

УДК 538.945

ИЗМЕРИТЕЛЬ КРИТИЧЕСКОГО ТОКА В СВЕРХПРОВОДНИКАХ

А.Г.Лихачев, С.В.Учайкин

Описан измеритель критического тока в сверхпроводниках. Измерения проводятся бесконтактным трансформаторным способом. Измеритель выполнен в виде блока стандарта КАМАК и управляется персональным компьютером IBM PC/AT. Приведена методика исследований ампер-вольтных характеристик и критического тока.

Работа выполнена в Лаборатории сверхвысоких энергий ОИЯИ.

Critical Current Meter for Superconductors

A.G.Likhachev, S.V.Uchaikin

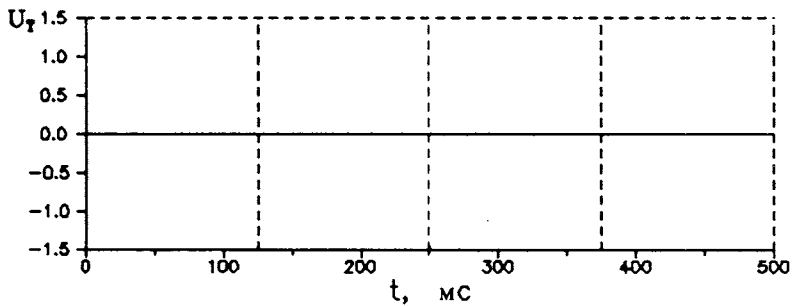
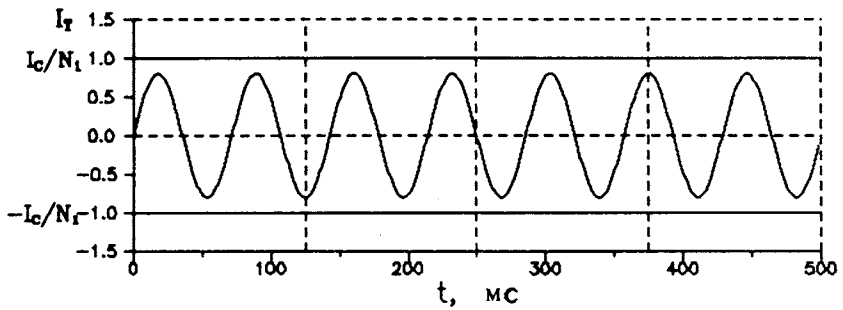
A gauge of critical currents of superconductors is presented. The contactless transformer method is used for measurements. The gauge is made as a CAMAC cell controlled by the personal computer IBM PC/AT. An experimental technique of investigations of the current-voltage curves and critical currents is described.

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

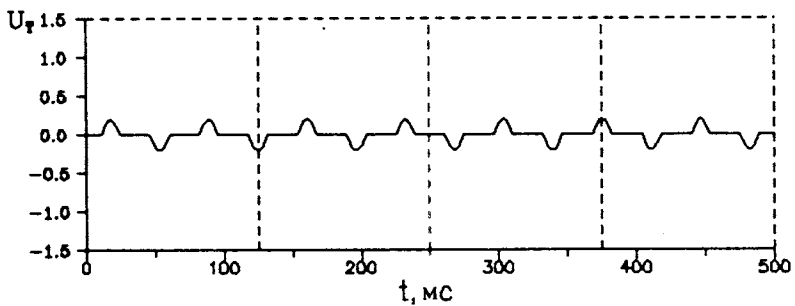
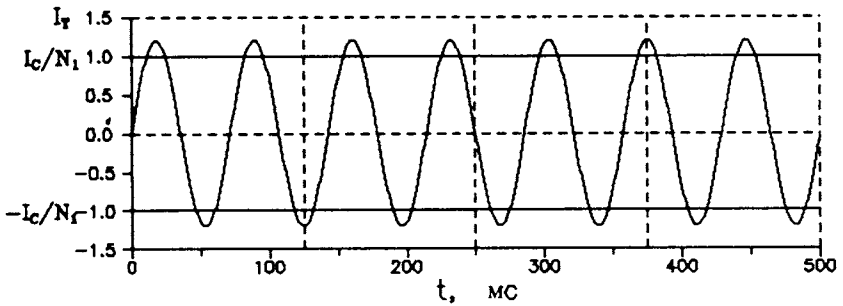
Введение

