

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Московский физико-технический институт  
(национальный исследовательский университет)»  
Физтех-школа физики и исследований им. Ландау  
Направление подготовки: 03.04.01 Прикладные математика и физика

Высокочастотная спектроскопия Nb-Co-Nb-Co-Nb-Al *split-ring*  
резонатора для исследования зависимости кинетической  
индуктивности от внешних условий

(магистерская работа)

Выполнил  
студент 6 курса М02-306е группы  
Фрадкин Борис Васильевич

подпись \_\_\_\_\_

Научный руководитель  
д.ф.-м.н. Столяров Василий Сергеевич

подпись \_\_\_\_\_

консультант  
д.ф.-м.н. Сидоренко Анатолий  
Сергеевич

подпись \_\_\_\_\_

# Содержание

<b>1. Обзор литературы</b>	<b>3</b>
1.1. Кинетическая индуктивность .....	3
1.2. Общие сведения о спектроскопии .....	4
1.2.1. Помехи при измерениях .....	5
1.2.2. Подходы к устранению помех .....	5
1.3. Цели и задачи исследования, их актуальность .....	6
<b>2. Методика и техника эксперимента</b>	<b>6</b>
2.1. Технологии в спектроскопии при криогенных температурах.....	6
2.2. Методики измерений для разных типов образцов .....	7
2.3. Схема измерительной установки .....	7
<b>3. Структура образца</b>	<b>16</b>
3.1. Интерес исследования и теоретическая модель материала.....	16
3.2. Магнетронное напыление образцов.....	20
<b>4. Описание СВЧ экспериментов</b>	<b>23</b>
4.1. Измерения сверхпроводящего ниобиевого SRR .....	23
4.2. Измерения гибридного Nb/Co/Nb/Co/Nb/Al SRR.....	28
<b>5. Обсуждение результатов опытов и выводы.</b>	<b>30</b>
<b>Заключение</b>	<b>37</b>
<b>Список литературы</b>	<b>38</b>

# 1. Обзор литературы

## 1.1. Кинетическая индуктивность

Кинетическая индуктивность характеризует вклад в энергию электрического тока за счет кинетической энергии носителей тока, в дополнение к энергии магнитного поля (которая характеризуется магнитной или геометрической индуктивностью) [24, 7, 19]:

$$F_K = \int n \frac{mv^2}{2} dV = \frac{L_K I^2}{2},$$

где интеграл берется по объёму проводника,  $n$ ,  $m$ ,  $v$  – концентрация, масса и скорость носителей тока,  $L_K$  – кинетическая индуктивность,  $I$  – полный ток в проводнике.

Как правило, кинетической индуктивностью можно пренебречь по сравнению с геометрической индуктивностью, из-за малости кинетической энергии электронов по сравнению с электромагнитной энергией. Однако на оптических частотах и в случае сверхпроводника это уже не так. Например, для достаточно тонких сверхпроводящих проволок и нанослоёв кинетическая индуктивность может давать заметный или даже определяющий вклад в индуктивность [2].

Короткий сигнал переменного тока вызывает напряжение, которое зависит от кинетической индуктивности:

$$E = L_K \frac{dI}{dt}$$

Это связано с тем, что носители заряда двигаются по инерции, так как обладают массой. С уменьшением плотности носителей кинетическая индуктивность растёт в связи с тем, что для поддержания прежнего тока меньше носителей должны иметь большую скорость [14]. В сверхпроводниках кинетическая индуктивность участка проводника длиной  $l$  и сечением  $A$  может быть посчитана по формуле полной кинетической энергии куперовских пар:

$$\frac{1}{2} (2m_e v^2) (n_s l A) = \frac{1}{2} L_K I^2$$
$$L_K = \frac{-1}{e} \left( \frac{dI}{dt} \right)^{-1} \frac{dp_s}{dt} = \frac{-m}{e} \frac{dv_2}{dl}$$

Так как концентрация  $n_s$  куперовских пар зависит от температуры ( $T$ ), то в рамках теории Гинзбурга — Ландау кинетическая индуктивность будет зависеть от температуры  $L_K(T) = L_K(0)(1 - T/T_c)^{-1}$ , где  $T_c$  – критическая температура перехода в нормальное состояние.

В данной работе предполагается исследовать кинетическую индуктивность тонких гибридных  $S/F$  наноструктур и её зависимость от внешних параметров.

## 1.2. Общие сведения о спектроскопии

Измерение кинетической индуктивности представляет интерес для наноэлектроники ввиду возможности ее использования для конструирования новых приборов и устройств [11, 3, 1]. Сверхпроводники, наряду с обычной геометрической индуктивностью, обладают при температурах ниже температуры сверхпроводящего перехода  $T_c$  также дополнительной – кинетической индуктивностью, обусловленной движением куперовских пар. Она становится сопоставимой по величине с геометрической индуктивностью для низкоразмерных сверхпроводников – тонких нитей и тонких пленок. В некоторых устройствах таких, как, например, искусственные нейроны на основе сверхпроводников, кинетическая индуктивность может играть значительную роль благодаря возможности изменять ее внешним воздействием – изменением температуры или внешнего магнитного поля. В частности, она может менять режим работы нейрона, используя искусственный синапс, кинетическую индуктивность и импеданс которого можно регулировать при работе устройства в зависимости от внешнего магнитного поля. В связи с этим развитие методики для изучения кинетической индуктивности является важной научной задачей.

Высокочастотная спектроскопия – это физическое исследование, в котором ищут параметры материала, взаимодействующие с переменными полями электромагнитного сигнала. В данном исследовании нет разделения на процедуры воздействие, взаимодействие, считывание, потому что один и тот же сигнал как оказывает воздействие на образцы, так и несёт информацию о результате взаимодействия. Когда вблизи некоторого материала распространяется электромагнитная волна или протекает переменный ток, часть электрической или магнитной энергии может передаваться материалу. В случае магнетиков переменное магнитное поле возбуждает колебания магнитных моментов, а в случае электромагнитных резонаторов возникает электромагнитная индукция, при которой через проводник в резонаторе протекает электрический ток.

### 1.2.1. Помехи при измерениях

Сигнал переменного тока или электромагнитную волну подают при помощи так называемого векторного анализатора цепей (VNA). Электромагнитная волна генерируется клистроном, исходит из одного порта VNA и распространяется по волноводам к другому порту. На пути волны устанавливают образец на держателе, отчего волна рассеивается и дальше распространяется в большом телесном угле. В процессе рассеяния мощность сигнала падает. Устройство выдаёт отношение амплитудно-фазовых характеристик отправленной волны и полученной. У VNA различают сигнал отражения  $S_{11}$  и сигнал передачи  $S_{21}$ .

Когда для спектроскопии используют переменный ток, образец устанавливают на линию передачи волны. В качестве проводников электромагнитного сигнала используют либо копланарные волноводы (CPW), либо микрополоски (MS). Эти проводящие линии отличаются расположением сигнальной линии и земли относительно диэлектрической подложки – у CPW между линией и землёй зазор, потому что они на одной стороне подложки. При данной конфигурации эксперимента волна теряет мощность, но не рассеивается.

Электромагнитная волна при распространении теряет мощность и, чем выше частота исходящего сигнала, тем больше расходуется мощность волны. Основной причиной потери энергии при подаче переменного тока является нагрев линии передачи. В связи с тем, что ток пропускают по медному проводу, он испытывает электросопротивление меди даже при криогенных температурах.

### 1.2.2. Подходы к устранению помех

Под нормировкой в спектроскопических исследованиях понимают вычитание нормирующих значений из данных измерений образцов. Нормирующие значения составляют контрольный спектр, полученный при измерении системы без образца. Он несёт в себе информацию о резонансных фоновых поглощениях и шумах в системе. Фоновый спектр образуется при прохождении СВЧ сигнала через коаксиальные кабели, соединения, аттенюаторы, сверхпроводящие вч-линии внутри рефрижератора растворения и MS на держателе для образца.

### 1.3. Цели и задачи исследования, их актуальность

Целью данной работы было установление контролируемого изменения кинетической индуктивности сверхпроводящего образца путем изменения внешних условий – температуры или магнитного поля.

Для достижения поставленной цели были сформулированы необходимые для этого задачи:

- выбор материалов,
- выбор конструкции сверхпроводящего образца,
- выбор или разработка методики измерения параметров образца и его кинетической индуктивности.

Актуальность данного исследования обусловлена необходимостью создания сверхпроводящих базовых элементов для конструирования искусственных нейронных сетей и сверхпроводниковых синапсов с регулируемыми параметрами (кинетической индуктивностью, импедансом).

## 2. Методика и техника эксперимента

### 2.1. Технологии в спектроскопии при криогенных температурах

В сверхпроводящих технологиях широко используют ферромагнетики. Существует необходимость определять магнитные свойства некоторых сплавов и образцов, содержащих ферромагнитные элементы. Среди методов определения магнитных свойств ферромагнетиков выделяют статические и динамические. Динамические методы позволяют определить частоту прецессии магнитного момента во внешнем поле, намагниченность насыщения и поле анизотропии. Для проведения динамических измерений используют VNA, который регистрирует поглощение мощности электромагнитного сигнала при его передаче или отражении. Исследование, в котором используют VNA, называется ФМР спектроскопией. Низкотемпературное исследование проводится при размещении образцов в рефрижераторе растворения. Криогенные температуры позволяют снизить влияние шумов на измерение ферромагнетиков.

## 2.2. Методики измерений для разных типов образцов

Многослойный SRR представлял собой гетероструктуру с чередующимися слоями металлов Nb-Co-Nb-Co-Nb-Al и имел форму двух разделённых концентрических колец с разрывами по разные стороны относительно их середины.

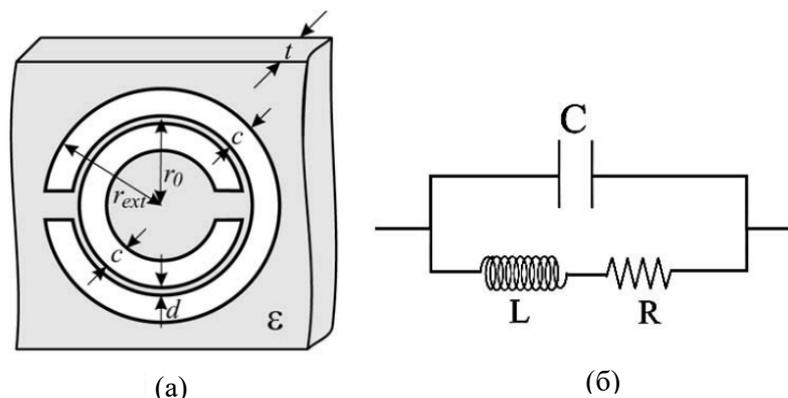


Рисунок 1 – Схематическое изображение *split-ring resonator* (а) и его эквивалентная электрическая схема (б).  $L = L_K + L_g$  (сумма кинетической и геометрической индуктивностей SRR),  $C = C_{eq}$  (эквивалентная ёмкость SRR),  $R$  – омическое сопротивление SRR.

