

26

О ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОМ СОПРОТИВЛЕНИИ
СВЕРХПРОВОДНИКОВ ВТОРОГО РОДА*Н.Я.Фогель, В.Г.Воложкая, Л.Н.Коровин,
И.М.Дмитренко*

Как следует из теории Абрикосова [1], магнитное поле проникает в сверхпроводники второго рода в виде вихрей. В присутствии транспортного тока под действием силы Лоренца возникает движение вихрей, которое приводит к диссипации энергии. Если сила Лоренца, действующая на вихри, существенно превосходит силу пиннинга, движение вихрей имеет характер вязкого течения. В области вязкого течения электрическое напряжение, возникающее в сверхпроводнике, линейно зависит от величины транспортного тока. При этом дифференциальное сопротивление $\rho_f = dV/dI$ связано с величиной магнитного поля согласно эмпирическому закону Кима [2] соотношением $\rho_f = \rho_n H/H_{c2}(0)$. Экспериментально величина ρ_f определяется из наклона линейного участка на вольт-амперной характеристике. Согласно [2] дифференциальное сопротивление характеризует объемные свойства сверхпроводника второго рода.

В настоящей работе измерены вольт-амперные характеристики в широкой области полей на монокристаллических и поликристаллических образцах сплавов системы $PbIn$ с концентрацией от 22 до 24 ат. % In . В качестве исходных компонент брались Pb и In высокой чистоты. Сплавы этих концентраций представляют собой твердый раствор с градиентированной кубической решеткой. Состав образцов проверялся с помощью химического анализа, ориентация монокристаллов определялась рентгенографически. Во всех экспериментах длинная ось образца перпендикулярна направлению внешнего магнитного поля, транспортный ток направлен вдоль оси образца. Измерения проведены на образцах в форме круглых цилиндров и пластин. Кривые $V(I)$ мерялись как по точкам, так и путем записи на двухкоординатном самопишущем потенциометре.

Для всех образцов были сняты зависимости критического тока I_c и сопротивления R от магнитного поля H . Из этих зависимостей видно, что в полях выше H_{c2} наблюдается поверхностная сверхпроводимость. Поле H_{c2} определялось по резкому падению I_c на кривых $I_c(H)$ и по перегибу на кривых $R(H)$.

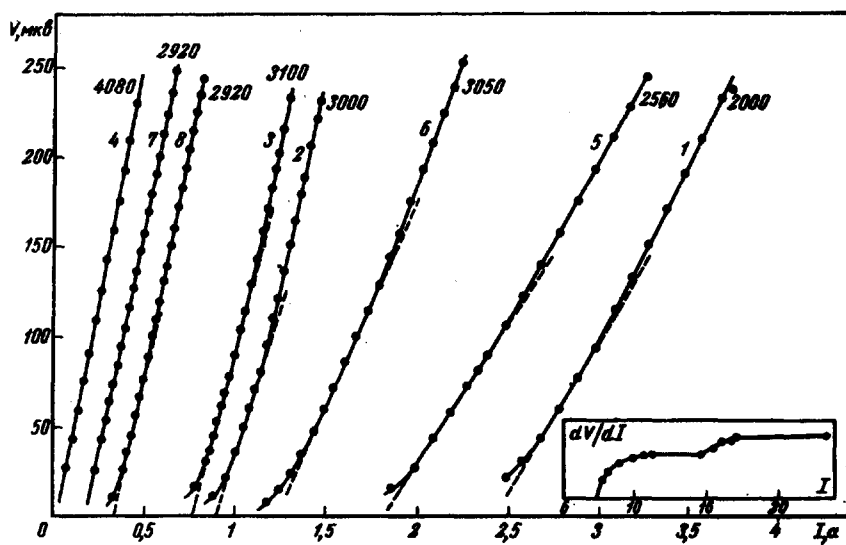


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики для трех образцов при $T = 4,2^\circ \text{K}$. Пунктиром показана экстраполяция первого линейного участка. Кривые 1, 2, 3, 4 — монокристаллический образец, 24% In; кривые 5, 6 — поликристаллический образец, 24% In; кривая 7 — пластина, 22% In, $H \perp$ плоскости пластины; кривая 8 — пластина, H под углом 15° к плоскости образца. Значения магнитного поля в эрстедах приведены рядом с кривыми. На вставке в правом углу приведена зависимость dV/dI от I в произвольных единицах

На рис. 1 приведены вольт-амперные характеристики для монокристаллического и поликристаллического образцов (24% In) цилиндрической формы при различных значениях магнитного поля. Судя по характеру кривых $V(I)$, резистивное состояние сохраняется вплоть до поля H_{c3} . На всех вольт-амперных характеристиках, снятых в полях меньше H_{c2} , вслед за начальной нелинейной областью наблюдается линейный участок, который при больших токах сменяется вторым линейным участком с несколько большим наклоном. В полях, превышающих H_{c2} , остается только первый линейный участок. Нами были проведены непосредственные измерения производной dV/dI с помощью модуляции транспортного тока переменным током малой частоты с последующим усилением и детек-

тированием выходного сигнала синхронным детектором. На производной отчетливо видно плато, параллельное токовой оси, в области второго линейного участка. Однако, первый линейный участок при такой методике дифференцирования на производной не проявляется. Это связано с тем, что добавление переменного тока даже небольшой амплитуды, необходимой для получения заметного сигнала, приводит к видоизменению вольт-амперной характеристики — первый линейный участок на кривой $V(I)$ исчезает, и естественно, он не может проявиться на производной. При графическом дифференцировании кривых $V(I)$, записанных с помощью двухкоординатного самопишущего потенциометра ($H < H_{c2}$), получается производная с двумя горизонтальными линиями, соответствующими первому и второму линейным участкам (вставка на рис.1).

