

## ОБНАРУЖЕНИЕ ТОНКОЙ СТРУКТУРЫ ПАРАМАГНИТНОГО ЭФФЕКТА В СВЕРХПРОВОДНИКАХ ПЕРВОГО РОДА

В.А.Фролов, Я.С.Кан

Обнаружено, что в том случае, когда парамагнитный эффект создан такой комбинацией магнитного поля и электрического тока, что  $H_z/H_K$  мало ( $\sim 0,01$ ), кажущаяся магнитная проницаемость  $\mu^*$  образца для продольного магнитного поля осциллирует в зависимости от тока.

Если находящийся в продольном магнитном поле  $H_z$  цилиндр с током  $I$  переходит из сверхпроводящего состояния в нормальное (или наоборот), то имеет место так называемый парамагнитный эффект (ПМЭ) [1], который состоит в том, что в области перехода кажущаяся магнитная проницаемость образца для продольного поля  $\mu^* = \Phi/\pi a^2 H_z$  ( $\Phi$  – магнитный поток в образце,  $a$  – радиус цилиндра) превышает единицу.

До сих пор ПМЭ не исследовался в том случае, когда определяющий параметр  $\phi = H_z/H_K$  мал ( $\sim 0,01$ ), т.е. когда ПМЭ возникает в промежуточном состоянии, которое создано в основном током. Нам кажется, что, кроме самостоятельного интереса, изучение ПМЭ в этом случае интересно и с точки зрения изучения самой структуры промежуточного состояния, создаваемого током.

Для исследования такого рода ПМЭ мы выбрали из всех возможностей сверхпроводящий переход, совершаемый под воздействием изменения тока  $I$  при  $H_z = \text{const}$  и  $T = \text{const}$  ( $T$  – температура). Для ранее исследовавшихся  $\phi$  ход  $\mu^*(I)$  в таких переходах схематически показан на врезке рис.1 (см., например, [2]).

Монокристаллический оловянный цилиндр (диаметр 5 мм, длина 80 мм,  $R_{3,7}/R_{300} = 1,4 \cdot 10^{-3}$ ) запитывался постоянным током от выпрямителя ВС-25, причём одним из токоподводов служила медная трубка (диаметр 30 мм, длина 120 мм), по оси которой был расположен образец (вертикально). Продольное поле  $H_z = 0,078$  Э создавалось соленоидом (диаметр 80 мм, длина 400 мм), надетым на гелиевый дьюар. Двойной пермалловый экран ослаблял магнитное поле не менее, чем до 0,01 Э.

Температура гелиевой ванны поддерживалась автоматическим регулятором давления с ручной коррекцией с точностью  $\pm 3 \cdot 10^{-4}$  К. Опыт проводился при температуре, на  $3,6 \cdot 10^{-2}$  К ниже  $T_K$  (скачок сопротивления образца при сверхпроводящем переходе в отсутствие тока и поля происходил в интервале  $1,3 \cdot 10^{-3}$  К). Критический ток  $I_K$  при этой температуре составлял 6,5 А, так что  $\phi = 0,015$ .

Измерялись сопротивление  $R/R_n$  среднего участка образца длиной 20 мм [3] ( $R_n$  — нормальное сопротивление участка) и магнитный поток  $\Phi$  в образце. Датчиком  $\Phi$  служила однослойная свинцовая катушка длиной 1 мм (9 витков), намотанная через тонкий слой изолятора на образец между потенциальными подводами. Мерой потока служил наводившийся при изменении состояния образца ток в катушке, который во избежание его воздействия на образец, измерялся компенсационным способом<sup>1)</sup>.

Измерения проводились в такой последовательности. При  $H_z = 0$  включался ток  $I$ , сообщавший образцу некоторое сопротивление  $R/R_n$ . В течение 5 — 10 сек оно дважды измерялось, а между этими измерениями включалось магнитное поле и измерялось  $\Phi$ .

