

О НЕЛИНЕЙНОЙ ПРОВОДИМОСТИ ТОНКИХ ПЛЕНОК В СМЕШАННОМ СОСТОЯНИИ

Л.Е. Мусиенко, И.М. Дмитренко, В.Г. Волоцкая

Приведены экспериментальные доказательства существования неравновесных эффектов в динамическом смешанном состоянии сверхпроводящих пленок, предсказанных в теории Ларкина и Овчинникова.

Неравновесные состояния, возникающие в сверхпроводниках, являются причиной ряда интересных явлений в тонких сверхпроводящих пленках. Так, в узких пленках, находящихся в изотермических условиях, возникает перегрев электронов относительно решетки, приводящий к наличию на вольт-амперных характеристиках (ВАХ) гистерезиса, не связанного с джоулевым нагревом [1, 2]. В динамическом смешанном состоянии сверхпроводника из-за большого времени энергетической релаксации электронов τ_ϵ неравновесные состояния возникают в нормальных ядрах движущихся вихрей, как это впервые было показано Ларкиным и Овчинниковым [3]. Происходящее при этом уменьшение коэффициента вязкости $\eta(u)$ с ростом скорости движения вихрей u приводит к тому, что сила вязкости трения $F_\eta = \eta(u)u \sim I(V)$ и ВАХ проходят через максимум, приобретая N -образную форму. Запись такой ВАХ в схеме с источником тока будет иметь срыв при характерных значениях электрического поля E^* и тока J^* , о чем уже сообщалось ранее [4].

В данном сообщении приводятся факты, подтверждающие существования неравновесных эффектов в динамическом смешанном состоянии сверхпроводников, предсказанных в работе [3].

Исследовались пленки Sn, Al и сплава Sn - 6% In с шириной $w > \lambda_{\perp}$. Пленки приготавливались термическим испарением в вакууме на подложки из монокристаллического кварца. Параметры некоторых образцов приведены в таблице (w, L, d - ширина, длина и толщина пленок, соответственно).

№ Образца	Материал	$w, \text{см}$	$L, \text{см}$	$d, \text{Å}$	$l, \text{Å}$	κ
1	Sn	$21 \cdot 10^{-4}$	$1,25 \cdot 10^{-2}$	500	800	0,7
2	Sn - 6% In	$87 \cdot 10^{-4}$	$3,4 \cdot 10^{-2}$	400	100	2,2
3	Al	$1,14 \cdot 10^{-1}$	$4,7 \cdot 10^{-1}$	300	40	5,6

Для всех исследованных материалов изменение ВАХ с понижением температуры и ростом внешнего, перпендикулярного пленке, магнитного поля H_{\perp} происходит качественно одинаково (рис. 1).

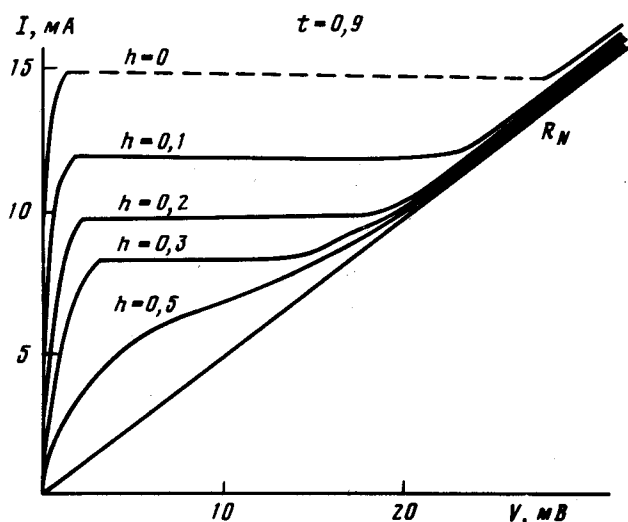


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики пленки Al при различных величинах магнитного поля

Во внешнем магнитном поле при достижении тока пиннинга пленка переходит в обусловленное движением вихрей динамическое смешанное состояние, которому на ВАХ соответствует широкая, существенно нелинейная, резистивная область. При достижении характерных для данной величины магнитного поля значений тока J^* и напряжения V^* , происходит резкий излом или срыв на ВАХ. С увеличением магнитного поля ВАХ постепенно сглаживаются, а при $h = H/H_{\perp} \gtrsim 0,3 - 0,4$ срывы и изломы на них исчезают. Как показали Ларкин¹ и Овчинников [3], в динамическом смешанном состоянии сверхпроводников из-за большого времени энергетической релаксации рост энергии нормальных возбуждений внутри вихря с увеличением скорости его движения может привести к сильному изменению функции распределения возбуждений по энергиям. При этом с увеличением скорости число нормальных возбуждений внутри вихря уменьшается, т. е. уменьшается его размер

