

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

Физический факультет
Кафедра общей физики
Михеев Сергей Сергеевич
КУРСОВАЯ РАБОТА

**Исследование низкотемпературных транспортных свойств слабых
связей на основе сверхпроводящей пленки NbTiN**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №20306

Научный руководитель:

к.ф.-м.н. А.Ю. Миронов

Оценка научного руководителя

« _____ » _____ 2021г.

Преподаватель практикума

д.ф.-м.н. О.Е. Терещенко

Оценка преподавателя
практикума

« _____ » _____ 2021г.

Куратор практикума:

к.т.н. В.Т. Астрелин

Итоговая оценка

« _____ » _____ 2021г.

Аннотация

Целью работы являлось изучение слабых связей на основе сверхпроводящей пленки NbTiN и исследование их низкотемпературных транспортных свойств. В качестве сверхпроводника был выбран NbTiN, обладающий высокой критической температурой, а в качестве слабой связи используется сужение в сверхпроводящей пленке. В ходе эксперимента были изучены свойства слабой связи при высокочастотном излучении. Получены вольт–амперные характеристики при разных уровнях мощности излучения и температурах, определена граница мощности, при которой наш образец теряет сверхпроводящие способности в слабой связи. Также получена зависимость сопротивления от температуры и определена критическая температура.

Ключевые слова: сверхпроводник, слабая связь, эффект Джозефсона, критическая температура.

Оглавление

1. Введение	4
2. Теоретическая часть	4
2.1. Сверхпроводимость	4
2.2. Слабая связь	6
2.3. Эффект Джозефсона	6
2.4. Нестационарный эффект	7
3. Экспериментальная часть	9
4. Результаты эксперимента	10
5. Заключение	13
6. Список литературы	14

1. Введение

Данная работа посвящена изучению слабых связей на основе сверхпроводящей пленки NbTiN и исследованию их низкотемпературных транспортных свойств. В ходе работы необходимо получить вольт – амперные характеристики при разных уровнях мощности излучения и температурах, также зависимость сопротивления от температуры в слабой связи. По полученным данным определить критические значения температуры и мощность излучения, при которых куперовские пары присутствуют в слабой связи и сверхпроводимость между берегами, то есть участками сверхпроводника, не подавлена.

Данная тема имеет не только теоретическое, но и практическое значение для отраслей техники. Использование сверхпроводников позволяет уменьшать размеры оборудования, а также создавать магнитные поля высокой интенсивности, недостижимые обычной аппаратурой. Также сверхпроводники используют для создания кабелей, способных передавать большие потоки энергии без потерь, для создания мощных электрических генераторов и двигателей. Ограничивающим фактором является необходимость поддержания проводника при низкой температуре, что само по себе требует энергозатрат, поэтому наиболее актуальны применения в устройствах с большой мощностью.

2. Теоретическая часть

2.1. Сверхпроводимость

Сверхпроводники – это материалы, электрическое сопротивление которых при понижении до некоторой температуры T_c становится нулевым.

Сверхпроводимость была открыта в 1911 году. При изучении сверхпроводящих свойств было доказано, что сверхпроводимость – это квантовое явление. Подтверждением этому служат эффект Джозефсона, эффект слабой связи.

В сверхпроводнике протекание электрического тока происходит без диссипации энергии. Ключевым параметром является критическая плотность тока I_c . Это значение соответствует величине плотности электрического тока в сверхпроводнике, при превышении которого образец возвращается в нормальное несверхпроводящее состояние.

Еще одним критическим параметром является величина приложенного магнитного поля B_c , при превышении которой восстанавливается электрическое сопротивление сверхпроводника.

Почему же сопротивление сверхпроводников нулевое? Два электрона с противоположными спинами и направлениями движения объединяются в пару, называемую куперовской. Эти пары обладают нулевым суммарным спином. Такие частицы обладают замечательным свойством: если температура ниже T_c , они могут скапливаться на самом нижнем энергетическом уровне в основном состоянии. Чем больше их там соберется, тем труднее какой-либо частице выйти из этого состояния. Для этого необходимо преодолеть энергетический барьер величиной 2Δ (по Δ на каждый электрон в паре). Характерное расстояние между двумя электронами в куперовской паре, называемое длиной когерентности, различно для разных сверхпроводников и может принимать значения 10^{-7} – 10^{-5} см.

