

В. В. СЫЧЕВ, В. А. АЛТОВ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТОКА В КОМБИНИРОВАННЫХ СВЕРХПРОВОДНИКАХ

(Представлено академиком В. А. Кириллиным 20 XI 1970)

Современная теория комбинированных сверхпроводников базируется на модели, предложенной З. Стекли (1, 2). При формулировке исходных уравнений (1, 2), описывающих состояние комбинированного проводника, в качестве первого приближения принято, что доля тока, идущая по сверхпроводящей части комбинированного проводника, равна критическому току сверхпроводника $I_{кр}$ при данной равновесной температуре T комбинированного проводника. Такое допущение позволило построить достаточно простую и наглядную модель, приводящую к результатам, качественно пригодным для любых практических приложений. Последующие работы, в которых теория З. Стекли была обобщена с учетом перехода к пленочному режиму кипения гелия (3) и затем с учетом влияния температурной зависимости сопротивления подложки (4), также основаны на этом допущении.

В условиях деления тока в комбинированном проводнике между сверхпроводником и подложкой сверхпроводник находится в особом, так называемом резистивном, состоянии (5). При этом важно отметить, что поскольку подложка и сверхпроводник в комбинированном проводнике могут рассматриваться как проводники, включенные параллельно, очевидно в условиях деления тока будет иметь место падение напряжения на этом сверхпроводнике V , равное падению напряжения на подложке:

$$V = fI\rho / A = (I_s - I_{кр})R_{рез}, \quad (1)$$

где I — полный ток в проводнике, f — доля тока, перешедшая в подложку, ρ / A — сопротивление подложки на единицу длины, $I_s = (1 - f)I$ — ток в сверхпроводнике, $R_{рез} = (dV / dI)_{T=const}$ — резистивное сопротивление сверхпроводника в расчете на единицу длины.

Очевидно, если бы в условиях деления тока между сверхпроводником и подложкой по сверхпроводнику протекал ток $I_{кр}(T, H)$, падение напряжения на сверхпроводнике отсутствовало бы; между тем это отличное от нуля падение напряжения поддерживается на сверхпроводнике включенной параллельно ему подложкой. В рассматриваемых условиях по сверхпроводнику течет ток, величина которого превышает величину критического тока для данной равновесной температуры проводника T

$$\Delta I_s = I_s - I_{кр}. \quad (2)$$

Учет этой поправки при выводе уравнений Стекли был выполнен в работе (6) и привел к выражениям, отличающимся от них дополнительным членом x в знаменателе правой части уравнений (3) — (5)

$$f = (i - 1) / [i(1 - ai + x)], \quad (3)$$

$$VA / (\rho I_c) = (i - 1) / (1 - ai + x) = fi \quad (4)$$

— безразмерное напряжение на единицу длины проводника;

$$\tau = ai(i - 1) / (1 - ai + x) = fai^2 \quad (5)$$

безразмерная температура проводника;

здесь $i = I / I_c$ — безразмерная сила тока в комбинированном проводнике, $\tau = (T - T_n) / (T_c - T_n)$ — безразмерная температура комбинированного проводника, $\alpha = \rho I_c^2 / [APh(T_c - T_n)]$ — безразмерный параметр, обычно именуемый критерием стабильности Стекли, T_n — температура гелиевой ванны, P — охлаждаемый периметр проводника, h — коэффициент теплоотдачи с поверхности проводника в гелиевую ванну, $x = \rho / (AR_{пр})$ — отношение сопротивления подложки ($R_n = \rho / A$) к сопротивлению сверхпроводящей части комбинированного проводника, находящейся в резистивном состоянии.

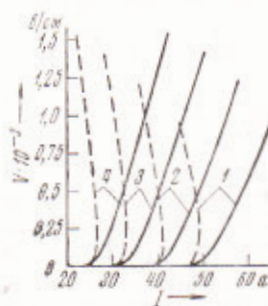


Рис. 1

Рис. 1. Зависимость $V(I_c)$ при различных H : 1 — 20 кэ; 2 — 30; 3 — 40; 4 — 50 кэ

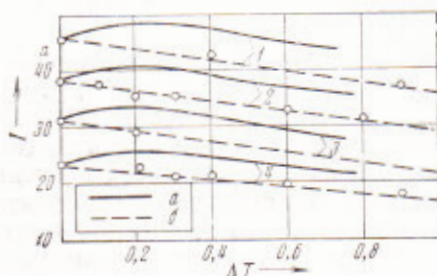


Рис. 2

Рис. 2. Зависимость $I_s(T_s)$ (а) и $I_{кр}(H, T)$ (б) при различных H : 1 — 20 кэ; 2 — 30; 3 — 40; 4 — 50 кэ

