

31058

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

13-96-390

На правах рукописи
УДК 537.312.62, 536.48

У-90

УЧАЙКИН
Сергей Викторович

РАЗРАБОТКА
И СОЗДАНИЕ КРИОЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ
НА ОСНОВЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ
И СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
И МАТЕРИАЛОВ

Специальность: 01.04.20 — физика пучков заряженных
частиц и ускорительная техника;
01.04.01 — техника физического эксперимента,
физика приборов, автоматизация физических исследований

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Дубна 1996

Работа выполнена в Объединённом институте ядерных исследований, г.Дубна.

Научные руководители: кандидат технических наук
Полушкин Владимир Николаевич
доктор технических наук
Филиппов Юрий Петрович

Официальные оппоненты: доктор физ.-мат. наук
Неганов Б.С.
доктор физ.-мат. наук
Бенячка Ш.

Ведущая организация: Томский политехнический
университет

Защита состоится " " 1996г. на заседании Диссертационного Совета Д-047.01.06
в Лаборатории сверхвысоких энергий Объединённого института ядерных исследований,
г.Дубна, Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан " " 1996г.

Учёный секретарь
диссертационного совета

Кривохижин В.Г.

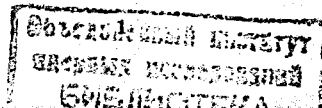
Общая характеристика работы

1. Актуальность проблемы. Область криогенных температур во многом привлекательна как с точки зрения научных исследований, так и технических приложений. Для фундаментальной науки важно то, что при снижении уровня тепловых колебаний в веществах начинают проявляться такие эффекты и свойства, которые обычно маскируются тепловым движением, например, дальний порядок, энергия нулевых колебаний решётки и т.д. Проявляются также некоторые физические явления, присущие только области низких температур, например, сверхпроводимость. С точки зрения экспериментальной физики и измерительной техники важной является возможность достижения весьма малых значений шумовой температуры $T_{ш}$ различных датчиков и усилителей. Уменьшение $T_{ш}$ происходит, во-первых, вследствие снижения температуры компонентов. Второй причиной снижения $T_{ш}$ является тот факт, что становится возможным применение компонентов из нетрадиционных, более эффективных полупроводниковых материалов, которые не могут работать при комнатных температурах, таких, как InAs, InSb, узкозонных халькогенидных стёкол.

Использование макроскопических квантовых эффектов, проявляющихся в сверхпроводниках, позволяет создавать приборы с уникальными характеристиками: магнитометры с чувствительностью лучше 10^{-21} Вб/Гц^{1/2}, сверхчувствительные гальванометры и вольтметры, усилители с уровнем белого шума ниже $4 \cdot 10^{-11}$ В/Гц^{1/2}, СВЧ резонаторы с добротностью до 10^{11} , СВЧ кабели и линии задержки с очень малыми потерями [19].

Самый существенный недостаток этих устройств – необходимость глубокого охлаждения детекторной или преобразовательной части (обычно до $T = 4,2$ К). При этом используется дорогое и громоздкое оборудование для работы с жидким гелием. Возникают проблемы, связанные с передачей слабых сигналов между удалёнными друг от друга “холодным” датчиком и “тёплым” усилителем.

Открытие высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП) в 1986 году дало возможность создания сверхпроводниковых устройств, использующих в качестве хладагента жидкий азот. Разработчики таких устройств столкнулись с серьёзными проблемами, связанными, в первую очередь, с необычными свойствами ВТСП: гранулярностью структуры, малой длиной когерентности, сложностью поведения в магнитном поле,



повышенным собственным шумом и т.д. Важные характеристики этих материалов, такие как критический ток и удельное сопротивление в нормальном состоянии, во многом определяются технологией изготовления. При поиске оптимальных составов и технологических процессов возникает необходимость в оценке качества полученных материалов и изготовленных джозефсоновских переходов – базовых элементов большинства сверхпроводящих устройств.

Таким образом, разработка критериев качества высокотемпературных джозефсоновских переходов и сверхпроводящих материалов, получение отвечающих этим критериям переходов и материалов, а также создание высокочувствительных приборов на основе высокотемпературных сверхпроводников являются актуальными задачами. Этому посвящена первая часть диссертационной работы, состоящая из глав 1 ÷ 4.

В число основных элементов современных ускорителей входят сверхпроводящие магниты и резонаторы, охлаждаемые нормальным или сверхтекучим гелием. Нарушение режима охлаждения может привести к переходу части сверхпроводящей обмотки или рабочей поверхности резонатора в резистивное состояние с выделением всей запасённой в системе энергии в малом объёме. Моделирование процессов теплопередачи “твёрдое тело – криогенная жидкость” позволяет изучить подобные случаи с целью принятия мер безопасности. Характерное время таких процессов составляет от десятков микросекунд до нескольких миллисекунд для их регистрации обычно использовались быстродействующие плёночные сверхпроводниковые термометры. Эти термометры работают в узком температурном диапазоне в области сверхпроводящего перехода и разработанное до сих пор экспериментальное оборудование позволяло проводить измерения только в ограниченном выбранном диапазоне температур. Использование полупроводниковых термометров позволяет проводить исследования во всём интересном для таких исследований температурном диапазоне жидкого и сверхтекучего гелия, однако, вследствие меньшей чувствительности полупроводниковых датчиков, предъявляет жёсткие требования к регистрирующей аппаратуре. Поэтому ранее полупроводниковые датчики не использовались.

Необходимость проведения измерений температуры во многих точках исследуемого объёма обуславливает большое количество электрических вводов в охлаждаемый объём, что снижает помехоустойчивость системы и увеличивает теплоприток по проводам.

Таким образом, для исследования быстропротекающих процессов те-

плопередачи в жидком и сверхтекучем гелии разработка быстродействующей многоточечной системы измерения температур с небольшим количеством вводов в холодный объём также является актуальной задачей. Решению этой задачи посвящена вторая часть диссертации, представляющая собой главу 5.

2. Цель работы. В первой части работы целью являлось создание базы для построения криоэлектронных систем с использованием свойств высокотемпературных сверхпроводящих материалов. Для этого предполагалось разработать методики и создать экспериментальное оборудование для оценки качества высокотемпературных джозефсоновских переходов и высокотемпературных сверхпроводящих материалов.