Поэтому на нижнем энергетическом уровне находятся куперовские пары, не сопротивляющиеся, то есть сверхпроводящие. Но если посмотреть на другие энергетические уровни, то там необязательно должны находиться пары с нулевым сопротивлением. Такую систему можно представить, как параллельное соединение двух частей, одна с нулевым сопротивлением, а другая не в сверхпроводящем состоянии. Поэтому в целом система обладает нулевым сопротивлением.

Важно различать сверхпроводник от идеального проводника, оба материала пытаются сохранить магнитный поток через свою поверхность. Рассмотрим два случая, сначала охладим идеальный проводник до

температуры ниже критической и поместим его во внешнее магнитное поле. Это поле не проникнет в наш образец. И наоборот, если мы сначала поместим идеальный проводник в магнитное поле, а потом охладим его, то заметим абсолютно другой результат. В этом и заключается отличие сверхпроводника, что он в обоих случаях будет вытеснять магнитное поле из толщи материала, то есть будет сохранять нулевой поток.

2.2. Слабая связь

Под слабой связью понимается два сверхпроводника, соединенных между собой несверхпроводящим участком. Этим переходом может быть изолятор, металл или сверхпроводник с меньшей T_c .

Так как обе части находятся в сверхпроводящем состоянии, в каждой из них будет своя волновая функция сверхпроводника. Если материалы и температуры одинаковы, модули обеих функций должны совпадать. Этого нельзя сказать о фазах, которые могут быть произвольны. Но это до тех пор, пока части изолированы друг от друга. После установления слабого контакта, который не вносит радикальных изменений, а играет роль возмущения, возникает единая волновая функция всего сверхпроводника. Поэтому можно считать, что в слабосвязанных сверхпроводниках устанавливается фазовая когерентность.

2.3. Эффект Джозефсона

Термин эффект Джозефсона в настоящее время относится к совокупности явлений, имеющих место в контактах двух сверхпроводников через слабую связь. В 1962 году появилась короткая теоретическая работа английского физика Б. Д. Джозефсона, где исследовался туннельный переход и было предсказано два эффекта: через контакт в отсутствие приложенного напряжения может течь постоянный сверхпроводящий ток и при конечном напряжении U через контакт помимо обычного постоянного тока будет также течь переменный сверхпроводящий ток частоты $\omega = 2eU/\hbar$.

В 1973 году Джозефсон получил за своё открытие Нобелевскую премию.

Дальнейшие исследования показали, что эффект Джозефсона весьма общий и проявляется не только в туннельных переходах, но и при соединении двух сверхпроводников через слабую связь любого вида.

Первый эффект заключается в том, что если мы будем пропускать слабый ток через слабую связь, то он будет протекать без сопротивления, даже если сама связь сделана из несверхпроводящих материалов. Это возникает из-за свойств сверхпроводников – согласованным, когерентным поведением его электронов. Электроны через слабую связь объединились в единый квантовый коллектив.

По-другому это можно описать так, опираясь на вышесказанные слова: волновая функция электронов с одной стороны объединилась с электронной функцией другой стороны. В итоге все сверхпроводящие электроны стали описываться единой волновой функцией.

Туннельный эффект, присутствующий в слабой связи – это типичная задача квантовой механики. Частица (например, электрон в металле) подлетает к барьеру (например, к слою диэлектрика), преодолеть который она по классическим представлениям никак не может, так как ее кинетическая энергия недостаточна, хотя в области за барьером она со своей кинетической энергией вполне могла бы существовать. Напротив, согласно квантовой механике, прохождение барьера возможно. Частица с некоторой вероятностью может как бы пройти по туннелю через классически запрещенную область, где ее потенциальная энергия как бы больше полной, то есть классическая кинетическая энергия как бы отрицательна. Опыт показывает, что действительно между двумя металлическими обкладками, разделенными тонким слоем диэлектрика (туннельный переход), может протекать электрический ток тем больший, чем тоньше диэлектрический слой.