Критический ток служит основной характеристикой транспортных свойств сверхпроводника. Обычно его определяют по ампер-вольтной характеристике (АВХ) как ток, при котором падение напряжения на образце превышает некоторую заданную величину. Это пороговое напряжение зависит от чувствительности конкретной установки, но стандартной считается величина, при которой напряженность электрического поля в образце $E = 1$ мкВ/см [1, с.852]. В большинстве случаев измерения проводятся четырехконтактным методом на постоянном или импульсном тестирующем токе I_T , величина которого достигает значения десятков ампер. Возникающий при такой величине тока разогрев контактов и тоководов, различные термоэффекты создают существенные ограничения на чувствительность измерений. Для исключения влияния мешающих факторов некоторые авторы [2, с.798] рекомендуют устанавливать порог чувствительности при четырехконтактных измерениях критического тока не ниже 2 мВ/м.

Трансформаторный метод измерения критических токов [3] лишен недостатков контактных методов. В этих измерениях кольцевой образец помещается между двумя катушками измерительного трансформатора (ИТ). Замкнутый сердечник ИТ изготавливается из материала с высокой магнитной проницаемостью. Пока образец находится



а)



б)

Рис.1. Диаграммы напряжений на измерительном трансформаторе. а) $I_T^A < I_C/N_1$, б) $I_T^A > I_C/N_1$

в сверхпроводящем состоянии, магнитный поток внутри него, сосредоточенный в основном в сердечнике, остается неизменным, и переменный ток, текущий в катушке возбуждения, не наводит напряжения на выводах измерительной обмотки. Если амплитуда тока, наводимого в образце:

$$I_S \approx N_1 \cdot I_T^A, \text{ А}, \quad (1)$$

где N_1 — число витков в обмотке возбуждения, I_T^A — амплитуда тестирующего тока А, превышает критический ток, то в измерительной катушке наводится напряжение амплитудой U_2 , как это видно на рис.1. Это напряжение связано с падением напряжения на образце U_s приблизительным соотношением, не учитывающим поле рассеяния трансформатора:

$$U_s \approx U_2 / N_2, \text{ В}, \quad (2)$$

где N_2 — число витков вторичной катушки.

При использовании трансформаторного метода можно достигнуть очень низкого порога чувствительности по напряженности электрического поля в образце, то есть можно намного точнее, по сравнению с контактными методами, измерять критический ток и исследовать ампер-вольтные характеристики сверхпроводников. При этом нет необходимости в нанесении контактов и подведении в холодный объем мощных тоководов.

Блок-схема

и электрическая принципиальная схема установки

Для измерений ампер-вольтных характеристик и критического тока трансформаторным способом была создана установка, блок-схема и упрощенная электрическая принципиальная схема которой изображены на рис.2 и 3. Опорное синусоидальное напряжение частотой 500 Гц создается генератором опорного напряжения ГОН, выполненным на операционном усилителе (ОУ) M_1 . Для стабилизации амплитуды выходного сигнала в цепь отрицательной обратной связи введены элементы M_2 К198НТ1 и D_1 КС133. Опорное напряжение поступает на аналоговый вход десятиразрядного цифро-аналогового преобразователя ЦАП (блок КАМАК КА-009* [4]). Сигнал с выхода ЦАП подается на вход преобразователя напряжения в ток U/I , выполненного на микросхеме M_6 и транзисторах $T_1 + T_4$. Транзисторы T_3 и T_4 закреплены на радиаторе, к которому приклеены термостабилизирующие диоды D_2 и D_3 . Датчиками тока преобразователя служат два проволочных резистора, подключая которые можно выбрать диапазон тестируемых токов. С выхода преобразователя U/I ток поступает на возбуждающую

*В блоке КА-009 источник постоянного опорного напряжения заменен генератором опорного напряжения ГОН.

