

05

© 1991 г.

ОСОБЕННОСТИ РЕЗИСТИВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СТАБИЛИЗИРОВАННОГО СВЕРХПРОВОДНИКА

А. И. Копчиков

При рассмотрении вопросов, связанных с распределением тока в криостатически стабилизированном одножильном жестком сверхпроводнике, выведено и решено уравнение для случая, когда сверхпроводник при заметном электрическом поле имеет линейную вольт-амперную характеристику с отрицательной производной. Получено, что в продольном распределении напряжения на композите помимо линейного члена существует слагаемое, синусоидально зависящее от длины рабочего участка. При проведении экспериментальной проверки указанных соотношений выяснено, что необходима высокая точность определения длин рабочих участков, а также высокая однородность свойств подложки и сверхпроводника по длине ($\delta \lesssim 0.1\%$). Эксперимент показал, что на нескольких рабочих участках сопротивление стабилизирующей подложки в магнитном поле $\mu_0 H_c = 9.00$ Тл отличается на $\sim 0.5\%$. При сравнительно высоком электрическом поле на композите на линейном участке вольт-амперной характеристики отклонение распределения напряжения имеет синусоидальный характер при условии численной корректировки сопротивления подложки до однородного.

Вопросы, связанные с электродинамикой криостатически стабилизированных композитов, интересны с точки зрения возможности исследования материалов с высоким транспортным током при условии жесткой стабилизации температуры. Один из первых таких экспериментов сразу поставил вопросы, возникающие при попытке определить вольт-амперные характеристики (ВАХ) самих сверхпроводников второго рода (СПИ) при условии их стационарной стабилизации [1]. Восстановленная по закону параллельных электрических соединений СПИ в резистивном состоянии и стабилизирующей подложки ВАХ СПИ имела начальный экспоненциальный участок, который с ростом тока в СПИ I_c переходил в участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением. В другой ранней работе при исследовании ВАХ иных СПИ с применением того же закона была обнаружена аналогичная закономерность [2]. Наши предварительные измерения показали, что в случае криостатического стабилизирования одножильного СПИ восстановленная формальным применением закона параллельных электрических соединений ВАХ СПИ имеет начальную экспоненциальность и при большем электрическом поле существует участок с отрицательной производной и особенностью по току [3].

Для последовательного решения возникающей задачи из первых принципов было выведено уравнение распределения тока в одножильном криостатическом композите с учетом поперечного сопротивления. В той же работе было получено решение соответствующей системы уравнений для случая линейной ВАХ СПИ [4]. Затем распределение тока по длине П-образного композита было найдено при условии, что ВАХ СПИ имела кусочно-линейный вид с положительным дифференциальным сопротивлением каждого участка [5]. И, наконец, для СПИ, имеющего кусочно-линейную ВАХ с отрицательным дифференциальным сопротивлением верхнего участка (рис. 1), была решена система аналогичных уравнений [3]. Отметим, что ВАХ композита при этом соответствует реально наблюдаемой, лишь нелинейная начальная часть ВАХ приближена линейным участком. В наших вариантах расчета удобно то, что для линейных участков ВАХ СПИ, закладываемых в систему уравнений, можно получить аналитические решения, которые легко позволяют провести дальнейший анализ.

Для случая кусочно-линейной ВАХ СПИ $E_S(I_S)$ на центральном участке П-образного композита, показанной на рис. 1, распределение тока в СПИ $I_S(x)$ на участке ν ВАХ при условии $\hat{\rho}_f > \bar{\rho}_{\text{ср}}$ имеет вид

$$\left(\frac{I_S}{I_0}\right) = \frac{\cos(x/\eta_S)}{\cos(l/2\eta_S)} \left\{ \frac{1 - \frac{\hat{\rho}_f I_\infty + E_\infty - \bar{\rho}_{\text{ср}} I_0}{I_0(\hat{\rho}_f - \bar{\rho}_{\text{ср}})}}{1 - \frac{x_S \sin(l/2\eta_S)}{\eta_S \cos(l/2\eta_S)}} \right\} + \frac{\hat{\rho}_f I_\infty + E_\infty - \bar{\rho}_{\text{ср}} I_0}{I_0(\hat{\rho}_f - \bar{\rho}_{\text{ср}})}, \quad (1)$$

