

**ПРИЛОЖЕНИЕ В. Методические рекомендации по определению электрофизических характеристик сверхпроводниковых структур по постоянному току с использованием оборудования УНУ**

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
НАУКИ ИНСТИТУТ РАДИОТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ  
ИМ. В.А.КОТЕЛЬНИКОВА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
(ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН)

УТВЕРЖДАЮ  
Директор ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН,  
академик РАН



С.А. Никитов  
«29» ноября 2022 г.

Методические рекомендации по определению электрофизических характеристик сверхпроводниковых структур по постоянному току с использованием оборудования УНУ

РАЗРАБОТАНО в рамках Соглашения о предоставлении из федерального бюджета гранта в форме субсидии № 075-15-2021-667 от 29 июля 2021 г. в соответствии с Техническим заданием (Прил. 9 к Соглашению, п.5.1.6.), Планом-графиком (Прил. 10 к Соглашению, состав разрабатываемых документов по п.2.4).

РЕКОМЕНДОВАНО

к утверждению

Руководитель работ,

Гл. науч. сотр, проф., д-р физ.-мат. наук

Кошелец В. П.

«29» ноября 2022 г.

## Оглавление

Введение .....	224
Область применения .....	224
Цель и назначение методических рекомендаций .....	225
Требования к проведению исследования электрофизических характеристик .....	225
Приборы и оборудование .....	226
Материалы .....	226
Методика охлаждения структур .....	227
Методика определения электрофизических характеристик сверхпроводниковых структур по постоянному току .....	230
Характерная электрическая схема подключения .....	235
Заключение .....	235

## **Введение**

Современные задачи микроэлектроники включают в себя разработку и создание сверхчувствительных детекторов миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов. Одним из наиболее чувствительных типов детекторов являются приемники на основе перехода в виде туннельной трехслойной структуры «сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник» (СИС). Туннельные СИС-переходы на основе ниобия и его соединений имеют широкий диапазон рабочих частот от 100 до 1000 ГГц и низкий уровень собственных шумов. Полный разработки детекторов на основе СИС-переходов включает в себя несколько этапов: расчеты и моделирование топологии, изготовление экспериментальных образцов, тестирование по постоянному току, тестирования на высоких частотах. В данном документе представлены методические рекомендации по определению электрофизических характеристик сверхпроводниковых структур по постоянному току с использованием оборудования УНУ.

## **Область применения**

Методические рекомендации по определению электрофизических характеристик сверхпроводниковых структур по постоянному току могут применяться при проведении исследований и испытаний микроструктур на основе сверхпроводников, как низкотемпературных (НТСП – с температурой перехода в сверхпроводящее состояние  $T_c$  ниже 20К), так и высокотемпературных (ВТСП,  $T_c > 77$  К). Данные рекомендации применимы для исследований слаботочных схем, с характерными токами через структуру до 500 мА и характерными напряжениями до 10 В. Используемые методики позволяют исследовать как отдельные сосредоточенные элементы сверхпроводниковой микроэлектроники, так и интегральные распределенные структуры, в том числе массивы элементов, например, цепочки из десятков тысяч последовательно соединенных СИС-переходов.

### **Цель и назначение методических рекомендаций**

Методика определения электрофизических характеристик сверхпроводниковых структур по постоянному току позволяет исследовать вольтамперные характеристики (ВАХ) микроструктур с низким уровнем шумов и определять ключевые электрофизические параметры таких структур, такие как:

1. критический ток СИС-перехода (массива переходов)  $I_c$ ;
2. сопротивление нормального состояния структуры  $R_n$ ;
3. критическая температура перехода в сверхпроводящее состояние  $T_c$ ;
4. щелевое напряжение СИС-перехода  $V_g$  и щелевой скачок тока  $I_g$ ;
5. параметр качества СИС-структуры – отношение «подщелевого» сопротивления СИС-перехода к сопротивлению нормального состояния  $R_j/R_n$ ;
6. зависимость критического тока СИС-перехода от приложенного магнитного поля (при наличии линии управления магнитным полем).

