

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж. Методические рекомендации по определению электрофизических характеристик сверхпроводниковых структур при воздействии внешних сигналов СВЧ 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» декабря 2022 г.

Методические рекомендации по определению электрофизических характеристик сверхпроводниковых структур при воздействии внешних сигналов СВЧ 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.5.1.8.), Планом-графиком (Прил. 10 к Соглашению, состав разрабатываемых документов по п.2.9).

РЕКОМЕНДОВАНО

к утверждению

Руководитель работ,

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


Кошелец В. П.

«29» декабря 2022 г.

Оглавление

Введение	265
Область применения	265
Цель и назначение методических рекомендаций	266
Требования к проведению исследования электрофизических характеристик	266
Приборы и оборудование	267
Материалы.....	268
Методика охлаждения структур	269
Рекомендации по обеспечению воздействия сигнала СВЧ на исследуемые сверхпроводниковые структуры и определению электрофизических характеристик структур при данном воздействии.....	272
Характерная электрическая схема подключения	277
Заключение.....	277

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 при воздействии внешних сигналов СВЧ с использованием оборудования УНУ.

Область применения

Методические рекомендации по определению электрофизических характеристик сверхпроводниковых структур при воздействии внешних сигналов СВЧ 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, со сравнительно слабыми сигналами СВЧ характерной мощностью до 1 мВт. 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 при воздействии внешних сигналов СВЧ позволяет исследовать вольтамперные характеристики (ВАХ) микроструктур под воздействием накачки от внешних источников, основанных на принципиально различных типах работы – таких как распределенный джозефсоновский переход на НТСП, массив последовательных джозефсоновских переходов в кристалле на ВТСП, умножителя СВЧ на диоде Шоттки, лампы обратной волны (ЛОВ), а также выходные характеристики микроструктур на СВЧ.

Требования к проведению процесса определения электрофизических характеристик

Для определения электрофизических характеристик сверхпроводниковых структур при воздействии внешних сигналов СВЧ, их 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;
- Источник (набор источников) СВЧ достаточной мощности для воздействия на исследуемые структуры;
- Персональный компьютер с программным обеспечением, обеспечивающим управление измерительной электроникой (опционально – источниками СВЧ) с компьютера.

Приборы и оборудование

В рамках подготовки методических рекомендаций по определению электрофизических характеристик сверхпроводниковых структур при воздействии внешних сигналов СВЧ 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;
- набор усилителей сигналов СВЧ диапазона 0,1-1 ГГц на основе транзисторов на высокой подвижности электронов;
- набор усилителей сигналов СВЧ диапазона 4-8 ГГц на основе транзисторов на высокой подвижности электронов;
- экспериментальный образец источника на основе распределенного джозефсоновского перехода Nb/AlN/NbN собственного изготовления силами организации-разработчика методики с использованием технологического оборудования «Криоинтеграл»;
- экспериментальный образец источника СВЧ на основе ВТСП-монокристаллической структуры $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$, лабораторного изготовления Нанкинского Университета, КНР;

-- источник на основе ЛОВ с управляющей электроникой отечественного производства (г. Нижний Новгород);

-- источник на основе умножителя СВЧ на диоде Шоттки, модель *FS-Z* производства фирмы *RPG*, входящей в концерн *Rohde & Schwarz*, Германия;

-- прецизионный синтезированный генератор сигналов *E8257D* производства *Keysight Technologies*, США;

-- анализатор спектра СВЧ диапазона 3 Гц - 26,5 ГГц модель *E4440A* производителя *Agilent*, США, в настоящий момент *Keysight Technologies*, США.

Материалы

При подготовке методических рекомендаций по определению электрофизических характеристик сверхпроводниковых структур при воздействии внешних сигналов СВЧ использованы следующие материалы:

- жидкий азот при нормальных условиях;
- жидкий гелий при нормальных условиях;
- комплект соединительных кабелей по постоянному току;
- комплект СВЧ 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 был 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 системы 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 объем 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.**

Рекомендации по обеспечению воздействия сигнала СВЧ на исследуемые сверхпроводниковые структуры и определению электрофизических характеристик структур при данном воздействии

При определении электрофизических характеристик сверхпроводниковых структур при воздействии внешних сигналов СВЧ в большинстве случаев требуется измерение вольтамперной характеристики структуры либо контроль конкретного параметра по постоянному току, например, тока накачки при воздействии внешнего сигнала СВЧ. 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.

1. Рекомендации по обеспечению воздействия сигнала СВЧ на исследуемые сверхпроводниковые структуры с использованием источников конкретного типа.