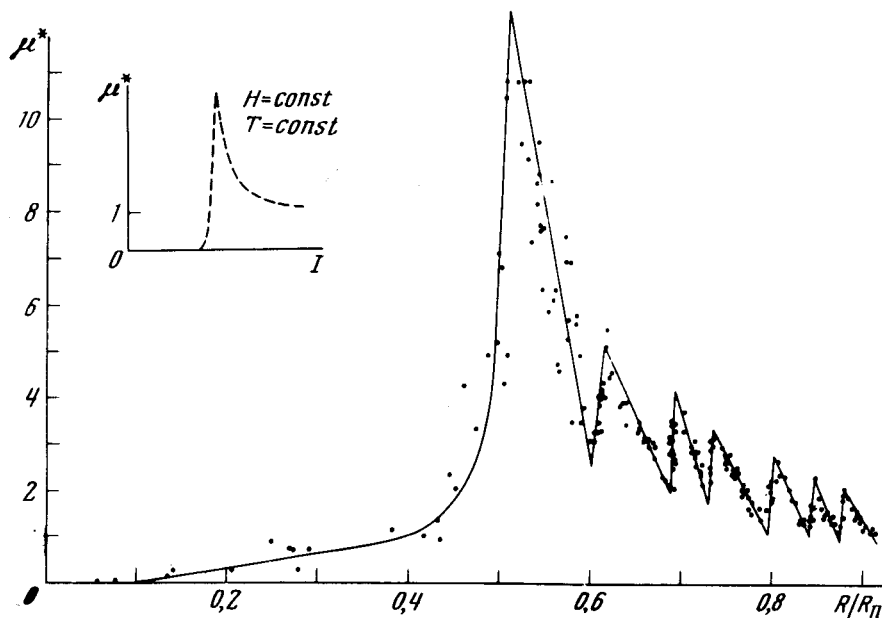


Рис.1

Если результат второго измерения сопротивления совпадал с первым, то считалось, что температура за время между отсчетами  $R/R_n$  не изменялась и измерение считалось состоявшимся. Из-за флуктуаций температуры примерно только треть всех попыток измерения была удачной. Нестабильность температуры в пределах указанной выше точности поддержания была также причиной того, что в эксперименте измерялась стохастическая зависимость  $\mu^*(R/R_n)$ , а не причинная за-

<sup>1)</sup>Подробнее способ измерения потока будет описан в другом месте.

зависимость  $\mu^*(I)$ , так как более удобно было компенсировать уход температуры малым изменением величины тока  $I$ , чем ждать случайного воспроизведения температуры. Чтобы исключить возможное влияние предыстории образца, все точки зависимости  $\mu^*(R/R_n)$  (рис.1) сняты одинаковым образом, для чего перед каждым измерением ток из образца на несколько секунд выключался (перебрасывался в сверхпроводящий шунт). Кривая  $\mu^*(R/R_n)$  (рис.1) получена в течение нескольких дней экспериментирования с ежедневным термоциклированием от 4,2 К до комнатной температуры. Уместно заметить, что кривая  $\mu^*(R/R_n)$  во всех деталях повторила аналогичную кривую, полученную полгода назад на этом же образце в условиях, отличавшихся от описанных выше, только направлением тока.