### **Требования к проведению процесса определения электрофизических характеристик**

Для определения электрофизических характеристик сверхпроводниковых структур по постоянному току, его воспроизводимости и повторяемости необходимы следующие условия:

- Система охлаждения структур ниже температуры перехода в сверхпроводящее состояние;
- Система электрического соединения структур к блокам измерительной электроники (источникам-измерителям постоянного тока);
- Источники-измерители по постоянному току с низким уровнем шумов;
- Персональный компьютер с программным обеспечением, обеспечивающим управление измерительной электроникой с компьютера.

## Приборы и оборудование

В рамках подготовки методических рекомендаций по определению электрофизических характеристик сверхпроводниковых структур по постоянному току с использованием оборудования УНУ было задействовано следующее оборудование, входящие в комплекс уникальной научной установки «Криоинтеграл» (далее – УНУ):

- система охлаждения на основе сосуда Дьюара с жидким гелием;
- погружная криогенная зонд-вставка для погружения в сосуд Дьюара;
- система охлаждения на основе заливного криостата производства *Infrared Lab.*, США;
- откачной стенд на основе турбомолекулярного насоса *Pfeiffer Vacuum HiCube 80*, производство Германия;
- система охлаждения на основе криорефрижератора замкнутого цикла 4,2 К *KDE415SA*, производство КНР;
- блок измерительной электроники по постоянному току (источник-измеритель) модульной сборки собственного изготовления силами организации-разработчика методики;
- измерительные платы на основе аналого-цифрового преобразования (АЦП) производства *National Instruments*, США, соединенные с блоком измерительной электроники;
- персональный компьютер с операционной системой Windows 7 и программным обеспечением собственной разработки с возможностью управлением измерительными платами АЦП.

## Материалы

При подготовке методических рекомендаций по определению электрофизических характеристик сверхпроводниковых структур по постоянному току использованы следующие материалы:

- жидкий азот при нормальных условиях;
- жидкий гелий при нормальных условиях;
- комплект соединительных кабелей.

Используемые в данных методических рекомендациях материалы нетоксичны. Жидкий азот (температура 77 К) и жидкий гелий (температура 4,2 К) являются опасными криогенными жидкостями, работать с которыми запрещается одному человеку и без соответствующего опыта работы с криогенными жидкостями.

## **Методика охлаждения структур**

В соответствии с настоящими методическими рекомендациями, охлаждение исследуемых структур до температуры около 4,2 К производится одним из трёх методов: 1. погружной метод, 2. заливной метод, и 3. метод замкнутого цикла.

### *1. Методика охлаждения методом погружения в жидкий гелий (погружной метод)*

1.1. Жидкий гелий в достаточном количестве должен находиться в сосуде Дьюара. Жидкий гелий должен быть экранирован от внешнего теплового излучения специальным «азотным экраном» - емкостью с жидким азотом. Выходной патрубком сосуда Дьюара должен иметь на выходе выходной шланг длиной не менее 30 см на основе силикона для предотвращения замерзания патрубка при активном испарении гелия. Шланг должен либо выходить на газовый потокомер, либо заканчиваться заглушкой и иметь прорезь для плавного стравливания испаренного гелия в атмосферу.

1.2. Исследуемый образец сверхпроводниковой структуры устанавливается в погружную зонд-вставку. Зонд-вставка должна иметь электрические выводы, обеспечивающие электрический контакт между структурой (при температуре 4,2 К) и блоками измерительной электроники (при комнатной температуре). Рекомендуется использовать прижимной метод контакта образца с платой зонд-вставки с применением винтов.

1.3. Зонд-вставка плавно погружается в сосуд Дьюара с визуальным и аудиальным контролем испарения жидкого гелия в процессе погружения. Погружение производится поэтапно, по 5-10 см с промежуточным ожиданием 3-5 минут. В процессе погружения испарение гелия не должно быть резким (аудиальный контроль по характерному «шипению» либо визуальный контроль по потокомеру) и не должно приводить к «замерзанию» – образованию льда на поверхности – выходного патрубка сосуда Дьюара. При замерзании патрубка необходимо замедлить скорость погружения, а при интенсивном замерзании рекомендуется обдувать патрубок горячим воздухом при помощи фена.

