

НЕЛИНЕЙНОСТЬ СОПРОТИВЛЕНИЯ ТОЧЕЧНОГО МЕТАЛЛИЧЕСКОГО  
КОНТАКТА И ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ВОЛН СВЧ ПРИ ГЕЛИЕВОЙ  
ТЕМПЕРАТУРЕ

М.С.Хайкин, И.Я.Краснополин

В последнее время появились сообщения об исследованиях нелинейности электрического сопротивления охлаждаемых жидким гелием точечных контактов, в которых одним из электродов служил либо полуметалл [1,2], либо сверхпроводник [3,4]. В этом письме содержатся некоторые результаты изучения свойств контактов обычных чистых металлов, находящихся в нормальном состоянии при низкой температуре.

Объектом исследования служили контакты, образованные тонкой проволочкой Pt ( $\varnothing$  10 мк) и массивным образцом Sn (испытывались и другие материалы). Контакт создавался при температуре жидкого гелия прикосновением проволочки к массивному образцу. Для получения стабильного контакта в момент прикосновения проволочки производилась сварка контакта слабым электрическим разрядом. Такой контакт при гелиевой температуре имел сопротивление  $0,3 + 1,5$  ом и поперечные размеры порядка  $10^{-5} + 10^{-6}$  см. Оценка размеров произведена по величине тока, разрушающего сверхпроводимость контакта, охлажденного ниже критической температуры Sn.

Для изучения особенностей поведения сопротивления  $R$  контакта применялись в основном два метода: снятие статических вольтамперных

характеристик  $V(I)$  и измерение напряжения низкой частоты  $A$ , получаемого вследствие детектирования в контакте модулированного излучения частоты 40 ГГц. Напряжения  $V$  и  $A$  записывались в функции от постоянного тока смещения  $I$ , пропускаемого через контакт.

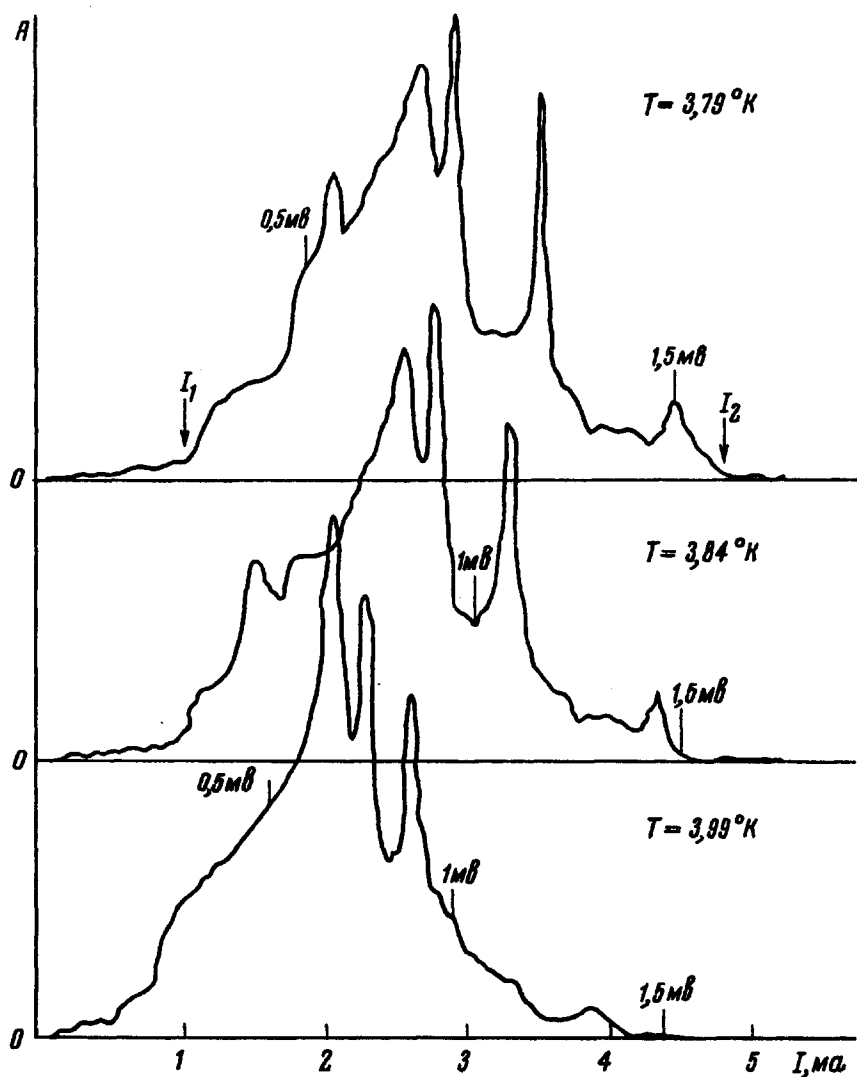


Рис. 1. Записи  $A(I)$  для контакта  $Pt + Sn$  в относительных единицах при температурах  $T$ , приведенных справа от кривых. Цифрами в милливольтгах указано падение напряжения на контакте

Излучение СВЧ мощностью  $10 + 100$  мквт, выходящее из открытого конца волновода, введенного в сосуд джара, освещало исследуемый контакт, помещавшийся в жидком гелии.

