpha}{\chi}.$$

В то же время усовершенствованный Регелем метод бесконтактного определения проводимости во вращающемся магнитном поле [4] позволяет производить определение электропроводности проводящей жидкости и при постоянном объеме и плотности, избегая осложнений, связанных со впайкой электродов.

Для этой цели была сконструирована и изготовлена установка, схематически изображенная на рис. 1.

Стеклянная трубка диаметром 25 мм при помощи плоского шлифа соединена с кварцевой трубкой 2, на которой бифилярно намотана печь 3 из „сплава 2“, изолированная асбестовым шнуром. На расстоя-

нии 30 мм по радиусу от обмотанной печи располагается обмотка статора 4, создающая вращающееся магнитное поле. На крышке 5 с внутренней стороны имеется приспособление, к которому подвешивается вольфрамовая нить (диаметром около 30 микрон) с образцом в кварцевой ампуле 6 на конце. К верхней части нити прикрепляется зеркальце 7, дающее возможность определять угол поворота образца под действием вращающегося магнитного поля.

Благодаря применению провода со стеклянной изоляцией ПСД для обмотки 4, прохождение тока по ней могло нагревать ее и образец 6 до 300°C. Для достижения более высокой температуры — 1200°C включалась печь 3. Измерение температуры производилось отградуированными термомпарами. При невысоких температурах градуировку термпар можно было производить при помощи ртутных термометров, подвешиваемых в качестве образцов.

Для устранения конвективных токов в герметизированной системе создавался высокий вакуум.

В отличие от методики [4] применение длинных цилиндрических образцов для малых диаметров оказывается предпочтительнее как с точки зрения изготовления измерительных и эталонных образцов, так и устранения побочных нежелательных эффектов, возникающих в сферах большего диаметра. Чувствительность же при высоте цилиндра, равной $\frac{2}{15}$ (в единицах измерения радиуса a), оказывается одинаковой.

Так, выражение для вращательного момента сферического образца радиуса a и электропроводностью σ , помещенного во вращающееся с малой угловой скоростью ω магнитное поле H_0 , имеет вид [4, 5]

$$M_{\text{ш}} = \frac{2\pi}{15} \cdot \frac{\omega \sigma H_0^2 a^5}{c^2}.$$

Для цилиндра того же радиуса и высоты $2a$ [5, 6]

$$M_{\text{ц}} = \frac{\pi \omega \sigma}{c^2} \cdot H_0^2 a^5.$$

Поскольку высота образца для узких цилиндров может быть взята и больше величины $\frac{2}{15}$, то во столько же увеличивается и чувствительность установки.

Одновременно эта методика дает возможность применять для ампул и другие конструкционные материалы, способные выдержать намного большие давления и температуры, чем стекло, такие, как кварц, корунд, фарфор, немагнитные металлы и т. п.

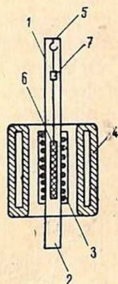


Рис. 1. Схема установки.

Проведение эксперимента заключается в следующем. Эвакуированная под высоким вакуумом толстостенная кварцевая ампула запаивалась и помещалась оттянутым концом в исследуемое вещество, находящееся в расплавленном состоянии. Обламывание оттянутого конца ампулы приводит к полному заполнению объема ампулы расплавом. Затем ампула вновь откачивалась до высокого вакуума, порядка 10^{-5} мм рт.ст., запаивалась и помещалась в центре вращающегося магнитного поля. Взаимодействие вращающегося магнитного поля с током, индуцированным этим полем в образце, приводит к отклонению образца на угол, пропорциональный его электропроводности.

Изменением температуры печи, естественно, изменялась температура образца и снималась обычная зависимость сопротивления образца от температуры. Для ртути это давало значение $\frac{1}{R} \left(\frac{\partial R}{\partial T} \right)_p$, близкое к табличному $9.4 \cdot 10^{-4} \text{ град}^{-1}$ [3] (кривая 1 на рис. 2).