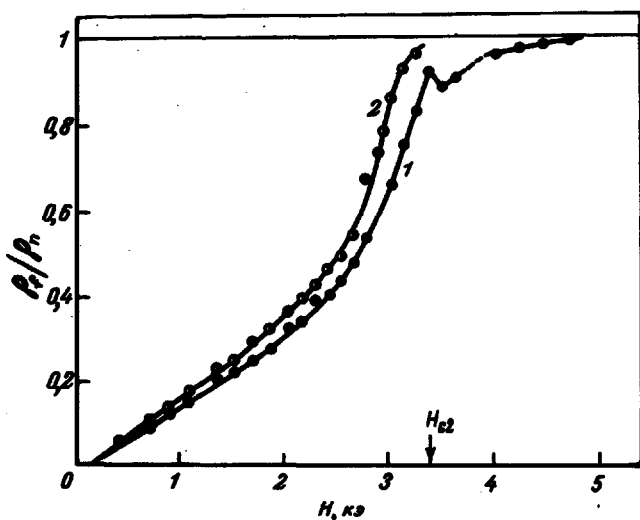


Рис. 2. Зависимость ρ_{fI} (кривая 1) и ρ_{fII} (кривая 2) от магнитного поля для монокристаллического образца (24% In), $T = 4,2^\circ \text{K}$

Из кривых $V(I)$ были определены значения дифференциального сопротивления ρ_{fI} и ρ_{fII} соответственно для первого и второго линейных участков. Зависимость ρ_{fI} и ρ_{fII} от поля для монокристаллического образца приведена на рис. 2. Значения ρ_f отнесены к величине нормального сопротивления ρ_n . Из рисунка видно, что две ветви дифференциального сопротивления различным образом зависят от магнитного поля. Верхняя ветвь, соответствующая ρ_{fII} , оканчивается в поле H_{c2} , тогда как нижняя, соответствующая ρ_{fI} , продолжается в область полей $> H_{c2}$. Обе ветви ρ_f в области малых полей линейно зависят от магнитного поля, но кривые не идут в ноль, так как размагничивающий фактор образца не равен единице. Две ветви ρ_f наблюдаются

у всех образцов цилиндрической формы, как монокристаллических, так и поликристаллических.

Характер зависимости ρ_f от H позволяет связать нижнюю ветвь ρ_f с поверхностными свойствами, а верхнюю с объемными. При токах, не намного превышающих критический, транспортный ток, по-видимому, преимущественно течет в поверхностном слое, и дифференциальное сопротивление определяется свойствами этого слоя. С увеличением тока происходит перераспределение транспортного тока в объем (при $H_{c1} < H < H_{c2}$), и течение вихрей определяется уже свойствами объема сверхпроводника. При $H_{c2} < H < H_{c3}$ в поверхностном слое, согласно работе Кулика [3], если поле наклонено к поверхности под малым углом, возникает вихревая структура, и возможно резистивное состояние, связанное с движением этой структуры. Такую резистивность мы и наблюдаем на цилиндрических образцах, так как при подобной геометрии всегда есть участки поверхности, к которым поле наклонено под малым углом. Поскольку на пластинах в перпендикулярном поле наблюдается только один линейный участок [2, 4, 5], можно предположить, что проявление резистивности поверхностного слоя в полях $< H_{c2}$ также связано с существованием значительной компоненты поля, параллельной поверхности образца. Это предположение подтверждается нашими измерениями на плоской пластине (22% In). Как и в работах других авторов, при ориентации поля перпендикулярно плоскости образца на вольт-амперных характеристиках виден только один линейный участок (кривая 7, рис. 1). При углах 5 и 15° между плоскостью и магнитным полем ($H \perp I$) мы вновь наблюдаем два наклона (кривая 8, рис. 1). Нам известна только одна работа, где исследовалась зависимость ρ_f от H при различных углах наклона магнитного поля по отношению к плоскости образца [6]. Приведенные в этой работе кривые $\rho_f(H)$ при малых углах подобны зависимости $\rho_{f1}(H)$, измеренной нами. Можно думать, что в этом случае был отмечен только первый линейный участок.

На основании приведенных нами данных можно утверждать, что не только критический ток является поверхностным, как это предполагалось в работе Шварца и Харта [6], но и ток, несколько превышающий критический, течет в поверхностном слое. Ток, существенно превышающий I_c , течет во всем объеме сверхпроводника. Таким образом, распределение транспортного тока в образце при фиксированном внешнем магнитном поле зависит от величины тока.

Авторы выражают благодарность И.О.Кулику и В.П.Галайко за полезные обсуждения.

Физико-технический
институт
низких температур
Академии наук Украинской ССР

Поступило в редакцию
16 декабря 1968 г.

Литература

- [1] А.А.Абрикосов. ЖЭТФ, 32, 1442, 1957.
- [2] Y. B. Kim, C. F. Hempstead, A. R. Strnad. Phys. Rev., 139A, 1163, 1965.
- [3] И.О.Кулик. ЖЭТФ, 55, 889, 1968.
- [4] Joiner. Phys. Rev. Lett., 19, 895, 1967.
- [5] H. Van Beelen, I. P. Van Braam Houckgeest, H. M. Thomas, S. Stolk, R. de Bruyn Ouboter. Physica, 36, 241, 1967.
- [6] P. S. Swartz, H. R. Hart. Phys. Rev., 137A, 818, 1965.