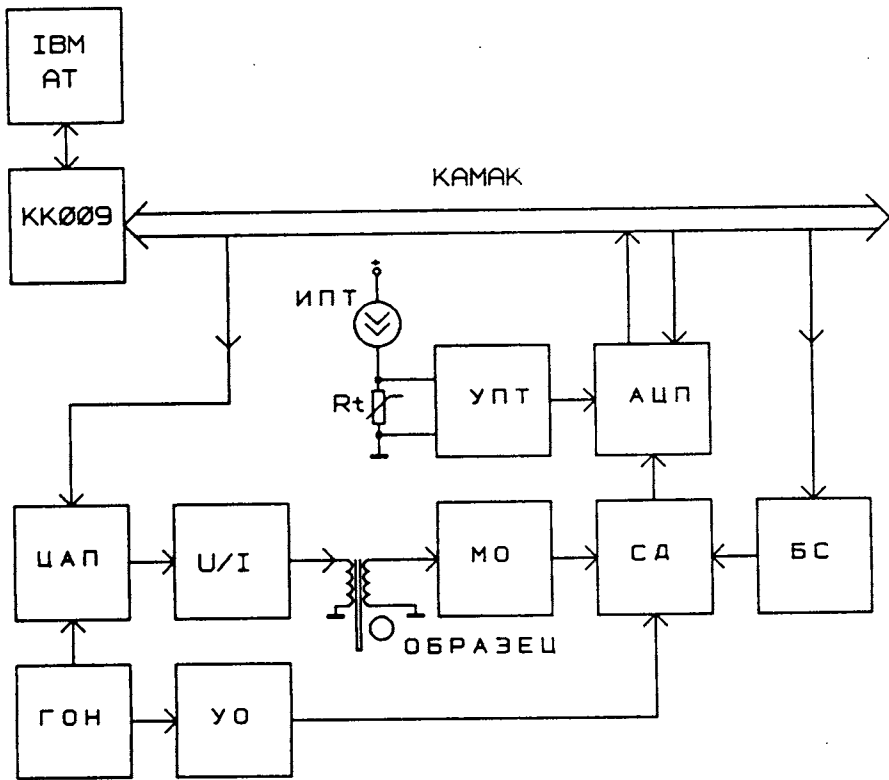


Рис.2. Блок-схема измерителя

обмотку измерительного трансформатора. Для усиления напряжения сигнальной обмотки измерительного трансформатора используется маломощный усилитель МУ (ОУ M_{10} и M_{11}). Усиленное напряжение детектируется синхронным детектором СД, собранным на ключах микросхемы M_{13} и ОУ M_{12} , M_{14} . опорное напряжение СД формируется усилителем-ограничителем УО (микросхемы $M_3 + M_5$). Напряжение с детектора оцифровывается двенадцатиразрядным аналого-цифровым преобразователем АЦП с программно коммутируемыми входами АЦП-12/16 [5]. Интегрирующий фильтр синхронного усилителя обнуляется ключом T_5 по сигналу с блока синхронизации БС.

Измерение температуры производится резистивным датчиком — объемным угольным резистором ТВО [6]. Датчик приклеен к сердечнику измерительного трансформатора. Для смещения датчика использован высокостабильный источник постоянного тока 100 мкА ИПТ. Измеряемое напряжение усиливается усилителем постоянного тока УПТ и оцифровывается АЦП.

Управление установкой осуществляется персональным компьютером IBM AT через контроллер КК-009 [7] по шине КАМАК.