В рефрижераторе растворения нет возможности поставить образец на держатель, не меняя внешних условий, поэтому измерения контрольного спектра проводят при условиях, близких условиям наблюдения искомых явлений в образце. В нашем случае измерения проводили при температуре, близкой критической  $T_c$  гетероструктуры Nb/Co/Nb/Co/Nb/Al, которая была предварительно измерена и равна 5,6 К.

Для работы с экспериментальными данными составлены инструменты в среде Python, а сама техника эксперимента находится в процессе развития и освоения. С этой целью была изучена литература по измерениям SRR из чистого Nb, аппроксимации резонансных спектров, измеренных при помощи VNA, и получению аналитической формулы для резонансной частоты SRR [9, 15, 12].

## 2.3. Схема измерительной установки

Рефрижератор растворения BlueFors (криостат) обеспечивает непрерывное охлаждение при температурах ниже 300 мК. Достижимые температуры в криостате < 10 мК. Для охлаждения BlueFors использует энтальпию смешения двух изотопов He,  $^3\text{He}$  и  $^4\text{He}$ .

Чтобы запустить цикл растворения, сперва достигают начальной температуры жидкого гелия (4,2 К). Традиционно для этого рефрижератор растворения размещают внутри отдельного изолированного вакуумированного пространства, которое погружают в жидкий гелий. Изначально вакуумное пространство охлаждают до температуры 4,2 К, запуская в нём газообмен. Гелиевая ванна при этом служит низкотемпературным экраном для теплового излучения и охлаждающей жидкостью для циркулирующего газа.

В системе BlueFors (рисунок 2) холодильник Pulse Tube (PT) создаёт достаточно низкие температуры для запуска цикла растворения. Фланцы (плиты) «50К» и «4К» («quasi-4К») экранов излучения соединены с двумя ступенями PT. Соединения выполнены с использованием гибких медных оплётков, которые заглушают вибрации, производимые PT. Весь блок из экранов излучения расположен в одном общем вакуумном пространстве и термически изолирован от окружающей среды.

Поступающий газ  $^3\text{He}$  предварительно охлаждён до  $< 4,2$  К при помощи других теплообменников. Первым на пути газа установлен *cold trap* с температурой около 50 К, который адсорбирует все загрязнения из цикла растворения и одновременно выступает теплообменником. Далее газ термически связывается (термолизуется) в *regenerator tube* и на второй ступени PT.

Для предварительного охлаждения рефрижератора растворения от комнатной температуры и обеспечения газообмена используют *heat switches* (HS). Они установлены между «квази-4К» плитой и *still* и между *still* и *mixing chamber*. После предварительного охлаждения HS должны разрывать термический контакт с PT, чтобы цикл растворения запустился. HS содержит две медные части для теплообмена, по одной части со сторон с высокой и низкой температурой, и промежуточную часть из нержавеющей стали с низкой теплопроводностью. Он заполнен гелиевым газом, который проводит тепло между медными частями. Сверху у HS имеется адсорбционный угольный насос, который при достижении температуры  $< 10$  К, адсорбирует гелий изнутри *heat switch*. В этом состоянии HS считается закрытым.

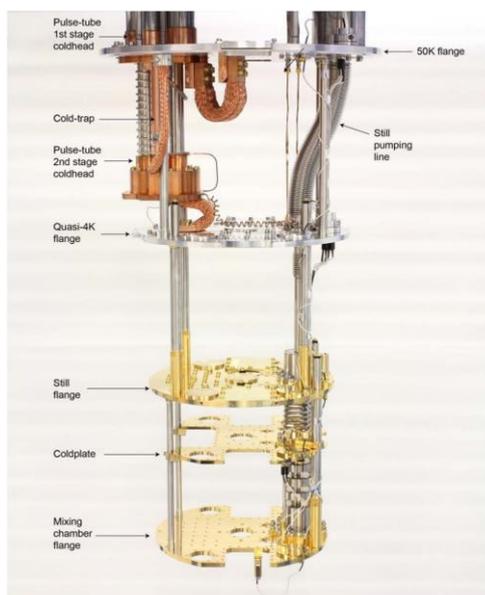


Рисунок 2 – Внутренняя часть криостата BlueFors. Держатель с резонатором помещается в районе фланца «4К» (quasi-4K flange).

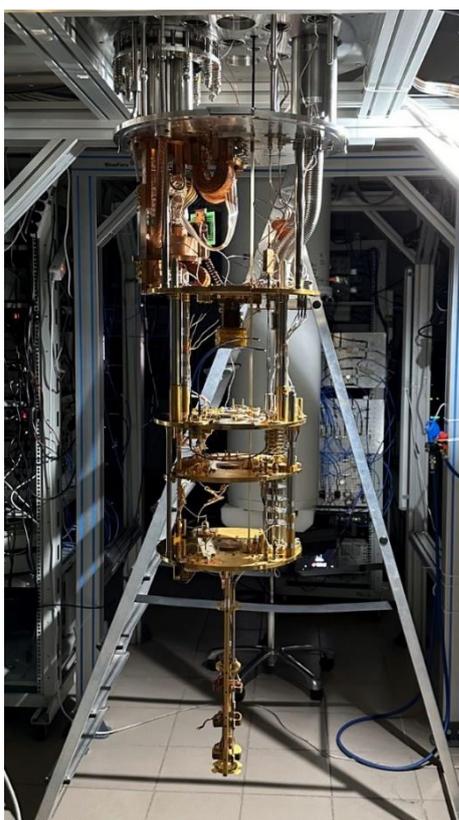


Рисунок 3 – Загрузка криостата. Малый магнит размещён под плитой «4К» BlueFors.

Держатель на рисунке 5 предназначен для малого магнита на рисунке 4, и при помощи винтов и специальной вставки он встраивается внутрь катушки, не касаясь её

стенок. Входы и выходы MS видны в просвете корпуса магнита и за пределами корпуса. При помощи коаксиальных кабелей с импедансом 50 Ом, волновод подключается к вч-цепи.

На наружной стороне держателя приклеены нагреватель и термометр. Спирторастворимый клей БФ-4 позволяет быстро переставить приборы при необходимости. Чтобы исключить контакты проводов приборов и теплопровода (термолизации) к плите «4К» с корпусом внутри магнита, использовали прижимную пластинку из текстолита. Нагреватель и термометр выровняли по длине MS и расставили так, чтобы термометр был на уровне образца, а нагреватель со стороны термолизации.



Рисунок 4 – Малый магнит, сделанный в лаборатории. Количество витков  $N = 1200$ , постоянная магнита  $k = 22,35$  мТл/А.



Рисунок 5 – Держатель для MS с термометром и Nb SRRs.

На рисунке 6 показаны первичные расположения элементов на держателе. В настоящей конфигурации термолизация и текстолит закреплены вместе, а термометр больше выровнен по положениям образцов. Держатель с образцами и приборами устанавливали в магнит. Далее магнит подвешивали на плите «4К». Во избежание теплопритока с указанной плиты между вставкой в магнит и латунным корпусом держателя проложены пластинки из текстолита (рисунок 6а). Далее нагреватель подключили к источнику постоянного тока (рисунок 12), а термометр к контроллеру температуры (рисунок 13). Для создания теплового контакта плиты криостата и образца была проведена термолизация между держателем и “Still” плитой с номинальной температурой 1 К.

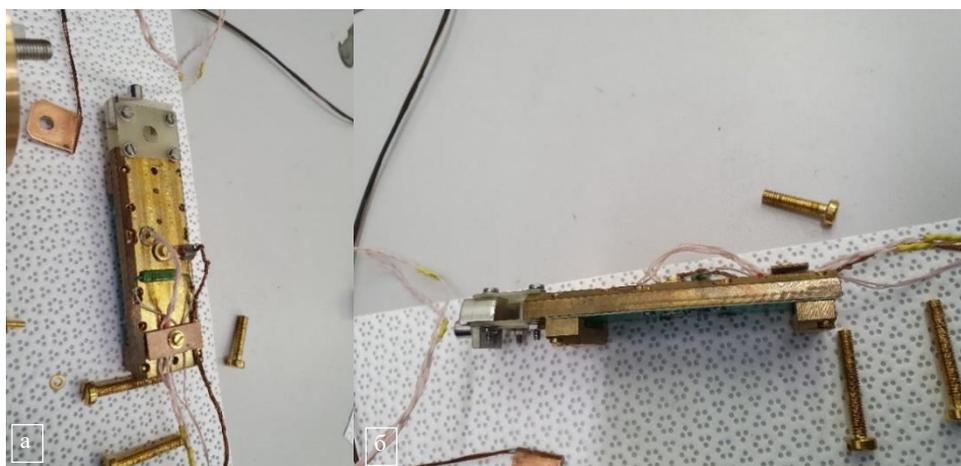


Рисунок 6 – Обратная сторона держателя с термометром, нагревателем и термолизацией: а – положения элементов друг относительно друга; б – положения приборов относительно образцов.

На рисунке 7 представлен собранный модуль с исследуемым образцом, подключённый к внешнему источнику СВЧ. После установки магнита с держателем в криостат по вч-линии пропускали сигнал при комнатной температуре. Данная процедура позволяет оценить уровень шумов и наводок и проверить замкнутость цепи по величине считываемого сигнала.



Рисунок 7 – Держатель в магните под плитой «4К» BlueFors, подготовленный к эксперименту.

Анализаторы цепей векторные (VNA) предназначены для измерений комплексных коэффициентов передачи и отражения (элементов матрицы рассеяния) многополюсников. Область применения – проверка, настройка и разработка различных радиотехнических устройств в условиях промышленного производства и лабораторий, в том числе в составе автоматизированных измерительных стендов. На рисунке 8 представлен VNA, использующийся для СВЧ измерений.



Рисунок 8 – Векторный анализатор цепей VNA Planar C1220.

Анализаторы отличаются друг от друга верхней границей диапазона рабочих частот, количеством измерительных портов, расположенных на передней панели, наличием соединителей для прямого доступа к входам измерительных и опорных приемников, а

также наличием соединителей для подключения расширителей по частоте. На рисунках 9 и 10 представлены порты и управляющие элементы VNA.



Рисунок 9 – Передняя панель VNA.

Передняя панель содержит:

1. Измерительный порт со светодиодным индикатором
2. Выключатель питания
3. Клемма заземления

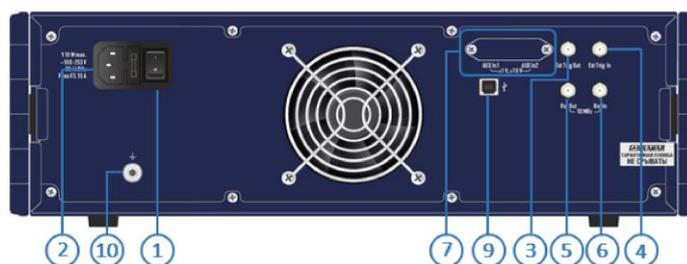


Рисунок 10 – Задняя панель VNA.

Задняя панель содержит:

1. Выключатель питания
2. Соединитель для подключения кабеля питания
3. Выход синхронизации
4. Вход синхронизации
5. Выход внешнего опорного генератора 10 МГц
6. Вход внутреннего опорного генератора 10 МГц
7. Выходы для измерения напряжений постоянного тока
9. Соединитель USB 2.0
10. Клемма заземления

Анализаторы работают под управлением внешнего персонального компьютера с установленным программным обеспечением, которое проводит обработку информации и выполняет функцию пользовательского интерфейса. Для связи с персональным компьютером используется интерфейс USB 2.0. Функциональные особенности VNA C1220 приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Функциональные особенности векторного анализатора цепей (VNA C1220).