1.1 Воздействие источника на основе распределенного джозефсоновского перехода на НТСП

1.1.1 Источник на основе распределенного джозефсоновского перехода рекомендуется выполнять на основе структур Nb/AlO_x/Nb либо Nb/AlN/NbN и располагать на единой интегральной микросхеме с исследуемой СИС-структурой посредством микрополосковой линии передачи.

1.1.2. Для задания рабочих параметров источника по постоянному току рекомендуется использовать 4-х точечную схему подключения, полностью аналогичную схеме подключения исследуемой СИС-структуры (рисунок 1), с независимыми проводами для источника тока и измерителя напряжения.

1.1.3. Для осуществления независимого задания рабочей точки по постоянному току на исследуемой СИС-структуре и на источнике рекомендуется использовать в составе микрополосковой линии передачи разрыв по постоянному току в верхнем электроде и щелевую антенну в нижнем электроде.

1.1.4. Частоту генерации распределенного джозефсоновского перехода f необходимо вычислять по соотношению Джозефсона $f = V \times 483,6 \text{ ГГц/мВ}$, где V – постоянное напряжение на переходе в данной рабочей точке (далее – рабочее напряжение).

1.1.5. Устанавливать рабочее напряжение на распределенном джозефсоновском переходе необходимо путем задания двух параметров: тока смещения через переход и магнитного поля. Магнитное поле рекомендуется устанавливать посредством специальной линии управления магнитным полем, спроектированной в нижнем электроде распределенного джозефсоновского перехода.

1.1.6. Выходную мощность генерации при фиксированной частоте генерации, соответствующей фиксированному рабочему напряжению, необходимо изменять путем изменения тока смещения при одновременном изменении магнитного поля

1.2. Воздействие источника на основе массива последовательных джозефсоновских переходов в кристалле на ВТСП

1.2.1. Источник на основе массива последовательных джозефсоновских переходов в кристалле $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ рекомендуется устанавливать системе охлаждения, независимой (отдельной) с системой охлаждения исследуемой структуры во избежание избыточного теплового влияния источника на исследуемую структуру.

1.2.2. При размещении источника в одной системе охлаждения вместе с исследуемой структурой необходимо использовать дополнительные инфракрасные фильтры и тепловые развязки между источником и структурой для минимизации теплового влияния на структуру.

1.2.3. Для задания рабочих параметров по постоянному току источника рекомендуется использовать 4-х точечную схему подключения, полностью аналогичную схеме подключения исследуемой СИС-структуры (рисунок 1), с независимыми проводами для источника тока и измерителя напряжения.

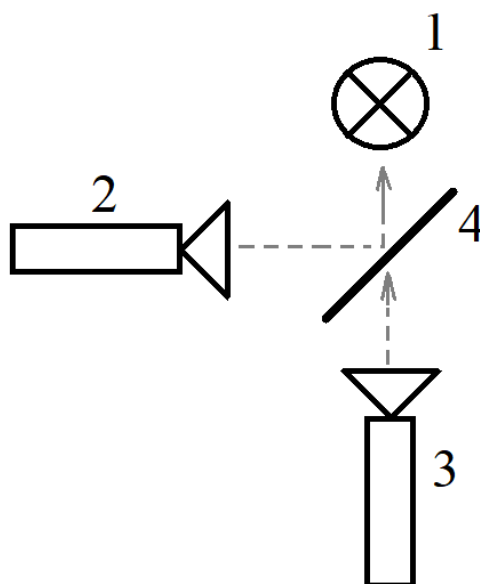
1.3. Воздействие источника на основе умножителя СВЧ на диоде Шоттки

1.3.1. При работе с коммерческим (промышленным) источником основе умножителя СВЧ на диоде Шоттки необходимо руководствоваться инструкцией по эксплуатации от производителя. В частности, необходимо соблюдать регламентированную производителем

последовательность действий при подключении питания по постоянному току, при подаче на вход сигнала СВЧ.

1.3.2. Рекомендуется устанавливать источник на основе умножителя СВЧ вне системы охлаждения исследуемой сверхпроводниковой структуры и заводить излучение источника через квазиоптический тракт с учетом материала входного окна системы охлаждения.

1.3.3. В случае необходимости подачи на исследуемую СИС-структуру, помимо сигнала источника СВЧ, другой сигнал на высокой частоте (например, в случае гетеродинного детектирования, когда источник СВЧ является опорным генератором гетеродина), рекомендуется заводить два сигнала СВЧ посредством делителя луча, установленного под углом 45 градусов к лучам каждому из источников. Примерная схема такого оптического тракта показана на рисунке ниже.



Пример схемы заведения сигнала СВЧ от двух независимых источников к приемной системе квазиоптическим методом. 1 – детектор (смеситель); 2 – источник СВЧ №1 (гетеродин); 3 – источник СВЧ №2; 4 – делитель луча.