Поскольку в реальных комбинированных проводниках действует ряд факторов (нелинейность коэффициента теплоотдачи h , наличие теплового и электрического сопротивления на границе сверхпроводника и подложки, нелинейность вольт-амперной характеристики сверхпроводника в резистивном состоянии при $T = \text{const}$ и др.), учет которых в теоретическом рассмотрении представляется затруднительным, оставался открытым вопрос о степени влияния параметра x на распределение тока в комбинированных сверхпроводниках. В этой связи нами было проведено экспериментальное исследование распределения тока в технических комбинированных проводниках в условиях деления тока между сверхпроводником и подложкой.

Методика эксперимента состояла в следующем. Исследуемый образец комбинированного проводника длиной 10—15 см навивался на фторопластовый каркас $\phi = 2,5$ см, выполненный в виде звездочки. Таким образом, образец соприкасался с поверхностью каркаса лишь в отдельных точках (на зубцах звездочки) и, следовательно, можно считать, что теплоотдача с поверхность образца осуществлялась к большому объему жидкого гелия. Исследуемый образец снабжен потенциальными отводами, расположенными на расстоянии 1 см друг от друга, что позволяло регистрировать резистивное сопротивление каждого участка, а следовательно, распределение температуры вдоль проводника. Образец помещался внутрь сверхпроводника соленоида, который являлся источником внешнего магнитного поля. Единичный участок, на котором регистрировалось падение напряжения, выбирался в той области образца, где распределение температуры было наиболее равномерным. Это позволило максимально приблизить условия опыта к модели Стекли. Эксперимент проводился следующим образом. Ток в цепи экспериментального образца постепенно повышался и по достижении критического тока $I_{кр}$ в образце появлялась резистивная зона, быстро распространяющаяся вдоль всего образца. Условие изотермичности образца устанавливалось по равенству падений напряжения на единичных участках. Затем постепенно увеличивая ток в цепи образца, получали на двухкоординатнике вольт-амперную характеристику исследуемого проводника.

На рис. 1 представлены вольт-амперные характеристики (сплошные линии) семижильного комбинированного проводника, снятые при различных значениях внешнего магнитного поля в условиях пузырькового режима кипения. Проводник внешним диаметром 0,3 мм представляет собой медную матрицу с семью NbTi жилами диаметром $\sim (0,07-0,10)$ мм. Верхние точки линий $H = \text{const}$ на вольт-амперной диаграмме соответствуют моменту наступления кризиса кипения. Дальнейшее повышение тока в образце приводило к неконтролируемому переходу комбинированного проводника в нормальное состояние (на рис. 1 не показано), когда весь ток течет по подложке, т. е. состояниям $T \geq T_c$.

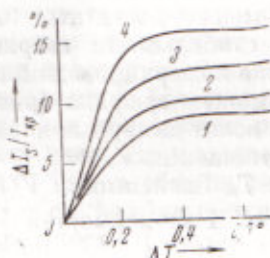


Рис. 3

Рис. 3. Зависимость $(I_s - I_{кр}) / I_{кр}$ от T при различных H : 1 — 20 кэ; 2 — 30; 3 — 40; 4 — 50 кэ

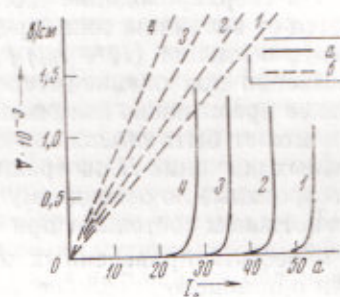


Рис. 4

Рис. 4. Вольт-амперные характеристики сверхпроводника в резистивном состоянии при $T = T_n$ (а) и подложки (б) при различных H : 1 — 20 кэ; 2 — 30; 3 — 40; 4 — 50 кэ

Поскольку сопротивление сверхпроводника в нормальном состоянии на несколько порядков выше сопротивления меди и температурная зависимость меди при температурах ниже 10°K слабая, можно считать, что сопротивление медной матрицы

$$R_n = \rho / A \simeq (dV/dI)_{T=T_c} \quad (6)$$

Отсюда понятно, что доля тока, текущая по медной матрице, составит

$$I_n = fI = V / R_n \quad (7)$$

С учетом уравнения (7) легко можно найти ток, текущий непосредственно по сверхпроводнику, находящемуся в резистивном состоянии:

$$I_s = (1 - f)I = I - I_n = I - V / R_n \quad (8)$$

На рис. 1 зависимости $V(I_s)$, соответствующие экспериментально полученным вольт-амперным характеристикам комбинированного проводника, показаны пунктирными линиями.

