

## СТРУКТУРА СЛОЯ, ВОЗНИКАЮЩЕГО НА ПОВЕРХНОСТИ АЛЮМИНИЯ ПРИ ВКЛЮЧЕНИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ $H > H_c$

*В.Т.Долгополов, С.И.Дорожкин*

Проведено микроскопическое изучение структуры слоя. Обнаружено, что по структуре слой близок к двумерному смешанному состоянию сверхпроводников первого рода [1 – 3].

Двумерное смешанное (ДС) состояние сверхпроводников первого рода, на возможность существования которого указал еще Л.Д.Ландау [1], было экспериментально обнаружено И.Л.Ландау и Шарвиным [4] при изучении вольт-амперных характеристик полых сверхпроводящих цилиндров. Характерной особенностью ДС состояния является наличие в нем электрического поля и тока, обеспечивающего скачок магнитного поля

$\Delta H \leq 2H_c$  на слое. ДС состояние можно рассматривать как предельный случай промежуточного состояния при уменьшении периода структуры последнего до размеров порядка длины когерентности [1, 3].

Можно надеяться, что слой такого состояния образуется на поверхности сверхпроводника первого рода, когда внешнее магнитное поле  $H > H_c$  скачком спадает до нуля. Из непрерывности тангенциальной компоненты магнитного поля следует, что поле в поверхностном слое также спадает до нуля, в то время как поле в толще образца за счет токов Фуко остается равным начальному. Область около поверхности, в которой  $H < H_c$  должна перейти в сверхпроводящее состояние. Образовавшийся слой не может запереть в образце магнитный поток, который в это время больше критического. Это означает, что в слое должно существовать вихревое электрическое поле, а структура слоя соответствовать промежуточному или ДС состоянию.

В настоящей работе сделана попытка микроскопического изучения возникающей структуры. Ниже приведены предварительные результаты такого исследования.

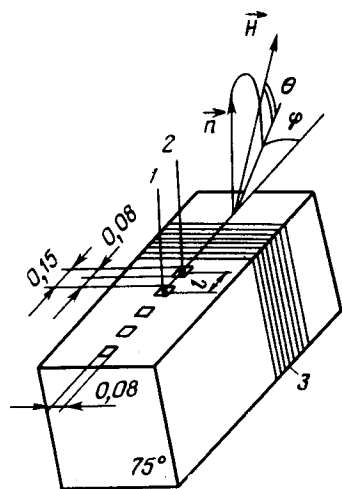


Рис.1. Схема эксперимента:  $\mathbf{H}$  — вектор напряженности магнитного поля;  $\mathbf{n} \parallel [110]$  — вектор нормали к поверхности; 1, 2 — пробитые туннельные переходы, точками обозначены места расположения микроконтактов; 3 — катушка из 100 витков;  $l$  — расстояние между контактами. Все размеры в см

Измерения проводились на параллелепипеде, вырезанном из монокристалла Al с  $R_{300\text{K}}/R_{4,2\text{K}} = 2 \cdot 10^4$  и имевшем размеры  $1 \times 1 \times 2$  см (рис.1). Неровности на поверхности образца удалялись шлифовкой, после чего наклепанный слой стравливался. Электрополировка доводила поверхность до зеркального блеска.

Изучалось состояние поверхностного слоя одной из граней образца, параллельной плоскости (110) кристалла. Измерения проводились с помощью микроконтактов, созданных электрическим пробоем туннельных структур Al — Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — Ag. Толщина пленок Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и Ag была порядка 30 и 1000 Å, соответственно. Пробой производился при гелиевой температуре, как это описано в работе Богатиной и Янсона [5]. Из полученных результатов видно, что на каждый туннельный контакт приходилась только одна закоротка. Величина сопротивлений микроконтактов находилась в пределах  $10^{-2} + 1$  ом. Оценка размеров закороток по формуле, предложенной Шарвиным [6]  $R \approx p_F / ne^2 d^2$  ( $p_F$  — фермиевский импульс,  $n$  —

плотность электронов,  $d$  — размер контакта) дает значения  $d \sim 3 \cdot 10^{-6} + 3 \cdot 10^{-5}$  см. Так как для Al длина когерентности  $\zeta_0 = 1,36 \cdot 10^{-4}$  см [7], то в нашем случае  $d \ll \zeta_0$ .