Во второй части работы целью являлась разработка криокоммутатора для системы, предназначенной для исследования быстропротекающих тепловых процессов в температурном диапазоне 1,4 ÷ 4,2 К.

3. Постановка задач.

(а) Обычно о качестве ВТСП джозефсоновских переходов (ДП) судят по характеристикам приборов, изготовленных на их основе. Недостаток такого подхода в его дороговизне, поскольку прибор может содержать большое количество переходов. Поэтому предпочтительнее разработать критерий качества единичного перехода и пользоваться им при отработке технологии изготовления, лишь после этого приступая к изготовлению сложного прибора. Для ДП критерием качества можно рекомендовать токо-фазовое отношение (ТФО), т.е. зависимость тока куперовских пар через переход от разности фаз параметра порядка в сверхпроводнике по разные стороны перехода. У идеального ДП токо-фазовое отношение синусоидально. Несинусоидальность ТФО может привести к деградации характеристик джозефсоновских приборов. Поэтому необходимо контролировать ТФО при изготовлении джозефсоновских переходов.

Знание вида ТФО позволяет использовать известные модели при разработке новых приборов и предсказании их характеристик. Таким образом, знание этого отношения важно и с точки зрения проверки применимости стандартных моделей для новых материалов и типов ДП.

ТФО в низкотемпературных ДП исследовались различными методами. Не все из них применимы для исследования высокотемпературных ДП. Причиной является ухудшение отношения си-

сигнал/шум вследствие повышения температуры окружающей среды и ухудшенных характеристик высокотемпературных ДП. Приемлемую точность измерений можно достичь с помощью модификации измерительной системы, предложенной в [20]. Изменение было внесено для улучшения отношения сигнал/шум и заключалось в использовании охлаждаемого предусилителя.

Таким образом, задачами исследований, результаты которых изложены в главах 1 и 2, были разработка малошумящего охлаждаемого усилителя, построение на его основе системы для измерений ТФО и исследование этого отношения в высокотемпературных джозефсоновских переходах.

- (b) Для массивных сверхпроводников оценка качества обычно проводится по транспортным характеристикам и их температурным зависимостям. К сожалению, у разных авторов нет единого подхода к технике этих измерений. Задачами исследований, изложенных в главе 3, были сформулирование требований к аппаратуре и режимам измерений, исходя из требуемой точности и с учётом физических явлений, протекающих в образцах во время тестирования, а также разработка соответствующей измерительной аппаратуры для сравнения различных материалов и технологий.
- (c) Исследования ВТСП джозефсоновских переходов и материалов имеют конечной целью построение приборов, работающих при азотных температурах, с характеристиками, которые были ранее доступными только при охлаждении приборов жидким гелием. Задачей исследований, описанных в главе 4, было создание сверхпроводящего гальванометра с чувствительным элементом, работающим при температуре жидкого азота.
- (d) Уменьшить количество соединений между датчиками и электронной, находящейся при комнатной температуре, можно с помощью криокоммутатора. Описанные в литературе подобные устройства показали свою работоспособность при температурах до 4,2 К. Быстродействие этих термометров не превышало 1 измерения за 100 мкс [21, 22]. При исследовании быстропротекающих процессов теплопередачи в жидком и сверхтекучем гелии измерения должны проводиться с точностью 10^{-4} и со скоростью не менее 10 мкс/измерение при температурах до 1,4 К (см., например, [27]). Поэтому задачами исследований, результаты которых изложены в главе 5, были испытание электронных компонентов при

температурах до 1,4 К и разработка криокоммутатора для быстродействующего измерителя низких температур.

4. Научная новизна.

- (a) Исследованы температурные зависимости крутизны и токов утечки затвора современных арсенид-галлиевых полевых транзисторов с барьером Шоттки. Рассчитаны спектральные плотности шумовых тока и напряжения при температурах $4,2 \div 300$ К. Определено, что крутизна исследованных транзисторов при охлаждении до 4,2 К увеличивается в 1,5-1,7 раза.
- (b) Определены токо-фазовые отношения (ТФО) в ВТСП джозефсоновских переходах: торцевых тонкоплёночных и межгранульных объёмных.
- (c) Определены основные источники погрешностей при исследовании транспортных свойств сверхпроводников и ограничения, накладываемые на величину тестирующего тока.
- (d) Разработан метод двойного экранирования с использованием ВТСП и ферромагнитных экранов. Метод позволяет получать магнитный вакуум при работе экрана на уровне азотных температур, что ранее было возможно только при охлаждении экрана жидким гелием.
- (e) Исследованы основные характеристики серийных КМОП и HCMOS мультиплексоров в температурном диапазоне $1,4 \div 300$ К. Определено, что временные характеристики HCMOS микросхем при охлаждении до температуры жидкого гелия улучшаются в ≈ 2 раза.

5. Практическая ценность.

- (a) Создан усилитель с охлаждаемым транзистором, работающим при температуре $4,2 \div 300$ К и собственным шумом на порядок меньшим собственного шума обычного ВТСП скивда.
- (b) Создана система для измерений токо-фазового отношения в сверхпроводящих слабых связях, позволяющая исследовать джозефсоновские контакты в диапазоне температур $4,2 \div 100$ К.
- (c) Создана система для исследований транспортных свойств сверхпроводящих материалов, позволяющая изучать зависимости сопро-

тивления и критического тока от температуры, определять критическую температуру и ширину сверхпроводящего перехода. Разработаны методики бесконтактных исследований температурных зависимостей удельного сопротивления и критических токов сверхпроводников.

- (d) Создан сквид-гальванометр с чувствительным элементом, работающим при температуре жидкого азота. Энергетическая чувствительность гальванометра составила $1,6 \cdot 10^{-21}$ Дж/Гц, что соответствует чувствительности высококачественных полупроводниковых устройств.
- (e) Впервые разработан криокоммутатор аналоговых сигналов, входящий в состав быстродействующего низкотемпературного термометра, позволяющего измерять температуру в 15 точках в широком диапазоне температур гелия II. Точность измерения температуры равна 10^{-4} при скорости 10^5 измерений в секунду. Точность измерения разности температур равна 10^{-5} при скорости 10^6 измерений в секунду. Коммутатор сохранил работоспособность после облучения потоками гамма-частиц дозой более 10^4 Грэй и нейтронов более $4 \cdot 10^{13}$ нейтронов/см² при 77 К.