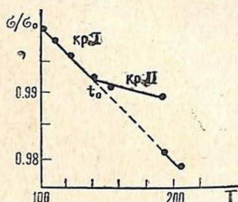


Рис. 2. Изменение электропроводности жидкой ртути при постоянном давлении (кр. I) и при постоянном объеме (кр. II)

После заполнения, вследствие термического расширения расплава всего объема ампулы, наблюдалась типичная точка перегиба — t_0 (рис. 2), после которой рост сопротивления образца резко уменьшался и даже прекращался вовсе, свидетельствуя, что температурный коэффициент жидкой ртути при постоянном объеме $\frac{1}{R} \left(\frac{\partial R}{\partial T} \right)_v$ практически равен нулю (кривая II на рис. 2), а увеличение сопротивления жидкой ртути с температурой при $p = \text{const}$ связано исключительно с эффектом термического расширения, что видно из выражения для закона Ома, записанного в виде

$$\frac{1}{R} \frac{\partial R}{\partial T} = -\sigma \frac{\partial \sigma}{\partial T} + \frac{1}{l} \frac{\partial l}{\partial T} - \frac{1}{S} \frac{\partial S}{\partial T}.$$

Полученные данные полностью соответствуют данным, полученным в [2], свидетельствуя о правильности выбранной методики.

Аналогичные зависимости сняты и для других веществ. Однако столь большой разницы между $\frac{1}{R} \left(\frac{\partial R}{\partial T} \right)_p$ и $\frac{1}{R} \left(\frac{\partial R}{\partial T} \right)_v$ в этих случаях не наблюдается, что, видимо, связано с тем, что у жидкой ртути наблюдаются более глубокие структурные изменения.

Интересно отметить, что, несмотря на развивающееся в ампуле давление до нескольких тысяч атмосфер, ампула лишь трескается и удается зафиксировать точки, соответствующие максимальной температуре на продолжении кривой I.

Таким образом, рассмотренная методика позволяет не только проводить измерения электропроводности и вязкости при высоких тем-

пературах и широком температурном диапазоне в условиях высокой химической реактивности и чистоты образцов в откаченных до высокого вакуума ампулах, но также проводить исследования электропроводности металлов и полупроводников при почти постоянном объеме при высоких давлениях.

Институт радиофизики и электроники

АН АрмССР

Поступила 11.VI.1968

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. В. Г. Левич, Курс теоретической физики, т. 1., Физмамгиз, 1962.
2. S. Gubar, I. Kikoin, Journ. of Phys., IX, 52 (1945).
3. Дж. Кэй, Т. Лэби, Таблица физических и химических постоянных, ГИФМЛ, 1962.
4. А. Р. Ретель, ЖТФ, 18, 1511 (1948).
5. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц, Электродинамика сплошных сред, ГИТТЛ, 1957.
6. Я. И. Френкель, Электродинамика, т. II, ГОНТИ, 1935.

ՆՅՈՒԹԵՐԻ ԷԼԵԿՏՐՈՆԱԳՈՐԴԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒՄԸ ՀԱՍՏԱՏՈՒՆ ԾԱՎԱԼԻ ԴԵՊՐՈՒՄ

S. Ս. ԶՈԼԻԱՆ

Ոչ կոնտակտային պտտվող մագնիսական դաշտի մեթոդով ուսումնասիրվել է հեղուկ վիճակում գտնվող մետաղների և կիսահաղորդիչների էլեկտրահաղորդականությունը հաստատուն ծավալի դեպքում:

Ցույց է տրված, որ հաստատուն ծավալի դեպքում կարող է տեղի ունենալ էլեկտրահաղորդականության չերմային զորձակցի խիստ փոփոխություն:

INVESTIGATION OF THE CONDUCTIVITY AT CONSTANT VOLUME

T. S. ZOLIAN

The electrical conductivity of metallic liquids carried out at the constant pressure and volume by the method of a revolving magnetic field is investigated. It is shown that the temperature coefficient of resistance (conduction) at the constant volume may be sharply changed.