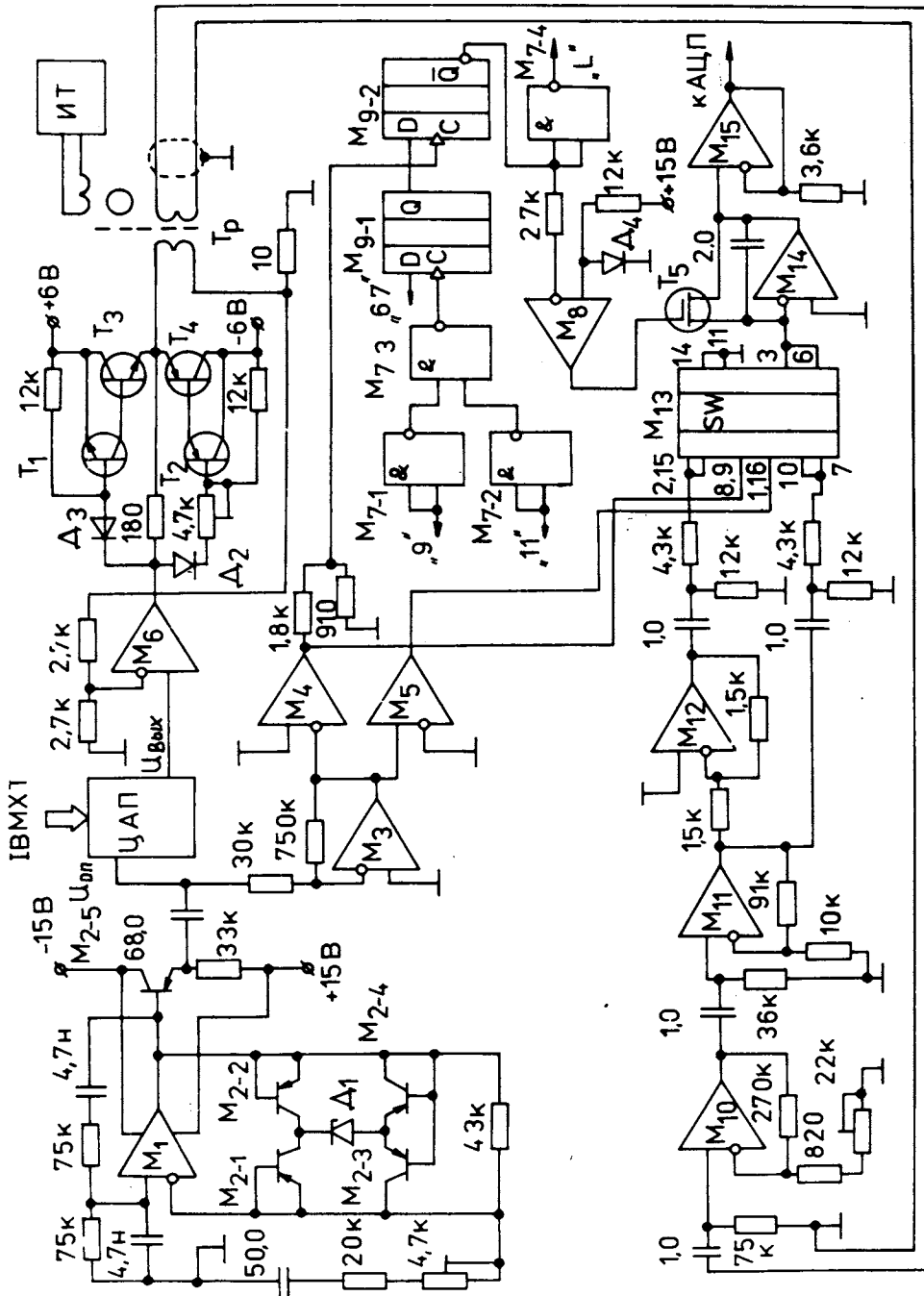


Рис.3. Упрощенная электрическая принципиальная схема измерителя

Конструкция установки и подготовка образцов

Измерительная головка для исследований бесконтактным способом температурных зависимостей критических токов и АВХ изображена на рис.4. Сердечник трансформатора состоит из двух чашек низкочастотного феррита 1 стандартного типоразмера Б9. Намоточные данные катушек приведены в табл.1.

Образец кольцевой формы 4 помещают внутрь сердечника измерительного трансформатора 1 между токовой (2) и измерительной (3) обмотками. Измерение температуры образца проводилось приклеенным к сердечнику 1 терморезистором ТВО (6). Регулирование температуры может производиться нагревателем, обмотка которого бифилярно намотана манганиновой проволокой на держатель 7. Конструкция защищена от колебаний температуры газообразного гелия тепловым экраном 8 и прикреплена с помощью несущих элементов 9 к штанге, погружаемой в стандартный гелиевый дьюар СТГ-40. При исследованиях влияния слабого магнитного поля на образцы ВТСП при температурах, близких к критической, на образец наматывалась тороидальная катушка 5.