1.4. В зависимости от целевой температуры исследуемой структуры, остановить погружение при достижении структурой жидкого гелия (температура структуры 4,2 К) либо при достижении необходимой температуры в холодных парах гелия (выше 4,2 К).

1.5. После проведения тестирования плавно поднимать зонд-вставку, также не допуская слишком интенсивного испарения. Рекомендуется сначала приподнять зонд-вставку таким образом, чтобы структура возвысилась над поверхностью гелия на несколько сантиметров, выждать около 30 секунд для стекания жидкого гелия из полостей погружной конструкции, затем поднять зонд-вставку до упора при закрученной резьбовой заглушке на сосуде Дьюара и выждать 5-10 минут для плавного нагрева исследуемой структуры. При слишком быстром вынимании исследуемой структуры из жидкого гелия из-за резкого перепада температур образец может расколоться, что полностью уничтожает структуру.

## *2. Методика охлаждения с использованием заливного криостата (заливной метод)*

2.1. Исследуемый образец должен быть установлен на охлаждаемую поверхность заливного криостата. Качество теплового контакта структуры с охлаждаемой поверхностью подбирается в зависимости от типа исследуемой структуры (низкотемпературный либо высокотемпературный сверхпроводник).

2.2. Заливка криостата жидким гелием проводится **в строгом соответствии** с инструкцией по эксплуатации заливного криостата, **предоставленного производителем**. Необходимо предварительно прокачать вакуумную емкость криостата, рекомендуемое остаточное давление до начала охлаждения не выше  $10^{-4}$  мБар. Перед началом переливания жидкого гелия в заливной криостат необходимо произвести предохлаждение системы до температуры 77 К путем заливания жидкого азота с последующим выливанием. Заливные криостаты по конструкции бывают двух типов: с наличием «азотного экрана» и без него. При наличии азотного экрана в процессе предохлаждения рекомендуется наполнять жидким азотом сначала емкость экрана, затем основную емкость, предназначенную для дальнейшей заливки жидкого гелия. Рекомендуется контролировать наличие азота в азотном экране как в процессе заливки криостата жидким гелием, так и в процессе всего исследования, при необходимости – доливать жидкий азот в экран.

2.3. После проведения заливки криостата жидким гелием в соответствии с инструкцией от производителя, рекомендуется выждать в течение 30 минут – 1 часа для достижения полного охлаждения массивных элементов система и выхода на рабочую температуру.

2.4. После окончания исследования необходимо дождаться полного испарения жидкого гелия и, при наличии, азота из криостата, и дальнейшего естественного нагревания системы до комнатной температуры. Для ускорения процесса отогрева допускается напустить в вакуумный объём криостата небольшое количество газообразного гелия.

*3. Методика охлаждения методом с использованием криорефрижератора замкнутого цикла (метод замкнутого цикла).*

3.1. Исследуемый образец должен быть установлен на охлаждаемую поверхность системы охлаждения замкнутого цикла. Качество теплового контакта структуры с охлаждаемой поверхностью подбирается в зависимости от типа исследуемой структуры (низкотемпературный либо высокотемпературный сверхпроводник).

3.2. Методика запуска и остановки системы криорефрижератора проводится **в строгом соответствии** с инструкцией по эксплуатации криостата замкнутого цикла, **предоставленного производителем.**