Диапазон частот Количество точек Время измерений	Выходная мощность Средний уровень шума Динамический диапазон СКО трассы	Режим измерений
от 100 кГц до 20 ГГц от 1 до 500001 12 мкс	от –60 до 10 дБм –133 дБм/Гц 0,001 дБм	S-параметры Линейность Импеданс

Пределы допускаемой относительной погрешности установки частоты источника выходного сигнала составляют  $\pm 2 \cdot 10^{-6}$ .



Рисунок 11 – Стеллаж установки с измерительными и запитывающими устройствами.

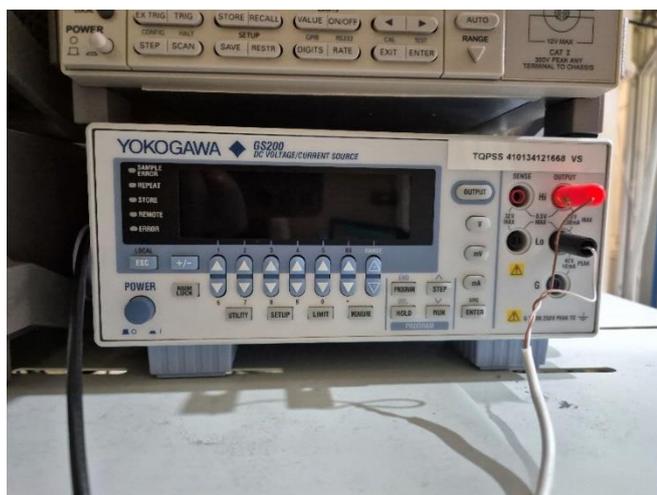


Рисунок 12 – Источник тока нагревателя Yokogawa GS200.



Рисунок 13 – Контроллер Lake Shore 372 температур фланцев криостата с возможностью подключения термометра.

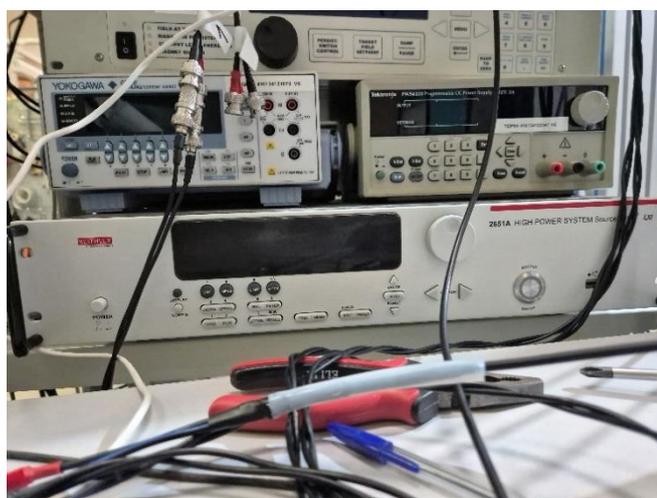


Рисунок 14 – Источник тока магнита Keithley 2651A.

### 3. Структура образца

#### 3.1. Интерес исследования и теоретическая модель материала

Как показано в работе: Andrey E. Schegolev, Nikolay V. Klenov, Sergey V. Bakurskiy, Igor I. Soloviev, Mikhail Yu. Kupriyanov, Maxim V. Tereshonok and Anatoli S. Sidorenko. **Tunable superconducting neurons for networks based on radial basis functions.** *Beilstein J. Nanotechnol.* **2022**, *13*, 444–454; кинетическая индуктивность:

$$L_K \approx \frac{\mu_0 X}{W} \left[ \int_0^d \lambda^{-2}(x) dx \right]^{-1},$$

где  $\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума;  $X$  – длина металлической полоски;  $W$  – её ширина;  $d$  – толщина гетероструктуры Nb/Co/Nb/Co/Nb/Al;  $\lambda$  – лондоновская глубина проникновения магнитного поля; интеграл берётся по толщине гетероструктуры,

$$\lambda^{-2}(x) = \frac{16\pi T^2}{\rho} \sum_{\omega > 0}^{Re} (F^2(x)),$$

где  $T$  – температура;  $\rho$  – электросопротивление гетероструктуры;  $\omega = \pi T(2n + 1)$  – мацубаровская частота;  $F$  – аномальная функция Грина,

сверхпроводящего многослойного образца, схема которого представлена на рисунке 15, сильно зависит от направления намагниченностей ферромагнитных слоёв  $FM_1$  и  $FM_2$ , как это показано на рисунке 16.

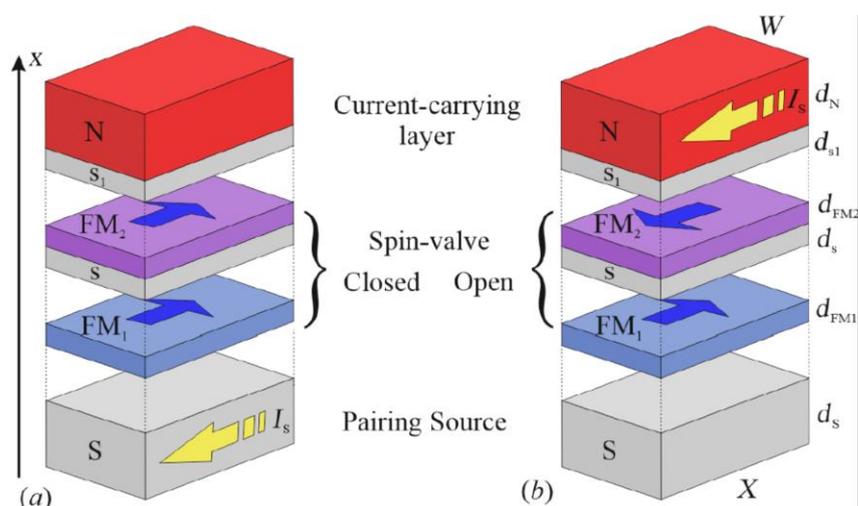


Рисунок 15 – Схема многослойного образца из теоретической работы [16]. Источником куперовских пар служит слой сверхпроводника  $S$ , на которые нанесены два слоя ферромагнетика  $FM_1$  и  $FM_2$  разной толщины, разделённые тонким слоем сверхпроводника  $s$ , толщиной менее длины когерентности. Сверху структура покрыта слоем нормального металла, отделённого от всей структуры также тонким слоем сверхпроводника  $s$ .

На рисунке 16 представлена зависимость кинетической индуктивности многослойного сверхпроводящего образца, показанного на рисунке 15, от направлений намагниченностей слоёв ферромагнетика. В частности, для случая, когда толщина слоя сверхпроводника порядка длины когерентности (на рисунке 16 это соответствует 1 на оси абсцисс), изменение намагниченностей слоёв от антипараллельной (AP) к параллельной (P) приводит к существенному изменению кинетической индуктивности – более 50% (в относительных единицах на оси ординат – от 0,15 до 0,25).

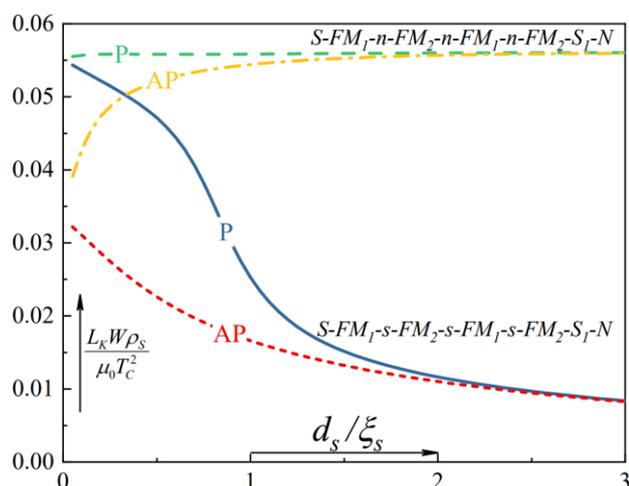


Рисунок 16 – Кинетическая индуктивность гибридных структур  $S - (FM)_1 - s - (FM)_2 - s - (FM)_1 - s - (FM)_2 - s - N$  и  $S - (FM)_1 - n - (FM)_2 - n - (FM)_1 - n - (FM)_2 - s_1 - N$  для параллельной (сплошная тёмно-синяя и пунктирная зелёная линии) и антипараллельной (пунктирная красная и штрих-пунктирная жёлтая линии) взаимных ориентаций намагниченностей между  $(FM)_1$  и  $(FM)_2$  слоями как функции от толщины прослойки.

Для обнаружения этого предсказанного эффекта в данной работе было запланировано проведение эксперимента по измерению резонансных частот образцов, изготовленных из многослойного материала, показанного на рисунке 15, в виде «сплит-ринг», SRR (рисунок 17).

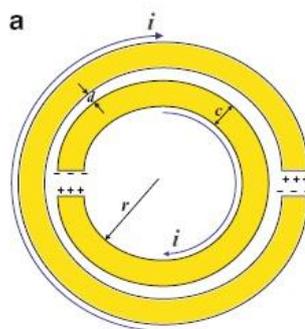


Рисунок 17 – Конструкция образца SRR предложенная в работе **Ошибка! Источник ссылки не найден.** для детектирования изменений кинетической индуктивности путем измерения резонансных частот такого образца при изменении внешних условий (температуры, магнитного поля).

Кольца SRR и промежутки обладают характеристиками:  $d$  – дистанция между внутренним и внешним кольцом,  $c$  – ширины самих колец и  $g$  – ширины разрезов в каждом

кольце. SRR обладает собственной резонансной частотой  $f_0$ , определяемой полной индуктивностью SRR  $L = L_K + L_g$  и ёмкостью SRR  $C_{eq}$  как:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_{eq}}} \quad (1)$$

В соответствии с целью данной работы и выбранной стратегией для ее достижения, нами были изготовлены два типа SRR – один из чистого ниобия, показанный на фотографии на рисунке 18

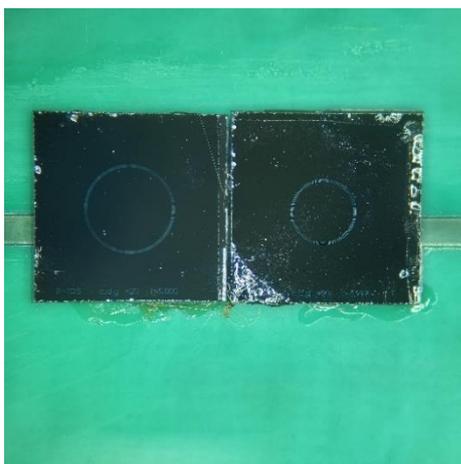


Рисунок 18 – Тестовые Nb SRRs, наклеенные при помощи БФ-4 на микрополосок из меди.

и второй из многослойной гетероструктуры Nb/Co/Nb/Co/Nb/Al (рисунок 19).