2.4. Нестационарный эффект

Теперь перейдем к случаю, когда ток превышает критический и на сверхпроводящем туннельном контакте появляется падение напряжения.

Оказывается, приложение постоянного напряжения U приводит к тому, что такой переход начинает самопроизвольно генерировать переменный ток, частота которого ω задается фундаментальным соотношением Джозефсона: $2eU = \omega\hbar$, где \hbar – постоянная Планка, e – заряд электрона. Эта формула совершенно справедлива. Действительно, если на туннельном переходе падает напряжение U , то электроны в одной из металлических обкладок будут обладать потенциальной энергией, большей на eU , чем электроны в другой. В сверхпроводящей обкладке ток переносится куперовскими парами, суммарный заряд которых $2e$, а избыточная потенциальная энергия $2eU$. В результате перехода сквозь диэлектрик электрон попадает в другую металлическую обкладку и должен каким-то образом уменьшить свою энергию, чтобы перейти в равновесное состояние с другими электронами.

В обычном металле это произойдет вследствие возбуждения тепловых колебаний в кристаллической решетке. Из – за таких столкновений избыточная энергия перейдет в тепло. Подобные столкновения приводят в металлах к электрическому сопротивлению, в сверхпроводнике же оно отсутствует. Единственный выход – отдать избыточную энергию $2eU$ в виде кванта электромагнитного излучения $\hbar\omega$.

Если же рассмотреть обратный процесс и поместить переход во внешнее высокочастотное электромагнитное поле, то, если частота этого поля совпадает с частотой джозефсоновской генерации, должен возникнуть резонанс. Оказывается, он возникает не только при совпадении частот, но и когда частота джозефсоновской генерации кратна частоте внешнего поля. В нашем же случае частота излучения 7,5 ГГц, и поэтому подавление сверхпроводимости в переходе происходит плавно, потому что расстояние между ступеньками Шапиро мало.

3. Экспериментальная часть

Блок – схема экспериментальной установки изображена на рис. 1. Для охлаждения образца до температуры близкой к абсолютному нулю, а именно 20 мК, мы использовали криостат Triton 400, внутрь которого помещается сверхпроводящий материал. Образец находится вблизи антенны, которая облучает наш материал. К криостату подключен высокочастотный генератор 4, с которого подается сигнал разной мощности. На образец мы подаем ток, с помощью источника тока Keithley 6430, а измеряем разность потенциалов вольтметром Agilent 34420A. Далее получаем вольт – амперные характеристики при разных уровнях мощности, с помощью компьютерной программы. Получение одной зависимости занимает 20 минут.

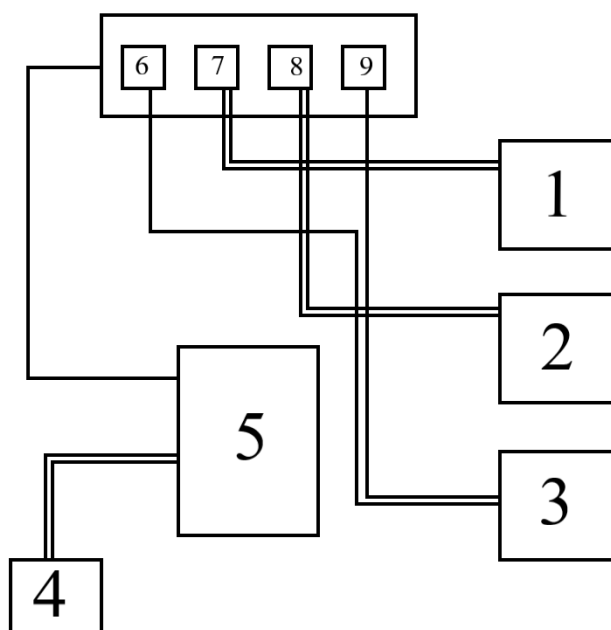


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

1 – фильтр тока; 2 – источник тока; 3 – вольтметр; 4 – генератор высоких частот; 5 – криостат; 6,7,8,9 – контакты образца

Главной задачей было определения уровня мощности излучений, при которых происходят заметные изменения в вольт – амперных зависимостях. И по полученным данным определить границу подавления сверхпроводимости в слабой связи.

