

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

P13-93-471

С.А. Корнев, В.В. Сиколенко

ИМПУЛЬСНЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ
КРИТИЧЕСКОГО ТОКА
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВ

1993

Введение

Критическая плотность тока является одной из важнейших характеристик сверхпроводников, определяющих возможности их практического использования. В настоящее время создается много приборов, содержащих в себе сверхпроводящие элементы, зачастую больших размеров и сложной формы, и измерение их критической плотности тока j_c и ее температурной зависимости сопряжено с определенными экспериментальными трудностями. В данной работе предложена импульсная схема измерения критических токов высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) и их вольт-амперных характеристик в диапазоне температур 77-300 К.

1. Анализ методов измерения критических токов

Выяснение связи j_c от структурных параметров ВТСП-образцов требует применения надежного метода измерения величины j_c , пригодного, в частности, при достаточно высоких ее значениях $\sim 10^4 \text{ А см}^{-2}$.

Распространенный прямой метод измерения транспортного критического тока j_c состоит в наблюдении малой разности потенциалов ($\sim 10^{-6} \text{ В}$), возникающей между измерительными электродами 4-точечной схемы при увеличении плотности тока через образец до значений, превышающих критическое значение. Одной из основных проблем такого метода является нагрев токоподводящих контактов при прохождении электрического тока. Последующая передача тепла от контактов к образцу увеличивает температуру его решетки и затрудняет измерение j_c при нужной температуре, а также самой температуры образца. Единственный путь уменьшения контактного перегрева для измерений в стационарном режиме - уменьшение контактного сопротивления. В настоящее время достигнуто очень низкое значение контактного сопротивления $r=10^{-10} \text{ Ом см}^2$ /1/, но это сопряжено с существенными технологическими трудностями. Другой распространенный метод определения j_c по измерению магнитного момента M и по ширине петли гистерезиса /2/, хотя и не требует устройства низкоомных контактов, но для его применения необходимо привлечение модельных представлений /3,4/, реализующихся объектом исследования.

Общедоступная версия
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

Существует прямой бесконтактный метод определения I_c , основанный на достаточно медленном индуцировании тока в образце и измерении временных зависимостей нарастания тока и скорости его изменения, но он требует изготовления специальных образцов кольцеобразной формы и небольших размеров /6/. Из этого сравнительного анализа существующих методов измерения критических токов видно, что есть определенные трудности измерения критических токов, которые не позволяют осуществить их измерение в широком диапазоне.

Для разрешения ряда проблем измерения критических токов целесообразнее перейти к импульсной методике. Как показано в работе /8/, импульсная токовая запитка сверхпроводящего образца позволяет получить уменьшение тепловых нагрузок на контакты. В этом случае контактные тепловые эффекты становятся неощутимыми, и появляется возможность ввода больших токов для измерения I_c . Однако основная методическая проблема при этом - это измерение тока. Прямые измерения токов крайне затруднены, т.к. сопротивление подводящих проводов становится больше, чем сопротивление образца.

Кроме того, еще одной существенной проблемой импульсных методик является точность измерения порогового напряжения, по которому определяется I_c . В традиционных импульсных генераторах /7/ при разряде искусственных линий (LC-контуров) на согласованную нагрузку и последовательно соединенный низкоомный образец скорость нарастания импульса тока ограничивается собственными индуктивностью и отношением L/R , в результате чего на образце ВТСП возникает импульс тока колоколообразной, а не прямоугольной формы. Это снижает точность определения того момента, когда падение напряжения на образце становится отличным от нуля. При малых значениях текущего тока падение напряжения на образце отсутствует, начиная с некоторого момента времени t , когда величина электрического тока через образец достигает критического значения, появляется падение напряжения на образце, которое связано со значением этого критического тока. Если длительность фронта t_f и спада импульса будет много меньше длительности самого импульса, что достигается бесконтактным методом измерения тока, то точность фиксации сверхпроводящего перехода существенно увеличится и будет определяться лишь точностью измерения порогового напряжения регистрирующей аппаратурой. Скорость

Институт физики
 2
 АИТОН

нарастания импульса ограничивается собственной индуктивностью подводящих проводов. Для получения больших токов при малых напряжениях необходимо использовать низкоимпедансный генератор импульсного напряжения.

Проведя краткий анализ методов измерения критических токов можно сделать вывод, что в этой области существуют две задачи:

- 1) ввод тока в образец;
- 2) измерение протекающего через образец тока.

Для решения первой задачи целесообразнее использовать импульсный ввод тока через низкоомные контакты, а для решения второй задачи необходимо использовать бесконтактные методы измерения тока и, следовательно, использовать импульсную запитку образцов.