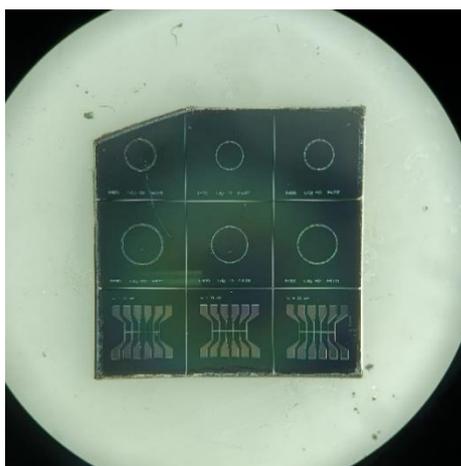


Рисунок 19 – Гетероструктура Nb/Co/Nb/Co/Nb/Al для исследования контролируемой кинетической индуктивности. Слева направо, начиная с левого верхнего квадранта на фото видны SRR с резонансными частотами 7 ГГц – первый ряд, 5 ГГц – второй ряд, свидетели для резистивных измерений – третий ряд.

### 3.2. Магнетронное напыление образцов

Для создания слоистых сверхпроводящих гетероструктур Nb/Co/Al и однослойных пленок Nb использован метод магнетронного напыления. Преимуществом данного метода по сравнению с другими методами являются: высокая воспроизводимость результатов, возможность варьирования скорости напыления и простота процедуры смены напыляемых материалов. Метод магнетронного напыления основан на распылении атомов материала мишени, прикрепленной к поверхности катода. Атомы мишени-катода выбиваются из ее поверхности посредством бомбардировки отрицательно заряженной мишени положительными ионами плазмы. В качестве ионизированного газа или плазмы, нами использован инертный газ аргон. За счет изменения давления инертного газа, а также напряжения, подаваемого на катод, можно изменять скорость осаждения частиц материала на поверхность анода (подложки).

Упрощенная схема магнетронного напыления в модифицированной нами серийной вакуумной установке Leybold Z-400 [13, 4, 17] представлена на рисунке 20. Для предотвращения испарения материала тела катода он защищен от горячей плазмы «темным щитом», который представляет собой высокий потенциал, локализованный вблизи катода, и который препятствует возгоранию плазмы в области  $\approx 2,0 \div 2,5$  мм у поверхности катода. (рисунок 20 п.5).

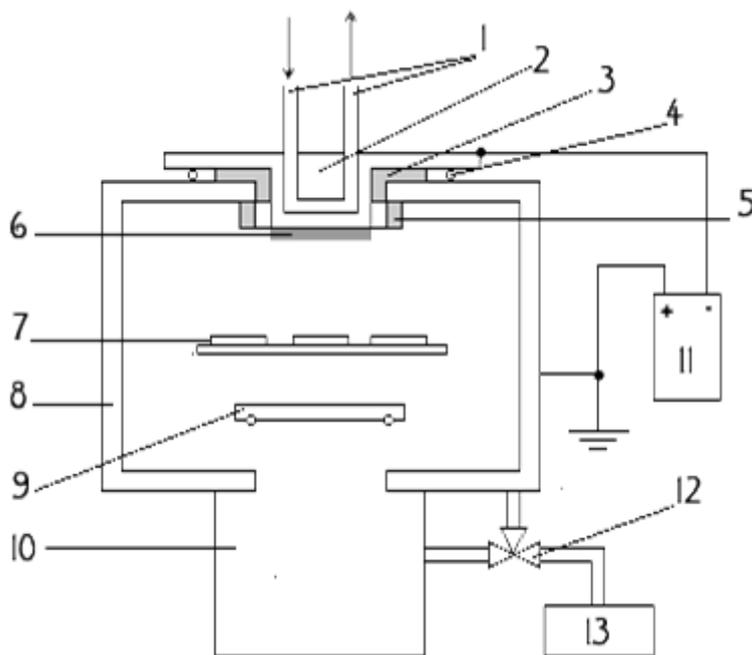


Рисунок 20 - Схема вакуумной установки магнетронного напыления Z-400, Leybold.

На схеме обозначены:

1. Охлаждающая вода
2. Катод
3. Изолятор
4. Вакуумная прокладка
5. «Темный щит»
6. Мишень из напыляемого материала
7. Подложки
8. Вакуумная камера
9. Высоковакуумный клапан (V1)
10. Высоковакуумный турбомолекулярный насос
11. Источник высокого напряжения катода
12. Двусторонние клапаны (V2/V3)
13. Форвакуумный насос



Рисунок 21 - Установка Z-400 с открытым колпаком во время подготовки магнетрона и установки подложек для напыления: размещение подложки (5 x 80 мм) на столике-держателе асимметрично относительно его оси обеспечивает градиент скорости осаждения материала вдоль подложки, необходимый в случае напыления «клина» - слоя с переменной толщиной. В правой части левого рисунка видно устройство, обеспечивающее равномерное движение мишени над подложкой в процессе напыления слоя постоянной толщины. Правый рисунок со снятой крышкой блока трех держателей мишеней показывает коммутацию ВЧ-кабелей (в белой изоляции) и системы водяного охлаждения мишеней (черные трубки).

Поскольку катод подвергается бомбардировке ионами с большой кинетической энергией и при соударении с его поверхностью эта энергия превращается в тепло, приводя к сильному нагреву катода, необходим постоянный отвод тепла, осуществляемый принудительно циркуляцией воды сквозь металлическое тело катода.

Выбор ниобия в качестве сверхпроводящего материала связан с высокой  $T_c$  этого сверхпроводника (9,2 К), а кобальта – с ограниченной взаимной растворимостью Nb-Co (менее 4 ат. %), что обеспечивает получение резкой границы раздела слоёв в гетероструктуре. Резкость границы, иными словами, означает достаточную прозрачность этой границы для куперовских пар.

Взаимная растворимость ниобия и кобальта очень ограничена: растворимость Co в (Nb) менее 4 % (ат.) при температуре 600 °С, растворимость Nb в (Co) составляет 1 % (ат.) при 800 °С, что обеспечивает необходимую резкую границу раздела между слоями этих металлов при магнетронном напылении, выполняемом при комнатной температуре подложки [23].

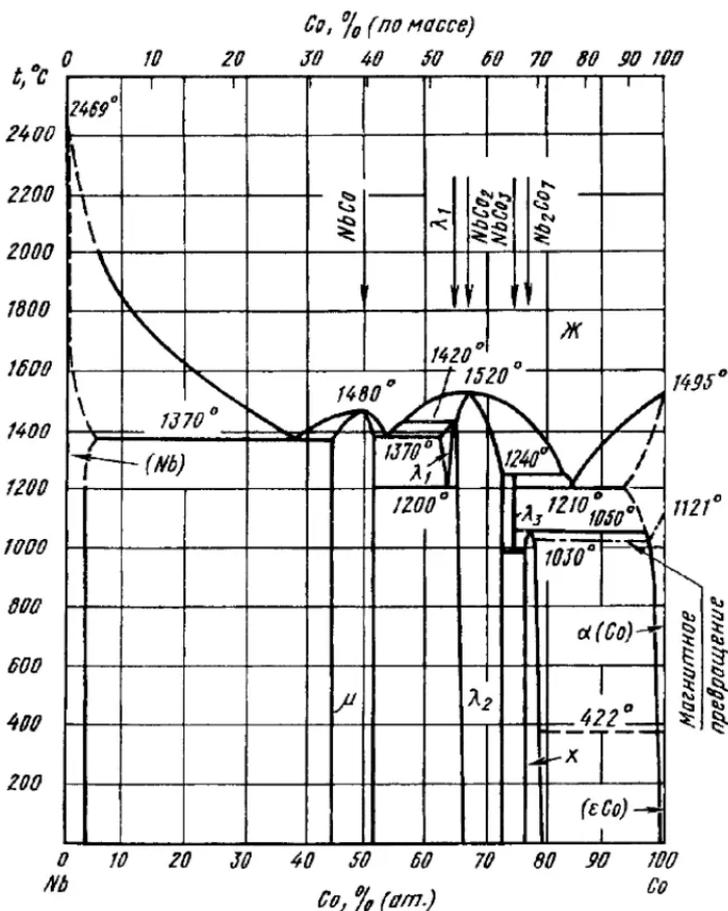


Рисунок 22 – Фазовая диаграмма Nb–Co.

Система характеризуется наличием граничных твердых растворов (Nb), ( $\alpha$ Co) и ( $\epsilon$ Co) и пяти интерметаллических соединений: NbCo ( $\mu$ ),  $\lambda_1$ , NbCo<sub>2</sub> ( $\lambda_2$ ), NbCo<sub>3</sub> ( $\lambda_3$ ), Nb<sub>2</sub>Co<sub>7</sub> ( $\chi$ ).

Два из них, NbCo и NbCo<sub>2</sub>, образуются конгруэнтно при температурах 1480 и 1520 °С и имеют области гомогенности [44-51% (ат.) Co] и [66-73 (ат.) Co] соответственно.

Фаза  $\lambda_1$ , образуется по перитектической реакции  $\text{Ж} + \text{NbCo}_2 = \lambda_1$  при температуре 1420 °С, а при 1200 °С распадается по эвтектоидной реакции  $\lambda_1 = \text{NbCo} + \text{NbCo}_2$ .  $\lambda_1$  легко переохлаждается до комнатной температуры при скорости охлаждения 2,5–3 °С/с и более.

Соединение NbCo<sub>3</sub> образуется по перитектической реакции  $\text{Ж} + \text{NbCo}_2 = \text{NbCo}_3$  при температуре 1240 °С и существует до температуры 1000 °С, при которой эвтектоидно распадается по реакции  $\text{NbCo}_3 + \text{NbCo}_2 = \text{Nb}_2\text{Co}_7$ . Область гомогенности соединения NbCo<sub>3</sub> если и существует, то ее протяженность не превышает 1% (ат.).

Соединение Nb<sub>2</sub>Co<sub>7</sub> образуется по перитектоидной реакции  $(\alpha\text{Co}) + \text{NbCo}_3 = \text{Nb}_2\text{Co}_7$  при температуре 1050 °С, имеет узкую область гомогенности 77–79% (ат.) Co.

Растворимость Co в (Nb) снижается с уменьшением температуры и составляет 5% (ат.) при 1370 °С, 4% (ат.) – при 1150 и 600 °С.

Растворимость Nb в (Co) равна 4% (ат.) при температуре 1100 °С и 1% (ат.) при температуре 800 °С.

В системе протекают три эвтектические реакции:  $\text{Ж} = (\text{Nb}) + \text{NbCo}$  при 1370 °С,  $\text{Ж} = \text{NbCo} + \lambda_1$  при 1370 °С,  $\text{Ж} = \text{NbCo}_3 + (\alpha\text{Co})$  при 1210 °С [21, 22].

Таким образом, пара материалов сверхпроводник – Ниобий, ферромагнетик – Кобальт, представляется оптимальной для решения задачи приготовления релевантных многослойных гетероструктур Сверхпроводник/Ферромагнетик с четко определенными, резкими границами между слоями.