В еще двух экспериментах необходимо было получить вольт – амперные характеристики при разных температурах, а также зависимость сопротивления от температуры, с помощью которой можно определить температуру, при которой куперовские пары протекают через слабую связь, что приводит к падению сопротивления.

4. Результаты эксперимента

В первом опыте мы наблюдали, как изменяется сопротивление слабой связи при разных температурах, получили соответствующую зависимость, с помощью которой определили критическую температуру. Можно заметить первое падение сопротивления при 8,5 К, что соответствует появлению куперовских пар в нашем образце, так как его критическая температура равняется именно 8,5 К. Следующее падение напряжения при 6 К. Это критическая температура слабой связи, поэтому в этот момент в промежутке между берегами начинают протекать куперовские пары. А уже при температуре в 4 К начинаются попытки установления когерентности системы. Это можно заметить по большим шумам на графике в логарифмическом масштабе, который изображен на рис. 2.

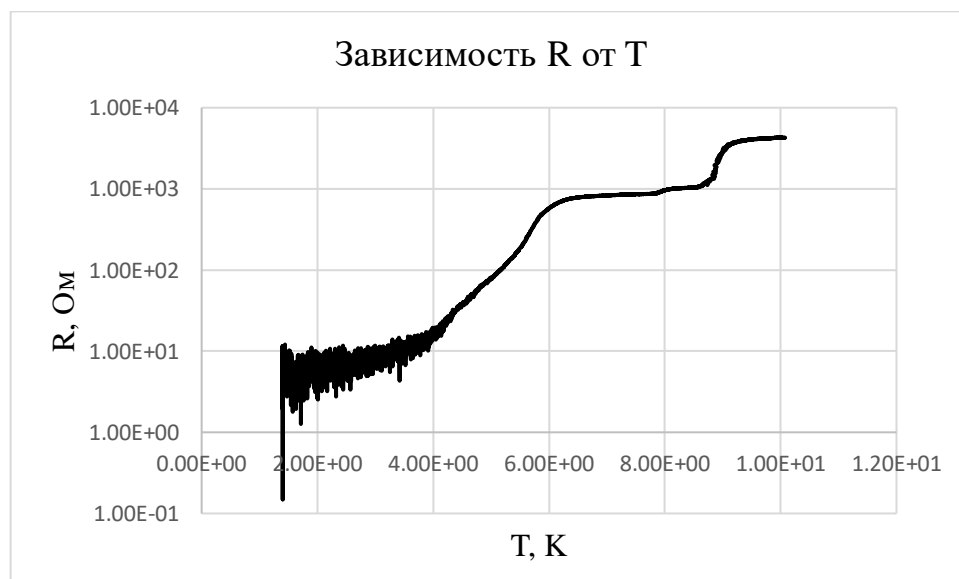


Рис. 2. Зависимость сопротивления от температуры

В следующем эксперименте были получены вольт – амперные характеристики при разной температуре, по этим данным можно

определить критическую температуру, когда куперовские пары начинают протекать в слабой связи. Стоит отметить, что критическая температура нашей пленки 8,5 К, а T_c слабой связи ниже этой отметки. На рис. 3. изображены три кривые при разных температурах, но без особых изменений. А на рис. 4. кривые при температуре перехода слабой связи в сверхпроводимое состояние.