при этом учтены неограниченно длинные боковые участки. Здесь I_0 — полный ток в композите, $\hat{\rho}_f$ — абсолютное значение отрицательного дифференциаль-

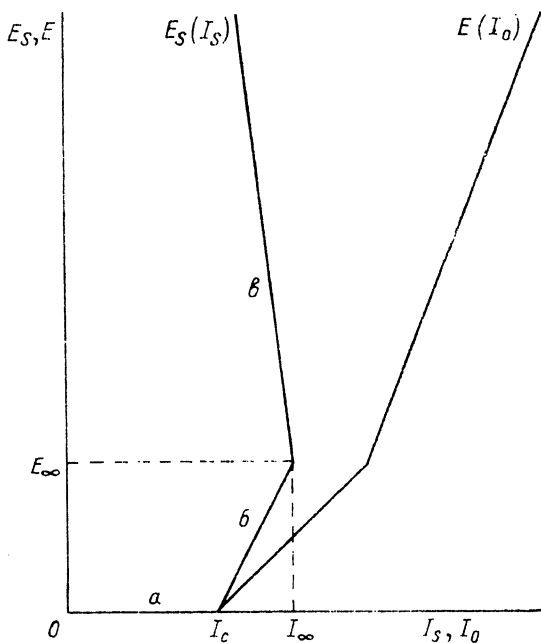


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика сверхпроводника $E_S(I_S)$, использованная при аналитическом расчете, и вольт-амперная характеристика криостатического композита $E(I_0)$.

ного сопротивления на единицу длины СПИ; $\bar{\rho}_{\text{ср}}$ — сопротивление стабилизирующей подложки на единицу длины; S — поперечное сопротивление на единицу длины; l — длина центрального участка; $2x_1$ — длина рабочего участка в середине центрального участка; E_∞ и I_∞ — электрическое поле и ток, соответствующие границе участков δ и ν ВАХ СПИ. В формуле (1) $x_S^2 = (S/\hat{\rho}_f - \bar{\rho}_{\text{ср}})$ и $\eta_S^2 = (S/\hat{\rho}_f - \bar{\rho}_{\text{ср}})$. Второе слагаемое в правой части выражения (1) соответствует распределению тока по закону параллельного электрического соединения СПИ и подложки. Разность потенциалов на рабочем участке композита, снимаемая со стабилизирующей подложки, равна

$$V|_{-x_1}^{x_1} = \frac{\bar{\rho}_{\text{ср}} [\hat{\rho}_f (I_0 - I_\infty) - E_\infty]}{(\hat{\rho}_f - \bar{\rho}_{\text{ср}})} \left\{ 2x_1 - \frac{2\eta_S \cdot \sin(x_1/\eta_S)}{\cos(l/2\eta_S) - \frac{x_S}{\eta_S} \sin(l/2\eta_S)} \right\}. \quad (2)$$

Отметим, что на линейной ВАХ композита $V(I_0)$ наряду с линейной зависимостью от длины рабочего участка ($2x_1$), соответствующей закону параллельного соединения и макроскопической однородности свойств СПИ и подложки по длине, существует осциллирующая зависимость от длины рабочего участка. Видно, что здесь в общем случае закон параллельных электрических соединений СПИ в резистивном состоянии и подложки может не выполняться.