В экспериментах определялась зависимость от времени напряжения на контакте при выключении магнитного поля. Ток через контакт был фиксирован. Так как вольт-амперная характеристика закоротки существенно изменяется при переходе Al из нормального состояния в сверхпроводящее, то по величине напряжения легко определить, в каком состоянии находится область образца под контактом. Измерения проводились при температуре 0,4К. Магнитный поток в образце оставался выше своего критического значения  $\Phi_c = H_c S$  ( $S$  — площадь сечения образца) в течение, примерно, 1 сек, после выключения внешнего магнитного поля  $H = 2H_c \approx 176$  э. Состояние поверхностного слоя образца исследовалось в первые 20 мсек после образования на поверхности сверхпроводящих областей. Напряжение с контакта усиливалось усилителем с полосой 20 гц — 1 Мгц, после чего сигнал поступал на один из каналов двухлучевого запоминающего осциллографа С8-11. Запуск временной развертки осциллографа был синхронизирован с моментом выключения поля.

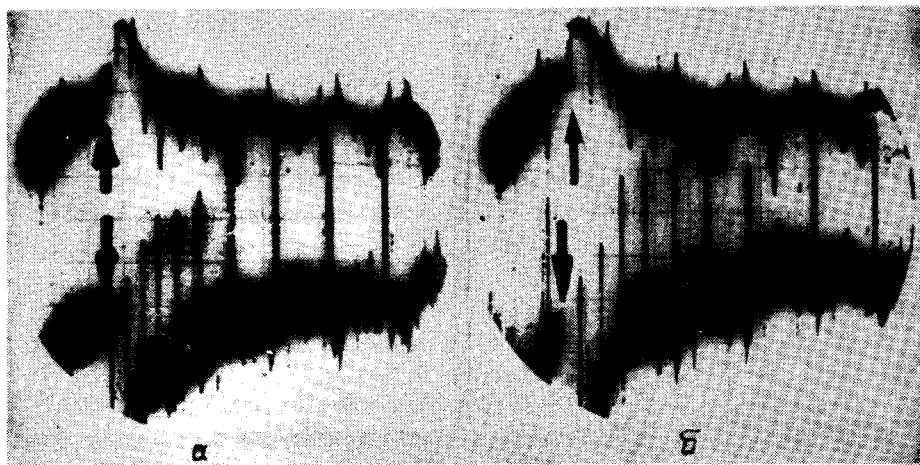


Рис. 2. Фотографии с экрана осциллографа  $\theta = -1,2^\circ$ : 2а)  $\phi = 0^\circ$ ; 2б)  $\phi = +2^\circ$ . Верхняя кривая — запись сигнала с контакта 2 (рис. 1), нижняя — с контакта 1. Стрелками обозначен момент возникновения сверхпроводимости. Масштаб по горизонтальной оси 10 мсек/дел

Пример записи сигналов с двух контактов приведен на рис. 2. Стрелками отмечен момент возникновения сверхпроводимости в поверхностном слое. Узкие импульсы соответствуют нормальному состоянию области под контактом. Поворачивая магнитное поле в плоскости поверхности, можно найти такое положение ( $\phi = 0$ ), при котором импульсы на двух контактах синхронны (рис. 2, а). Изменение угла  $\phi$  приводит к тому, что импульсы перестают быть синхронными (рис. 2, б). Временной

сдвиг  $\Delta t$  между соответствующими импульсами с двух контактов является линейной функцией (см. рис. 3) угла  $\phi$  при малых значениях этого угла.