Оценим тепловые при импульсном методе измерения критического тока. Это можно сделать исходя из следующих соображений: можно пренебречь нагревом, если $t_{имп} \ll t_p$; где t_p - тепловая постоянная измеряемого образца, $t_{имп}$ - длительность импульса тока. Для ВТСП $t_p \sim 10^{-5}$ с, следовательно, при длительности импульса $t_{имп} \sim 1$ мкс нагрев образца пренебрежимо мал. Для примера найдем повышение температуры образца керамики с теплоемкостью $0.4 \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1} \cdot \text{г}^{-1}$, плотностью $5.1 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$, массой 10 г , находящегося в резистивном состоянии с $R = 4 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$ при плотности тока $10 \text{ кА} \cdot \text{см}^{-2}$ за 1 мкс . Без учета теплоотвода оно составляет всего $2 \cdot 10^{-3} \text{ К}$, что наглядно демонстрирует, что в данном методе проблемы нагрева образца не существует.

2. Импульсный метод измерения критического тока

На рис.1 показана блок-схема импульсного метода измерения критического тока. Было разработано 2 генератора импульсных напряжений. Их схемы приведены на рис.2 и 3 соответственно. Параметры импульсных генераторов приведены в таблице 1.

Таблица 1

N генератора	U _{вых} , В	I нагрузки, А	длит. имп., мкс
1	0.1 - 1.0	20 - 200	10.0
2	1 - 5	200 - 1000	1.0

Для измерения тока в разрядной цепи использовался RL-интегрирующий пояс Роговского. В принципе, при пороге напряжения 10^{-4} В данная методика позволяет измерять изменение сопротивления до 10^{-7} Ом .

Для измерения температуры образца использовались

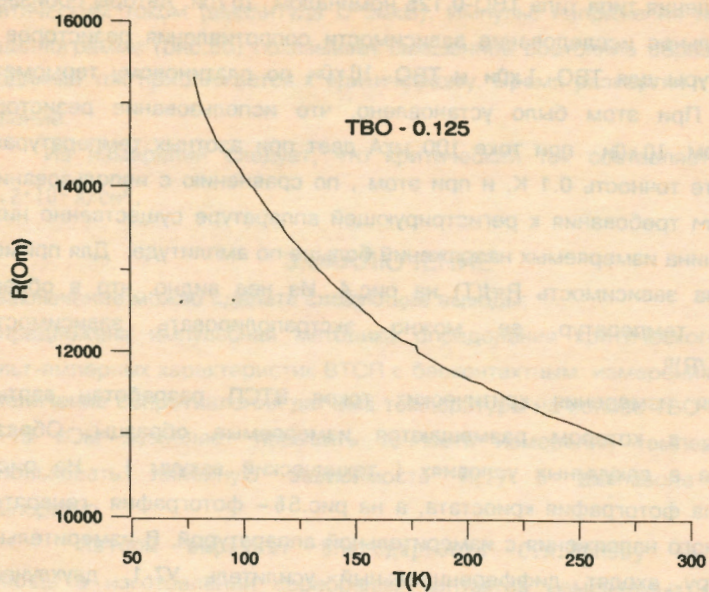


Рис. 4



а



б

Рис.5

сопротивления типа типа ТВО-0.125 номиналом 10 кОм. Авторы произвели сравнительное исследование зависимости сопротивления резисторов от температуры для ТВО 1 кОм и ТВО 10 кОм по платиновому термометру ТСПН-3. При этом было установлено, что использование резисторов номиналом 10 кОм при токе 100 мкА дает при азотных температурах в результате точность 0.1 К, и при этом, по сравнению с использованием ТВО 1 кОм требования к регистрирующей аппаратуре существенно ниже, т.к. величина измеряемых напряжений больше по амплитуде. Для примера приведена зависимость $R=f(T)$ на рис.4. Из нее видно, что в области азотных температур ее можно экстраполировать зависимостью $T=\Sigma k_n(R_0/R)^n$.

Для измерения критических токов ВТСП разработан азотный криостат, в котором размещаются измеряемые образцы. Образцы находятся в вакуумных условиях (технический вакуум). На рис.5а приведена фотография криостата, а на рис.5б – фотография генератора импульсного напряжения с измерительной аппаратурой. В измерительную аппаратуру входят дифференциальный усилитель У7-1, двухлучевой осциллограф С8-17 (в настоящее время используется цифровой осциллограф С9-8).