## Методика определения электрофизических характеристик сверхпроводниковых структур по постоянному току

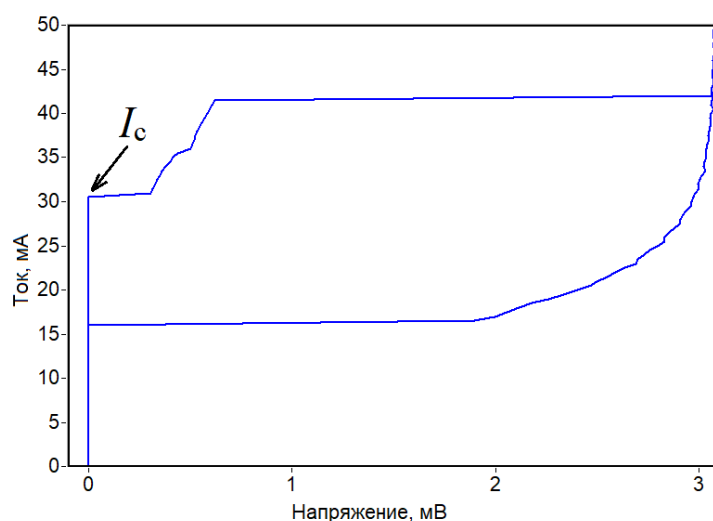
При определении любых электрофизических характеристик сверхпроводниковых структур по постоянному току требуется измерение вольтамперной характеристики структуры либо контроль конкретного параметра по постоянному току, например, сопротивления структуры. При измерении ВАХ и определении параметров рекомендуется использовать 4-х точечную схему подключения, которая в обобщённом виде представлена в следующем разделе (рисунок 1). При такой схеме задание тока и измерение напряжения производится через независимые провода с использованием независимых источника и измерителя.

Далее приведены методики определения наиболее часто встречающихся электрофизических характеристик сверхпроводниковых структур по постоянному току.

### 1. Критический ток $I_c$ СИС-перехода, массива переходов

1.1. Необходимо измерить ВАХ структуры в режиме задания тока смещения и с независимым измерением напряжения (по 4-х точечной схеме).

1.2. Критический ток структуры определяется непосредственно из ВАХ и является током резкого перехода структуры в нормальное состояние. Пример показан на рисунке ниже.

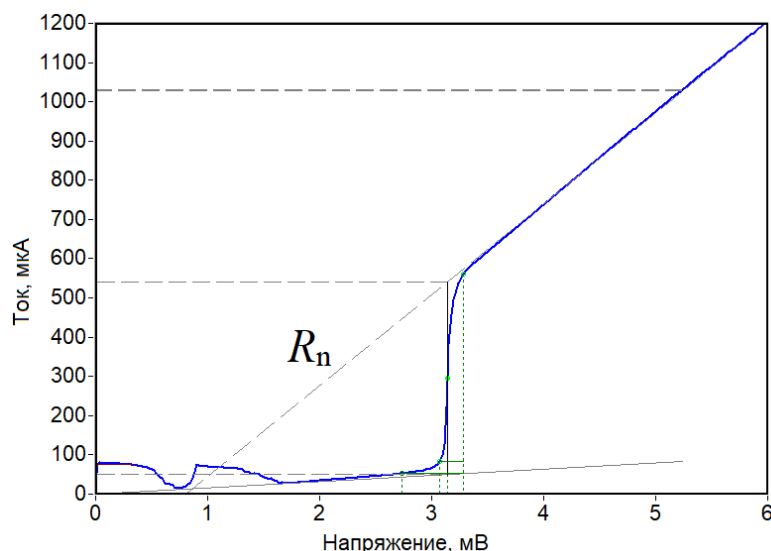


Пример определения  $I_c$  для распределенного СИС-перехода.  
В данном случае  $I_c = 30,5$  мА.

## 2. Сопротивление нормального состояния структуры $R_n$

2.1. Необходимо измерить ВАХ структуры по 4-х точечной схеме измерения. Режим задания (тока либо напряжения) не имеет значения для данной характеристики.

2.2. Сопротивление нормального состояния структуры определяется непосредственно из ВАХ как наклон характеристики на нормальной ветви. Пример показан на рисунке ниже.



Пример определения  $R_n$  для СИС-перехода площадью около  $3 \text{ мкм}^2$ .  
В данном случае  $R_n = 4,32 \text{ Ом}$ .