Эти результаты легко понять, если считать, что нормальные области представляют из себя полосы длиной  $l = 0,08 + 0,23 \text{ см}$ , вытянутые вдоль магнитного поля и движущиеся по поверхности перпендикулярно

$$H. \text{ Скорость движения, согласно рис. 1,3, } V = \frac{l \sin \phi}{\Delta t} \approx \frac{l \phi}{\Delta t} \approx (1,3 + 3,7) \text{ см/с}$$

Неопределенность в измерении скорости возникает из-за неопределенности расстояния между точечными контактами. Из рис. 3 также видно, что при изменении знака магнитного поля направление движения не изменяется, но изменяется величина скорости. По длительности импульсов  $\tau$  и скорости можно определить поперечные размеры нормальных областей. При  $\theta = 1,2^\circ$  ( $\tau = 0,4 \cdot 10^{-3} \text{ сек}$ ) они составляют  $(5 + 15) \cdot 10^{-4} \text{ см} \approx (4 + 12) \xi_0$ . Размеры сверхпроводящих областей, примерно, в 20 раз больше  $(1 + 3) \cdot 10^{-2} \text{ см}$ . Корреляцию между импульсами с двух контактов удалось обнаружить только в наклонном магнитном поле ( $\theta \geq 0,6^\circ$ ). Длительность импульсов нормальной фазы очень сильно зависела от угла  $\theta$ . Она изменялась от  $2 \cdot 10^{-3} \text{ сек}$  при  $\theta = 2,4^\circ$  до  $2 \cdot 10^{-5} \text{ сек}$  при  $\theta = 0^\circ$ .

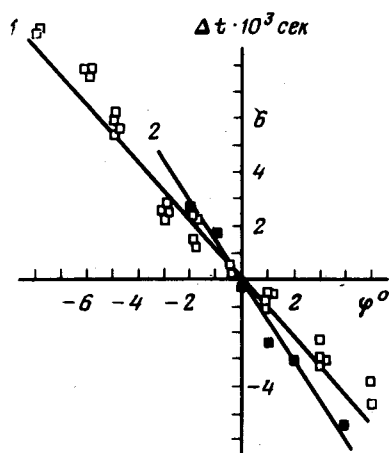


Рис. 3. Зависимость  $\Delta t(\phi)$ ; 1 и 2 отличаются знаком магнитного поля

На зависимости от времени ЭДС, снимаемой с катушки 3 (рис. 1), имеется всплеск, синхронный с моментом возникновения поверхностного слоя. В этот момент из образца выталкивается магнитный поток  $\Delta \Phi \approx 0,5 H_c P \xi_0$  ( $P$  — периметр сечения образца, перпендикулярного магнитному полю). В предположении, что при возникновении слоя магнитный поток из него выталкивается наружу, а не запирается в образце, толщина слоя оказывается порядка  $\xi_0$ .

Авторы выражают глубокую благодарность В.Ф.Гантмахеру, Ю.В.Шарвину и И.Л.Ландау за полезные обсуждения.

## Литература

- [1] Л.Д.Ландау. Частное сообщение Д.Шенбергу (см. D. Shoenberg, Superconductivity, Cambridge, University Press, 1938, p.59.
  - [2] Л.П.Горьков, О.Н.Дорохов. ЖЭТФ, 67, 1925, 1974.
  - [3] А.Ф.Андреев, Ю.К.Джикаев. Письма в ЖЭТФ, 26, 756, 1977.
  - [4] И.Л.Ландау, Ю.В.Шарвин. Письма в ЖЭТФ, 10, 192, 1969.
  - [5] Н.И.Богатина, И.К.Янсон. ЖЭТФ, 63, 1312, 1972.
  - [6] Ю.В.Шарвин. ЖЭТФ, 48, 984, 1965.
  - [7] J. J. Hauser. Phys. Rev., B10, 2792, 1974.
-