

Б. Г. ЛАЗАРЕВ, А. А. ГАЛКИН и В. И. ХОТКЕВИЧ

**НЕКОТОРЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ
ПРИ РАДИОЧАСТОТАХ**

(Представлено академиком С. И. Вавиловым 21 XI 1946)

Исследование поведения сверхпроводников при пропускании через них тока радиочастоты или при помещении их в переменное магнитное поле представляет большой интерес как для понимания явления сверхпроводимости, так, вероятно, и для теории металлов вообще. Такие исследования могут дать сведения о кинетике процессов, происходящих при установлении сверхпроводящего состояния или при его разрушении (время установления или разрушения сверхпроводимости, скорость перемещения границы между нормальной и сверхпроводящей фазой и др.). Эти сведения могут оказаться существенными для электронной теории металла, если рассматривать переход этого типа как частный случай электронных процессов в металлах. Таким путем может быть, повидимому, достигнуто наиболее непосредственное определение таких величин, как время релаксации электронных процессов в металле и его температурной зависимости.

Исследованиям сверхпроводимости при высоких частотах были посвящены работы McLenna'a и др. (1,2) до $3 \cdot 10^7$ Hz и работы Silsbee с сотрудниками (3,4) до $3 \cdot 10^5$ Hz. Авторы этих работ искали временные эффекты у сверхпроводников. В первом сообщении (1) авторы склонны были сделать вывод о том, что ими обнаружены релаксационные эффекты на самых высоких частотах, однако в дальнейшем наблюдаемые явления (некоторое смещение критической температуры при увеличении частоты тока) были приписаны побочным обстоятельствам (5).

Во второй группе работ показано, что сверхпроводник (олово, тантал) следит безинерционно за импульсами тока до самых высоких, примененных автором, частот ($2,9 \cdot 10^5$ Hz) и, следовательно, переходит в нормальное состояние при превышении током критического значения и в сверхпроводящее состояние — при понижении тока ниже критического.

Таким образом, из работ McLenna'a и др. нельзя сделать однозначных выводов о наличии релаксационных эффектов. Работы Silsbee и др. дают лишь верхний предел времени релаксации (меньше 10^{-6} сек.).

Поэтому существенно провести исследования, которые позволили бы, если не определить это время, то хотя бы значительно понизить его верхний предел. Найденная нами методика измерений позволила получить новые данные, часть из которых и приводится в настоящем сообщении*. Исследовались олово и таллий в виде проволок 0,1—0,2 мм.

* Предварительное сообщение было сделано на конференции по физике низких температур в Москве в 1941 г. (6).

в диаметре. Основные измерения проведены на таллии. Последний удобен для измерений, потому что он имеет критическую температуру $2,38^\circ \text{K}$. При температуре около 2°K критическое магнитное поле таллия равно около 50 гаусс. Критический ток для проволоки 0,2 мм составляет не более 2,5 А, что уменьшало опасность нагревания образца при переходе в нормальное состояние. Кроме того, использовалась высокая теплопередача в гелии II. Следует заметить, что в цитируемых работах проводились измерения в гелии I или даже газообразном гелии, в силу чего нагрев образцов мог быть значительным.

К сожалению, таллий сильно окисляется в воздухе, что создает некоторое затруднение при работе с ним. Нам удалось получить образцы таллия без заметной пленки окисления путем монтажа образцов либо под дистиллированной водой, либо в защитном покрытии канифоли (с последующим удалением ее). Контролем хорошего качества образцов служило совпадение критического поля тока с внешним критическим полем.

Метод измерения заключался в следующем. Через сверхпроводящую проволоку одновременно пропускались переменный и постоянный токи, т. е. через сверхпроводник проходил ток

$$J = J_0 \sin \omega t + J_n,$$

где J_0 — амплитуда переменного тока и J_n — постоянный ток, вносящий асимметрию. Измерялась постоянная слагающая разности потенциалов на концах сверхпроводника в зависимости от величины переменного тока.

В зависимости от величины переменного тока разность потенциалов на концах образца должна иметь резкий максимум, так как, если в одном полупериоде J превышает критическое значение тока J_k , а в другом полупериоде $J_0 - J_n < J_k$, то в первом полупериоде на концах сверхпроводника будут возникать импульсы напряжения одного знака. При этих условиях сверхпроводник будет работать как своеобразный выпрямитель напряжения. Однако при достижении $J_0 - J_n$ величины J_k гальванометр покажет максимум. При дальнейшем увеличении значения $J_0 - J_n$ на образце будут появляться импульсы противоположных знаков, и с увеличением тока постоянная слагающая напряжения будет стремиться к величине RJ_n , где R — сопротивление образца в нормальном состоянии. Форму кривой легко вычислить.

Контрольные эксперименты на токе в 50 Hz дают хорошее совпадение вычисленной формы кривой с опытом. Если не учитывать инерционных эффектов (при работе на достаточно низкой частоте), то вычисления дают для высоты максимума выражение $V \sim \sqrt{J_k J_n}$, которое не зависит от частоты тока.