6. Апробация работы. Результаты работы докладывались:

- (a) на Всесоюзном совещании молодых учёных и специалистов "Проблемы теории чувствительности электронных и электромеханических систем" (Москва, 1987);
- (b) на международном симпозиуме по материаловедению для передовых технологий (Дрезден, 1990);
- (c) на 1-ом Российско-китайском симпозиуме по материаловедению (Томск, 1992);
- (d) на международной конференции по квантовым вихрям и турбулентности в потоках гелия II (Геттинген, Германия, 1993).
- (e) на 15-ой и 16-ой Международных конференциях по криогенике (Италия, Генуя, 1994, и Япония, Китакаюшу, 1996);
- (f) на 3-ем симпозиуме по низкотемпературной электронике и высокотемпературной сверхпроводимости (США, Рино, 1995);
- (g) на XVIII-ом международном семинаре по прикладной сверхпроводниковой электронике и биомагнетизму (Украина, Жукин, 1995);

- (h) на IV-ой международной конференции по технологии низких температур (Чехия, Прага, 1996);
- (i) на научных семинарах в Лаборатории нейтронной физики и Лаборатории сверхвысоких энергий Объединённого института ядерных исследований.

7. Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в 18 публикациях.

8. Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, двух частей и заключения. В первую часть входят с 1 по 4 главы, вторая часть представляет собой пятую главу. Работа изложена на 108 страницах и содержит 41 рисунок и 7 таблиц.

Содержание диссертации

Первая глава посвящена разработке малшумящего высокочастотного усилителя с охлаждаемым входным транзистором. В разделах 1.1-1.2 описаны исследования при температурах $T_e = 4, 2 \div 300$ К характеристик современных транзисторов с большой крутизной – АП354Г (НПО "Сатурн", Украина) и ATF-10136 (Avantek, США) [1, 2]. Определено, что усилительные и шумовые характеристики транзисторов значительно улучшаются при охлаждении. Крутизна транзисторов увеличивается в $1,5 \div 1,9$ раза при снижении температуры до ≈ 50 К, и далее практически не изменяется.

Были определены спектральные характеристики эквивалентных источников шумового напряжения и тока при $T_e = 300, 77$ и $4, 2$ К (рис.1). У эквивалентного источника шумового напряжения при криогенных температурах резко снижается низкочастотная $1/f$ составляющая, спектральная плотность "белого" шума снижается в $\approx 1,3$ раза. У эквивалентного источника шумового тока резко снижается частотно-независимая составляющая, вызванная дробовым шумом тока утечки затвора.

В разделе 1.3 описан разработанный малшумящий усилитель с охлаждаемым первым каскадом [1, 2, 3]. В качестве охлаждаемого транзистора использовались АП354Г и ATF-10136. При токе стока 10 мА уровень белого шума был соответственно меньше $0,6$ нВ/Гц^{1/2} и $0,45$ нВ/Гц^{1/2} в температурном диапазоне $T_e = 4, 2 \div 100$ К. Мощность, выделяемая охлаждаемой частью усилителя, составила менее 25 мВт. Шумовая температура связанного со сквидом колебательного контура снизилась с ≈ 200 К до T_e . Характеристики усилителя совпадают с характеристиками лучших из описанных

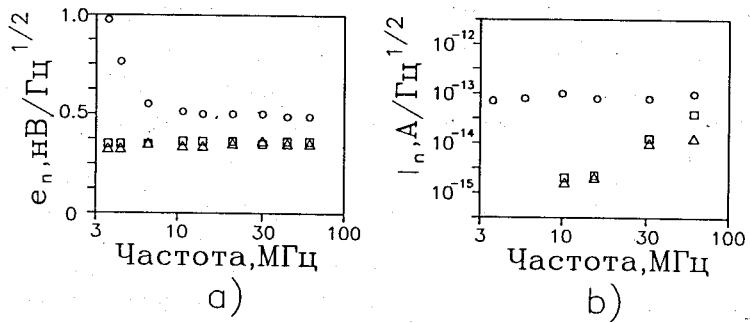


Рис. 1: Частотные зависимости при различных температурах: а) э.д.с. шума e_n ; б) шумового тока i_n . \circ – 300 K; \square – 77 K, Δ – 4.2 K.

в литературе аналогов (0,5 нВ/Гц^{1/2} для усилителя из [23]), при меньшей рассеиваемой мощности.

Во второй главе рассказывается о исследованиях токо-фазового отношения (ТФО) в джозефсоновских переходах (ДП) из высокотемпературных сверхпроводников. В разделе 2.1 обосновывается выбор метода исследований ТФО [2, 4]. Был избран метод Винсент-Дивера [20], поскольку в нём, в отличие от других методов, не накладывается строгих ограничений на индуктивность при увеличении температуры T_e . Этот метод состоит в измерении малосигнального импеданса слабой связи, включенной в ВЧ скивид, работающий в безгистерезисном режиме.

В разделе 2.2 описана система, разработанная для таких измерений [2, 5]. Её основой является усилитель, описанный в главе 1. Функциональная диаграмма системы показана на рис.2. Система работает следующим образом. Первый цифро-аналоговый преобразователь ЦАП1 выставляет управляющее напряжение для источника тока, соответствующее определённому постоянному току I_{DC} . Ток I_{DC} определяет внешнее магнитное поле Φ_E внутри контура квантования скивида. Частота выходного напряжения ВЧ-генератора задаётся с помощью цифро-аналогового преобразователя ЦАП2. Изменяя выходное напряжение ЦАП2, можно снять АЧХ колебательного контура $L_T C_T$. Фазовращатель компенсирует фазовый сдвиг во входной цепи и усилителе. Выходной сигнал с детектора фильтруется низкочастотным фильтром и измеряется аналого-цифровым преобразователем АЦП. Данные через контроллер КАМАК вводятся в память компьютера для дальнейшей обработки. Эти измерения повторялись при различных значениях внешнего магнитного поля Φ_E . По серии АЧХ определялись зависимости резонансных частот и добротности от поля Φ_E . Исходя из них, рассчитывалась индукти-

