

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
национальный исследовательский университет

Вопрос по выбору к экзамену по основам современной физики:

Генератор гетеродина на основе  
распределённого джозефсоновского перехода

Выполнили студенты 3 курса ФФКЭ:  
Атепалихин Артемий Алексеевич, группа 854,  
Водзяновский Яромир Олегович, группа 852,  
инженеры лаб. 234 ИРЭ РАН

Долгопрудный, 2021 г.

# Содержание

<b>1. Основные понятия и аббревиатуры</b>	<b>2</b>
<b>2. Описание работы</b>	<b>2</b>
2.1. Задача исследования . . . . .	2
2.2. Общая информация . . . . .	2
<b>3. СИС - контакт</b>	<b>3</b>
<b>4. Принцип гетеродинирования</b>	<b>4</b>
<b>5. Физика работы РДП</b>	<b>6</b>
5.1. Общая теория РДП . . . . .	6
5.2. Режимы работы . . . . .	7
5.2.1. Генерация ступенями Фиске . . . . .	8
5.2.2. Режим flux-flow . . . . .	8
5.3. Накачка детектора . . . . .	8
<b>6. Эксперимент</b>	<b>10</b>
6.1. Установка . . . . .	10
6.2. План . . . . .	12
6.3. Результаты . . . . .	13
<b>7. Выводы</b>	<b>14</b>

## 1. Основные понятия и аббревиатуры

- SIS - superconductor-insulator-superconductor  
(СИС - сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник)
- FFO - flux-flow oscillator  
(РДП - распределённый джозефсоновский переход)
- СВЧ - сверхвысокие частоты
- Эффект Джозефсона (стац.)
- Джозефсоновский переход
- Режим flux-flow
- Ступени Фiske

## 2. Описание работы

### 2.1. Задача исследования

Основными целями являются:

- 1) Приведение краткого теоретического описания принципа работы РДП
- 2) Демонстрирование результатов экспериментального исследования одного из изготовленных в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН образцов

### 2.2. Общая информация

Используемый в качестве генератора гетеродина распределённый джозефсоновский переход является важнейшей частью одного из возможных вариантов устройств, способных излучать и принимать в ТГц и субТГц диапазонах, внимание к которым многократно возросло за последние пару десятилетий. Приёмники, работающие свыше нескольких сотен ГГц, крайне необходимы для целого ряда направлений современной науки: от медицины и биологии до аэрологии и астрофизики. Стоит отметить, что сказанное выше не является красивыми возможностями и грандиозными планами: сверхпроводниковые гетеродинные приёмники ТГц излучения уже довольно долго и очень активно используются в наземных, воздушных и космических миссиях (подр. - [5])

### 3. СИС - контакт

В основе описываемого далее метода приёма СВЧ сигнала лежит *джозефсоновский контакт* - два сверхпроводниковых элемента, имеющие слабую связь, которая в нашем случае организована путем нанесения тонкого слоя диэлектрика ( $\pm 10$  нм) между ними. Схема СИС-контакта приведена на рисунке 1.