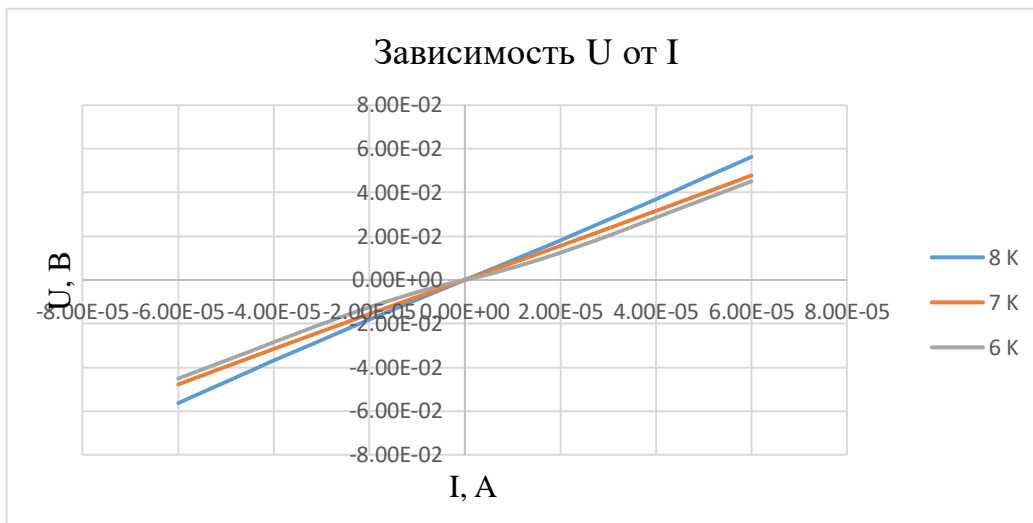


Рис. 3. Зависимость U от I при разных температурах

Начиная с 8 К, мы охлаждали образец сначала на 1 К, а когда стали видны изменения в нашей зависимости меняли температуру таким образом, чтобы понять, когда слабая связь начинает переходить в сверхпроводящее состояние, и в ней появляются куперовские пары. Можно увидеть, что при температурах до 6 К особых изменений не наблюдается, но вот при дальнейшем охлаждении куперовские пары начинают протекать через слабую связь. Этой границе соответствует температура 5,5 – 6 К.

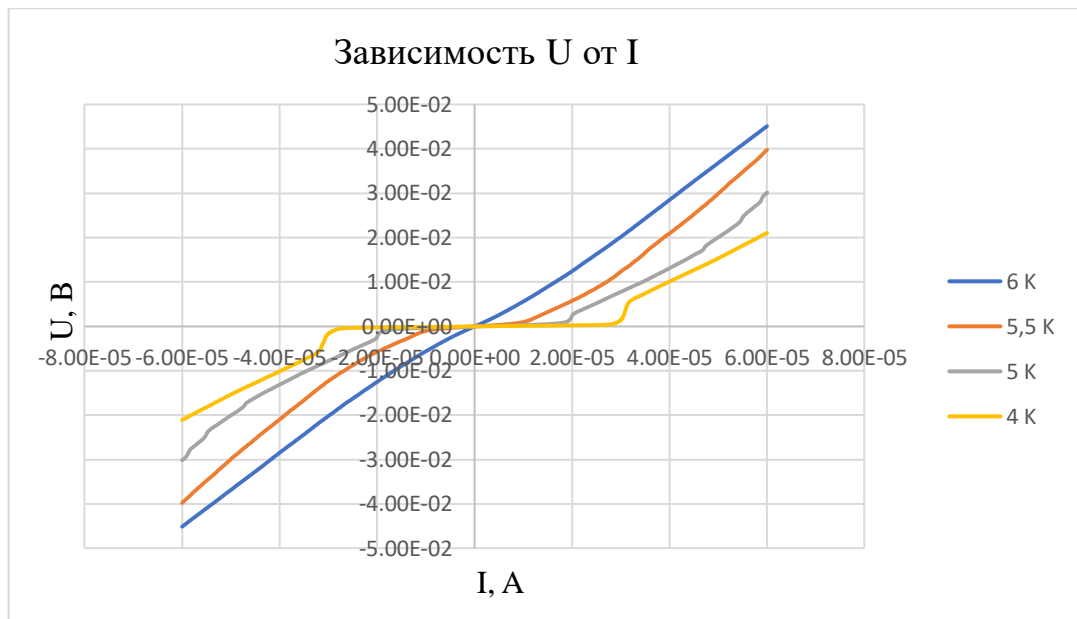


Рис. 4. Зависимость U от I при разных температурах

В заключительном опыте были получены вольт – амперные характеристика при разных уровнях мощности излучения с частотой 7,5 ГГц. Начинали со 180 дБ, что изображено на рис. 5. И несколько зависимостей на рис. 6 для сравнения. И увеличивали с шагом 30 дБ, далее по необходимости. Сначала изменений в графиках мы не наблюдали, но при 25 дБ замечаем резкое изменение.