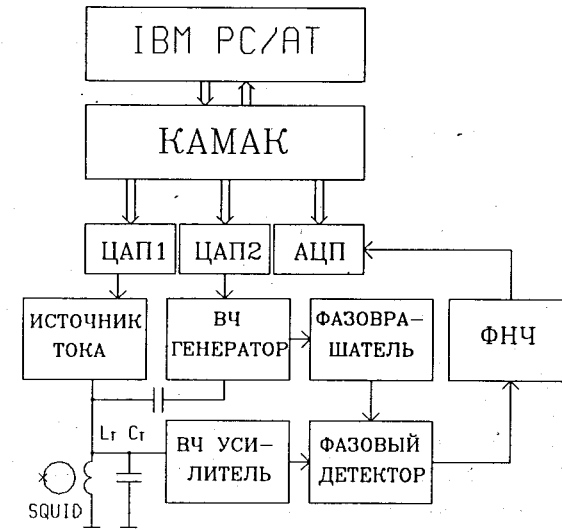


Рис. 2: Функциональная диаграмма системы для измерений ТФО.

вность джозефсоновского перехода $\mathcal{L}(\Phi_E)$. Переход к аргументу φ проводился путём численного интегрирования уравнения 1. Затем, с помощью уравнения 2 определялось токо-фазовое отношение $I_p(\varphi)$.

$$\varphi(\Phi_E) = \int_0^{\Phi_E} \left[1 + \frac{L}{\mathcal{L}(\Phi_E)} \right]^{-1} d\Phi_E. \quad (1)$$

$$\mathcal{L}(\varphi) = \frac{\hbar}{2e} \left(\frac{dI_p(\varphi)}{d\varphi} \right)^{-1}, \quad (2)$$

В разделе 2.3 приведены результаты исследований $I_p(\varphi_{\Sigma}^{eff})$ для двух видов ВТСП ДП – торцевого тонкоплёночного и мостикового объёмного. Три тонкоплёночных скивида показали практически одинаковые характеристики при $T = 68$ K, когда основной параметр скивида был равен $\beta = 2 \div 3$. Для определения $I_p(\varphi)$ исследовались АЧХ колебательного контура, связанного со скивидами при температуре около 80 K. При этой температуре скивиды работали в безгистерезисном режиме с $\beta = 0,3$. Результат расчёта $I_p(\varphi)$ для контакта 1 показан на рис.3 (слева). ТФО этого контакта близко к синусоидальному.

Исследовались пять межгранульных ДП, включенные в объёмные скивиды из BiPbSrCaCuO [1, 2, 6]. Как видно из рис.3 (справа), $I_p(\varphi_{\Sigma}^{eff})$ этих пере-

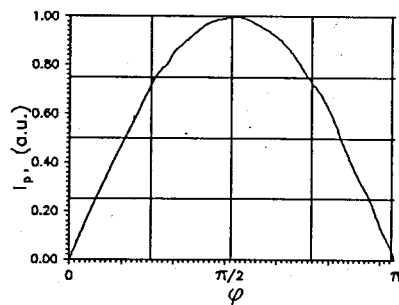


Рис. 3: Токо-фазовое отношение торцевого ДП (слева) и ДП, включенного в объёмный сквид из BiPbSrCaCuO (справа).

ходов также близко к синусоидальному.

Система может использоваться для контроля качества ДП. Для примера на рис.4 показаны вольт-поточковые характеристики двух ДП – с синусоидальным и несинусоидальным ТФО. Как видно из рисунка, несинусоидальность ТФО приводит к резкому искажению треугольной вольт-поточковой характеристики.

Глава 3 посвящена исследованиям транспортных характеристик ВТСП-материалов. В разделе 3.1 проведено сравнение методов измерения температурной зависимости удельного сопротивления сверхпроводников [7]. Оценены ограничения на величину тестирующего тока для исключения ошибки определения ширины сверхпроводящего перехода. Описана универсальная автоматизированная установка на базе персонального компьютера, разработанная для исследования температурных зависимостей удельного сопротивления и критического тока в сверхпроводниках [7, 8, 9, 10]. Блок-схема установки изображена на рис.5. Опорное напряжение с одного из трёх источников: синусоидального 500 Гц (блок 2), постоянного (блок 3) или программно управляемого (ПУ) импульсного (блок 1), через ПУ коммутатор (блок 5) поступает на аналоговый вход двенадцатиразрядного ЦАП1 (блок 6). Сигнал с выхода ЦАП1 подаётся через коммутатор 7 на вход программируемого преобразователя напряжение-ток (блок 8). Коммутатор включается либо программой непосредственно, либо через ПУ одновибратор 9. С выхода преобразователя 8 ток поступает на разъём измерительной головки 10. Выходной сигнал с измерительной обмотки поступает на вход усилителя постоянного тока 12 или синхронного усилителя 14. Напряже-

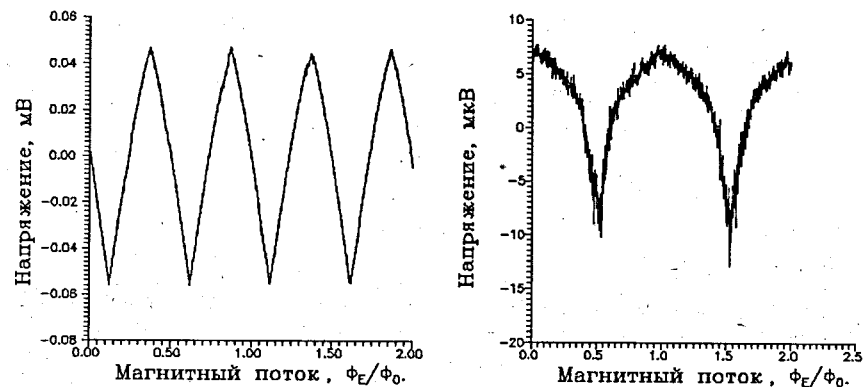


Рис. 4: Вольт-поточковая характеристика сквида синусоидальной (слева) и несинусоидальной (справа) вольт-поточковой характеристикой.

