

*Письма в ЖЭТФ, том 12, стр. 102 – 105*

*20 июля 1970 г.*

**НАБЛЮДЕНИЕ "АНДРЕЕВСКОГО" ОТРАЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ  
НА ГРАНИЦЕ МЕЖДУ НОРМАЛЬНОЙ И СВЕРХПРОВОДЯЩЕЙ ФАЗОЙ  
С ПОМОЩЬЮ РАДИОЧАСТОТНОГО РАЗМЕРНОГО ЭФФЕКТА**

*И.П.Крылов, Ю.В.Шарвин*

Как было показано Андреевым [1], отражение возбуждений (электронов, дырок), приходящих из нормальной ( $n$ ) фазы на границу со сверхпроводящей ( $s$ ) фазой, происходит с изменением знаков вектора скорости, массы и заряда

возбуждений, причем вероятность отражения равна единице для квазичастиц с энергией, меньшей ширины щели в спектре сверхпроводника.

Измерения интегральных характеристик промежуточного состояния — теплопроводности [2], теплоемкости [3], электропроводности [4] — подтверждают справедливость теории Андреева. Представляется, однако, возможным и более непосредственное наблюдение явления отражения электронов от  $n$ - $s$ -границы. При измерении поверхностного импеданса  $n$ -слоя, граничащего с одной стороны с вакуумом, а с другой — с  $s$ -фазой, в случае большого свободного пробега электронов, отражение электронов от  $n$ - $s$ -границы и возвращение их в скин-слой должно оказывать влияние на величину поверхностного импеданса и привести к возникновению радиочастотных размерных эффектов (РРЭ) нового типа.

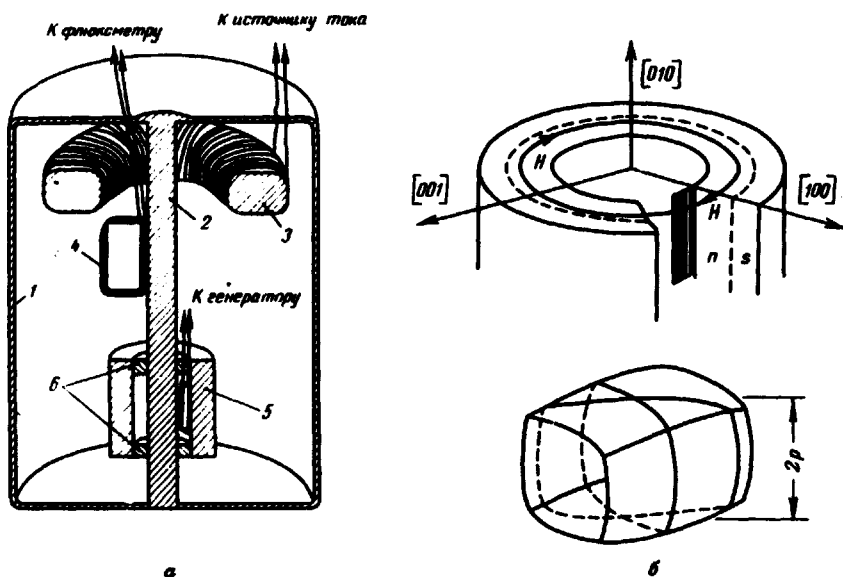


Рис. 1

В нашем эксперименте (см. рис. 1)  $n$ -слой создавался на внутренней поверхности полого цилиндрического образца 5 под действием магнитного поля тока  $I$ , протекающего по проводу 2. Монокристаллический образец диаметром 12 мм, длиной 15 мм с отверстием радиуса  $r = 3,10$  мм был отлит из олова чистотой 99,9999% в стеклянной трубке с вкладышем из каменной соли. Вследствие различия коэффициентов теплового расширения соли и олова вкладыш свободно извлекался из образца. Образец фиксировался относительно провода 2 с помощью дюралевых шайб 6. Примененное устройство позволило получить  $n$ -слой цилиндрической формы и варьировать его толщину, изменяя величину  $I$ . Для получения требуемых сильных токов (до 600 а) был использован сверхпроводящий трансформатор, в котором вторичной обмоткой служили провод 2 и оболочка 1, изготовленные из свинца. Первичная обмотка из 215 витков проволоки 65 БТ была намотана на пермалловый сердечник 3. Величина тока  $I$  была пропорциональна току в первичной обмотке  $J$ , что контролировалось при помощи катушки 4, присоединенной к флюксметру Ф-18.

К внутренней поверхности образца была прижата катушка колебательного контура радиочастотного генератора, работавшего на частоте  $f \approx 10$  МГц. По-

ложение катушки, имеющей форму плоской спирали и направление поля вблизи катушки относительно кристаллических осей образца, показанные на рис. 1, б, были такими же, как в опыте Гантмахера [5] при наблюдении наиболее интенсивной линии РРЭ на плоских оловянных образцах в  $n$ -состоянии. Нами применялась обычная модуляционная методика наблюдения РРЭ [5] с регистрацией на самописце сигнала, пропорционального  $\partial f / \partial J$ .