Экспериментальная проверка полученных аналитических соотношений может быть осуществлена при помощи одновременного измерения ВАХ криостатически стабилизированного одножильного композита П-образной формы, когда на его среднем участке (при измерении, расположенном в перпендикулярном внешнем магнитном поле H_e) создано несколько симметричных рабочих участков, вложенных один в другой. Модернизируя созданную ранее установку [6, 7], мы реализовали четыре независимых нановольтовых измерительных канала (на приборах типа НФК-3, Ф118 и Р341) с цифровой регистрацией измеряемых величин. После настройки и измерения времени успокоения были определены погрешности каналов. На пределе 10 мкВ нановольтамперметра НФК-3 (первый канал) основная погрешность составила $\pm 0.02\%$, на пределе 50 мкВ прибора Р341 (четвертый канал) основная погрешность оказалась равной $\pm 0.02\%$. Были приняты меры для обеспечения неискаженной передачи напряжений от рабочих участков композита на входы нановольтметров. При отмеченных погрешностях запись неискаженной ВАХ СПИ требует высокой однородности H_e ($\Delta H_e/H_e \approx 0.002\%$), такой же кратковременной стабильности H_e , минимальности перегрева обеспечивается криостатической стабилизацией [8].

Блок магнитного поля установки состоял из универсального испытательного стенда УИС-1, стабилизатора постоянного тока типа НВ-234В и измерительной аппаратуры. Стенд УИС-1 генерирует магнитное поле не более $\mu_0 H_e = 9.00$ Тл, стабильность источника НВ-234В составляет $2 \cdot 10^{-5}$. Измерения проводились при температуре жидкого гелия $T \approx 4.2$ К с погрешностью измерения давления газообразного гелия ~ 0.3 мм рт. ст.

Стабилизирующая подложка, примененная в настоящем эксперименте, имела толщину 1.93 мм, ширину 4.75 мм и была изготовлена из меди. Подложка характеризовалась П-образной формой и полукруглой геометрией на центральном участке, она закреплялась на оправке зонда, погружаемого в стенд УИС-1. Внешняя поверхность подложки облуживалась дозированным количеством химически чистого олова. Для измерения однородности подложки по длине центрального участка был проведен монтаж четырех симметричных потенциальных рабочих участков (зон). Пайка медных потенциальных контактов проводилась так, что с подложкой имели контакт только нижние части облуженных медных проволок диаметром ~ 60 мкм, после пайки излишки олова счищались. Погрешность локализации контактов составляла примерно 20 мкм. Но даже такие размеры контактов и точности определения рабочих участков приводят к погрешностям, которые примерно на порядок выше погрешностей измерительных каналов. Минимальная неоднородность сопротивления подложки при гелиевой температуре имела место при $\mu_0 H_e = 9.00$ Тл и составляла -0.5% на второй зоне и -0.4% на четвертой зоне по отношению к среднему сопротивлению на единицу длины $\bar{\rho}_{ст} = 4.46 \cdot 10^{-7}$ Ом/см на первой и третьей зонах. Затем потенциальные контакты отпаивались и оловом подпаивался к шунту образец.

В качестве образца СПИ был использован одножильный ниобий-титановый провод со средним диаметром 46.6 мкм в медной оболочке. Ниобий-титановый сплав имел 48 вес. % титана, остальное ниобий и менее 0.5 % примесей. Материал подвергался отжигу при температуре 350 °С продолжительностью 1 ч через каждые 70 % деформации. Аналогичные образцы неоднократно исследовались в других экспериментах [6, 7, 9]. Контроль перпендикулярности образца оси зонда (и, следовательно, вектору поля H_e) проводился с помощью шаблона под микроскопом МБС-9. Отклонение образца от плоскости, перпендикулярной оси зонда, составляло не более диаметра СПИ. При запайке образца на третьей зоне произошел резкий его изгиб и после выпрямления осталась плавная изогнутость длиной ~ 2.8 мм, выступающая на диаметр от основного направления провода. Наличие такой остаточной деформации должно привести к небольшому локальному уменьшению силы пиннинга образца. Далее минимальным количеством олова с той же локализацией подпаивались четыре пары потенциальных контактов. Размеры рабочих участков были следующими: первая зона $2x_1 = 8.25$ мм, вторая зона $2x_2 = 16.80$ мм, третья зона $2x_3 = 29.16$ мм и четвертая зона $2x_4 = 41.31$ мм.