## 4. Описание СВЧ экспериментов

### 4.1. Измерения сверхпроводящего ниобиевого SRR

Исследования многослойного образца затруднены в связи с тем, что параметры измерительной установки для наблюдения явлений при резонансе заранее неизвестны. При СВЧ измерениях можно получить спектры с низким разрешением, связанным с тепловыми и электромагнитными шумами, резонансами в спектре фона и т. п. Для калибровки измерений проводили исследования SRR из сверхпроводящего Nb. Система с одним

металлом позволяет более точно отследить влияние на результат измерения тех или иных задаваемых параметров экспериментальной установки (мощность СВЧ излучения, диапазон частот и др.). Ниобий, согласно литературным данным, обладает минимальными потерями при измерениях ниже его  $T_c$  [8].

Для исследования были выбраны два образца SRRs из Nb с номинальными частотами резонанса  $f_0$  5 и 7 ГГц (рисунок 18). SRRs сделаны так, что все размеры  $c$ ,  $d$ , и  $g$  равны 20 мкм. При помощи спирторастворимого низкотемпературного клея БФ-4 образцы установили на держатель с медным MS.

На результаты измерения влияют положения образцов на держателе в связи с тем, что ротор магнитного поля переменного тока направлен параллельно волноводу, диаметры SRR в 2–3 раза превышают ширину MS, а магнитное поле проникает в образец под разными углами. Поэтому образцы располагали так, чтобы диаметры колец совпадали с краем волновода на виде сверху, как показано на рисунке 18. Именно такое положение допускает возникновение электромагнитной индукции в SRR, поскольку поле переменного тока имеет внутри колец одно преимущественное направление.

Держатель с образцами при помощи специальной вставки устанавливали в магните, изображённом на рисунке 4. Магнит подвешивали на плите «4К» криостата с базовой температурой 4 К. К держателю подключали коаксиальные кабели, соединённые через сверхпроводящие вч-линии, аттенюаторы внутри криостата и коаксиальные кабели в комнате с VNA (рисунок 8). Далее плиты рефрижератора изолировали от внешней среды при помощи двустенного кожуха из нержавеющей стали, создавали внутри высокий вакуум и подавали жидкий He для охлаждения всей системы.

Измерения зависимости спектров от температуры без магнитного поля проводили, начиная с минимальной температуры 2,5 К, и снимали спектры VNA при разных температурах. Для этого в систему подавали сигналы мощностью –10 дБ и частотами в диапазоне 3,5–7,5 ГГц. С ростом частоты мощность монотонно падает и на частоте резонанса Nb SRR наблюдается глубокий минимум. После записи спектра при одной температуре её повышают, подавая ток на нагреватель. Ток увеличивали от 0 до 10 мА с шагом 0,1 мА до достижения следующей температуры, при которой проводили измерение.

Второе исследование проводили в магнитных полях при фиксированной температуре 2,5 К. Спектры VNA получали при разных значениях приложенного магнитного поля. Для этого в систему подавали сигналы мощностью 3 дБ и частотами в диапазоне 6,95–7,05 ГГц. Мощность сигнала ведёт себя аналогично измерениям при разных температурах. После записи спектра при одном поле его меняют, подавая новый ток на

обмотку магнита. Магнитное поле уменьшали от 110 до 0 мТл с шагом 0,2 мТл. Чтобы избежать заморозки вихрей Абрикосова в сверхпроводящем Nb, ток магнита большими шагами поднимали до величины, соответствующей полю 110 мТл, а в процессе измерения плавно уменьшали до 0 А. Благодаря этому подходу сократили время на измерения Nb SRRs.

При наивысшем токе нагревателя наблюдали размытие резонансного поглощения Nb SRRs в спектре фона. Данный спектр выбрали в качестве контрольного для устранения фона в спектрах при всех прочих температурах и получения ВЧ-спектра в координатах  $(f, T)$  с наибольшим разрешением. На рисунке 23 представлены спектры VNA, полученные при разных значениях тока нагревателя. На спектр, полученный при 10 мА, была произведена нормировка.

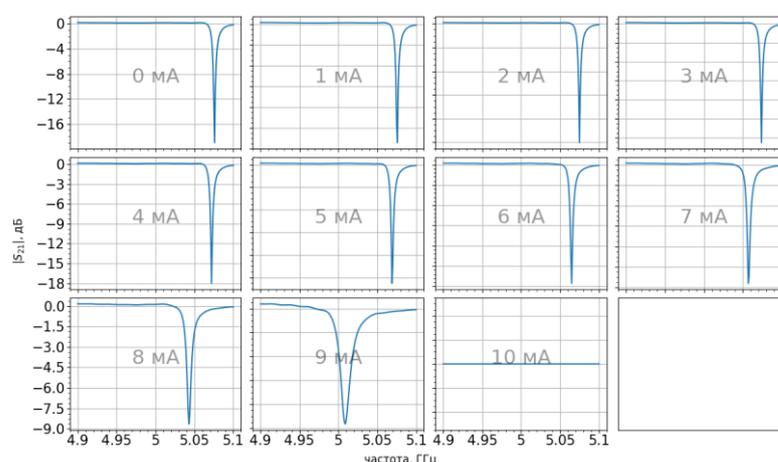


Рисунок 23 – Спектры VNA Nb SRR с  $f_0 = 5$  ГГц, полученные при разных токах нагревателя. Спектры демонстрируют изменение резонансного поглощения с ростом температуры.

После введения нормировки построили ВЧ-спектр в координатах  $(f, I_h)$ , где  $I_h$  – ток нагревателя (рисунок 24). Показания термометра не использовали для отображения данных, в связи с их противоречивостью. Резонансная частота  $f_r$  и добротность  $Q$  Nb SRR уменьшаются с ростом температуры согласно ВЧ-спектру. Резонансная частота связана с кинетической индуктивностью согласно уравнению (1), что позволило экспериментально установить зависимость кинетической индуктивности от температуры, а добротность – с величиной потерь при электромагнитной индукции SRR. Потери растут в связи с приближением ко критическому току Nb.

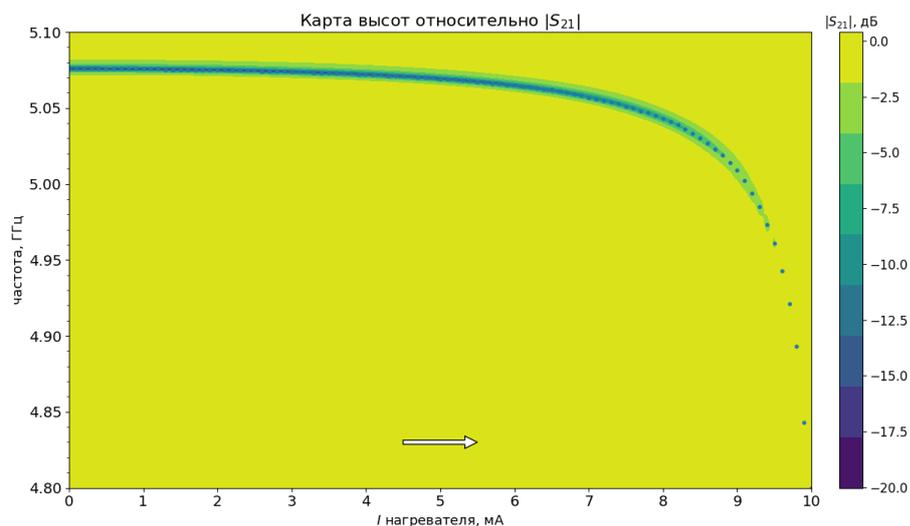


Рисунок 24 – ВЧ-спектр Nb SRR с  $f_0 = 5$  ГГц. Точками показаны положения минимумов спектров VNA (рисунок 23), стрелкой – направление развёртки тока.

Для ВЧ-спектра в координатах  $(f, B)$  использовали данные, полученные при измерении Nb SRR с  $f_0 = 7$  ГГц при фиксированной температуре 2,5 К. Благодаря узкому диапазону частот для измерений спектров VNA при том же числе измеряемых точек по частотам, получили высококачественные данные, не требующие введения нормировки.  $f_r$  и  $Q$  уменьшаются с ростом приложенного магнитного поля согласно ВЧ-спектру (рисунок 25). Падение резонансной частоты с ростом поля отражает рост кинетической индуктивности, уменьшение добротности связано с приближением приложенного поля ко  $H_{cm}$  Nb.

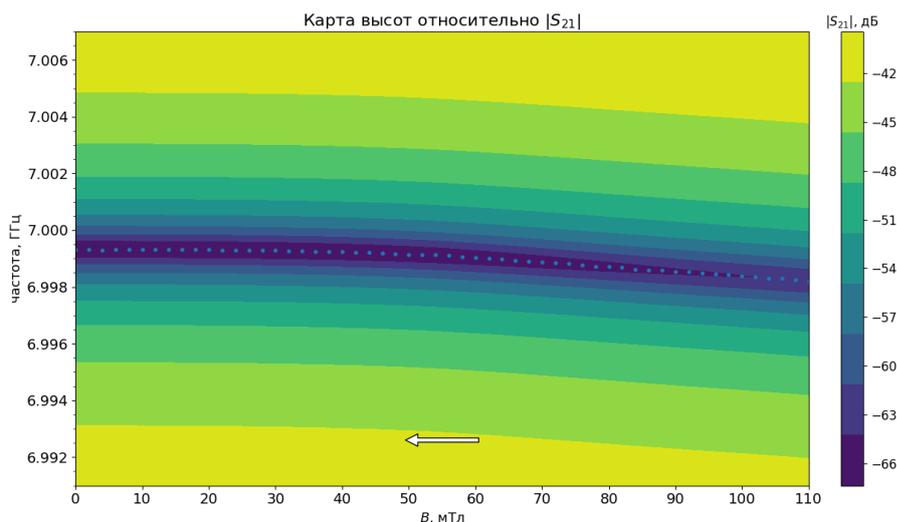


Рисунок 25 – ВЧ-спектр Nb SRR с  $f_0 = 7$  ГГц. Точками показаны положения минимумов спектров VNA, стрелкой – направление развёртки приложенного магнитного поля.

Для более наглядного отражения зависимости  $f_r$  от приложенного магнитного поля отдельно построили зависимость минимумов спектров VNA от поля. Изменения лежат в пределах 1,2 МГц как видно по рисунку 26. По характеру изменения резонансной частоты можно судить о зависимости кинетической индуктивности от приложенного магнитного поля.

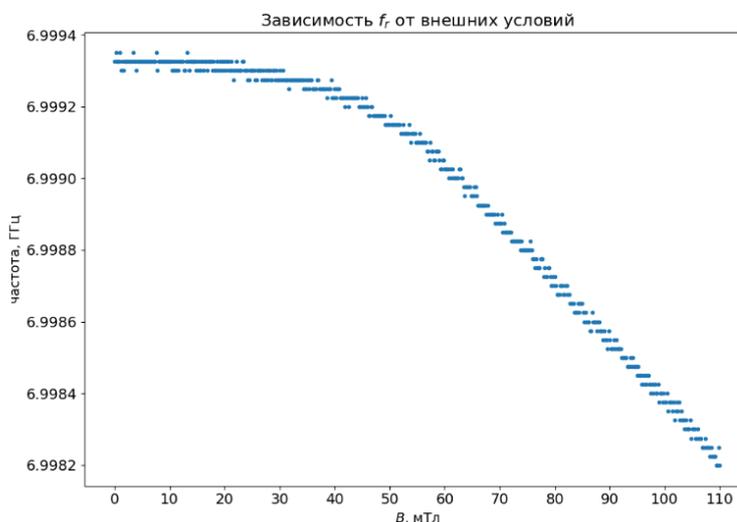


Рисунок 26 – Зависимость резонансной частоты Nb SRR с  $f_0 = 7$  ГГц, полученная по минимумам спектров VNA.