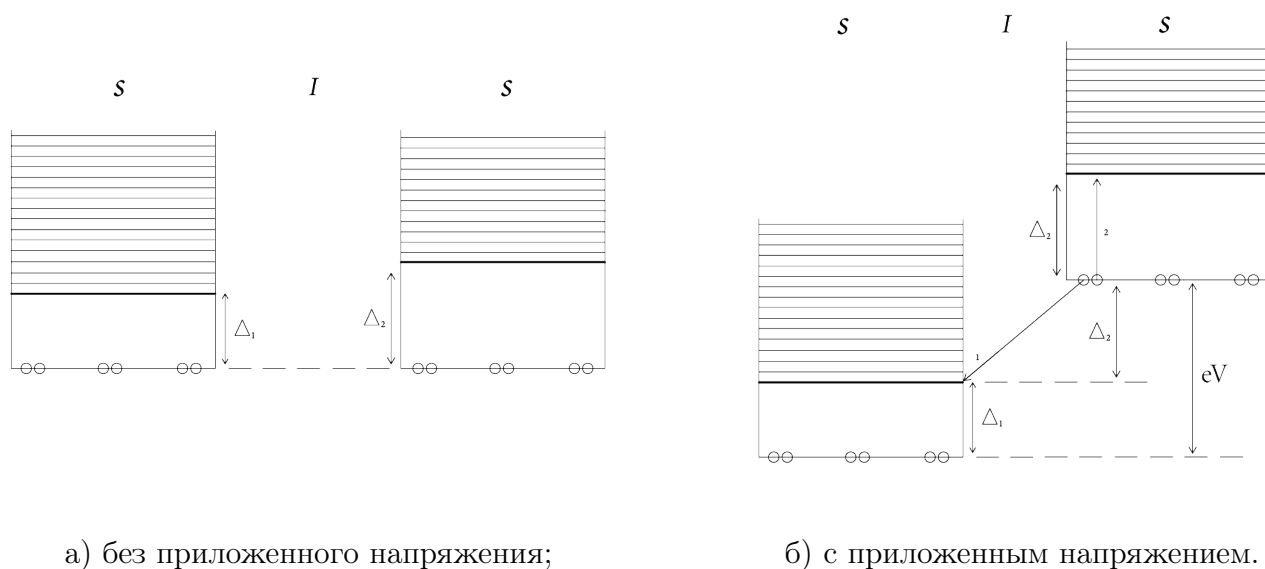


Рис. 1: Энергетические диаграммы контакта SIS

В случае слабой связи двух сверхпроводников кроме туннелирования электронов, образовавшихся в результате разрыва куперовских пар, могут туннелировать сами пары даже без приложенного напряжения. Такой поток зарядов называется джозефсоновским током; его плотность определяется некоторой константой  $j_c$  и разницей фаз волновых функций куперовских пар в двух сверхпроводниках. Данный эффект называется стационарным эффектом Джозефсона.

## 4. Принцип гетеродинирования

**Гетеродинирование** - это процесс, в котором сильный монохроматический сигнал гетеродина (LO) и слабый интересующий сигнал (s) накладываются на детектор с нелинейной кривой ВАХ. Из-за нелинейности в смесителе генерируется много суммарных и разностных частот:

$$|nF_s - mF_{LO}| \quad (1)$$

**Смеситель** (в нашем случае) - трёх-портовое устройство, принимающее на вход исследуемый сигнал (s) и сигнал гетеродина (LO), а на выходе выдает промежуточный сигнал (IF). (рис. 3)



Рис. 2: Схема смесителя

Пусть сигналы s и LO выглядят следующим образом:

$$V_{LO} = V_{LO} \sin(2\pi F_{LO}t), \quad V_s = V_s \sin(2\pi F_s t) \quad (2)$$

Будем полагать, что в SIS смесителе нелинейный ВАХ имеет следующую зависимость:

$$I = aV^2 \quad (3)$$

Отсюда, путем подстановки суммы выражений (2) в (3):

$$I = a(V_s + V_{LO}) = \dots + aV_s V_{LO} (\cos[2\pi(F_s - F_{LO})t] - \cos[2\pi(F_s + F_{LO})t]) \quad (4)$$

Из уравнения выше видно, что ток детектора имеет спеткральные компоненты на частотах  $F_s \pm F_{LO}$ . Выходящий сигнал IF будет иметь амплитуду пропорциональную входящему сигналу s, но сниженным по частоте  $F_{IF} = F_s - F_{LO}$ .

На рис. 3 представлена иллюстрация принципа работы смесителя. Будут присутствовать две полосы справа (Upper sideband) и слева (Lower sideband) от частоты гетеродина.

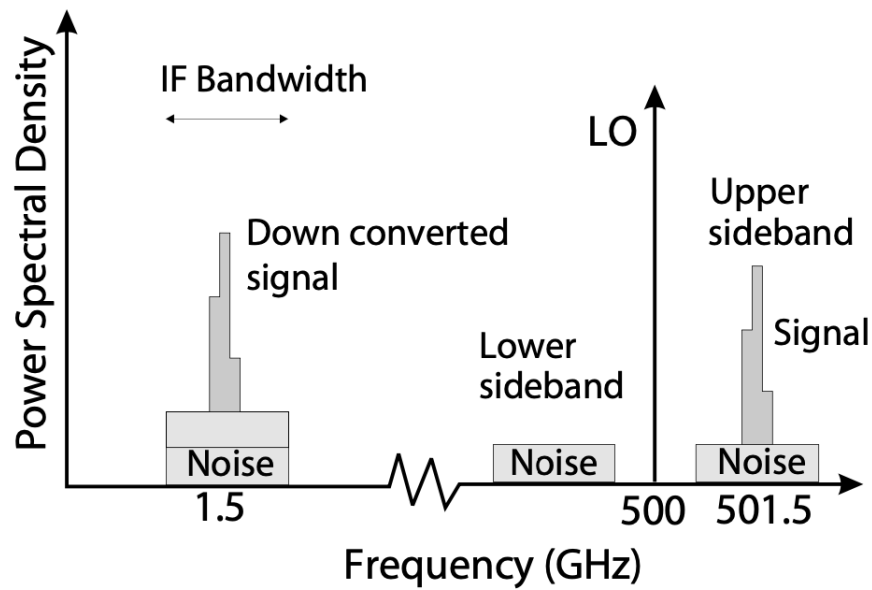


Рис. 3: Иллюстрация принципа гетеродирования.  $F_{LO} = 500\text{GHz}$ ,  $F_{IF} = 1.5\text{GHz}$