Измерение ВАХ композитного СПИ проводилось в жидком гелии при температуре $T \approx 4.2$ К в магнитном поле $\mu_0 H_e = 9.00_1$ Тл. Запитка композита по-

стоянным током осуществлялась от второго стабилизатора типа NB-234В, погрешность определения тока составляла 0.02 %. ВАХ композита показана на рис. 2. После начальной нелинейности ВАХ виден первый линейный участок, который при полном токе $I_0 = 6$ А переходил во второй линейный участок, сохраняющийся до максимального тока, введенного в композит ($I_0 = 21.39$ А). Относительное распределение электрического напряжения на зонах композита на первом линейном участке ВАХ показано на рис. 3, причем по оси ординат отложено отношение $((V_i - V_{hm})/V_{hm})$, где i — номер зоны, а V_{hm} — однородное распределение электрического поля по длине композита, взятое по значению напряжения на какой-либо зоне (рис. 3, по первой зоне). Прежде всего следует отметить, что эти экспериментальные данные характеризуются более высокой

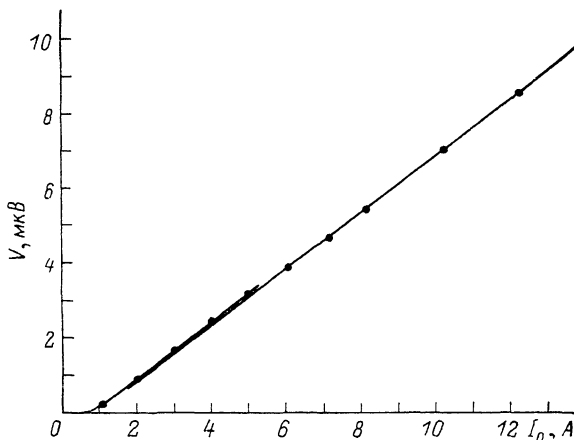


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика композитного сверхпроводника, снятая со второй зоны, во внешнем магнитном поле $\mu_0 H_e = 9.00_1$ Тл при температуре жидкого гелия.

погрешностью в силу малости напряжений на входах нановольтметров (например, для тока $I_0 = 3.011$ А на второй зоне $\Delta \sim 0.14$ %). Видно, что с ростом тока I_0 относительная неоднородность поврежденного участка СПИ на третьей зоне снижается, при токе $I_0 \geq 4$ А она будет пренебрежимой (~ 0.1 %). Что касается второй и четвертой зон, то эти отклонения соответствуют неоднородности стабилизирующей подложки, отмеченной ранее. Учитывая, что при этих и более высоких токах I_0 большая часть тока течет через подложку (критический ток СПИ $I_c(9.0 \text{ Тл}) = 0.7$ А), длины перераспределения тока сравнительно велики, а неоднородность сопротивления подложки по длине не слишком велика (~ 0.5 %), можно попытаться численно промоделировать однородный по длине композит, при больших токах I_0 , подняв напряжение на второй и четвертой зонах соответственно на 0.53 и 0.48 %. Смоделированный таким образом композитный СПИ с однородным (~ 0.1 %) электрическим полем по длине соответствует высокой степени однородности критического тока I_c композита по его формальному определению [10]. Имея возможность экспериментально и затем численно получить значения распределения электрического поля на композите с однородным по длине значением критического тока и сопротивления подложки, можно проверить соответствие эксперимента представленному ранее расчету. Было отмечено, что при построении рис. 3 использовалось отношение $[(V(x_i) - V_{hm}(x_i))/V_{hm}(x_i)]$, из сравнения его с формулой (2) видно, что

$$V_{hm}(x_i) = \frac{\bar{\rho}_{ст} [\beta_f (I_0 - I_\infty) - E_\infty]}{(\beta_f - \bar{\rho}_{ст})} 2x_i.$$