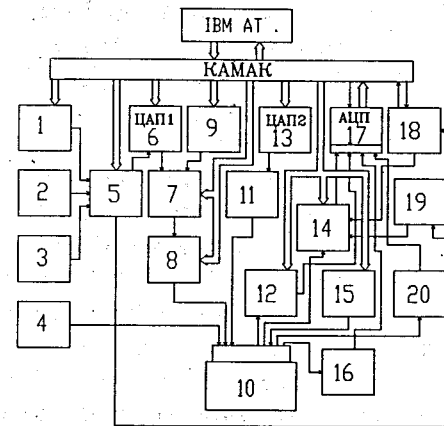


Рис. 5: Блок-схема установки для измерений транспортных характеристик сверхпроводников.

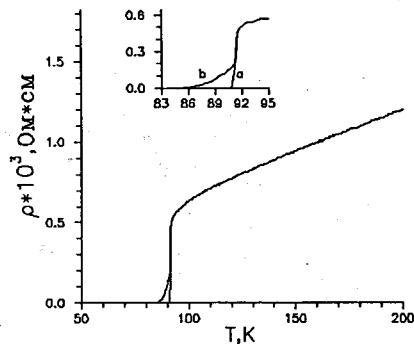


Рис. 6: Температурная зависимость удельного сопротивления сверхпроводника при различных тестирующих токах I_T . а) I_T выбран правильно б) I_T больше допустимого.

ния с выходов усилителей поступают на АЦП 17 с программно коммутируемыми входами. Обнуляется интегрирующий фильтр синхронного усилителя сигналом с блока синхронизации 18. Для компенсации сдвига фазы в измерительных цепях служит фазовращатель 19. Измерение температуры производится резистивным датчиком, питаемым источником постоянного тока 4. Выходное напряжение датчика усиливается усилителем 16. Ток нагревателя регулируется десятиразрядным цифро-аналоговым преобразователем ЦАП2 (блок 13). Напряжение с ЦАП2 поступает через преобразователь напряжения в ток 11 на разъём 10. Для контроля за уровнем азота используется резистивный датчик, смещённый источником постоянного тока 15. Для усиления сигнала уровнемера служит усилитель 20. Управление установкой осуществляется с помощью персонального компьютера IBM AT по шине КАМАК.

Конструкция установки позволяет исследовать образцы в температурном диапазоне $77 \div 300$ К, используя стандартный азотный дьюар. Для исследований зависимости $\rho(T)$ четырёхконтактным методом использовались образцы прямоугольной формы размером $20 \times 7 \times 2$ мм, изготовленные методом прессования. Для бесконтактных измерений использовались кольцевые образцы $\varnothing 7 \times \varnothing 5 \times 2$ мм. Установка позволяет исследовать образцы с сопротивлением $10^{-9} \div 10$ Ом с чувствительностью по электрическому полю в образце $0,5$ мкВ/м. Примеры измеренных зависимостей $\rho(T)$ приведены на рис.6.

Раздел 3.2 посвящён измерениям критического тока в ВТСП [7, 8, 9, 10]. Критический ток обычно определяют по АВХ, используя критерий по напряжённости электрического поля $|\vec{E}| = 1$ мкВ/см. Однако паразитные напряжения, возникающие в образце из ВТСП вследствие термоэффек-

тов, могут многократно превышать величину 1 мкВ/см. В разделе 3.2.1 при выработке критерия предложено использовать зависимость между напряжённостью электрического поля \vec{E} в образце и эффективной частотой колебаний решётки магнитных вихрей f . Если эффективная частота f будет во много раз меньше частоты характерных процессов f_X , протекающих в приборе, сделанном из данного сверхпроводника, $f \ll f_X$, то возникающее слаборезистивное состояние сверхпроводника не будет влиять на работу прибора. Оценки показывают [25], что для частотного диапазона 1 Гц – 10^9 Гц необходимая чувствительность измерений составит $10^{-8} - 10$ В/м.

В разделе 3.2.2 дан краткий обзор методик измерений критического тока. Показано, что контактный разогрев сильно ограничивает чувствительность контактных методов. Среди бесконтактных методов для описываемой системы измерений был выбран трансформаторный метод [26], поскольку при его использовании исключается влияние внутригранульных контурных токов, а также не происходит контактный перегрев.

В разделе 3.2.3 анализируются источники помех при измерениях критического тока трансформаторным методом. Синфазная помеха в основном вызвана ёмкостной связью C_{12} между токовой и измерительной катушкой. Для её уменьшения в установке снижена паразитная ёмкость C_{12} , путём электростатического экранирования катушек трансформатора. Квадратурная помеха возникает из-за поля рассеяния трансформатора. Для её уменьшения был использован синхронный усилитель. Изменение конструкции трансформатора и использование синхронного усилителя, позволило измерять напряжение в образце с чувствительностью 10 нВ, что при среднем диаметре образца 6 мм соответствует напряжённости поля $E = 0,5$ мкВ/м [7]. Это на $1,5$ порядка лучше, чем у аналогичных установок и на 3 порядка выше чувствительности контактных методов.

Во время проведения измерений зависимости $J_C(T)$ по мере охлаждения образца через заданный шаг температуры снимается АВХ. Для этого тестирующий ток I_T в виде пакетов синусоидальных импульсов с нарастающей амплитудой поступает на первичную обмотку измерительного трансформатора Т (рис.5 и эпюра 1 на рис.7). Этот ток создаёт в сердечнике магнитный поток амплитудой Φ_1 . Пока образец находится в сверхпроводящем состоянии, в нём наводится ток с амплитудой $I_S^A \approx N_1 \cdot I_T^A$, создающий поток Φ_S такой величины, что суммарный магнитный поток внутри сверхпроводящего кольца Φ_2 равняется нулю. На выводах вторичной обмотки напряжение появляется только тогда, когда амплитуда тока I_S^A превышает критический ток I_C . Это напряжение U_2 (эпюра 2) усиливается и детектируется синхронным детектором (эпюра 3). Критерием достижения критического тока служит

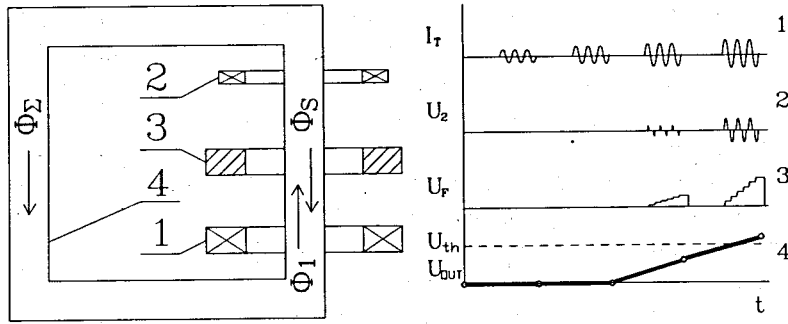


Рис. 7: Трансформаторный метод измерения критического тока. Измерительный трансформатор (слева) и эпюры напряжений на измерительном трансформаторе (справа).