Для примера на рис. 6а, б приведены осциллограммы, измеренные на $Y_{0.95}Ho_{0.05}Ba_2Cu_3O_7$ -образцах. Верхний импульс (рис. 6а, б) - импульс тока с токового трансформатора (пояс Роговского). На рис 6а на нижней линии приведены формы сигналов: 1 - импульс напряжения с образца при $T=300$ К; 2 - импульс напряжения с образца при $T=80$ К (сверхпроводящее состояние); 3 - импульс напряжения при срыве сверхпроводимости

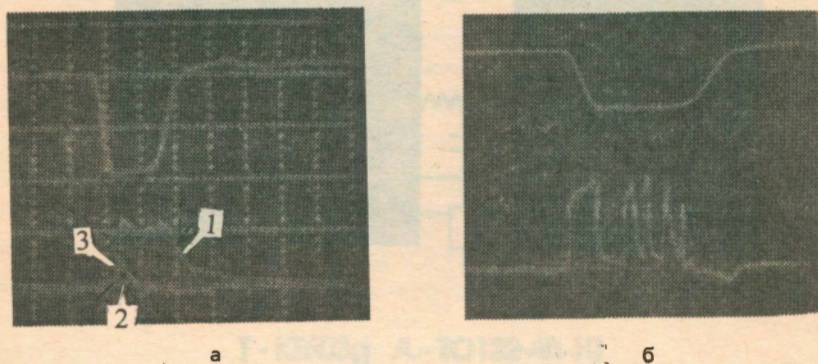


Рис.6

критическим током (амплитуда $U=5\text{мкВ}$). Импульс напряжения на нижней осциллограмме (рис.6б) показывает смешанное состояние образца, когда вводимый ток приближается к критическому. Время развертки $\tau = 5 \mu\text{с} / \text{деление}$.

Из измерений следует, что критический ток составляет $\sim 1.2 \cdot 10^3 \text{ А/см}^2$.

3.ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение можно сделать следующие выводы:

- предложена импульсная методика определения критического тока и вольт-амперных характеристик ВТСП с бесконтактным измерением тока.
- увеличение сопротивления датчика температуры на основе ТВО-0,125 до 10-15 кОм позволяет повысить точность измерения температуры и использовать линейную зависимость $R(T)$ в диапазоне азотных температур.

Авторы выражают благодарность С.А.Попову за помощь в изготовлении серебряных контактов измеряемых образцов, Н.В.Пиляру и Д.Л.Боровкову за помощь в работе, А.М. Балагурову и Н.И.Балалыкину за полезные дискуссии.

Работа выполнена в рамках Госпрограммы по ВТСП, проект N 91035 "Электрон".

Литература

1. Ekin J.W., Larson T.M., Bergen N.F. Appl.Phys.Lett., 1988 v.52, p.1819
2. Жуков А.А., Мошталков В.В. Сверхпроводимость: физика, химия, техника 1991, т.4, N5, стр.850.
3. Veep C.P. Rev.Mod.Phys., 1964, v.1, p.31.
4. Veep C.P. Ph.Rev.Let., 1988, v52, p.1800.
5. Кемпбелл А., Иветс Дж. "Критические токи в сверхпроводниках", М., "Мир", 1975.
6. Залеский В.Ю. Сверхпроводимость: физика, химия, техника, 1989, т.2, N3, стр.71.
7. Дмитриев В.М. и др., ФТТ, 1989, т.47, стр.1088.
8. Роуз-Инс А., Родерик Е. Введение в физику сверхпроводимости, Москва, Мир, 1972.

Рукопись поступила в издательский отдел
30 декабря 1993 года.

Корнев С.А., Сиколенко В.В.
Импульсный метод измерения критического тока
высокотемпературных сверхпроводников

P13-93-471

Предлагается импульсный метод измерения критического тока высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП), основанный на прямом пропускании импульса тока через образец ВТСП и бесконтактном его измерении. Этот метод позволяет при измерении без нагрева образца увеличить величину пропускаемого тока до 10^3 А. Рассматриваются два варианта измерительных схем и приводятся результаты измерений критических токов ВТСП-керамик на основе $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$.

Работа выполнена в Лаборатории сверхвысоких энергий и Лаборатории нейтронной физики им. И.М.Франка ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 1993

Перевод авторов

Korenev S.A., Sikolenko V.V.
Pulse Method of Measuring Critical Current
of High-Temperature Superconductors

P13-93-471

The new pulse method of high-temperature superconductor (HTSC) critical current measurement founded on direct passing of current pulse through HTSC specimen and on its noncontact measurement has been described. This method allows one to increase current up to 10^3 A without any sample heating. Two variants of measuring schemes are considered and the results of $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ critical current measuring are described.

The investigation has been performed at the Laboratory of Particle Physics and Frank Laboratory of Neutron Physics, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 1993