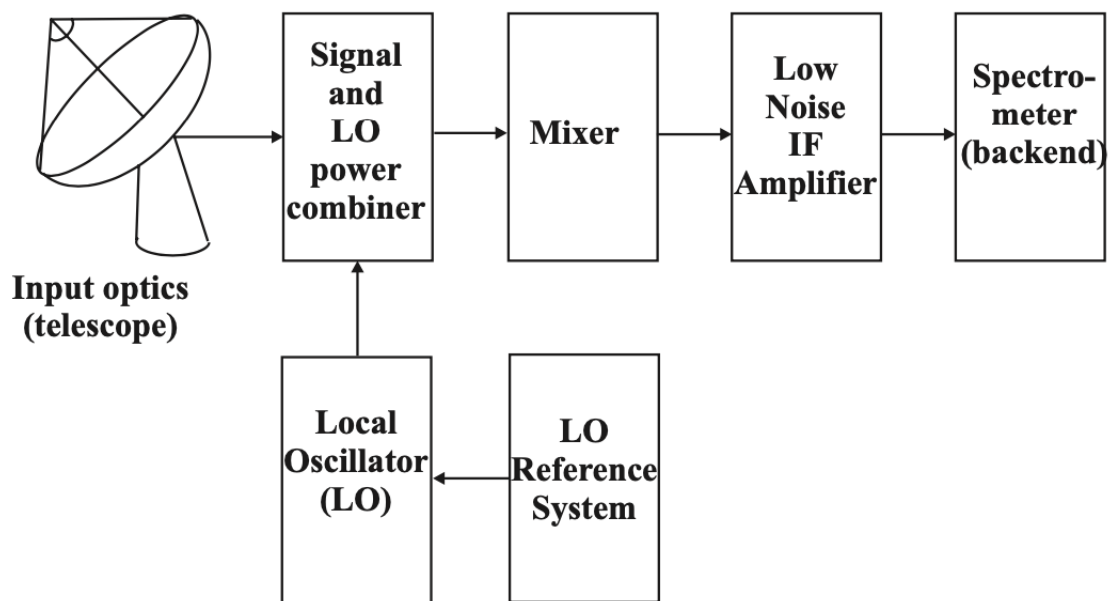


Рис. 4: Блок схема полного процесса детектирования сигнала

## 5. Физика работы РДП

### 5.1. Общая теория РДП

В качестве РДП используются переходы на основе туннельных структур  $Nb/AlO_x/Nb$  и  $Nb/AlN/NbN$  геометрии «overlap» (перевод с англ. – частичное перекрытие, совмещение) с поперечным заданием тока смещения  $I_B$ . Характерная длина РДП составляет 300 – 700 мкм при ширине  $W$  от 3 до 20 мкм. Величина критической плотности тока  $j_c$  лежит в диапазоне  $2 - 10 A/c^2$ , что соответствует джозефсоновской глубине проникновения магнитного поля  $\lambda_J \approx 8 - 2$  мкм. Для структур  $Nb/AlO_x/Nb$  «целевое напряжение»  $V_g \approx 2.8$  мВ, в то время как для структур  $Nb/AlN/NbN$   $V_g \approx 3.7$  мВ при  $T=4.2$  К.

В РДП под действием силы Лоренца, создаваемой магнитным полем и транспортным током, называемого током смещения  $I_B$ , движутся джозефсоновские вихри – флаксоны. Каждый такой вихрь содержит квант магнитного потока  $\Phi_0 = h/2e$ , а его размер составляет порядка  $2\lambda_J$  вдоль оси перехода и  $2\lambda_L$  в перпендикулярном плоскости туннельного слоя направлении, где  $\lambda_L$  - глубина лондоновского проникновения поля в электроды. Типичное значение  $\lambda_L$  для пленок ниобия, используемое в расчетах, составляет 90 нм.