Отсюда функциональная зависимость отношения $((V_i - V_{hm})/V_{hm})$ от длины рабочего участка по выражению (2) соответствует

$$\left(\frac{V_i - V_{hm}}{V_{hm}} \right) \sim \frac{\sin(x_i/\eta_S)}{x_i}.$$

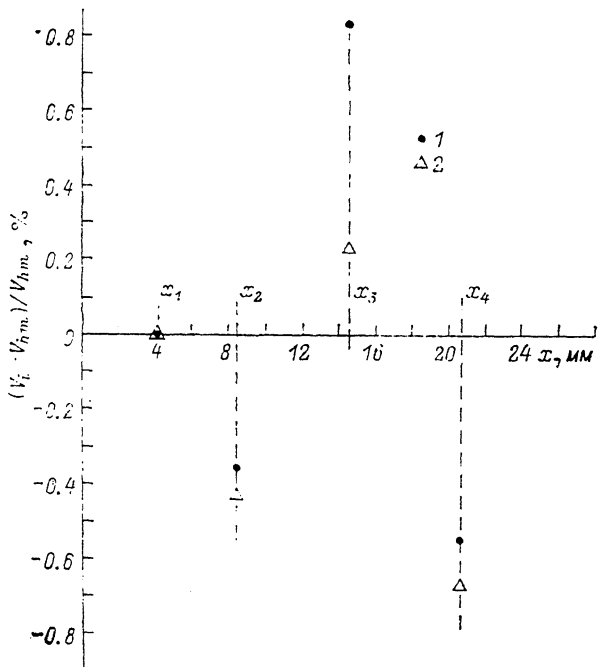


Рис. 3. Экспериментальные данные отклонения электрического напряжения на зонах $((V_i - V_{hm}) / V_{hm}; i=2, 3, 4)$ от однородного распределения напряжения ($i=1$) по длине композита на первом линейном участке ВАХ при токах $I_0=1.999$ (1) и 3.011 А (2).

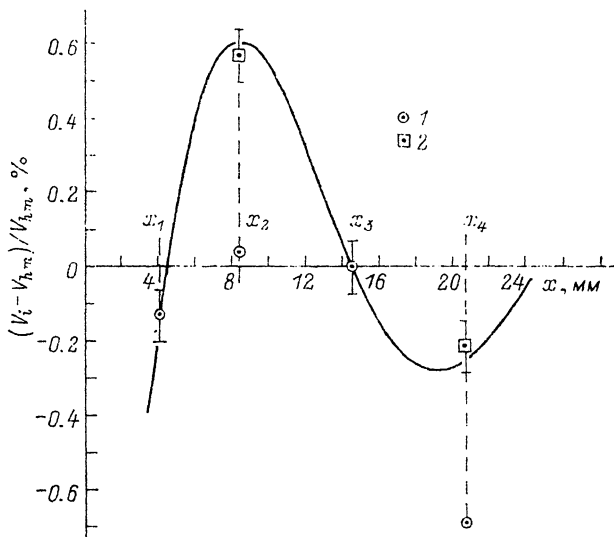


Рис. 4. Отклонения электрического напряжения на зонах ($i=1, 2, 4$) от однородного распределения ($i=3$) по длине композита на втором линейном участке ВАХ (1) и на зонах с учетом неоднородности сопротивления подложки (2).

Аппроксимирующая кривая распределения напряжения для однородного композита во внешнем магнитном поле $\mu_0 H_0 = 9,00_1$ Тл при температуре жидкого гелия; $I_0 = 8.136$ А.