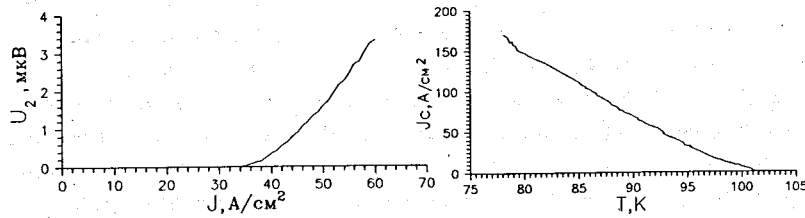


Рис. 8: Ампер-вольтовая характеристика (слева) и зависимость критического тока от температуры (справа) образца из BiPbSrCuCaO .

превышение выходного напряжения синхронного детектора заданного порога напряжения U_{th} (эпюра 4). Установка позволяет измерять плотность критического тока в диапазоне $0,6 \div 6 \cdot 10^4 \text{ A/cm}^2$. Примеры измеренной АВХ и зависимости $J_C(T)$ приведены на рис.8.

В главе 4 описан разработанный на основе исследований ВТСП материалов и ДП ВТСП-сквид гальванометр [12, 13, 14]. Сквид изготавливался из керамики $\text{Y}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ с критический ток более 100 A/cm^2 , что определяло относительно малый уровень шумов типа $1/f$. Для снижения уровня магнитных помех использовался сверхпроводящий экран из керамики $\text{Y}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$, допированной серебром. Поскольку первое критическое поле межгранульных связей невелико ($\approx 10^{-4} \text{ Тл}$), при переходе в сверхпроводящее состояние в ВТСП экранах может “выморозиться” значительное поле [12, 13]. Для уменьшения остаточного поля было предложено использовать двойное экранирование [12, 14]: охлаждать сверхпроводящий экран внутри ферромагнитного экрана.

Поле пробоя ВТСП экрана составило $H_a \approx 12 \text{ Гс}$. Для предварительного экранирования использовался четырёхслойный магнитный экран из пермал-

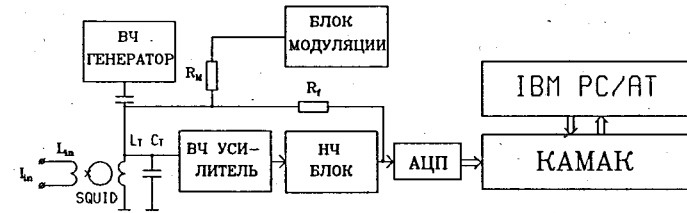


Рис. 9: Блок – схема гальванометра.

лоя, снижавший внешнее магнитное поле до величины 10 нТ .

Конструкция гальванометра позволяет использовать для работы стандартный азотный дьюар. Функциональная схема гальванометра изображена на рис.9. Измеряемый ток подаётся во входную катушку L_{IN} , индуктивно связанную с ВТСП ВЧ сквидом. Высокочастотный ток смещения контура $L_T C_T$, вырабатывается ВЧ генератором. Усиление сигнала с колебательного контура осуществляется ВЧ усилителем. НЧ блок служит для преобразования, усиления и низкочастотной фильтрации сигнала сквида. Блок модуляции вырабатывает ток низкочастотной модуляции сквида. Сигнал с выхода НЧ блока преобразуется в цифровую форму с помощью аналого-цифрового преобразователя АЦП и по шине КАМАК поступает в персональный компьютер для дальнейшей обработки.

Коэффициент преобразования гальванометра составил $30 \text{ нА}/\Phi_0$, где $\Phi_0 = 2 \cdot 10^{-15} \text{ Вб}$ – квант магнитного потока. Спектральная плотность шумов в области “белого” шума составляет $10 \text{ пА}/\text{Гц}^{1/2}$ (рис.10). Чувствительность на частотах ниже 1 Гц ограничивается повышенным $1/f$ шумом. Энергетическое разрешение гальванометра ϵ_g в области белого шума составило $\approx 1,6 \cdot 10^{-21} \text{ Дж}/\text{Гц}$. Достигнутое ϵ_g соответствует разрешению высококачественных полупроводниковых устройств и может быть значительно улучшено после появления сверхпроводящих согласующих элементов.

В главе 5 представлены результаты работы по созданию криокоммутатора, входящего в состав системы для быстрых измерений низких температур [15, 16]. В разделе 5.1 приведены результаты исследования основных характеристик нескольких типов серийных КМОП и HCMOS мультимплексоров в температурном диапазоне $1,4 \div 300 \text{ К}$. Среди исследованных лучшими характеристиками обладали HCMOS микросхемы серий 74НС (производство Valvo, США) и 1564 (СНГ), быстродействие которых увеличивалось почти в 2 раза при охлаждении до $4,2 \text{ К}$ [15]. Микросхемы, изготовленные по этой технологии, были выбраны в качестве элементной базы криокоммутатора.

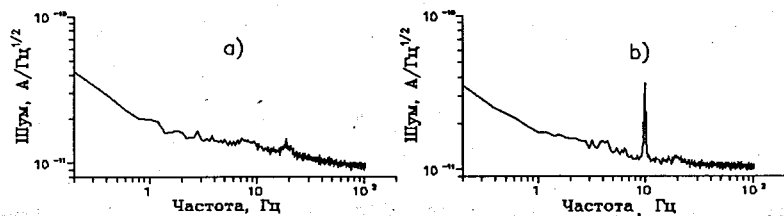


Рис. 10: Спектральная плотность шумов гальванометра. а) при отсутствии входного сигнала, б) при входном сигнале частотой 10 Гц с амплитудой 70 нА.