1.4. Воздействие источника на основе лампы обратной волны

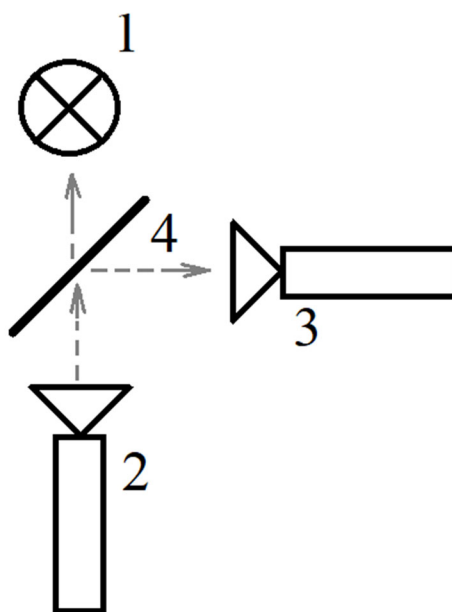
1.4.1. При работе с источником основе ЛОВ необходимо **строго руководствоваться инструкцией по эксплуатации от производителя**. В частности, необходимо соблюдать регламентированную производителем последовательность действий при подключении питания катода, при подаче замедляющего высоковольтного напряжения. При

регламентированном жидкостном охлаждении ЛОВ необходимо обеспечить данный тип охлаждения и контролировать циркуляцию охлаждающей жидкости в процессе работы.

1.4.2. Устанавливать источник на основе ЛОВ необходимо вне системы охлаждения исследуемой сверхпроводниковой структуры и заводить излучение источника через квазиоптический тракт с учетом материала входного окна системы охлаждения структуры.

1.4.3. В выходном тракте ЛОВ рекомендуется использовать рупорную антенну.

1.4.4. Для компенсации неравномерности амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) ЛОВ рекомендуется ответвлять часть мощности на независимый (вспомогательный) детектор для введения дальнейших поправок на неравномерность при обработке результатов исследований. Для ответвления части мощности рекомендуется использовать делитель луча, установленный под углом 45 градусов к источнику и вспомогательному детектору. Примерная схема такого оптического тракта показана на рисунке ниже.

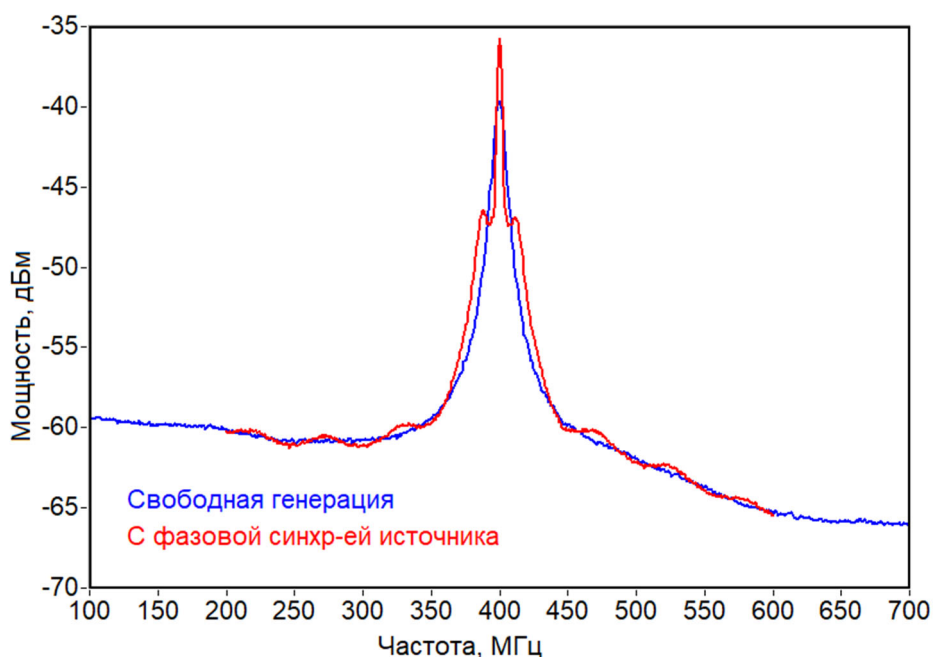


Пример схемы для ответвления части мощности сигнала ЛОВ на вспомогательный детектор для учета неравномерности АЧХ ЛОВ. 1 – исследуемая структура (смеситель либо прямой детектор); 2 – источник на основе ЛОВ; 3 – вспомогательный детектор; 4 – делитель луча.