Показанное на рис. 3 распределение напряжения по зонам искажается при полном токе $I_0 = 4.057$ А, изменение распределения продолжается при токах $I_0 = 5.068$ и 6.071 А. Из ВАХ композита (рис. 2) видно, что полный ток $I_0 = 5-6$ А соответствует переходу ВАХ от первого линейного участка ко второму. Распределение напряжения по зонам при токах $I_0 = 7.127$ и 8.136 А с учетом введения поправок на неоднородность сопротивления подложки соответствует зависимости $(\sin(x + x_0/\gamma_s))/x$, что показано на рис. 4. Аппроксимирующая кривая имеет функциональную зависимость

$$\left(\frac{V - V_{hm}}{V_{hm}}\right) = -0.0549 \frac{\sin(x + 5.4/3.183)}{x},$$

где координата x имеет размерность мм.

Зная значение исследованного в других экспериментах поперечного сопротивления S аналогичных композитов, можно определить абсолютное значение $\hat{\rho}_f$ отрицательного дифференциального сопротивления СПИ на единицу длины, исходя из $S = 1 \cdot 10^{-7}$ Ом·см [7]. Полученное значение $\hat{\rho}_f$ оказалось равным $\hat{\rho}_f = 1.43 \cdot 10^{-6}$ Ом/см, что в 3.21 раза выше сопротивления стабилизирующей подложки на единицу длины $\hat{\rho}_{ct}$ в соответствующем магнитном поле.

Выводы

1. При проведении прецизионного эксперимента для проверки полученных соотношений по распределению постоянного тока в криостатически стабилизированных одножильных композитах помимо создания нескольких нановольтовых цифровых измерительных каналов выяснена необходимость точного определения длин рабочих участков и высокой однородности по длине сопротивления стабилизирующей подложки и свойств самого сверхпроводника.

2. Результаты экспериментального исследования и численного моделирования могут быть объяснены существованием в резистивном состоянии криостатически стабилизированного одножильного жесткого сверхпроводника протяженного участка с отрицательным линейным дифференциальным сопротивлением.

Автор выражает глубокую благодарность И. Я. Краснополнцу за многочисленные обсуждения.

Список литературы

- [1] Matsunaga S., Yano S., Ushio S. et al. Preprints. International Cryogenic Engineering Conf. Tokyo (Kyoto), 1967. P. III-12a6-1—III-12a6-4.
- [2] Алексеевский Н. Е., Гласник И., Дубровин А. В. // ЖЭТФ. 1968. Т. 54. Вып. 1. С. 84—88.
- [3] Колчинов А. Н. // Тез. конф. «Металлофизика сверхпроводников». Киев, 1986. Ч. III. С. 353—354.
- [4] Альтов В. А., Колчинов А. Н. // Изв. АН СССР. Энергия и транспорт. 1983. № 4. С. 30—36.
- [5] Колчинов А. Н. // Тез. докл. Всесоюз. совещания «Научно-технические и технологические вопросы создания сверхпроводникового электроэнергетического оборудования». М., 1984. Т. 3. С. 192—193.
- [6] Колчинов А. Н. // Сверхпроводимость в технике. Тр. II Всесоюз. конф. по техническому использованию сверхпроводимости. Т. II. М.; Л., 1984. С. 64—67.
- [7] Колчинов А. Н. // Сб. «Физико-технические и метрологические вопросы сверхпроводимости». М., 1984. С. 84—99.
- [8] Альтов В. А., Кульсов Н. А., Колчинов А. Н. ГСИ. Методические указания ВНИИМС МИ. № 1836-88. М., 1987.
- [9] Колчинов А. Н. // Тез. конф. «Металлофизика сверхпроводников». Киев, 1986. Ч. II. С. 207—208.
- [10] Ekin J. W. // Appl. Phys. Lett. 1989. Vol. 55. N 9. P. 905—907.

Временный научно-технический
коллектив «Стабилизация»
Москва

Поступило в Редакцию
7 февраля 1991 г.