С целью установления правомерности формулы для идеального резонатора из литературных данных [15] производили аппроксимацию по вышеуказанной формуле. Результаты подгонки параметров представлены на рисунке 27. Получено соответствие резонансных частот спектров VNA и подобранных по формуле идеального резонатора. Также получены данные о добротностях SRR:  $Q_1$  – добротность загрузки,  $Q_c$  – добротность связи,  $Q_i$  – внутренняя добротность.

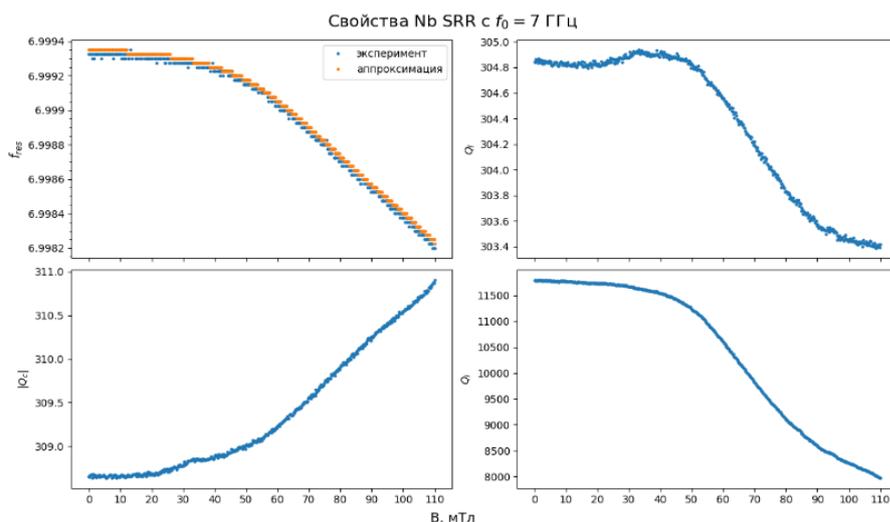


Рисунок 27 – Аппроксимация данных спектров VNA Nb SRR с  $f_0 = 7$  ГГц, выполненная по аналитической формуле.

Установлена зависимость резонансной частоты от температуры в отсутствие магнитного поля. С ростом температуры наблюдали уменьшение резонансной частоты, связанное с ростом кинетической индуктивности и уменьшение добротности резонансного поглощения, связанное с уменьшением критического тока в Nb. Показана зависимость резонансной частоты от поля, что демонстрирует возможность контролировать кинетическую индуктивность приложением поля. Данные по Nb SRR позволили настроить эксперимент на менее чувствительную к микроволновому излучению систему Nb/Co/Nb/Co/Nb/Al.

#### 4.2. Измерения гибридного Nb/Co/Nb/Co/Nb/Al SRR

Исследования провели в МФТИ в рефрижераторе растворения BlueFors (далее криостат) при помощи векторного анализатора цепей (VNA). Был выбран образец SRR, изготовленный из сверхпроводящей гетероструктуры Nb/Co/Nb/Co/Nb/Al (далее гибридный SRR). Образцы приклеили при помощи клея БФ-4 на MS из меди, расположенный на подложке из текстолита на держателе (рисунок 5).

В связи с тем, что гибридный SRR позже (при более низкой температуре) переходит в сверхпроводящее состояние, чем ниобиевый, а слои ферромагнетиков влияют на электромагнитную индукцию в Nb и Al, после измерения VNA в спектрах не наблюдались изменения при разных магнитных полях и температурах. Можно было судить о том, что сигнал не передаётся через MS, или держатель перегревается от контакта с элементом, находящимся при комнатной температуре или температуре выше критической для перехода

Nb в сверхпроводящее состояние. Поэтому в паре с гибридным SRR на MS установили Nb SRR. Сопротивление данного образца при температуре перехода гибридной структуры в сверхпроводящее состояние намного меньше, поэтому настолько же меньше тепловые потери. Высокая связь Nb образца и волновода позволила в процессе смены поля и температуры наблюдать за изменениями в спектре VNA.

Пробные измерения на установке были проведены с использованием Nb SRR с  $f_0 = 5$  ГГц и гибридного SRR с  $f_0 = 7$  ГГц (рисунок 28). Гибридный SRR состоит из гетероструктуры Nb/Co/Nb/Co/Nb/Al. Среди нескольких SRRs с разными параметрами  $c$ ,  $d$ ,  $g$  выбрали наиболее чистые по наблюдениям в микроскопе –  $c$ ,  $d$ ,  $g = 10$  мкм для гибридного SRR,  $c$ ,  $d$ ,  $g = 20$  мкм для Nb SRR.

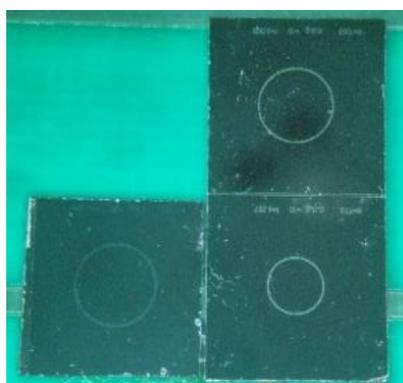


Рисунок 28 – SRRs на Si(100) подложке, наклеенные на MS – вид под микроскопом.

Держатель охладили без магнитного поля до температуры 2,5 К. Начиная с этой температуры, приступили к измерениям спектров поглощения (далее спектров VNA) при разных значениях тока нагревателя. Данные представляют собой зависимость амплитуды передачи сигнала  $|S_{21}|$  от его частоты. Диапазон измерений частот установили 3,5–7,5 ГГц; мощность исходного сигнала задали –10 дБ. Диапазон частот выбрали соответственно номинальным частотам  $f_0$  SRR – 5 ГГц у ниобиевого и 7 ГГц у гибридного. Номинальные резонансные частоты образцов SRR рассчитаны по геометрии SRR и средним электронным плотностям металлов. Ток нагревателя меняли от 0 до 10 мА с шагом 0,1 мА. Для автоматизации процесса в программе рассчитаны задержки на измерение VNA и на увеличение тока нагревателя. После записи измерения программа отображает графики спектров VNA.

По окончании эксперимента при изменениях температуры приступили к измерениям в приложенном магнитном поле. Для этого держатель остывал до достижения начальной температуры, известной по показаниям термометра (2,5 К). В связи с тем, что термометр

демонстрировал температуру большую, чем номинальная температура плиты установки магнита – «4К» – его показания не использовали для температурных измерений. Для оценки температуры образца использовали эмпирическую калибровку нагревателя. Параметры измерений VNA не меняли; диапазон полей установили в пределах  $\pm 120$  мТл и развёртку делали с шагом 1 мТл. Процесс измерений также происходил автоматически.

## 5. Обсуждение результатов опытов и выводы.

Полученные данные, показанные на рисунке 29, демонстрируют поглощение вч-сигнала на частоте резонанса Nb SRR. Наблюдение пика поглощения говорит об исправной работе вч-линии криостата. На спектрах VNA не просматривается поглощение мощности сигнала, вызванное взаимодействием с гибридным SRR. Это связано с величиной потерь резонатора, которая отражается на добротности  $Q$ . При низких добротностях поглощение выражается в малом снижении амплитуды и в уширении полосы поглощения резонатора. Чтобы выделить резонансное поглощение гибридного SRR была введена нормировка.

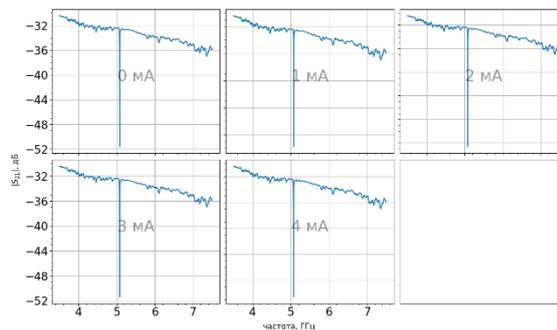


Рисунок 29 – Спектры VNA, полученные при измерении Nb и гибридного SRR, построенные до введения нормировки.

Контрольный спектр выбрали из температурных измерений системы. Данный спектр соответствует току нагревателя  $I = 9,4$  мА. Нормированные данные представлены на рисунке 30.

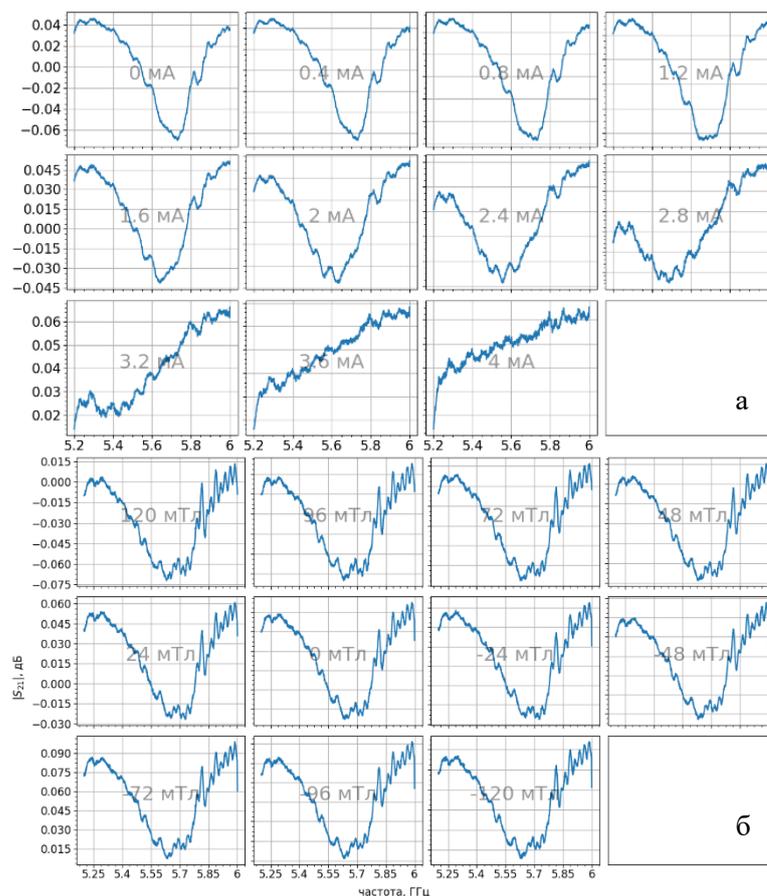


Рисунок 30 – Спектры VNA для SRR из гетероструктуры Nb/Co/Nb/Co/Nb/Al, измеренные: а – при разных температурах без магнитного поля; б – при разных магнитных полях и температуре 2,5 К.