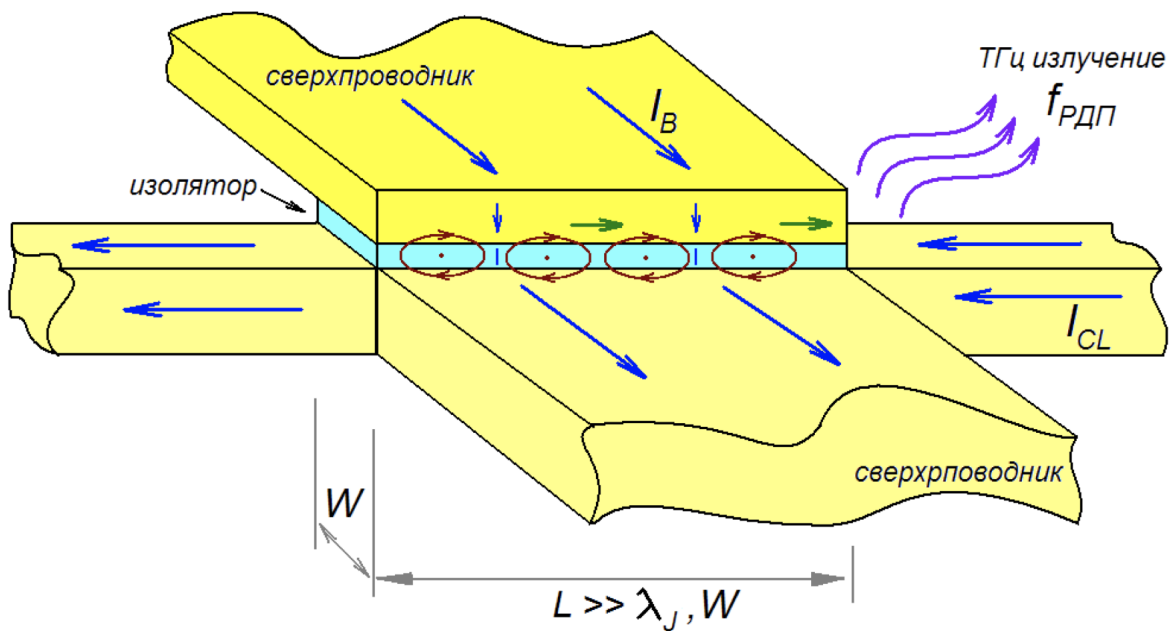


Рис. 5: Геометрия РДП

Для создания магнитного поля на концах РДП используется линия управления магнитным полем с током  $I_{CL}$ , конструктивно представляющая собой нижний сверхпроводящий электрод из ниобия (рис. 5). Кванты магнитного потока, двигаясь по переходу под действием силы Лоренца, достигают края и излучают электромагнитную волну в микрополосковую линию, соединенную с переходом через трансформатор импеданса, который необходим для согласования микрополосковой линии и имеющего низкий импеданс РДП.

Таким образом, переход при напряжении  $V$  генерирует электромагнитные колебания с частотой  $f$ , определяемой соотношением Джозефсона (5) (порядка 483.6 ГГц/мВ).

$$hf_{\text{РДП}} = 2eV_{\text{РДП}} \quad (5)$$

Скорость и плотность потока флаксонов, и, следовательно, мощность и частоту излучения можно перестраивать путем изменения тока смещения или/и магнитного поля.

## 5.2. Режимы работы

Из-за особенностей материалов изготовления образцов область приёма сигнала ограничена  $\sim 150$  ГГц снизу и  $\sim 700$  ГГц сверху, причём в разных диапазонах приём осуществляется разными механизмами.

Будем полагать, что внешнее магнитное поле  $H > H_{c1}$

$$H_{c1} = \frac{\Phi_0}{\pi\Lambda\lambda_J}, \quad (6)$$

где  $\Lambda$  - магнитная толщина барьера.

Регулировать режим работы будет параметр затухания  $\alpha$ , который имеет физический смысл нормальной проводимости туннельного барьера на единицу длины перехода. На ВАХ (рис. 6) видно, что есть граничное напряжение  $V_{JSC}$  в котором параметр  $\alpha$  испытывает скачек и режим работы меняется.

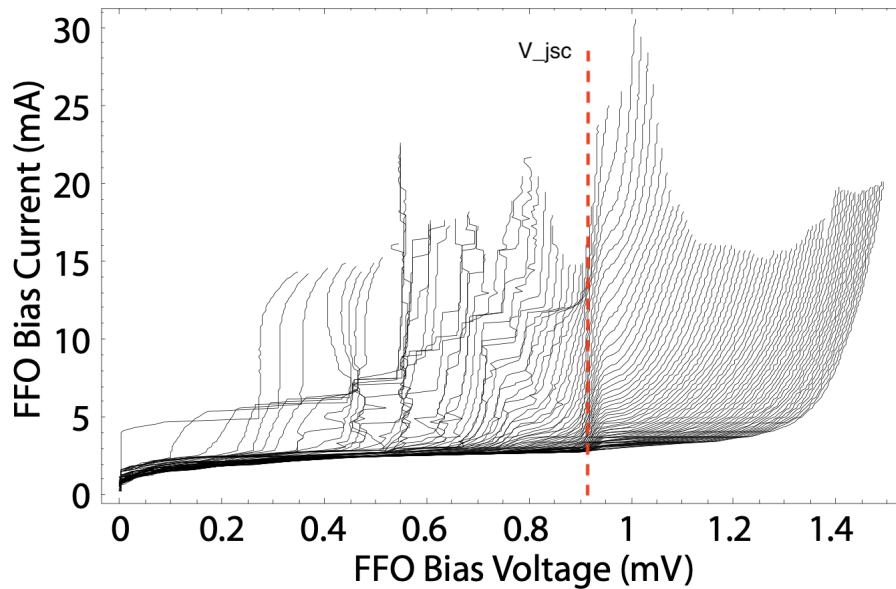


Рис. 6: Пример ВАХ РДП, с обозначенным напряжением  $V_{JSC}$  скачка параметра  $\alpha$

Рассмотрим следующие случаи:



### 5.2.1. Генерация ступенями Фиске

Рассмотрим ситуацию, когда напряжение  $V < V_{JSC}$ .

При столкновении кванта магнитного потока с краем перехода часть электромагнитного излучения отражается обратно, при этом отраженная волна может в случае малого  $\alpha$  достигнуть противоположного края. Тогда возникают стоячие волны, которые при определенных резонансных частотах облегчают вхождение в переход флаксонов, в результате чего ВАХ имеют ярко выраженную резонансную структуру. Чем меньше затухание, тем острее резонансные пики и круче структура ВАХ, которую называют ступенями Фиске. Часть флаксонов покидают переход, они вызывают изменение тока и напряжения таким образом, что их энергия конвертируется в Э-М излучение.