2. Рекомендации по исследованию выходных характеристик СВЧ исследуемых структур.

При определении выходных характеристики микроструктур на СВЧ необходимо обеспечение достаточного усиления в выходном тракте для измерения этого тракта при помощи анализатора спектра. Рекомендуется использовать охлаждаемые и неохлаждаемые усилители СВЧ (рисунок 1 б) на основе транзисторов на высокой подвижности электронов. Запись спектров СВЧ рекомендуется производить при помощи коммерческого (промышленного) анализатора спектра, имеющего динамический диапазон не ниже 60 дБ.

Пример выходного тракта СВЧ в диапазоне 100-700 МГц показан на рисунке ниже.



Пример измеренного спектра СВЧ выходного тракта СИС-смесителя при подаче на СИС-смеситель сигнала распределенного джозефсоновского перехода на частоте 500 ГГц и опорного сигнала на частоте 20 ГГц от прецизионного генератора сигналов. Измеренный спектр есть результат свертки сигнала источника на частоте 500 ГГц и 25-й гармоники сигнала на частоте 20 ГГц. В тракте СВЧ использованы усилители диапазона 0-1 ГГц на основе транзисторов на высокой подвижности электронов. Спектр измерен как в режиме свободной (автономной) генерации без дополнительной синхронизации (синяя кривая), так и с фазовой синхронизацией источника к опорному сигналу (красная кривая).

Характерная электрическая схема подключения

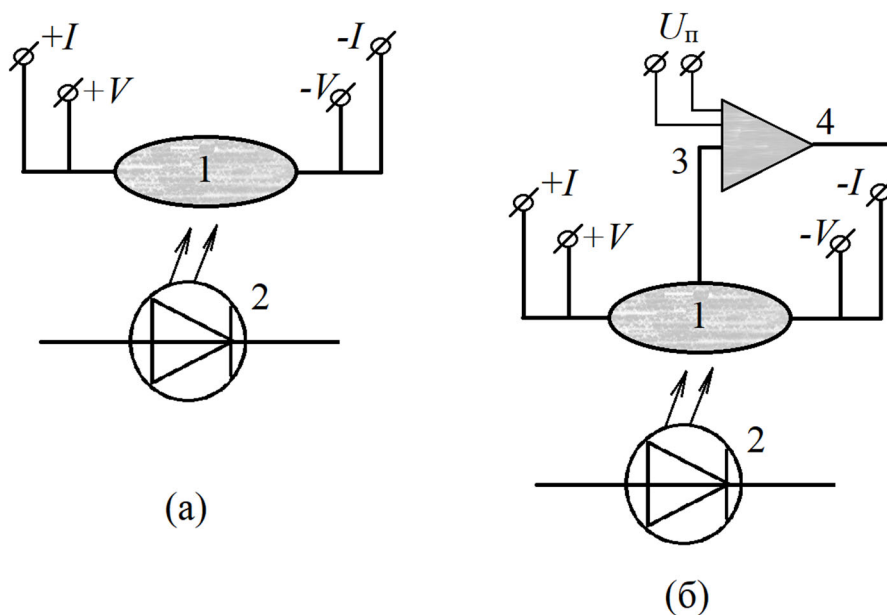


Рисунок Ж.1 – Характерная 4-х точечная схема подключения исследуемой структуры к системе измерения по постоянному току (а) с воздействием сигнала СВЧ от внешнего источника без выходного тракта СВЧ, (б) с воздействием сигнала СВЧ от внешнего источника с исследованием выходного тракта СВЧ. 1 – исследуемая сверхпроводниковая структура; 2 – источник СВЧ; 3 – вход усилителя СВЧ; 4 – выход усилителя СВЧ; $U_{\text{п}}$ – напряжение питания усилителя СВЧ. Линия управления магнитным полем в исследуемой структуре (при наличии) на схеме не указана.

Заключение

Описанные методические рекомендации по определению электрофизических характеристик сверхпроводниковых структур при воздействии внешних сигналов СВЧ позволяют проводить тестирование достаточно широкого спектра различных сверхпроводниковых структур под воздействием накачки от внешних источников, основанных на принципиально различных типах работы – таких как распределенный джозефсоновский переход на НТСП, массив последовательных джозефсоновских переходов в кристалле на ВТСП, умножителя СВЧ на диоде Шоттки, лампы обратной волны (ЛОВ), а также исследовать выходные характеристики микроструктур на СВЧ. К таким структурам относятся как ВТСП-структуры, так и НТСП-структуры на основе ниобия и его соединений; как одиночные элементы, так и массивы элементов, состоящие из цепочек последовательно или параллельно соединенных элементов.