С другой стороны, тепловой поток, отводимый с единицы поверхности комбинированного проводника в жидкий гелий,

$$q = VI / (Pl) = h(T) [T_n - T_s], \quad (9)$$

где $P = \pi d$ — охлаждаемый периметр проводника, $l = 1$ см — длина исследуемого участка, T_n — температура проводника. Отсюда, используя ту или иную экспериментальную зависимость теплоотдачи в жидкий гелий, каждой точке вольт-амперной характеристики может быть приписана соответствующая температура проводника. Поскольку сверхпроводящие жилы тонки ($d_{жилы} \simeq (7-10) \cdot 10^{-3}$ см) и связь их с медной матрицей является достаточно хорошей, полагаем, что $T_n = T_s$. На рис. 2 представлены зависимости $I_s = f(T_s)$ для различных значений магнитного поля, построенные с использованием кривой теплоотдачи $q(\Delta T)$, характерной для условий

охлаждения данного опыта (⁷). Соответствующие температурные зависимости критического тока $I_{кр}(H, T)$ исследуемого образца были получены в дополнительных опытах и также показаны на рис. 2. Температура образца выше температуры гелиевой ванны T_0 обеспечивалась путем использования метода «перевернутого дюара» и регистрировалась с помощью термометров сопротивления. Отсюда легко получены значения отношения $(I_s - I_{кр}) / I_{кр}$ для различных значений внешнего магнитного поля (рис. 3).

Напомним, что в модели З. Стекли величина тока, текущего по сверхпроводнику, принимается равной критическому току сверхпроводника при данной температуре. Таким образом, отношение $(I_s - I_{кр}) / I_{кр}$ показывает, насколько ток в сверхпроводнике для данного комбинированного проводника отличается от величины тока, предсказываемого моделью Стекли. Как видно из рис. 3, величина $(I_s - I_{кр}) / I_{кр}$ может достигать 10–15%, что весьма существенно при оценке степени стабильности сверхпроводящих устройств. Такое превышение величины тока в сверхпроводнике над критическим полем может быть объяснено с помощью графика (рис. 4), на котором для разных значений H изображены вольт-амперные характеристики подложки, построенные по очевидному соотношению $V_n = IR_n$, и сверхпроводника в резистивном состоянии при $T = T_n$. Зависимости $V(I_s)_{\tau=\tau_n}$ найдены путем пересчета приведенных на рис. 1 зависимостей $V(I_s)$; пересчет выполнен с помощью предложенного в работе (⁸) соотношения

$$I_s(H, V, T) = I_s(H, V, T_n) [1 - \tau / \tau_n]. \quad (10)$$

Из рис. 4 видно, что на начальных участках изотерм $V(I_s)$ сопротивление сверхпроводника в резистивном состоянии $R_{рез}$ существенно меньше сопротивления подложки R_n . Следовательно, в этой области состояний сверхпроводника параметр $x = R_n / R_{рез}$ в уравнениях (3) – (5) оказывается соизмеримым с остальными величинами, входящими в уравнение. Это обстоятельство и приводит, в частности, к существенному отличию I_s от значения из модели Стекли, а следовательно, и к изменению остальных характерных параметров ($f, VA / (\rho I_c, \tau)$), описывающих состояние комбинированного проводника в условиях деления тока между сверхпроводником и подложкой.

В заключение авторы благодарят В. Б. Зенкевича, Н. А. Кулысова и В. В. Кургузова за плодотворные обсуждения полученных результатов и помощь в работе.

Институт высоких температур
Академии наук СССР
Москва

Поступило
16 XI 1970

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Z. J. J. Stekly, I. L. Zar, Trans. IEEE, NS-12, 367 (1965). ² A. R. Kantrowitz, Z. J. J. Stekly, Appl. Phys. Letters, 6, 56 (1965). ³ M. G. Kremlev, V. B. Zenkevitch, V. A. Altov, Cryogenics, 8, № 3, 173 (1968). ⁴ В. В. Сычев, В. Б. Зенкевич и др., ДАН, 188, № 1 (1969). ⁵ Y. B. Kim, Proc. of the X Intern. Conf. on Low Temperature Phys., Moscow, 1966. ⁶ В. В. Сычев, В. А. Альтов, Изв. АН СССР, Энергетика и транспорт, № 5, 84 (1970). ⁷ M. N. Wilson, Adv. Cryog. Eng., 12 (1966). ⁸ W. F. Gauster, J. Appl. Phys., 40, 2060 (1969).