См. [4]

### 5.2.2. Режим flux-flow

Рассмотрим ситуацию, когда напряжение  $V > V_{JSC}$ .

Форма ВАХ становится более плавной, наклон кривых уменьшается (дифференциальное сопротивление увеличивается), что облегчает непрерывную перестройку рабочей частоты РДП, но увеличивает его полосу излучения. Такой режим является истинным «флакс-флоу» режимом (от англ. Flux-flow - вязкий поток вихрей), описываемым в работах без учета стоячей волны, т.е. где не был реализован резонансный режим.

См. [4]

## 5.3. Накачка детектора

После получения высокочастотной электромагнитной волны необходимо её принять. Для передачи сигнала была сконструирована специальная схема, показанная на рисунке 7. Детектором в ней является сосредоточенный джозефсоновский переход - обычный СИС.

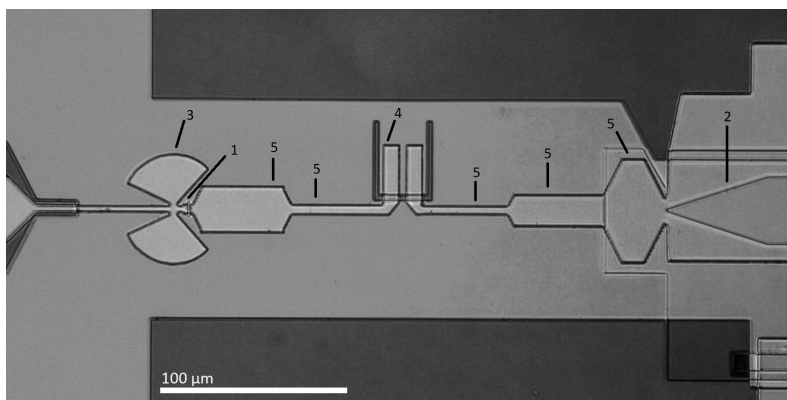


Рис. 7: Схема микрополосковой линии для исследования характеристик РДП. 1 - SIS переход; 2 - РДП; 3 - Radial stab; 4 - DC-break; 5 - микрополосковые линии.

Электромагнитная волна, пришедшая к детектору, воздействует на электроны в валентной зоне верхнего сверхпроводящего электрода, см. рис. 8. Получивший энергию  $\hbar\omega$  электрон теперь способен преодолеть барьер  $\Delta_1 + \Delta_2$  даже без приложенного напряжения.

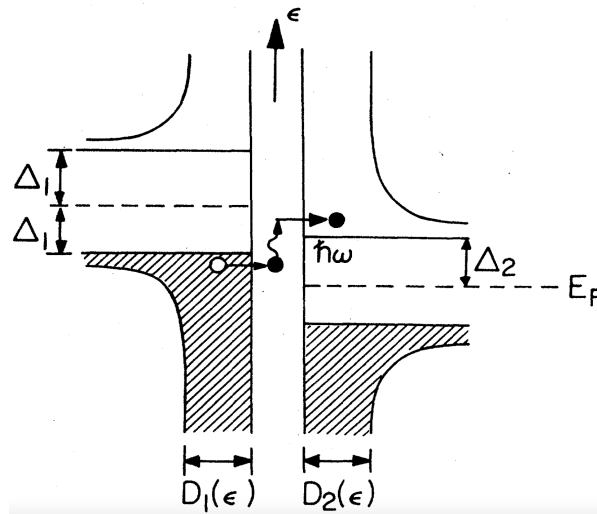


Рис. 8: Энергетическая диаграмма SIS перехода

В общем случае условие туннелирования электрона из валентной зоны одного сверхпроводника в зону проводимости второго выглядит следующим образом (см. [3]):

$$eV + \hbar\omega \geq \Delta_1 + \Delta_2 \quad (7)$$

Результат такого эффекта отражается на ВАХ СИС-перехода (рисунок 9): сплошная кривая является ненакаченной характеристикой, пунктирная - под воздействием электромагнитного сигнала частотой  $\omega$ . Джозефсоновский ток подавлен магнитным полем.

