

ВЛИЯНИЕ ПЕРЕМЕННОГО ПОЛЯ
НА СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ ПЕРЕХОД В ОЛОВЕ

В.Т. Долгополов, С.С. Мурзин

Под действием переменного электромагнитного поля большой амплитуды происходит сдвиг поля сверхпроводящего перехода, не связанный с изменением температуры образца.

При наблюдении токовых состояний в олове было замечено, что гистерезисные явления, исчезающие при переходе образца в сверхпроводящее состояние, могут быть восстановлены увеличением амплитуды радиочастотного поля [1]. Согласно [2], для наблюдения токовых состояний необходимо наличие несверхпроводящего слоя металла, толщина которого значительно превышает глубину скин-слоя. Создавалось впечатление, что при введении переменного поля сверхпроводимость разрушается во всем объеме металла в более слабом магнитном поле, чем без радиочастотного облучения. Проверке этого предположения посвящена настоящая работа.

Первые эксперименты были выполнены на монокристаллических дисках, диаметром 0,6 и 0,4 мм и толщиной 17,8 мм. В дальнейшем для измерений использовался оловянный цилиндр, длиной 3 см и диаметром 0,93 см. Отношение сопротивлений $\rho_{300\text{K}}/\rho_{4,2\text{K}}$ для цилиндра составляло 10^5 . При измерениях на дисках вектор постоянного магнитного поля лежал в плоскости диска, при работе с цилиндром вдоль H была направлена образующая. Результаты, полученные на цилиндре и дисках аналогичны. Все приводимые ниже результаты относятся к оловянному цилиндру.

Образец помещался в цилиндрическую катушку индуктивности, служившую для создания переменного поля. Длина катушки немного превышала длину образца. Диаметр на 1 мм был больше диаметра оловянного цилиндра. Образец располагался внутри катушки индуктивности на двух бумажных полосках, так, что между ним и катушкой имелся зазор. Поверх первой катушки индуктивности надевалась вторая, служившая приемной. Между катушками также был оставлен зазор размером около 1 мм. Наличие зазора было существенно для улучшения теплоотвода, особенно при температурах выше λ -точки.

Сигнал со второй катушки проходил RC-фильтр с постоянной времени 0,1 сек и поступал на Y-координату высокочувствительного (5 мв/см) двухкоординатного самопишущего потенциометра. Сверхпроводящий переход регистрировался по ЭДС, возникавшей во второй катушке при выталкивании магнитного поля в момент перехода из нормального состояния в сверхпроводящее или проникновении поля в образец при обратном переходе. Постоянное магнитное поле медленно и равномерно ($dH/dt = \text{const}$) разворачивалось во времени. При этом принимаемый сигнал, пропорциональный $d\Phi/dt$ (Φ — поток магнитной индукции через образец), был пропорционален $d\Phi/dH$.

В экспериментах использовались переменные поля с частотами от 10^6 до 10^3 μ . В этом диапазоне частот скин-эффект был аномальным. Действительно, на частоте 10^3 μ в олове глубина скин-слоя $\delta_a \approx 4 \cdot 10^{-3}$ см [3], в то время как длина свободного пробега электронов в нашем образце при гелиевых температурах $l \approx 3 \cdot 10^{-2}$ см.

Пример экспериментальной кривой приведен на рис. 1. Запись производилась при увеличении магнитного поля, причем скорость изменения поля выбиралась достаточно низкой для того, чтобы форма кривой перехода от скорости не зависела. Из рис. 1, б видно, что под влиянием переменного поля происходит не только сдвиг, но и деформация кривой перехода. Для количественного описания величины сдвига удобно использовать те точки кривой (на рис. 1, б они отмечены стрелками), в которых весь объем образца уже можно считать находящимся в нормальном состоянии.

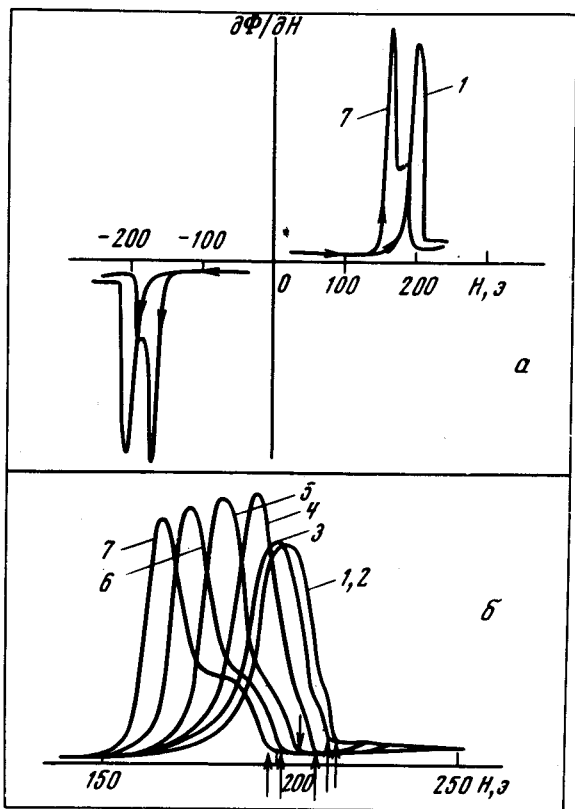


Рис. 1. Сдвиг сверхпроводящего перехода в переменном поле, $T = 2,06\text{K}$, $\omega/2\pi = 4000$ μ . На кривой 1 — $H = 0$, 2 — 34, 3 — 43, 4 — 50, 5 — 67, 6 — 84, 7 — 97 э. Стрелками отмечено направление записи

Зависимость величины сдвига ΔH от амплитуды переменного поля показана на рис. 2. Сдвиг сверхпроводящего перехода начинается не с нуля, а с некоторого конечного значения H_{\sim} . При отклонении направления постоянного магнитного поля от оси цилиндра величина ΔH резко уменьшается.