Таблица 1. Намоточные данные измерительного трансформатора

Обмотка б	Число витков	Провод
1	41	ПЭЛ 0,2
2	20	ПЭЛ 0,08

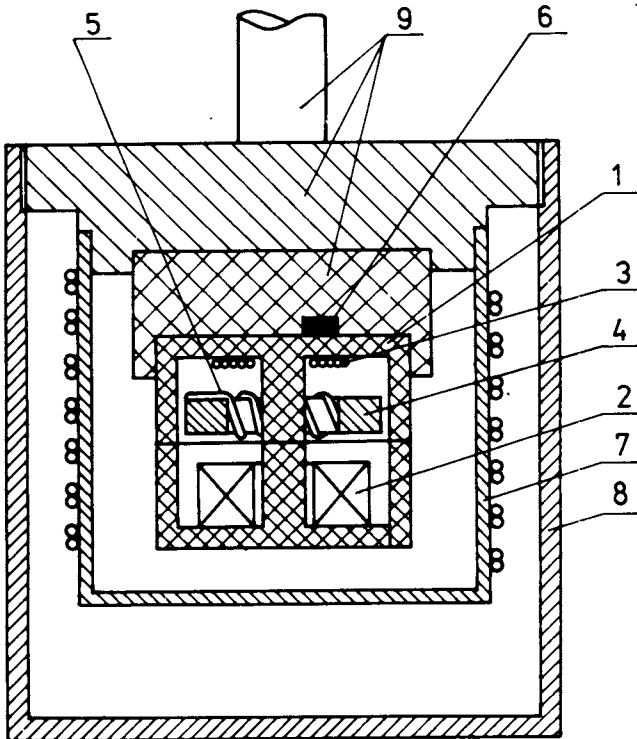


Рис.4. Конструкция измерительной головки

Регулирование температуры может производиться нагревателем, обмотка которого бифилярно намотана манганиновой проволокой на держатель 7. Конструкция защищена от колебаний температуры газообразного гелия тепловым экраном 8 и прикреплена с помощью несущих элементов 9 к штанге, погружаемой в стандартный гелиевый дьюар СТГ-40. При исследованиях влияния слабого магнитного поля на образцы ВТСП при температурах, близких к критической, на образец наматывалась тороидальная катушка 5.

Для исследований зависимости $J_c(T)$ использовались образцы в виде кольца $7 \times 5 \times 2$ мм. Образцы из ВТСП-керамики изготавливались прессованием в специальной форме.

Измерение АВХ и зависимости плотности критического тока от температуры $J_c(T)$

При измерениях используется описанная ниже методика и написанная на ее основе программа. Вначале при определенной температуре снимается АВХ. Для этого в обмотку возбуждения измерительного трансформатора подается тестирующий ток I_T в виде пакетов синусоидальных импульсов с нарастающей амплитудой (рис.1). Блок синхронизации устанавливает начальную фазу пакета синусоидальных импульсов и обнуляет интегрирующий фильтр синхронного детектора перед началом измерений. При

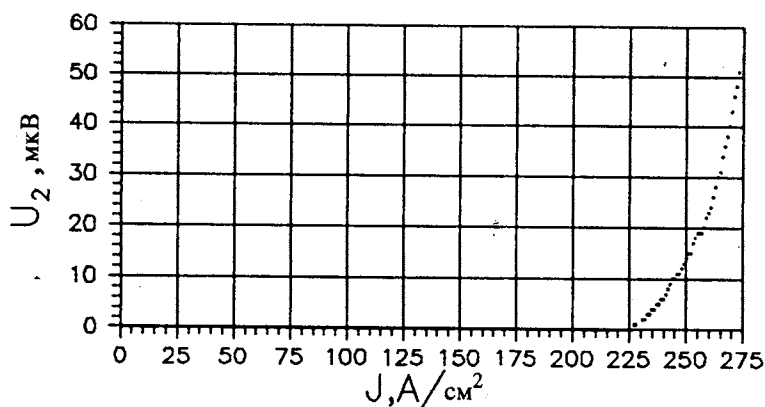


Рис.5. Ампер-вольтовая характеристика образца из $\text{Y}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{U}_{7-\delta}$