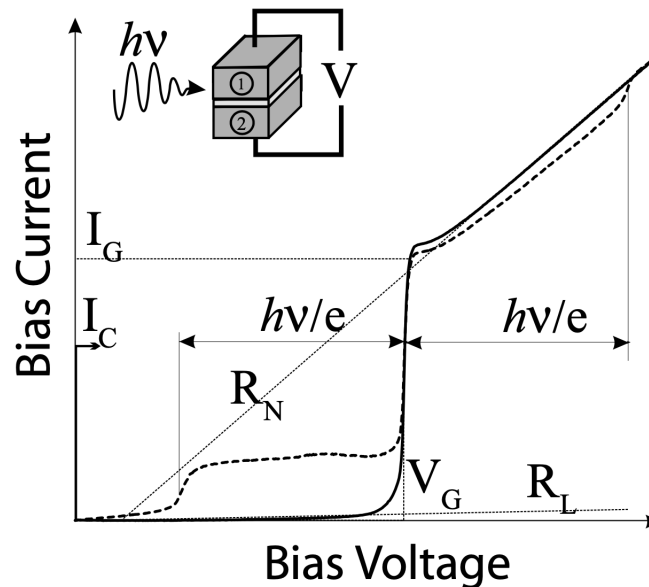


Рис. 9: ВАХ SIS-перехода

## 6. Эксперимент

### 6.1. Установка

Для осуществления перехода ниобиевых плёнок в сверхпроводящий режим необходимо охладить образец (рис. 11.а) как минимум до 9,25К ( $T_C$  Nb). Для этого чип помещается в специальный держатель (рис. 11.б), который с помощью соединительных проводов (рис. 12.а) подключает образец к измерительным блокам необходимым образом. Далее в защитном корпусе плата с чипом опускается в дьюар с гелием (рис. 10, 12.б), где происходит охлаждение до 4,2К, т.к. это температура кипения гелия. После этого можно приступать к измерениям.

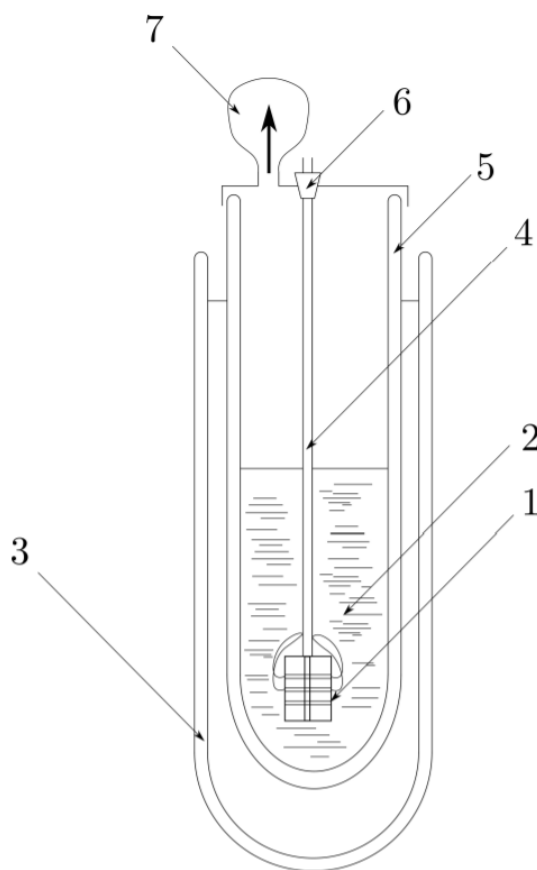
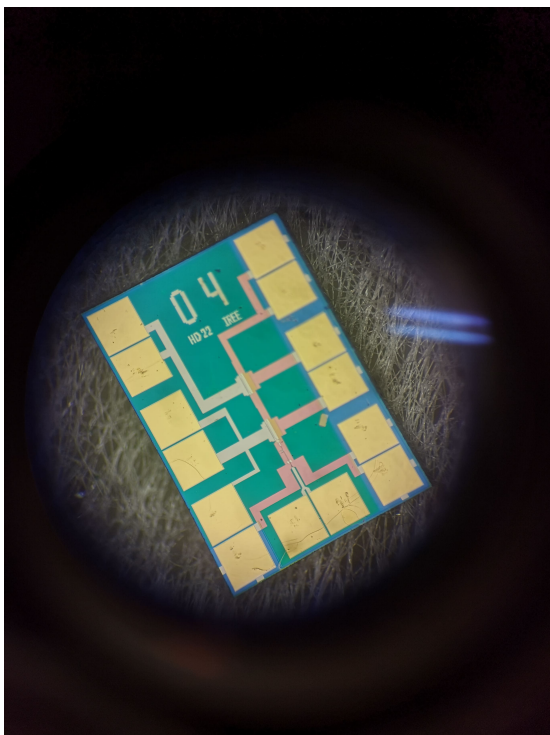
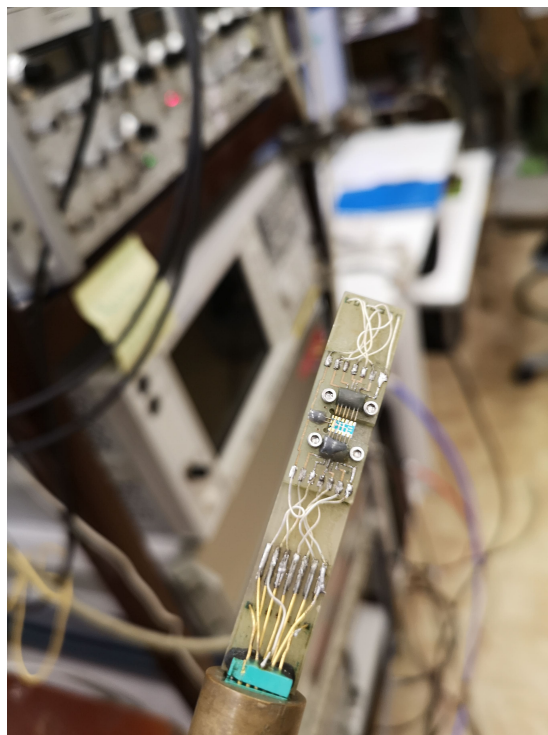


Рис. 10: схема измерительной установки.