На рис. 1 приведена запись  $A(I)$ , типичная для сварных контактов: область наблюдения детектированного сигнала заключена в пределах от  $I_1$  до  $I_2$ . Значения  $I_1$  для разных контактов находятся в пределах от 0,1 до 1 ма, значения  $I_2$  - от 1 до 10 ма. При повышении температуры  $T$  область нелинейности  $R$  смещается в сторону меньших  $I$ , причем амплитуда  $A(I)$  убывает. Детектированный сигнал (а значит и нелинейность  $R$ ) исчезает при температуре  $5,5 + 6^\circ\text{K}$ . На рис.2 показан пример зависимости  $I_2(T)$ .

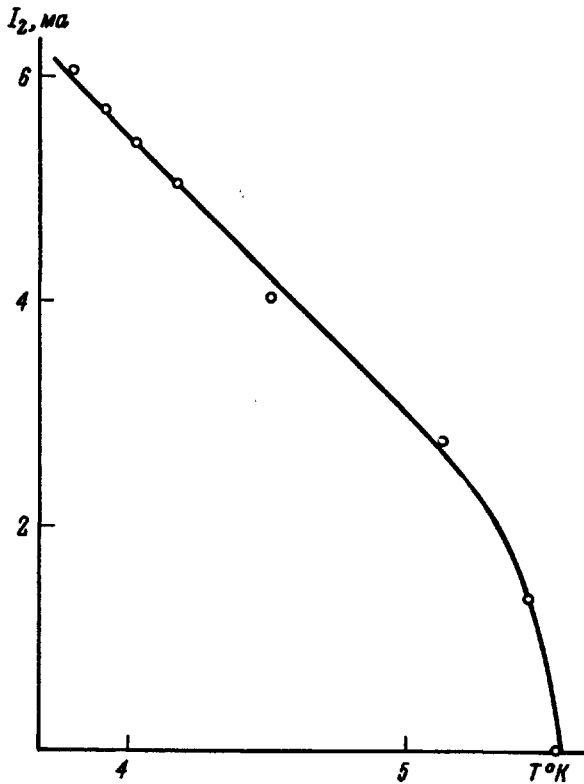


Рис.2. Зависимость границы  $I_2$  области нелинейности сопротивления контакта  $Pt+Sn$  от температуры

Статические характеристики  $V(I)$  сварных контактов свидетельствуют об изменении  $R$  в области от  $I_1$  до  $I_2$ , причем скачки  $R$  соответствуют пикам на кривой  $A(I)$ . На рис. 3 показан пример статических характеристик контакта, отличающегося тем, что область нелинейности  $R$  сильно сужена и практически выродилась в скачок  $R$ .

Как видно из этой характеристики,  $R_2(I > I_2) \approx 2,8 R_1(I < I_1)$ . Для других контактов, имевших более широкую область нелинейности сопротивления (рис.1) отношение  $R_2/R_1$  составляло 2 + 3. Скачок  $R$ , соответствующий разрушению сверхпроводимости контакта, весьма различен на разных контактах; на рис.3 этот скачок не заметен. Это обстоятельство, по-видимому, зависит от того, какой металл (Pt или Sn) преобладает в самом тонком месте контакта. Наложение магнитного поля любого направления уменьшает  $I_1$  и  $I_2$ ; например, поле 6 кэ снижает  $I_2$  в  $\sim 1,5$  раза.