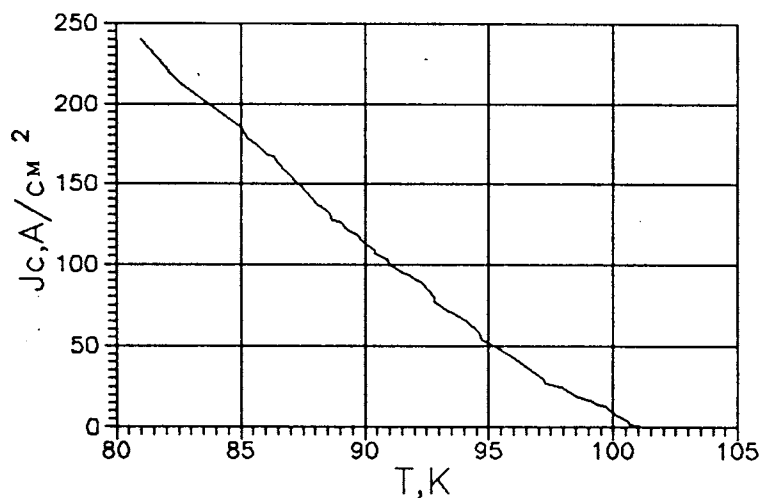


Рис.6. Зависимость критического тока от температуры образца из керамики BiPbSrCaCuO

превышении выходным напряжением синхронного детектора заданного порога запоминается соответствующее значение I_T и, согласно (1), рассчитывается значение J_C . Затем измерительная головка охлаждается или, с помощью нагревателя 7, нагревается до нужной температуры, и снимается новая АВХ.

Примеры измеренных АВХ и зависимости $J_C(T)$ приведены на рис.5 и 6.

Основные характеристики установки

Температурный диапазон измерений:	4,2 + 300 К
Абсолютная погрешность измерения температуры, не хуже:	
в диапазоне 77 + 300 К	0,1 К
в диапазоне 4,2 + 77 К	0,05 К
Амплитуда тестирующего тока:	
минимальная	0,06 мА
максимальная	0,6 А
шаг	0,06 мА
Диапазон измерений критических токов:	0,0025 + 25 А
что при сечении образца 1 мм ²	
соответствует плотности критических токов	2,5 + 25000 А/см ²
Чувствительность по электрическому полю, не хуже:	30 мкВ/м
Максимальные размеры образца	7,5 × 4 × 2,5 мм

Выводы

Создана автоматизированная установка для измерения критических токов в сверхпроводниках бесконтактным трансформаторным методом. Достигнутая чувствительность по постоянному полю составляет 30 мкВ/м, что много меньше стандартной (100 мкВ/м).

Авторы благодарны Б.В.Васильеву и В.Н.Полушкину за обсуждения и полезные рекомендации.

Литература

1. Жуков А.А., Мошалков В.В. — СФХТ, 1991, т.4, с.851.
2. Jones H., Cowey L., Dew-Huges D. — Cryogenics, 1989, 29, 8, p.795.
3. Harris E.A., Bishop J.E.L., Havill R.L., Ward P.J. — J. Phys. C, 1988, 21, p.L673.
4. Антюхов В.А. и др. — Цифровые блоки в стандарте КАМАК (выпуск 10). Сообщение ОИЯИ 10-82-844, Дубна, 1982.
5. Попов С.А. — Препринт ОИЯИ P10-86-398, Дубна, 1986.
6. Дацков В.И. — ПТЭ, 1981, 4, с.253.
7. Churin I.N., Georgiev A. — Microprocessing and Microprogramming, 1988, 23, 1—5, p.153.