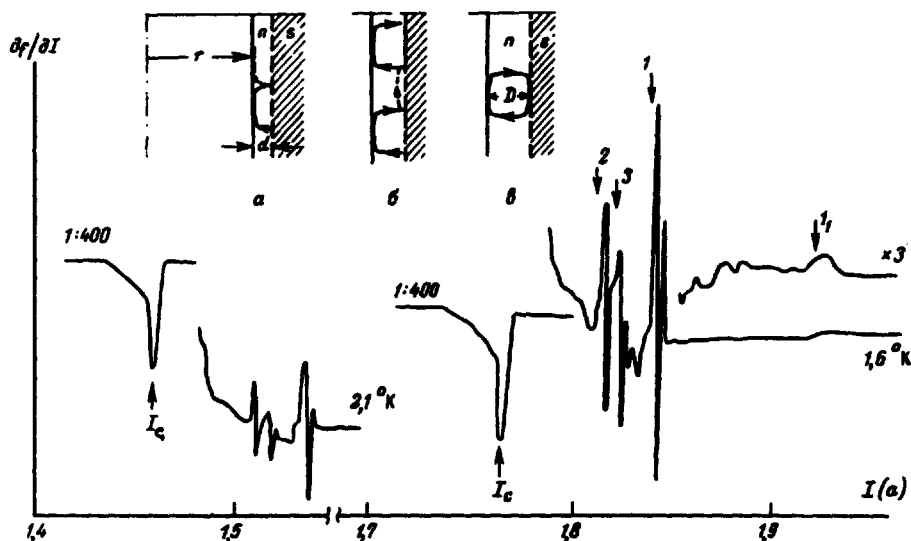


Рис.2

Две записи  $\partial f(J) / \partial J$  при различных температурах приведены на рис. 2. Справа от минимума, связанного с появлением  $n$ -слоя на поверхности образца при  $J = J_c$  (снятого при уменьшенной в 400 раз чувствительности) был обнаружен ряд линий РРЭ. Толщина  $n$ -слоя  $d$ , соответствующая линии, наблюдаемой при токе  $J$ , может быть определена по формуле  $d = r(J - J_c) / J_c + \sqrt{\xi \cdot r J / J_c}$ , где второй член, равный  $\approx 3 \cdot 10^{-3}$  см, учитывает роль поверхностной энергии  $n$ - $s$ -границы  $\xi H_c^2 / 8\pi$  (см. [6]). Распределение поля в  $n$ -слое определялось из условия  $H = H_c$  на  $n$ - $s$ -границе (поправкой порядка  $H_c \xi / r$  мы пренебрегали). В нашем эксперименте  $d \leq 10^{-1} r$  и, таким образом, неоднородность поля в  $n$ -слое сравнительно невелика. Наличие неоднородности должно приводить к небольшому дрейфу электронов вдоль оси образца, причем размер траектории в радиальном направлении  $D$  можно с достаточной точностью определить по формуле  $D = 2rc / eH$ , где  $H$  — поле на среднем расстоянии от оси образца, а  $2r$  представляет собой размер орбиты в импульсном пространстве в направлении оси. Нетрудно видеть, что в том случае, если орбита расположена на выпуклом участке ферми-поверхности, максимальная величина  $D$  будет одинаковой для конечного интервала направлений поля в образце (см. рис. 1, б, где внизу показана часть ферми-поверхности с орбитами, соответствующими разным участкам образца).

При  $d < D$  эффективные электроны, ускоренные в скин-слое, сталкиваются с  $n$ - $s$ -границей и при исследованных температурах должны отражаться практически полностью. Если  $d > D/2$ , электроны возвращаются в скин-слой после двухкратного отражения, давая практически такой же вклад в ток, как и в случае  $d > D$  (схема б на рис. 2).

При уменьшении  $J$  до такого значения, когда радиальный размер траектории отраженных квазичастиц сравнивается с  $d$ , они попадают скин-слой после первого отражения, давая вклад противоположного знака в поверхностный ток (схема  $a$  на рис. 2), что и должно приводить к возникновению линии РРЭ при значении  $J$ , определяемом условием  $d(J) = \rho c / e H$ , где  $H$  — поле на расстоянии  $d/2$  от поверхности образца. При обычном зеркальном отражении эта линия, очевидно, должна была бы отсутствовать.

На кривой для  $T = 1,6^\circ K$  на рис. 2 цифрами 1, 2, 3 отмечены положения линий, рассчитанные по значениям  $\rho$  для сечений  $1_1, 2_1, 3_1$  из работы [5]. Близкое совпадение положения линий с рассчитанным служит подтверждением предложенного Андреевым закона отражения.

При увеличении в три раза чувствительности на кривой рис. 2 отчетливо виден пик РРЭ при  $d = D$  для полного сечения  $1_1$  (схема  $b$  на рис. 2). Появление этой линии связано, по-видимому, с изменением структуры "всплеска" радиочастотного тока (см. [7]), имеющегося в металле на расстоянии  $D$  от поверхности, при пересечении области всплеска  $n$ - $s$ -границей, когда отраженная часть всплеска накладывается на неотраженную. Очевидно, может быть наблюден целый ряд линий быстро убывающей интенсивности в тех случаях, когда в толщине  $n$ -слоя укладывается  $m/2$  экстремальных орбит, где  $m$  — целое число.

Институт физических проблем  
Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
17 июня 1970 г.

#### Литература

- [1] А.Ф.Андреев. ЖЭТФ, 46, 1923, 1964; 51, 1510, 1966.
- [2] Н.В.Заварицкий. ЖЭТФ, 38, 1673, 1960.
- [3] Н.В.Заварицкий. Письма в ЖЭТФ, 2, 168, 1965.
- [4] И.Л.Ландау. Письма в ЖЭТФ, 11, 437, 1970.
- [5] В.Ф.Гантмахер. ЖЭТФ, 44, 811, 1963.
- [6] Ю.В.Шарвин. ЖЭТФ, 33, 1341, 1957.
- [7] Э.А.Кавер, В.Ф.Гантмахер. УФН, 94, 193, 1968.