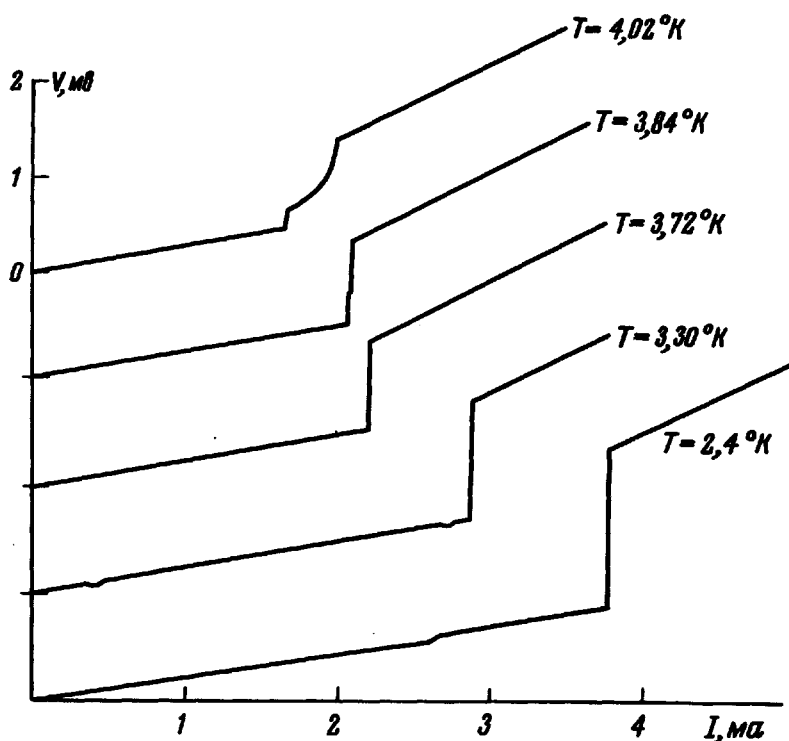


Рис. 3. Статические вольтамперные характеристики контакта Pt + Sm при температурах T, указанных справа от кривых

Эффекты, аналогичные описанным выше, наблюдались также и на контактах, получавшихся без сварки, просто легким касанием острия и массивного образца, изготовленных из Pt, Sn, Al, Cu, Au, Nb, Bi. Увеличение площади контакта нажимом на острие приводило к исчезновению нелинейности сопротивления контакта и эффекта детектирования.

Эти факты дают основание считать, что нелинейность сопротивления точечного контакта обусловлена, главным образом, геометрией контакта, а не индивидуальными свойствами металлов, его образующих.

Для объяснения нелинейности сопротивления исследованных ими структур, Есаки и Стайлз [1] предположили, что в области контакта нормального металла с полуметаллом возникает сверхпроводимость; Ненни [2] сделал попытку объяснить это явление возникновением тепловой неустойчивости в объеме контакта. Однако вопрос о природе эффекта представляется еще не выясненным; тем более это относится к контакту двух обычных металлов, находящихся в нормальном состоянии.

В связи с этим надо обратить внимание на следующее обстоятельство, обнаружившееся в данной работе. В то время как сопротивления  $R$  разных контактов ( $Pt+Sn$ ) лежат в пределах  $0,3 + 1,5$  ом (различие в 5 раз), а ток  $I_2$  - в пределах  $1,6 + 7,4$  ма (различие в 4,6 раза), падение напряжения на контакте при  $I = I_2$  отличается от среднего значения  $1,9$  мв не более чем на  $\pm 25\%$  (плотность тока  $10^7 + 10^9$  а/см<sup>2</sup>, температура  $4,1^\circ K$ ). Из этого следует, что скорость дрейфа, приобретаемая электронами, пролетающими область контакта, размеры которой много меньше длины свободного пробега, составляет  $v_{др} \approx \Delta \varepsilon / p \approx 3 \cdot 10^5$  см/сек, т.е. порядка скорости звука  $\xi = 1,9 \cdot 10^5$  см/сек для  $Sn$  (при этой оценке взято приращение энергии электрона  $\Delta \varepsilon \approx 2$  Мэв и его импульс  $p \approx 10^{-20} \frac{г \cdot см}{сек}$ ). Такие быстрые электроны должны эффективно излучать гиперзвуковые фононы, длина волны которых  $\sim 10^{-6}$  см, т.е. порядка размеров контакта. Это обстоятельство благоприятствует возбуждению когерентного индуцированного излучения фононов из объема контакта, что должно приводить к торможению потока электронов в контакте, т.е. к увеличению его сопротивления. Изложенные соображения представляют собой лишь качественную гипотетическую картину эффекта. Но, во всяком случае, следует считать вполне оправданным возникновение нелинейности электрического сопротивления металла, когда скорость дрейфа носителей тока достигает и превосходит скорость звука в металле. Наблю-

давшиеся скачки сопротивления контакта, вероятно, представляют собой проявление особенностей фононного спектра [5,6] металлического кристалла, служащего электродом контакта.

П.Л.Капице авторы благодарны за интерес и внимание к работе, Р.Т.Мина и В.С.Эдельману - за ее обсуждение, Г.С.Чернышеву и В.А.Юдину - за техническую помощь.

Институт физических проблем  
Академии наук СССР

Поступило в редакцию  
12 июля 1966 г.

#### Литература

- [1] L.Esaki, P.J.Stiles, Phys.Rev.Lett., 15, 152, 1965.
- [2] C.A.Nanney. Phys.Rev.Lett., 16, 313, 1966.
- [3] J.E.Zimmerman, A.H.Silver. Phys.Rev., 141, 367, 1966.
- [4] J.I.Pankove. Phys.Lett., 21, 406, 1966.
- [5] L.Van Hove. Phys.Rev., 89 1189, 1953.
- [6] J.M.Kowall, L.Kopf. Phys.Rev., 137, A907, 1965.