$\xi(u)$, что приводит к уменьшению коэффициента вязкости η с ростом u , а сила вязкого трения имеет максимум при $u = u^*$. Для E^* и u^* в точке максимума ВАХ теория [3] дает следующие выражения:

$$E^* = \frac{BD^{1/2} [14 \zeta(3)]^{1/4} (1-t)^{1/4}}{(\pi \tau_\epsilon)^{1/2}}, \quad (1)$$

$$u^* = \frac{D^{1/2} [14 \zeta(3)]^{1/4} (1-t)^{1/4}}{(\pi \tau_\epsilon)^{1/2}}, \quad (2)$$

где $D = v_F l / 3$, l — длина свободного пробега, $t = T/T_k$, B — индукция в образце.

На всех исследованных нами пленках, независимо от материала, величины E^* и u^* имеют зависимость от температуры и магнитного поля, следующую из формул (1) и (2). Следует отметить, что зависимость E^* и u^* от времени энергетической релаксации τ_ϵ особенно отчетливо проявляется при сравнении этих величин для Sn и Al, у которых τ_ϵ отличаются на два порядка [5, 6]. На рис. 2 приведены температурные зависимости u^* для образцов №1 и №3 (см. таблицу). Видно, что в исследованном интервале температур экспериментальные данные хорошо согласуются с теоретическим расчетом при $\tau_\epsilon(\text{Sn}) = 6,6 \cdot 10^{-10}$ сек и $\tau_\epsilon(\text{Al}) = 4 - 7 \cdot 10^{-8}$ сек. Полученное согласие эксперимента с теорией [3] позволяет утверждать, что наблюдаемые особенности на ВАХ во внешнем магнитном поле $0,05 < h \lesssim 0,4$ обусловлены нелинейной зависимостью коэффициента вязкости от скорости движения вихрей.

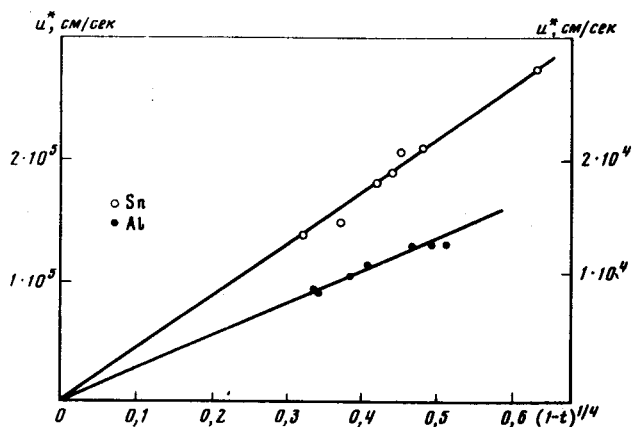


Рис. 2. Температурная зависимость u^* образцов №1(Sn) и №3 (Al); сплошные прямые — расчет

Следует обратить внимание на тот факт, что экспериментальные ВАХ содержат особенности, не описываемые теорией в ее существующем виде. Так, за точкой срыва (E^* , J^*) наблюдается широкая резистивная область, а выходу ВАХ на R_N предшествует область постоянного избыточного тока, характерного для узких ($w < \lambda_D$) пленок в отсутствие внешнего поля H . К сожалению, в теории не исследуется вид ВАХ за точкой максимума. На основании имеющихся эксперименталь-

ных данных пока нельзя однозначно ответить на вопрос, сохраняется ли в пленке вихревое состояние за точкой срыва, или она переходит в некое новое состояние с иными зависимостями параметра порядка от координат и времени.

Авторы благодарны А.И.Ларкину и Ю.Н.Овчинникову за ценные советы и обсуждения результатов работы.

Физико-технический институт
низких температур
Академии наук Украинской ССР

Поступила в редакцию
4 апреля 1980 г.

Литература

- [1] В.А.Шкловский. ФТТ, 17, 3076, 1975.
 - [2] В.Г.Волоцкая, Л.Е.Мусяенко, И.М.Дмитренко, Ю.В.Калекин. ФНТ, 2, 500, 1976.
 - [3] А.И.Ларкин, Ю.Н.Овчинников. ЖЭТФ, 68, 1915, 1975.
 - [4] Л.Е.Мусяенко, В.Г.Волоцкая, И.М.Дмитренко, Ю.В.Калекин. "Вопросы атомной науки и техники", серия "Фундаментальная и прикладная сверхпроводимость", вып. 1, 5, 1975.
 - [5] W.J.Skocpol, M.R.Beasley, M.Tinkham. J. Low Temp. Phys., 16, 145, 1974.
 - [6] T.M.Klapwijk, M.Sepers, J.E.Mooij. J. Low Temp. Phys., 27, 801, 1977.
-