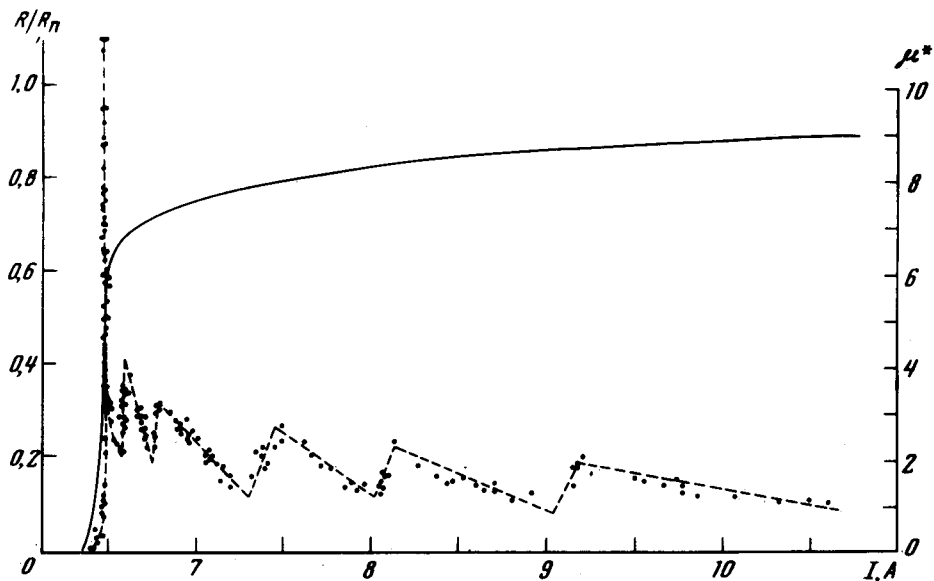


Рис.2

С помощью зависимости  $(R/R_n)$  (1) (рис.2, сплошная линия) мы пересчитали все точки экспериментальной зависимости  $\mu^*(R/R_n)$  в точки зависимости  $\mu^*(I)$  (рис.2, штриховая линия), которая могла бы быть получена в эксперименте с идеализированной точностью поддержания температуры (не хуже примерно  $10^{-4}$  К). Эта зависимость, как видно, имеет осциллирующий характер, что наблюдается впервые. Естественно, что пиков на кривой  $\mu^*(I)$  должно быть столько же, как и на кривой  $\mu^*(R/R_n)$ , хотя на графике их на один меньше. Дело в том, что вблизи критического тока состояние образца очень сильно изменяется при малом изменении тока и в выбранном масштабе первые два пика просто не разрешаются.

Предварительные эксперименты показали, что вид кривой  $\mu^*(R/R_n)$  а следовательно и  $\mu^*(I)$ , закономерно зависит от величины  $\phi$  (оно изменялось в два раза за счет  $H_z$ ).

При увеличении же  $\phi$  примерно до 0,1 в образце при  $I = \text{const}$  возникали хорошо заметные осцилляции потока во времени, не связанные

с флуктуациями температуры, которые, вероятно, имеют ту же природу, что и осцилляции потока, наблюдавшиеся в [4].

Что касается причин, по которым тонкая структура ПМЭ до сих пор не была наблюдена, то их можно указать несколько. Во-первых, возможно, ранее не придавалось столь большого значения стабильности состояния образца. Во-вторых, ранее датчиками потока были довольно длинные катушки, которые усредняли бы  $\Phi$  в случае, если состояние образца по каким-то причинам было неоднородно по длине. Не нужно забывать, наконец, и того, что ПМЭ с малыми  $\phi$  просто не исследовался, а возможно, что по мере увеличения  $\phi$  происходит смена типа перехода — от статического, когда промежуточное состояние создано почти исключительно током, до динамического [4], когда составляющая внешнего поля становится существенной для формирования промежуточного состояния. В таком случае наблюдаемые нами осцилляции кажущейся магнитной проницаемости  $\mu^*$  в зависимости от тока  $I$  связаны с изменением структуры чисто токового промежуточного состояния с ростом тока.

Выражаем благодарность Б.Г.Лазареву за поддержку и доброжелательную критику, В.А.Шкловскому за полезные дискуссии, а также А.Ф.Андрееву и И.Л.Ландау за ценные замечания.

Физико-технический институт  
Академии наук Украинской ССР

Поступила в редакцию  
30 марта 1979 г.

### Литература

- [1] K.Steiner, H.Schoeneck. *Physik. Z.*, **38**, 887, 1937.
  - [2] T.S.Teasdale, H.E.Rorschach Jr., *Phys. Rev.*, **90**, 709, 1953.
  - [3] Я.С.Кан, В.А.Фролов. *ФНТ*, **4**, 17, 1978.
  - [4] И.Л.Ландау. *ЖЭТФ*, **64**, 557, 1973.
-