Чтобы определить зависимости резонансной частоты  $f_r$  и добротности  $Q$  от температуры и магнитного поля, построили контурные карты (далее ВЧ-спектры) в координатах  $(f, T)$  и  $(f, B)$  и высотами, соответствующими величинам амплитуды сигнала  $|S_{21}|$  в дБ (рисунок 31).  $f_r$  соответствует точкам минимума спектров VNA, добротность отражена в ширине области на полувысоте резонансного поглощения, если оно выражено в Вт.

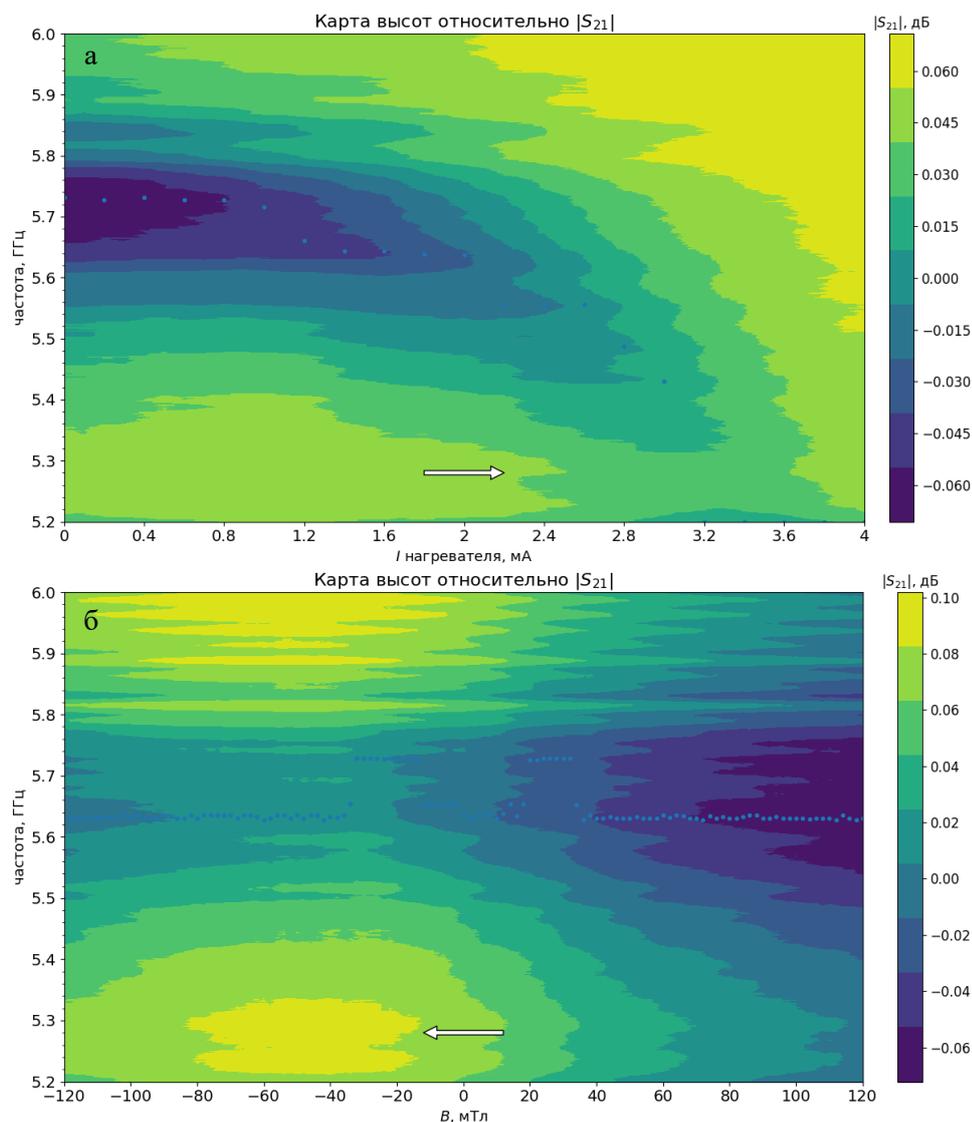


Рисунок 31 – ВЧ-спектры гибридного SRR: а – зависимость от тока нагревателя; б – зависимость от приложенного магнитного поля при 2,5 К. Стрелками указаны направления развёрток, точками – положения минимумов.

Низкая добротность спектра отражается на отношении ширины полосы поглощения и масштаба изменения резонансной частоты. На рисунке 31а наблюдается скачкообразное понижение точки минимума с ростом температуры. Это могут быть резонансные частоты в фоновом спектре, который не удался целиком после введения нормировки. Остаточного фона могло быть достаточно, чтобы скрыть низкодобротное резонансное поглощение гибридного SRR.

По результатам на рисунке 31б можно судить о том, что гибридный SRR не обладает необходимой добротностью для наблюдения изменений на ВЧ-спектре с изменением магнитного поля. Для лучшего представления наблюдаемых явлений отдельно построили

зависимости  $f_r$  от приложенного поля и от температуры. Графики представлены на рисунке 32.

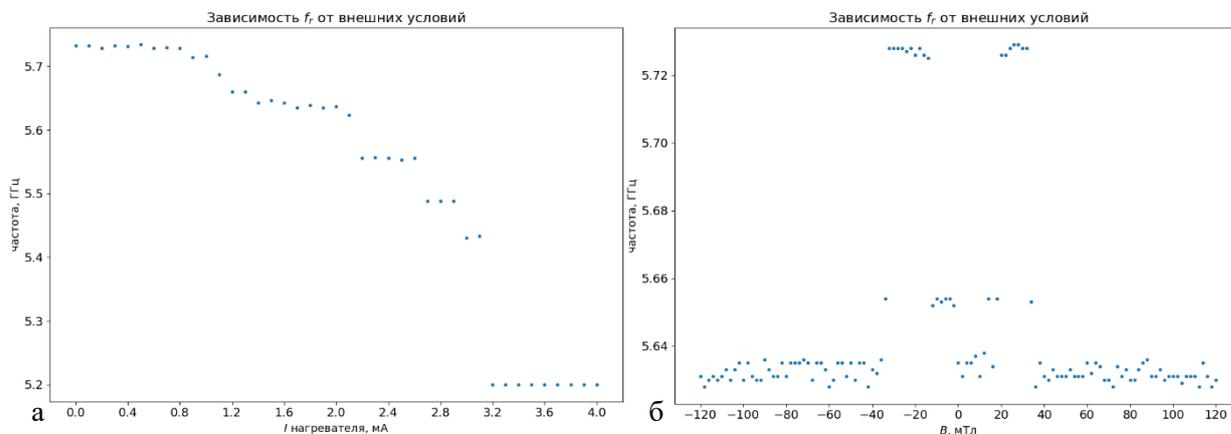


Рисунок 32 – Зависимость резонансной частоты  $f_r$  от: а – температуры; б – внешнего магнитного поля.

По результату, представленному на рисунке 32б, можно заключить, что гибридный SRR из предыдущей партии слабо взаимодействует с внешним магнитным полем, когда поле по модулю превышает 40 мТл. На интервалах  $0 \pm 40$  мТл наблюдаются максимумы  $f_r$ . Пробные измерения позволили откалибровать устройства для измерений гибридных SRR. Далее перешли к измерениям SRR из гетероструктуры Nb/Co/Nb/Co/Nb/Al новой партии.

С целью установления взаимосвязи между кинетической индуктивностью и взаимными направлениями намагниченностей магнитных слоёв структуры провели высокочастотную спектроскопию SRRs новой партии из гетероструктуры Nb/Co/Nb/Co/Nb/Al с номинальными резонансными частотами  $f_0 = 5$  и 7 ГГц и параметрами  $c$ ,  $d$  и  $g$  равными 30 мкм (рисунок 33).



Рисунок 33 – SRRs на Si(100) подложке наклеены на MS (вид под микроскопом): а – сверхпроводящий Nb с  $R = 880$  мкм ( $f_0 = 7$  ГГц), б – гетероструктура с  $R = 1180$  мкм ( $f_0 = 5$  ГГц), в – гетероструктура с  $R = 880$  мкм ( $f_0 = 7$  ГГц).

Перед установкой новых образцов волновод на держателе очистили от следов клея, продули сжатым воздухом от загрязнений. Для большей теплоизоляции пластинки разделили на две части каждую, уменьшая тем самым площадь сечения для потока тепла. При установке SRRs их выравнивают по краю проводящей линии MS для того, чтобы возбуждающее переменное поле имело одно преимущественное направление в области внутри колец. По длине MS образцы расположены около центра, потому что именно эта часть держателя заключена внутри самодельного магнита для криостата. Силовые линии поля в области центра наиболее ориентированы в направлении MS.

В процессе охлаждения до достижения критической температуры  $T_c$  гетероструктуры Nb/Co/Nb/Co/Nb/Al СВЧ сигнал служил для получения контрольных данных о фоновом спектре и зашумлённости. При температуре 2,5 К приступали к СВЧ измерениям всей системы, включающей SRR образец. Диапазон измерений частот устанавливали 4,6–4,8 ГГц; мощность исходного сигнала задавали 3 дБ. Магнитное поле меняли в пределах (–50)–50 мТл с шагом 1 мТл.

Данные представляют собой зависимость амплитуды передачи сигнала  $|S_{21}|$  от его частоты. На рисунке ниже представлены спектры VNA, полученные при развёртке приложенного поля из отрицательных значений к положительным.

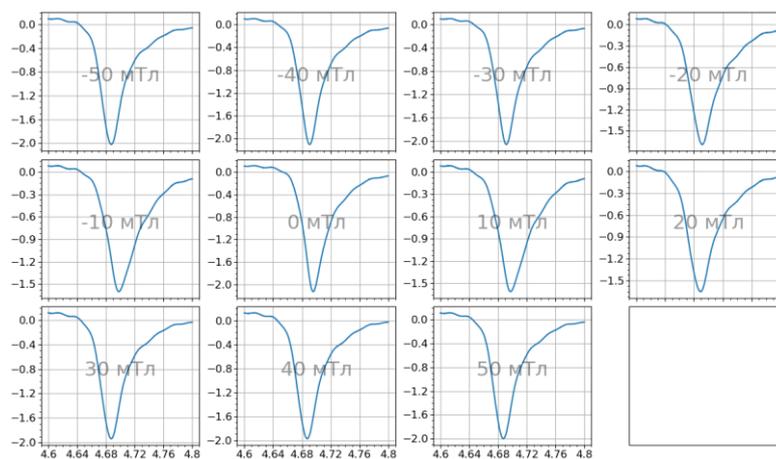


Рисунок 34 – Спектры VNA для SRR из гетероструктуры Nb/Co/Nb/Co/Nb/Al в величинах дБ от ГГц, измеренные при разных полях при температуре 2,5 К.

По экспериментальным данным построили ВЧ-спектр, представленный на рисунке 35, который продемонстрировал изменение резонансной частоты и добротности с изменением приложенного поля. Форма спектра свидетельствует о том, что на гибридный SRR существенно влияет магнитное поле. По сравнению с прошлыми измерениями спектр указывает на большую добротность, а нормировка на контрольный спектр полностью устраняет фон. Этому способствовала большая ширина колец из металла SRR новой партии.