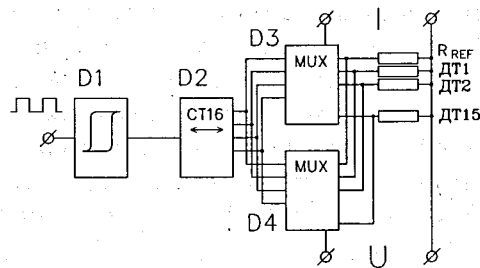


Рис. 11: Электрическая схема коммутатора.

В разделе 5.2 описан разработанный криокоммутатор аналоговых сигналов [16, 17]. Коммутатор выполнен по схеме, приведенной на рис.11. Сигнал с внешнего генератора поступает через триггер Шмитта D1 на вход двоичного счётчика D2. Триггер служит для повышения помехоустойчивости, так как коммутатор удалён от “тёплого” усилителя на несколько метров. Счётчик D2 управляет мультиплексорами D3 и D4, которые последовательно соединяют по четырёхточечной схеме термодатчики ДТ1–ДТ15. Использование охлаждённого счётчика позволило уменьшить количество проводов, по которым передаются цифровые сигналы управления.

Использование коммутатора позволило уменьшить количество электрических вводов в охлаждаемый объём с 60 до 7 для 15 датчиков при измерениях по четырёхточечной схеме.

В разделе 5.3 приведены основные характеристики системы для быстрых

измерений температур, в состав которой входит криокоммутатор. Система позволяет измерять сопротивление с точностью 10^{-4} при времени измерений 10 мкс и изменение сопротивления с точностью 10^{-5} при времени преобразования 1 мкс. Криокоммутатор сохранил работоспособность после облучения потоком нейтронов до $4 \cdot 10^{13}$ нейтронов/см² и дозе гамма излучения до 10^4 Грэй при $T = 77$ К [18].

Основные результаты диссертации

1. Разработан малошумящий усилитель для диапазона $10 \div 100$ МГц с первым каскадом, работающим в температурном диапазоне $4, 2 \div 100$ К, со спектральной плотностью напряжения шума менее $0,45$ нВ/Гц^{1/2}. По сравнению с аналогами [23], усилитель имеет почти в 4 раза меньшую рассеиваемую мощность (25 мВт).
2. Для оценки качества джозефсоновских переходов разработана и создана не имеющая аналогов автоматизированная система, позволяющая исследовать токо-фазовое отношение в ВТСП джозефсоновских переходах в температурном диапазоне $4, 2 \div 100$ К. В отличие от обычной практики, когда о качестве переходов судят по готовому изделию, система используется на этапе отработки технологии изготовления единичного перехода.
3. Впервые исследованы токо-фазовые отношения наиболее интересных с практической точки зрения ВТСП джозефсоновских переходов: торцевых тонкоплёночных из соединения YBaCuO и межгранульных объёмных из BiPbSrCaCuO. Определено, что, в пределах погрешности измерений, высококачественные ВТСП переходы имеют синусоидальное токо-фазовое отношение. Это поддерживает предположение, что синусоидальность $I_p(\varphi)$ — это общая характеристическая особенность ВТСП слабых связей высокого качества.
4. Разработана и создана система для измерений транспортных характеристик сверхпроводников бесконтактным трансформаторным методом. Система позволяет измерять температурные зависимости как удельных сопротивлений $\rho(T)$, так и критических токов $J_C(T)$. Усовершенствование методики измерений позволило достичь чувствительности по напряжённости электрического поля $0,5$ мкВ/м, что на почти на 2 порядка превышает чувствительность аналогичных систем [26]. Преимущество системы состоит также в том, что, в отличие от аналогов, в ней для

измерения зависимостей удельного сопротивления и критического тока от температуры используется один и тот же образец.

5. Разработан метод двойного экранирования с использованием ВТСП и ферромагнитных экранов. Метод позволяет получить условия "магнитного вакуума" при работе экрана на уровне азотных температур, что ранее было возможно только при охлаждении экрана жидким гелием.
6. Экспериментально показана возможность создания приборов для электрических измерений со сверхпроводниковым чувствительным элементом, работающим при температуре жидкого азота, на основе которого впервые создан ВТСП сквид-гальванометр. Энергетическая чувствительность гальванометра составила $1,6 \cdot 10^{-21}$ Дж/Гц, что соответствует чувствительности высококачественных полупроводниковых устройств. Существенно увеличить чувствительность гальванометра возможно после появления высококачественных ВТСП согласующих устройств.
7. Впервые определены временные параметры КМОП и HCMOS микросхем при 4,2 К и проверена их работоспособность при температурах до 1,4 К. Определено, что большинство КМОП микросхем остаются работоспособными при $T = 4,2$ К при незначительном ухудшении характеристик. Лучшими характеристиками для работы при гелиевых температурах обладают HCMOS схемы. При охлаждении от комнатной температуры до 4,2 К такие основные параметры HCMOS схем, как сопротивление открытого канала и быстродействие, улучшаются приблизительно в два раза.
8. Впервые разработан быстродействующий криокоммутатор аналоговых сигналов. В отличие от других криокоммутаторов (см., например, [22]), разработанный позволяет проводить измерения в диапазоне от температуры окружающей среды до температуры сверхтекучего гелия. Скорость измерений температуры составила 10^5 измерений в секунду, при относительной точности 10^{-4} , что на порядок превышает скорость аналогов [22]. Скорость измерения разности температур ещё выше и равна 10^6 измерений в секунду при относительной точности 10^{-5} .

В заключении автор выражает благодарность Полушкину В.Н. за помощь в формировании области научных интересов, обучение и многолетнюю совместную работу; Филиппову Ю.П., Томилиной Т.Н., Кузнецову А.Б. и Сергееву И.А. за обсуждение диссертации и полезные замечания; проф. Васильеву Б.В. и проф. Киришману Р. за рекомендации по ряду работ;

др. Х.Коху за любезное приглашение в Физико-технический институт, где была выполнена часть диссертации. Автор выражает признательность соавторам за интересное сотрудничество, коллективам и руководству Лаборатории сверхвысоких энергий, Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ и отдела низких температур Берлинского филиала Физико-технического института за возможность проведения исследований и их поддержку.