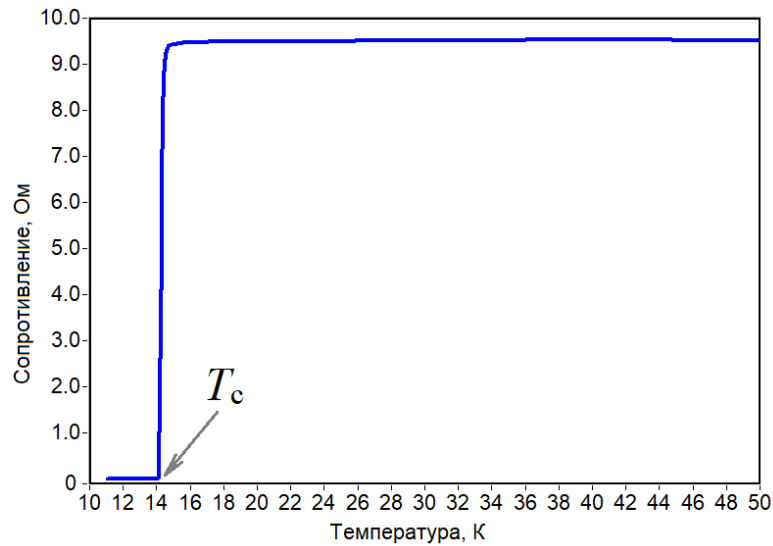
## 3. Критическая температура перехода в сверхпроводящее состояние $T_c$ ;

3.1. Необходимо иметь термометр, установленный в непосредственном контакте с исследуемой структурой либо в непосредственной близости с качественным тепловым контактом со структурой и обеспечивающий постоянный контроль температуры структуры.

3.2. Необходимо подключить структуру к цифровому мультиметру в режиме измерения сопротивления по 4-х точечной схеме.

3.3. Необходимо обеспечить плавное и медленное охлаждение структуры с постоянным контролем сопротивления и температуры структуры, с частотой измерения не реже 1-го измерения в секунду и не чаще 3-х измерений в секунду.

3.4. Температура перехода в сверхпроводящее состояние  $T_c$  определяется в момент резкого падения сопротивления тестируемой структуры. Пример показан на рисунке ниже.

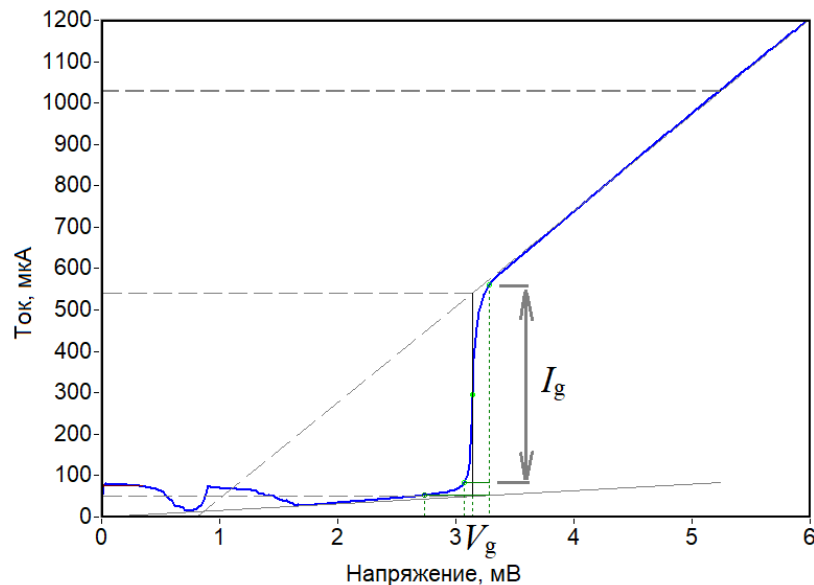


Пример определения  $T_c$  для пленки NbN толщиной 320 нм.  
В данном случае  $T_c = 14,2$  К.

#### 4. Щелевое напряжение СИС-перехода $V_g$ и щелевой скачок тока $I_g$ ;

4.1. Необходимо измерить ВАХ структуры по 4-х точечной схеме в режиме задания напряжения смещения. Альтернативный метод – измерить обратную ветвь ВАХ (от высокого тока до нуля) структуры по 4-х точечной схеме в режиме задания тока.

4.2. Щелевое напряжение определяется как напряжение, при котором происходит резкое изменение тока через переход, а само изменение тока является скачком тока. Пример показан на рисунке ниже.