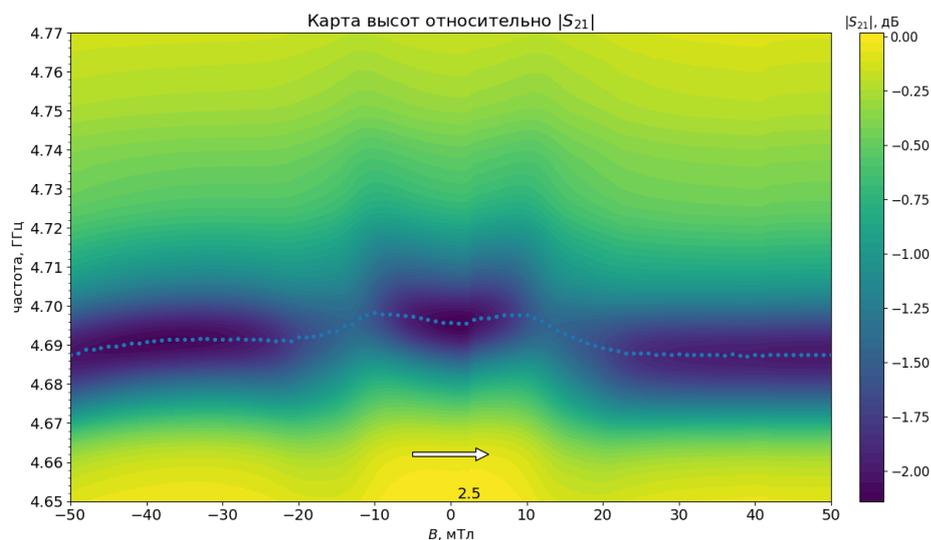


Рисунок 35 – ВЧ-спектр для SRR из гетероструктуры Nb/Co/Nb/Co/Nb/Al, полученный по спектрам VNA. Стрелкой указана развёртка поля, точками обозначены положения минимумов спектров VNA (рисунок 34), числом указано значение магнитного поля на изломе в спектре.

На ВЧ-спектре гибридного SRR видны: область геометрического резонанса SRR до  $-20$  мТл, области пересечения ферромагнитного резонанса  $S_0$  и геометрического резонанса SRR в пределах  $10$ – $20$  мТл и  $(-10)$ – $(-20)$  мТл, поле перемагничивания слоя  $S_0$  толщиной  $1,5$  нм равное  $2,5$  мТл и, либо движение джозефсоновских вихрей между слоями Nb, либо разбиение магнитной структуры  $S_0$  на домены в области  $(-10)$ – $10$  мТл. По минимумам ВЧ-спектра построили график зависимости резонансной частоты от внешнего магнитного поля, который представлен на рисунке 36.

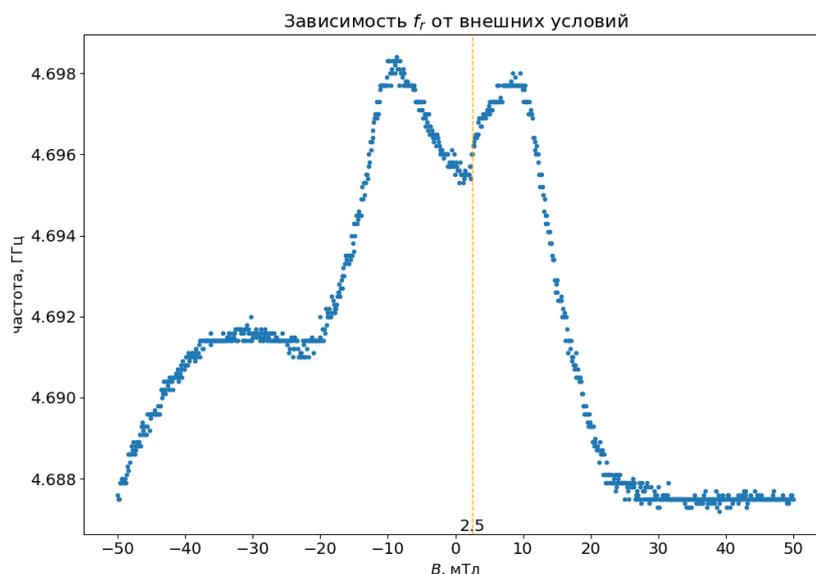


Рисунок 36 – Зависимость резонансной частоты от внешнего магнитного поля, полученная по минимумам ВЧ спектра. Пунктирная линия повторяет положение излома на рисунке 35.

Получено характерное поле  $2,5$  мТл, при котором на зависимости резонансной частоты от магнитного поля наблюдался скачок. Это поле соответствует перемагничиванию одного из слоёв  $S_0$  и перемене параллельной конфигурации намагниченностей на антипараллельную. Изменение резонансной частоты с приложенным полем в области электромагнитного резонанса напрямую связано с изменением кинетической индуктивности (как это было рассчитано в работе [16]). Асимметрия зависимости резонансной частоты относительно  $0$  мТл в области поля перемагничивания демонстрирует возможность контроля кинетической индуктивности полем в данной гетероструктуре, чтобы использовать это для конструирования устройств сверхпроводниковой спинтроники – сверхпроводниковых вентилях и сверхпроводниковых синапсов искусственной нейрональной сети.

## Заключение

В результате проведенных в данной работе исследований можно сделать следующие выводы:

1. Проведена высокочастотная спектроскопия гибридных SRRs
2. Определены лучшие образцы из представленных для получения спектров с наибольшей добротностью
3. Построены зависимости резонансных частот для гибридных и Nb SRRs от магнитного поля и температуры и добротности для Nb SRR от магнитного поля.
4. После обработки спектров обнаружены изменения в кинетической индуктивности в зависимости от приложенного магнитного поля, взаимной ориентации намагниченностей слоёв Co, что позволит использовать это для конструирования приборов сверхпроводниковой электроники и искусственных синапсов.

## Список литературы

- [1] Anatolie S. Sidorenko, Horst Hahn and Vladimir Krasnov. «Frontiers of nanoelectronics: intrinsic Josephson effect and prospects of superconducting spintronics.» *Beilstein J. Nanotechnol* 14 (2023): 79–82.
- [2] Anthony J Annunziata, Daniel F Santavicca, Luigi Frunzio, Gianluigi Catelani, Michael J Rooks, Aviad Frydman and Daniel E Prober. «Tunable superconducting nanoinductors.» *Nanotechnology* 21 (2010).
- [3] BAKURSKIY, S., и др. «Controlling the proximity effect in a Co/Nb multilayer: the properties of electronic transport.» *Beilstein J. Nanotechnol* 11 (2020): 1336-1345.
- [4] «Functional Nanostructures and Metamaterials for Superconducting Spintronics.» *Springer* (2018): 279. <<https://www.springer.com/gp/book/9783319904801>>.
- [5] A. Golovchanskiy, V. V. Bolginov, N. N. Abramov, V. S. Stolyarov, A. Ben Hamida, V. I. Chichkov, D. Roditchev, V. V. Ryazanov. «Magnetization dynamics in dilute Pd<sub>1-x</sub>Fe<sub>x</sub> thin films and patterned microstructures considered for superconducting electronics.» *J. Appl. Phys.* 120.16 (2016).
- [6] Neudecker, G. Woltersdorf, B. Heinrich, T. Okuno, G. Gubbiotti, C.H. Back. «Comparison of frequency, field, and time domain ferromagnetic resonance methods.» *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 307.1 (2006): 148-156.
- [7] Lukas Nulens, Davi A. D. Chaves, Omar J. Y. Harb, Jeroen E. Scheerder, Nicolas Lejeune, Kamal Brahim, Bart Raes, Alejandro V. Silhanek, Margriet J. Van Bael, and Joris Van de Vondel. «Noninvasive Readout of the Kinetic Inductance of Superconducting Nanostructures.» *Nano Letters* 24.36 (2024): 11149-11155.
- [8] M. C. Ricci, H. Xu, R. Prozorov, A. P. Zhuravel, A. V. Ustinov and S. M. Anlage. «Tunability of Superconducting Metamaterials.» *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 17.2 (2007): 918-921.
- [9] Michael C. Ricci, Steven M. Anlage. «Single superconducting split-ring resonator electrodynamic.» *Appl. Phys. Lett.* 88.26 (2006).
- [10] N. Álvarez, G. Alejandro, J. Gómez, E. Goovaerts and A. Butera. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 46 (2013).
- [11] N. Klenov, Y. Khaydukov, S. Bakurskiy, R. Morari, I. Soloviev, V. Boian, T. Keller, M. Kupriyanov, A. Sidorenko, B. Keimer. «Periodic Co/Nb pseudo spin valve for cryogenic memory.» *Beilstein J. Nanotechnol.* 10 (2019): 833-839.

- [12] O. Sydoruk, E. Tatartschuk, E. Shamonina, L. Solymar. «Analytical formulation for the resonant frequency of split rings.» *J. Appl. Phys.* 105.1 (2009).
- [13] R. Morari, V. Zdravkov, E. Antropov, A. Sidorenko. «Nanolayers with Advanced Properties for Superconducting Spintronics.» *J. Nanoelectron. Optoelectron.* 7 (2012): 678-680.
- [14] S. M. Anlage, H. J. Snortland and M. R. Beasley. «A current controlled variable delay superconducting transmission line.» *IEEE Transactions on Magnetics* 25.2 (1989): 1388-1391.
- [15] S. Probst, F. B. Song, P. A. Bushev, A. V. Ustinov, M. Weides. «Efficient and robust analysis of complex scattering data under noise in microwave resonators.» *Rev. Sci. Instrum.* 86 .2 (2015).
- [16] Schegolev, A. E., и др. «Tunable superconducting neurons for networks based on radial basis functions.» *Beilstein Arch.* (2022). Full Research Paper.
- [17] Sidorenko A., Zdravkov V., Morari R. Device for obtaining superconducting films. Патент 175. 31 03 2010 г.
- [18] Veselago, Viktor G. *Sov. Phys. Usp.* 10 (1968): 509.
- [19] Vodolazov, P M Marychev and D Yu. «Extraordinary kinetic inductance of superconductor/ferromagnet/normal metal thin strip in an Fulde–Ferrell state.» *J. Phys.: Condens. Matter* 33 (2021).
- [20] Yi-Chun Chen, Dung-Shing Hung, Yeong-Der Yao, Shang-Fan Lee, Huan-Pei Ji, Chwen Yu. «Ferromagnetic resonance study of thickness-dependent magnetization precession in Ni80Fe20 films.» *J. Appl. Phys.* 101.9 (2007).
- [21] Банных О. А., Будберг П.Б., Алисова С. П. и др. *Диаграммы состояния двойных и многокомпонентных систем на основе железа.* Металлургия, 1986.
- [22] В., Шухардина С., ред. *Двойные и многокомпонентные системы на основе меди.* Наука, 1979.
- [23] Н. П. Лякишев, О. А. Банных, Л. Л. Рохлин и др. «Диаграммы состояния двойных металлических систем.» Ред. Н. П. Лякишев. Т. 2. М.: Машиностроение, 1997. 3 т. 51-53. Справочник.
- [24] Ф., Менде Ф. «Роль и место кинетической индуктивности зарядов в классической электродинамике.» *ИНЖЕНЕРНАЯ ФИЗИКА* 11 (2012): 13-22.