Литература

- [1] S.Uchaikin. Investigations of the Noise Performances of the FET AP354G at the Low Temperature. *JINR Rapid Communications*, 1995, 4(72), 25-30.
- [2] S.Uchaikin. "System for Measurements of the Current-Phase Relation in Superconducting Weak Links" In: *Proceedings of the Third Symposium LOW TEMPERATURE ELECTRONICS AND HIGH TEMPERATURE SUPERCONDUCTIVITY. The Electrochemical Society Proceedings Volume 95-9.*, Reno, Nevada, 1995, 80-87.
- [3] В.Н.Полушкин, С.В.Учайкин. ВЧ усилитель сквид-магнитометра. *ИТЭ*, 1989, 1, 193-194.
- [4] V.Polushkin, S.Uchaikin, S.Knappe, H.Koch, B.David, D.Grundler. Current Phase Relation of $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ Step Edge Junction. In: *Studies of High-T_c Superconductors. Ed. by V.Narlikar. IEEE Appl. Supercond.*, 1995, 5, 2, 2790-2793.
- [5] S.Uchaikin. System for Measurements of the Current-Phase Relation in Superconducting Weak Links. *The Electrochemical Society Interface*, 1995; 4, 1, 152.
- [6] А.В.Блинов, С.В.Учайкин, Ю.С.Булышев, С.В.Серых, А.Г.Шнейдер. Сквид из керамики $PbSrCaCuO$ при $T = 77$ К. *Сверхпроводимость: физика, химия, техника*, 5, 6, 1992, 1125-1128.
- [7] S.V.Uchaikin. Measurement of Macroscopic Characteristics of High-Temperature Superconductors. In: *Actual Problems of Modern Materials. Abstracts of the First Russian-Chinese Symposium*, 1992, Tomsk, 120.
- [8] С.В.Учайкин. Формирователь мощных импульсов для криогеники. *Препринт ОИЯИ, P13-96-173*, 1996.

- [9] А.Г.Лихачёв, С.В.Учайкин. Измеритель критического тока в сверхпроводниках. *Краткие сообщения ОИЯИ*, 1995, 5(73), 77-84.
- [10] S.V.Uchaikin, E.B.Ljapina. Critical Current Meter for HTSC Ceramic. In: *Proceedings of the Fourth International Conference CRYOGENICS'96*, Praha, Czech Republic, 1996, 88-91.
- [11] V.N.Polushkin, S.V.Uchaikin. Influence of Nonlinear Behavior of High Temperature Superconductors in Magnetic Field on Signal and Noise SQUID Characteristics. In: *Collected Abstract INTERNATIONAL SYMPOSIUM MASHTEC'90 Material Science for High Technologies*, Dresden, GDR, April 24-27, 1990. 1-E01.
- [12] А.Р.Буев, Н.Л.Истомин, А.В.Сермягин, Е.А.Силаев, С.В.Учайкин. Исследование ВТСП-керамических экранов с помощью феррозондового тесламетра. *Краткие сообщения ОИЯИ*. P13-91-294, Дубна, 1991.
- [13] В.Н.Полушкин, С.В.Учайкин. Чувствительность систем на основе сверхпроводящих квантовых интерферометров. In: *Тезисы докладов Всесоюзного совещания "Проблемы теории чувствительности электронных и электромеханических систем*, Москва, 1987, 9-10.
- [14] S.V.Uchaikin, L.K.Hier. Ceramic HTSC SQUID-Based Galvanometer. *J. of Supercond.*, 5, 3, 1992, 251-254.
- [15] С.В.Учайкин. Исследование характеристик КМОП приборов при низких температурах. *Препринт ОИЯИ*, P8-96-183.
- [16] I.A.Sergeyev, S.V.Uchaikin. Electronics for Investigation of Superfluid Turbulence in Forced Flow Conditions. In: *Collected Abstract International Workshop on QUANTUM VORTICITY AND TURBULENCE IN HE II FLOWS*, Göttingen, Germany, 4-6 November 1993.
- [17] Y.Filippov, I.Sergeev, S.Uchaikin. Multichannel System for Fast Measurements of Temperatures at 1.4-4.2 K. *Cryogenics*, 34, ICEC-15 Supplement, 413-415, 1994.
- [18] Y.Filippov, A.M.Kovrizhnykh, V.I.Batin, S.Uchaikin. Tests of the Cryostat for 1,3 GHz Superconducting Cavity at 1.4-2 K. In: *Abstract Booklet of the ICEC16/ICMC*, Kitakyushu, Japan, 233, 1996.
- [19] А.Бароне, Дж.Патерно. Эффект Джозефсона: физика и применение. М.: Мир, 1984.
- [20] D.Vincent, B.Deaver. *Phys. Rev. Lett.*, 1974, 32, 212-214.
- [21] J.Peters. In: *Proceedings of the ICEC-11*. West Berlin, Germany, April, 1986, 607-611.
- [22] Z.Szücs, R.Karunanithi, U.Ruppert. In: *Proceedings of the Symposium on LOW TEMPERATURE ELECTRONICS AND HIGH TEMPERATURE SUPERCONDUCTIVITY. The Electrochemical Society Proceedings Volume 88-9*, Honolulu, USA, 1987, 537-544.
- [23] M.Mück. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 1993, 3, 3.
- [24] M.Darula, P.Scidel, F.Busse, S.Benachka, *J. of Appl. Phys.*, 1993, 74, 2674-2679.
- [25] А.П.Малоземофф. В. *Физические свойства высокотемпературных сверхпроводников*, Под ред. Д.М.Гинзберга, М.: Мир, 1990.
- [26] E.A.Harris, J.E.L.Bishop, R.L.Havill, P.J.Ward. *J.Phys.C*, 1988, 21, L673-677.
- [27] I.A.Sergeev. In: *Proceedings of the Fourth International Conference CRYOGENICS'96*, Praha, Czech Republic, 1996, 38.

Рукопись поступила в издательский отдел
18 октября 1996 года.