Пример определения  $V_g$  и  $I_g$  для СИС-перехода площадью около 3  $\mu\text{м}^2$ .  
В данном случае  $V_g = 3,14$  мВ,  $I_g = 491$  мкА.

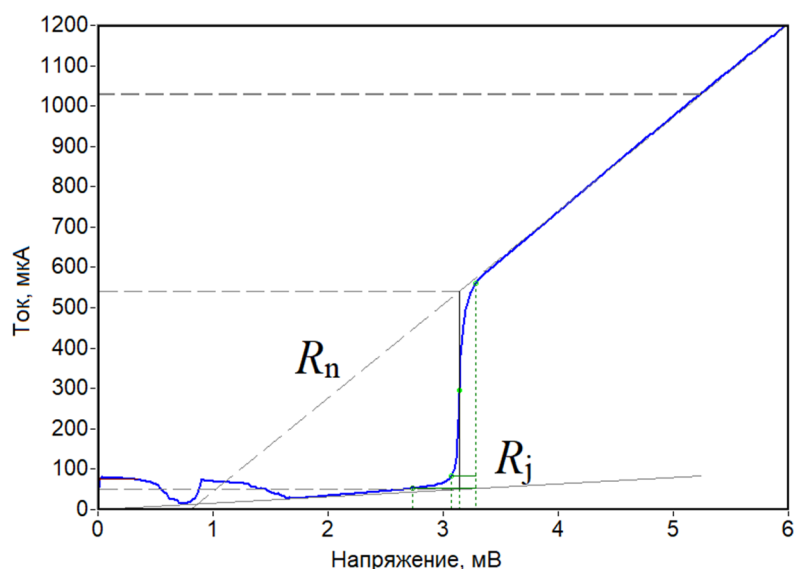
5. Параметр качества СИС-структуры – отношение «подщелевого» сопротивления СИС-перехода к сопротивлению нормального состояния  $R_j/R_n$

5.1. Необходимо измерить ВАХ структуры по 4-х точечной схеме в режиме задания напряжения смещения. Альтернативный метод – измерить обратную ветвь ВАХ (от высокого тока до нуля) структуры по 4-х точечной схеме в режиме задания тока.

5.2. Сопротивление нормального состояния описано в п. 2 данного раздела рекомендаций.

5.3. «Подщелевое» сопротивление СИС-перехода определяется токами утечки при напряжениях ниже щелевого и вычисляется непосредственно из ВАХ в области возле  $V_g$  и ниже него.

5.4 Параметр качества определяется как отношение двух сопротивлений. Пример показан на рисунке ниже.



Пример определения  $R_j/R_n$  для СИС-перехода площадью около 3 мкм<sup>2</sup>.  
В данном случае  $R_j/R_n = 14,4$ .

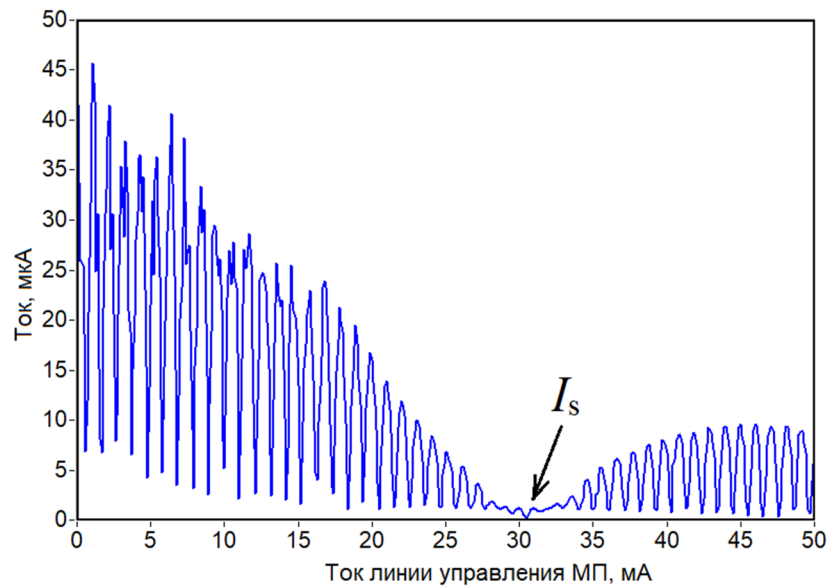
6. Зависимость критического тока СИС-перехода от приложенного магнитного поля (при наличии линии управления магнитным полем)