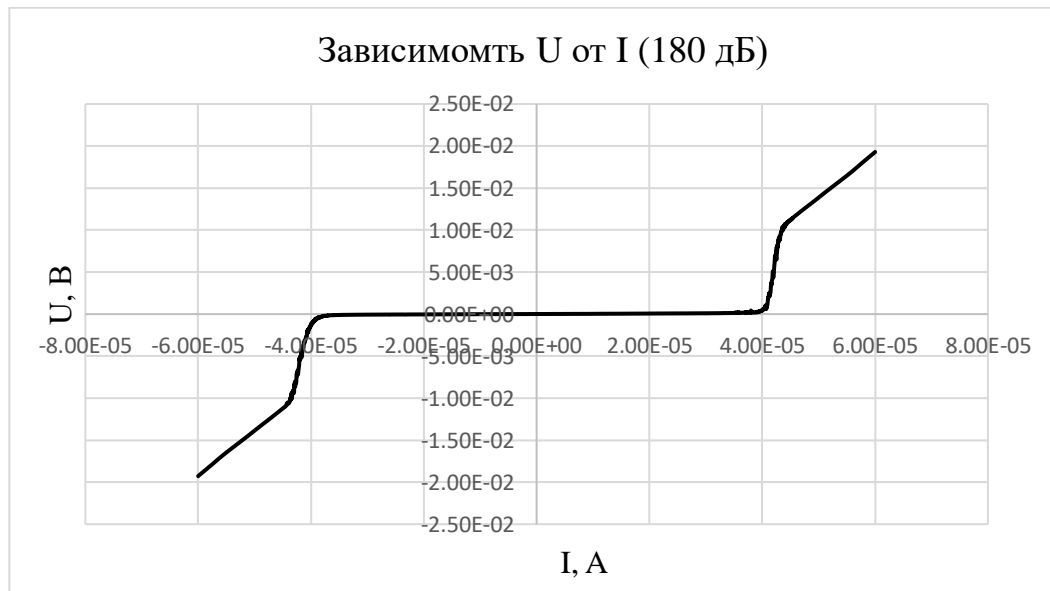


Рис. 5. График зависимости U от I при 180 дБ

Далее уменьшаем мощность до возвращения слабой связи в исходное состояние. Получаем, что 29,2 дБ – это граница, когда сверхпроводимость

в слабой связи подавляется. Ниже этого уровня мощности промежуток между берегами переходит в несверхпроводящее состояние.

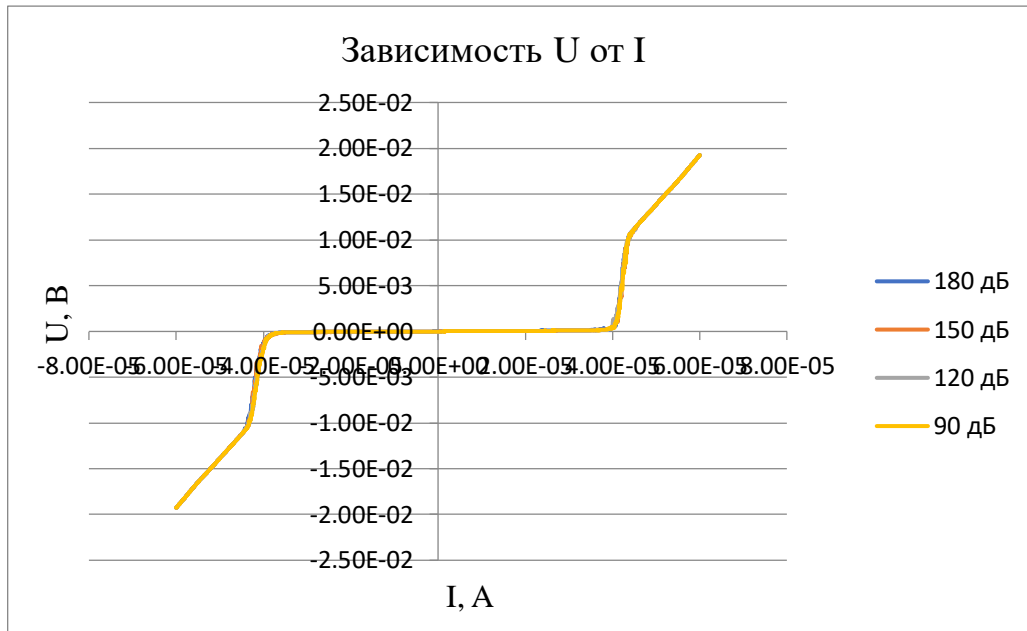


Рис. 6. График зависимости U от I при разных уровнях мощности

Ниже на рис. 7 представлен график при граничном значении уровне мощности, когда слабая связь переходит в несверхпроводящее состояние.