Вид зависимости $\Delta H(H_{\sim})$ не изменяется в пределах от 10^3 до $2 \cdot 10^5$ μ (кривая 4 на рис. 2). Дальнейшее увеличение частоты приводит к появлению заметного сдвига сверхпроводящего перехода при меньших H_{\sim} , чем соответствующее месту излома кривой $\Delta H(H_{\sim})$. Отсутствие частотной

зависимости в широком диапазоне частот определенно указывает на то, что сдвиг сверхпроводящего перехода не связан с перегревом образца относительно гелиевой ванны. По-видимому, перегрев становится существенным лишь на частотах около 1 МГц и именно перегревом объясняется изменение вида кривой $\Delta H(H_{\sim})$ на этих частотах. Действительно, мощность, выделяемая в нормальном состоянии на одном квадратном сантиметре поверхности образца при $\omega = 2\pi \cdot 10^6$ и $H_{\sim} = 50 \text{ э}$, составляет $W = \omega \delta (H^2/4\pi) = 5 \cdot 10^{-2} \text{ вт}$. В нашем случае образец лишь часть периода находился в нормальном состоянии и выделявшаяся мощность была несколько меньше. Поэтому использование для дальнейших оценок полученной выше цифры дает верхний предел величины перегрева. Из-за скачка Капицы выделение мощности перегревает образец на $\Delta T \approx (40/T^3)W \approx 0,25\text{К}$ при $T = 2 \text{ К}$ и сдвигает переход на величину $\Delta H \approx 2H_c \frac{T}{T_c} \Delta T \approx 20 \text{ э}$. Экспериментально наблюдавшийся сдвиг при указанных

условиях составлял примерно 10 э . Понижение частоты уменьшает величину теплового смещения сверхпроводящего перехода, пропорционально $\omega^{1/3}$, и на частотах 1 кГц тепловое смещение пренебрежимо мало по сравнению с наблюдаемым экспериментально.

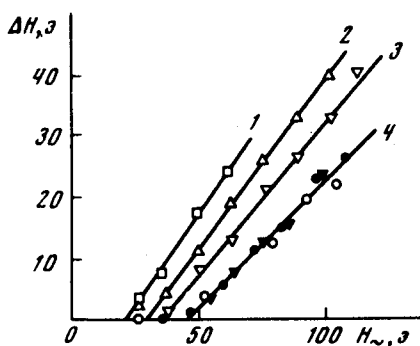


Рис. 2. Зависимость величины сдвига от амплитуды переменного поля: 1 — $T = 3,25\text{К}$, 2 — $T = 2,97\text{К}$, 3 — $T = 2,74\text{К}$, 4 — $T = 2,02\text{К}$. Различными знаками на кривой 4 отмечены результаты, полученные на трех частотах $\omega/2\pi = 10^3 \text{ вц}$, $\omega/2\pi = 1,5 \cdot 10^4 \text{ вц}$, $\omega/2\pi = 2,27 \cdot 10^5 \text{ вц}$

При температурах выше λ -точки общий вид кривых $\Delta H(H_{\sim})$ сохранялся (рис. 2), а амплитуда поля H_{\sim} , за которой начинался сдвиг сверхпроводящего перехода, монотонно уменьшалась с увеличением температуры. Следует, правда, отметить, что к результатам, полученным в этой области температур, необходимо относиться с осторожностью, поскольку был возможен неконтролируемый перегрев образца.

Сдвиг сверхпроводящего перехода в переменном поле может быть связан с появлением постоянного тока на поверхности образца. Причиной появления постоянного тока служит неэквивалентность двух полупериодов переменного поля: в один из полупериодов суммарное поле $H + H_{\sim} \cos \omega t_1$ может превышать критическое поле сверхпроводника H_c , в другой полупериод $H + H_{\sim} \cos \omega t_2 < H_c$ (в аналогичных условиях, одновременно пропуская по проводнику постоянный и переменный ток, наблюдали появление ЭДС на концах сверхпроводящего провода [4, 5]). Отсутствие сдвига перехода при малых H_{\sim} могло бы быть связано с магнитным "перегревом". Однако наблюдение сверхпроводящего перехода на экране осциллографа, подобно тому, как это сделано в [6], показало,

что переход обнаруживается уже при амплитудах H_{\sim} вдвое меньших, чем поле, соответствующее излому кривой $\Delta H(H_{\sim})$. Кроме того, неясной остается причина деформации кривой перехода при введении переменного поля.

Авторы выражают искреннюю благодарность Ю.В.Шарвину, В.Ф.Гантмахеру и В.В.Шмидту за полезные обсуждения.

Институт физики твердого тела
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
31 августа 1976 г.

Литература

- [1] В.Т.Долгополов, С.С.Мурзин. Письма в ЖЭТФ, 23, 213, 1976.
 - [2] F.I. Babkin, V. T. Dolgoplov. Sol. St. Comm., 18, 713, 1976.
 - [3] A. L. Shawlow, G. E. Devlin. Phys. Rev., 113, 120, 1959.
 - [4] Б.Г.Лазарев, А.А.Галкин, В.И.Хоткевич. ЖЭТФ, 11, 573, 1941; ДАН СССР, 55, 817, 1947.
 - [5] B. Serin, J. R. Feldmeier, M. Garfunkel. Phys. Rev., 76, 167, 1949.
 - [6] А.А.Галкин, П.А.Безуглый. ЖЭТФ, 28, 463, 1955.
-