При частотах столь высоких, что нельзя пренебречь временем релаксации по сравнению с полупериодом тока, как общий вид кривой $V = V(J)$, так и величина V_{\max} будут, очевидно определенным образом изменяться. Например, при приближении величины полупериода к времени релаксации максимум будет исчезать при больших значениях J_n .

В настоящей работе эти явления исследовались при частотах тока до $2 \cdot 10^7$ Hz.

Для получения высокочастотного тока использовался генератор, построенный по двухтактной схеме, с подогревными лампами. Генератор давал возможность получать частоты от 10^5 до $2 \cdot 10^7$ Hz. Особое внимание было уделено сбалансированию плеч генератора для достижения правильной формы тока, которая проверялась по интенсивности гармоник. Симметрию синусоиды тока легко было проверить с большой точностью, снимая зависимость разности потенциалов от тока без пропускания постоянного тока. Таким способом регистрировалась асим-

метрия тока даже меньшая, чем 0,1%. Кроме того, проверялось отсутствие амплитудной модуляции током в 50 Hz.

Глубина модуляции не превышала 0,5%. Для ввода тока высокой частоты в дюаровский сосуд применялся настроенный контур. Сила тока регулировалась величиной связи.

Произведенные описанным методом измерения на таллии дали следующие основные результаты:

1. На 50 периодах кривые $V(J)$ имеют расчетный вид.
2. На всех частотах вплоть до $2 \cdot 10^7$ Hz получены кривые $V(J)$ с максимумом.
3. С возрастанием частоты высота максимума убывает и стремится к значению, равному RJ_n . Так например, величина отношения $\frac{V_{\max}}{RJ_n}$, характеризующая высоту максимума, будет для 50 Hz равна приблизительно 8; для $2,3 \cdot 10^6$ 1,3; для $4,2 \cdot 10^6$ 1,13; для $6 \cdot 10^6$ 1,04 и для $1 \cdot 10^7$ незначительно превышает единицу.
4. На кривых, снятых при уменьшении тока, максимум расположен при значениях токов меньших, чем на кривых, снятых при возрастании тока.
5. При обратном ходе максимум на кривой более высок. Иногда на прямом ходе мы не могли заметить максимума и замечали его только на обратном ходе (при уменьшении величины переменного тока).

Полученные результаты можно, по нашему мнению, трактовать следующим образом: время релаксации таллия при 2°K меньше полупериода самой высокой из примененных частот, т. е. меньше $2 \cdot 10^{-8}$ сек. — это следует из факта существования V_{\max} при наличии асимметрии тока.

Исходя из этого основного вывода, представляется вероятным, что понижение максимума с частотой нельзя объяснить только нагреванием образца, так как для наблюдаемого снижения в 8 раз потребовалось бы уменьшение критического тока в 64 раза ($V_{\max} \sim \sqrt{J_n J_k}$). Возможно, что здесь уже начинает наблюдаться ожидаемый эффект. Такой вывод совместим с тем фактом, что при обратном ходе (т. е. при уменьшении величины переменного тока) максимум более высок, чем при прямом ходе. Разогрев должен был бы, наоборот, снизить значение V_{\max} . Если здесь проявляется время релаксации и оно имеет величину порядка 10^{-8} сек., то возрастание максимума можно связать с температурной зависимостью времени релаксации — такого же характера, что и температурная зависимость времени релаксации электронных процессов в металле (7). Можно учесть также фазовое соотношение между температурными колебаниями и колебаниями тока и показать, что это обстоятельство здесь существенного значения не имеет. Следует оговорить термин „время релаксации“. Вероятно, для сверхпроводника следует говорить о сочетании явлений истинного времени релаксации, явления сверхпроводимости и таких инерционных явлений, как передвижение границы между сверхпроводящей и нормальной фазами. Однако интересно то, что полученный верхний предел времени релаксации ($2 \cdot 10^{-8}$ сек.) имеет тот же порядок, что и время, необходимое для установления равновесия при переходе от одного электронного состояния к другому (7). Если это явления одной природы, то можно надеяться при дальнейшем повышении частоты и при более низких температурах для таллия (или при использовании металла с высокой характеристической температурой) определить это время и его температурный ход.

Работа в этом направлении продолжается.

Физико-технический институт
Академии Наук УССР,
Харьков

Поступило
8 X 1946

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

¹J. C. McLennan, A. C. Burton, A. Pitt, J. O. Wilhelm, *Phil. Mag.*, **12**, 707 (1931). ²J. C. McLennan, A. C. Burton, A. Pitt, J. O. Wilhelm, *Proc. Roy. Soc. (A)*, **136**, 52 (1932); **138**, 245 (1932). ³F. B. Siesbee, R. B. Scott, J. W. Cook, F. G. Brikwedde, *Phys. Rev.*, **39**, 379 (1932). ⁴F. B. Siesbee, R. B. Scott, F. G. Brikwedde, *J. Res. N. B. S.*, **20**, 109 (1938). ⁵A. C. Burton, *The Phenomenon of Superconductivity*, Univ. Toronto Press, 1934. ⁶Конференция по физике низких температур, *ЖЭТФ*, **11**, 573 (1941); *J. Phys.*, **4**, 379 (1941). ⁷Л. Э. Гуревич, *Основы физической кинетики*, 1940.