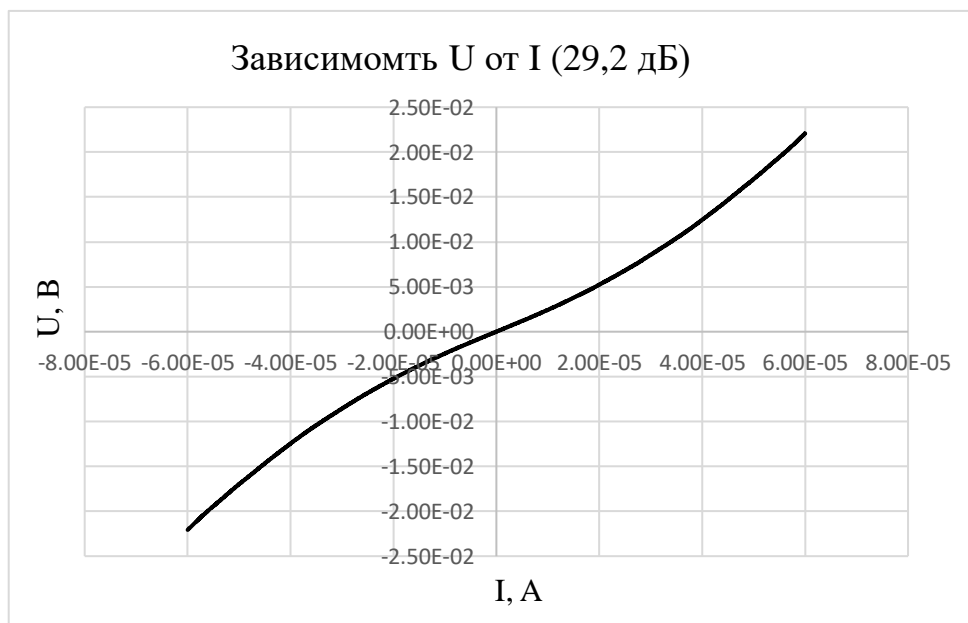


Рис. 7. График зависимости U от I при 29,2 дБ

5. Заключение

В ходе работы были проведены три эксперимента для изучения низкотемпературных транспортных свойств слабых связей на основе

сверхпроводящей пленки. Сначала была получена зависимость сопротивления от температуры. С помощью полученной зависимости можно определить температуру, при которой совершается попытка установления когерентности в системе, при этом на первом этапе этих попыток возникает так называемый эффект проскальзывания фазы, приводящий к ненулевому напряжению на слабой связи в целом и большим шумам в частности. По графику эта температура 4 К.

В следующем опыте были получены вольт – амперные характеристики при разных температурах. С помощью данных зависимостей была определена критическая температура, при которой в слабой связи появляются куперовские пары, что приводит к падению сопротивления. А именно ниже 6 К наблюдается данный эффект. Далее мы получили вольт – амперную зависимость при разных уровнях мощности и по графикам определили граничный уровень мощности, при котором слабая связь еще в сверхпроводящем состоянии, это 29.2 дБ.

6. Список литературы

1. Шмидт В. В. Введение в физику сверхпроводников //М.: МЦНМО. – 2000. – Т. 9.
2. Джозефсона Э. Учебно-методическое пособие/Сост. ЯВ Фоминов, НМ Щелкачёв //М.: МФТИ. – 2010.
3. Гольцман Г. Н. Эффекты Джозефсона в сверхпроводниках //Соросовский образовательный журнал. – 2000. – Т. 6. – №. 4. – С. 96-102.