- 1 - цилиндр с образцом, помещённый в жидкий гелий;
- 2 - гелий;
- 3 - внешняя стенка сосуда (дьюара);
- 4 - т.н. “макалка” - металлическая трубка с соединительными проводами внутри;
- 5 - внутренняя стенка сосуда, отделена от внешней вакуумом;
- 6 - фиксатор глубины погружения цилиндра;
- 7 - индикатор испарения гелия (резиновая груша).

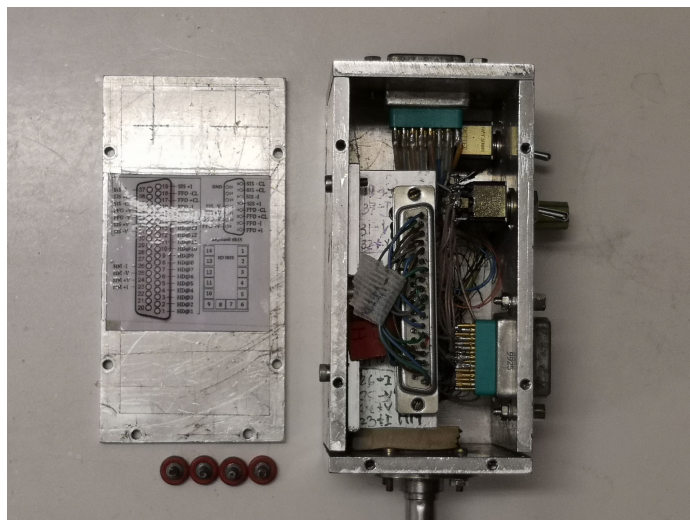


а) Фото образца

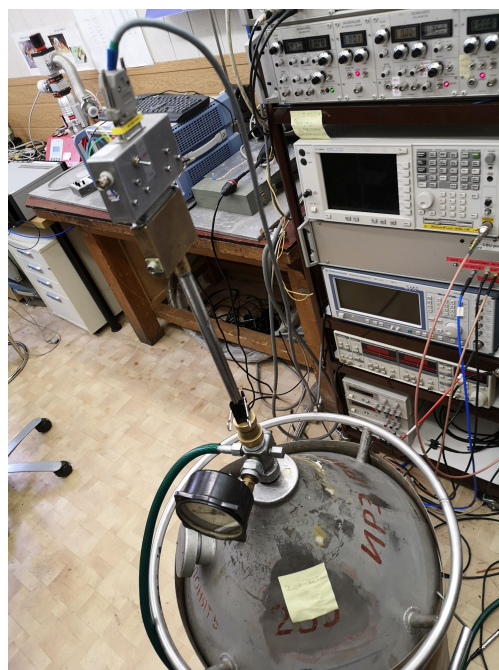


б) Держатель с электродами

Рис. 11: Исследуемый образец



а) Элемент соединения образца с измерительной установкой



б) Дьюар с опущенным образцом

Рис. 12: Исследуемый образец

## 6.2. План

В рамках работы по исследованию свойств и параметров схем согласования, а также для изучения свойств шунтирования СИС-переходов было поставлено множество опытов с конкретной последовательностью действий:

- выбирается структура, имеющая согласование РДП и СИС (как на рис. 7)
- подходящий чип подключается нужным образом и опускается охлаждаться в гелий (рис. 12)
- измеряется ВАХ СИС-перехода без воздействия высокочастотного сигнала со стороны РДП, подтверждается исправность детектора
- на РДП подаётся наименьшее значение тока смещения, измеряется его ВАХ - на графике появляется первая (слева) кривая, см. рисунок 13  
с постоянным шагом увеличивая ток  $I_{CL}$ , задающий поле, добавляется всё больше кривых на характеристику
- параллельно снятию ВАХ на РДП измеряется величина тока накачки на смесителе - она откладывается по третьей оси (чем краснее цвет точки, тем больше  $I_{pump}$ )
- на ВАХ детектора (рисунок 14) появляется несколько накаченных кривых, соответствующих разным частотам излучения ФФО  
выбор значения частоты, для которого записывается очередная кривая, осуществляет измерительный алгоритм
- далее ведутся работы по обработке полученных данных, которые не рассматриваются в настоящем обсуждении



### 6.3. Результаты

Полученные графики: ВАХ РДП с отложенным по третьей оси относительным значением тока накачки (рисунок 13) и ВАХ СИС с явно выраженными кривыми под воздействием сигнала РДП и без него (рисунок 14):