В случаях, когда критический ток СИС-перехода необходимо подавлять для уменьшения шумов и влияния паразитных эффектов, проектируют специальную линию управления магнитным полем. В простейшем случае в качестве линии управления может

выступать соленоид, в который вставлена исследуемая структура. Также в качестве линии управления может выступать нижний электрод линии передачи исследуемой структуры, через который пропускается постоянный ток  $I_M$ .

4.1. Необходимо задать рабочую точку на ВАХ, близкую по величине тока к критическому току структуры, в режиме задания напряжения.

4.2. Зависимость критического тока от приложенного магнитного поля измеряется непосредственным образом путем пропускания тока через линию управления магнитным полем и измерения значения тока через структуру. Зачастую такая зависимость измеряется для определения значения тока в линии управления магнитным полем  $I_s$ , который способствует максимальному подавлению критического тока. Пример зависимости с определением  $I_s$  показан на рисунке ниже.



Пример зависимости критического тока двойного СИС-перехода суммарной площадью около  $1,5 \text{ мкм}^2$  от приложенного магнитного поля. В данном случае  $I_s = 30,5 \text{ мА}$ .

## Характерная электрическая схема подключения

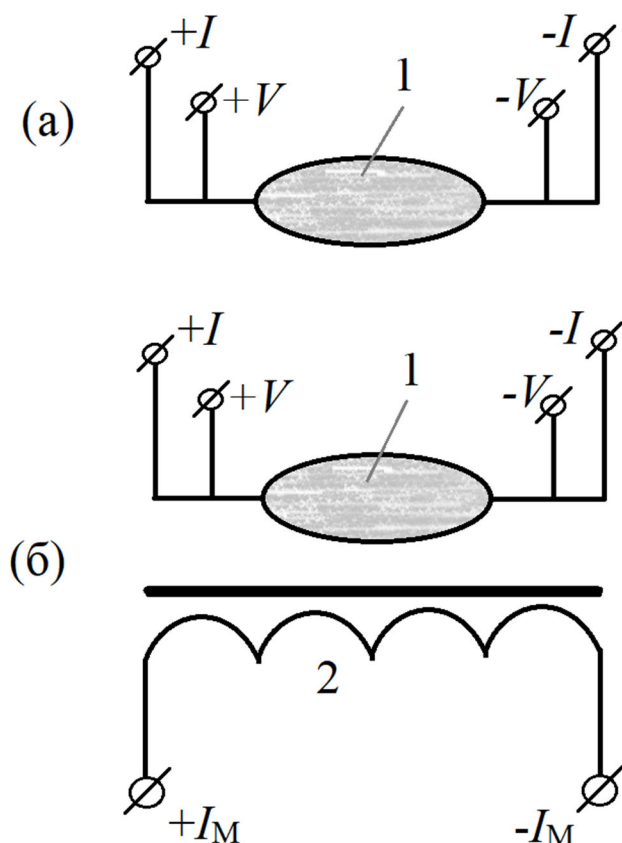


Рисунок В.1 – Характерная 4-х точечная схема подключения исследуемой структуры к системе измерения по постоянному току (а) без линии управления магнитным полем, (б) с линией управления магнитным полем. 1 – исследуемая сверхпроводниковая структура; 2 – линия управления магнитным полем.

## Заключение

Описанные методические рекомендации по определению электрофизических характеристик сверхпроводниковых структур по постоянному току позволяют проводить тестирование достаточно широкого спектра различных сверхпроводниковых структур по многим электрофизическим параметрам, измеряемым непосредственно по постоянному току либо определяемым из характеристик по постоянному току. К таким структурам относятся как высокотемпературные, так и низкотемпературные сверхпроводники на основе ниобия и его соединений; как одиночные элементы, так и массивы элементов, состоящие из цепочек последовательно или параллельно соединенных элементов.