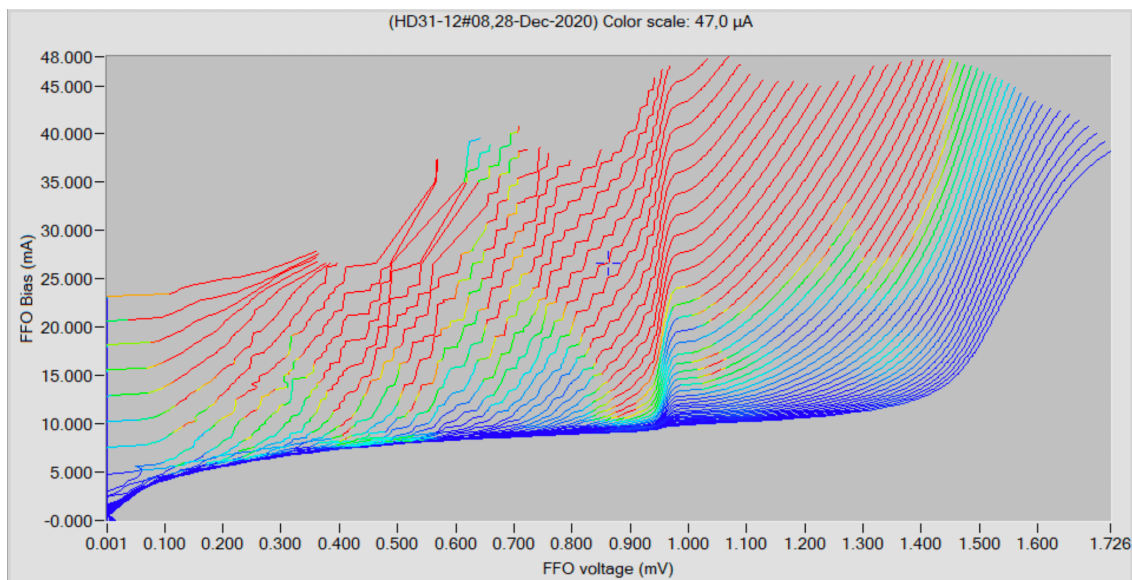


Рис. 13: ВАХ РДП

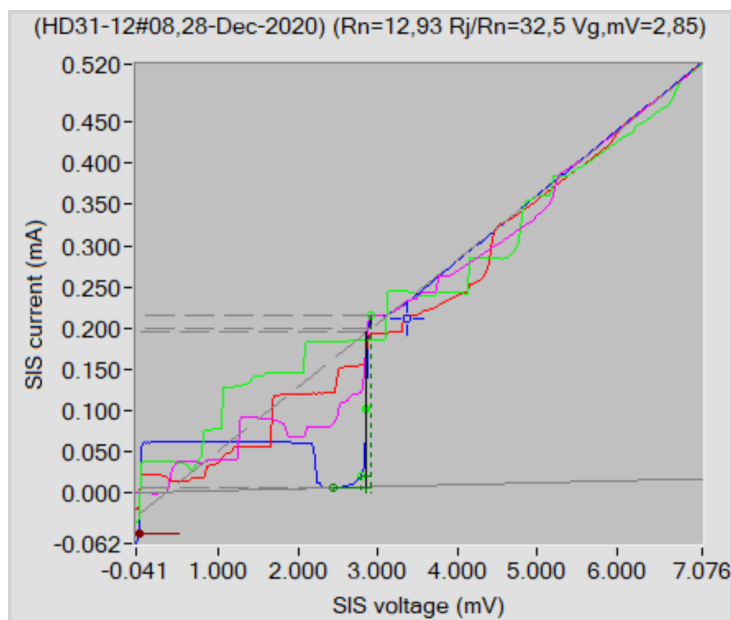


Рис. 14: ВАХ СИС

*Ступень на малых напряжениях исходной кривой (без накачки, син.) связана с эффектами крит.тока и не является результатом воздействия СВЧ сигнала от РДП*

## 7. Выводы

В ходе проделанной работы мы получили следующие результаты:

- краткое введение в физику джозефсоновский переходов;
- описание принципов и целей гетеродинамирования;
- поверхностное описание работы РДП:
  - принцип генерации СВЧ сигнала;
  - режим ступеней Фiske;
  - режим флэкс-флоу;
  - процесс накачки СИС-детектора;
- данные, полученные в одном из поставленных экспериментов.

По полученным экспериментальным данным можно судить о том, что изложенная теория отлично воплощена на практике, исследуемые образцы обладают ожидаемым функционалом и полностью готовы к использованию в тех или иных целях.

## Список литературы

- [1] Шмидт В.В., Введение в физику сверхпроводников, М.: МЦНМО, 2000
- [2] Лихарёв К.В., Введение в динамику джозефсоновских переходов, М.: Наука, 1985
- [3] Tucker J.R., Feldman M.J., Quantum detection at millimeter wavelengths, New York: Reviews of Modern Physics, 1985
- [4] Barychev A.M, SIS THz mixer integrated with a superconducting FFO, GrafiMedia Groningen: Bedrijf RuG, 2005
- [5] Кинёв Н.В., Генерация и прием ТГц излучения с использованием сверхпроводниковых интегральных устройств, М.: МФТИ, 2012
- [6] Глазков В.Н., Энергетические диаграммы для квазичастотного тока в контактах сверхпроводников. Эффект Джозефсона., М.: МФТИ, 2017
- [7] Атепалихин А.А., Туннелирование электронов через потенциальный барьер. Контакты типа NIN, SIN, SIS, М.: МФТИ, 2021