# УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДИСЦИПЛИНЫ

# СЛАБОТОЧНАЯ СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ

КОНСПЕКТЫ ЛЕКЦИЙ

Лекция 11,12

**11. СКВИД – сверхпроводящий квантовый интерференционный детектор.**

**11.1. Теория ПТ-СКВИДа.**

1. Схема ПТ-СКВИДа.

Это 2 перехода, включенные в СП кольцо.

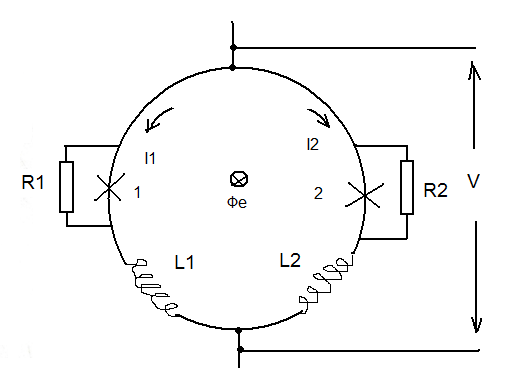


Схема упрощенная: нет емкостей (Это ПТ СКВИД). I - постоянный ток смещения. Фе – внешний поток. R1 R2 – шунтирующие сопротивления через переход. L1 L2 - собственные индуктивности ветвей СКВИДа. I1 I2 - токи через первый и второй переходы. Критические токи переходов Ic1 Ic2.

2. Понятия и определения.

Введем некоторые полезные понятия и определим разные величины.

1.Токи I1, I2=f(t).

I1+ I2=I (11.1)

Поскольку I=const (медленно меняется)

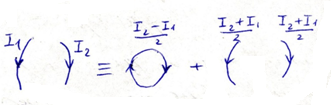
dI/dt=0 или dI1/dt=-dI2/dt

2.Круговой (циркулирующий) ток в кольце (важное понятие)

I=(I2-I1)/2 (11.2)

Это ток, а не плотность тока. За + взято направление I2. . Именно такой ток течет по кругу. И именно он создает поток в контуре.

Действительно:



Токи (I2+I1)/2 не создают потока в контуре: ни равны и потоки, создаваемые ими, противоположны.

Т.е. поток в контуре Фвнут.=1/c(L1+L2)I создает лишь ток I.

Мы условились далее не писать букву с (т.е. с=1).

3. Выражения для токов I1 и I2 через J.

6. Полное напряжение, возникающее на СКВИДе.

8. Далее для упрощения (нам важна физика) L1=L2=L/2, где L-полная индуктивность кольца. Тогда по (11.7а) Ф=Фе+L·(I2-I1)/2. Но (I2-I1)/2 – это же круговой ток. Т.е. (с=1):

Ф=Фе+L·J. (11.8)

3. Вывод основной системы уравнений для ПТ-СКВИДа.

Во-первых,

}. (11.9)

Написаны уравнения Джозефсона.

Далее

φ1-φ2=2πФ/Фо. (11.10)

Эта формула была выведена раньше (связь φ1 и φ2, Ааронов-Бом).

Для простоты 2πn=0 (всё периодично с Фо или 2π).

Избавимся в (11.9) от V1 и V2.

Выразим V1 и V2 по (11.5) – резистивной модели

V1=(I1-Ic sin φ1) R (11.11)

V1=(I2-Ic sin φ2) R

У нас R1=R2=R

Тогда (11.9) с учетом (11.11) будут

 (11.12)

4. Основная система уравнений для ПТ-СКВИДа.

Остался пустяк. Заменим I1 и I2 на величины, относящиеся ко всему контуру, т.е. подставим I1 и I2 из (11.30. Получим

}. (11.13)

5. Замечания.

1) Это основная система уравнений для ПТ-СКВИда.

Для одинаковых переходов.

В рамках резистивной модели.

2) Если Дж. переходы разные, то небольшое усложнение формул.

3) Из этой системы можно получить всё (в рамках резистивной модели, естественно). Все характеристики ПТ-СКВИДа.

4) Например, V=(V1+V2)/2 по (11.6а)

V=. (11.14)

Кажущийся парадокс: в (11.13) не входит L явно. Ответ: фактически L входит через Ј, т.к. Ј определяется величиной L. Ниже я покажу это.

Но сначала введем важный параметр.

6. Параметр βс.

1. Определим

βс=2LIc/Фо . (11.15)

Величина βс~L⋅Ic, т.е. это поток при I=Ic, отнесенный к Фо/2.

Этот параметр определяет характеристики ПТ-СКВИДа (увидим позже).

2. А теперь об ответе на парадокс отсутствия L в (11.13).

Найдем выражение для отношения Ј/Iс (здесь Ј – круговой ток в СП контуре). По (11.8):

Ј/Iс = (Ф-Фе)/LIc.

Учтем (11.10):

Ј/Iс = .

И окончательно запишем этот выражение через βс (см. (11.15)):

Ј/Iс = . (11.16)

Т.е. Ј зависит от βс, т.е. от L. Т.е. в (11.13) L входит через Ј.

**11.2. Характеристики ПТ-СКВИДа.**

Важный параметр dV/dФе (при I=Io=Const).

Полный «размах» V:

ΔV=rd·ΔIm,

ΔIm≈Фо/2L (для βс≈1, было).

Здесь rd-динамическое сопротивление СКВИДа.

Т.е. ΔV≈rd·Фо/2L.

При rd≈1 Ом, L≈10-9 Генри (типично), величина ΔV≈1 мкВ.

Т.е. при таких типичных характеристиках

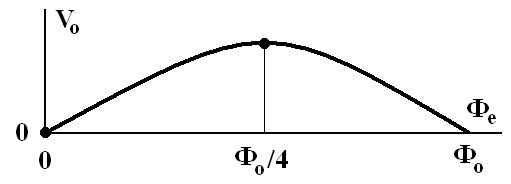
dV/dФе≈2ΔV/Фо≈2 мкВ/Фо.

Если надо мерить dФе≈10-5Фо, то dV≈2·10-5 мкВ. Вполне измеримо (мерят и лучше). Рекорд δФ≈5·10-7Фо (для разумных βс).

**11.3. Принцип работы ПТ-СКВИДа.**

4. Если мы сместим рабочую точку еще дальше по Фе, в Фе=Фо (еще больше поле приложим), то сигнал V(t) будет, как и в первом случае, содержать частоту 2f. Только его фаза будет противоположной. И этот сигнал не пройдет через фильтр частоты f.

5. Т.е. зависимость амплитуды сигнала частоты f от Фе (нашей рабочей точки) будет



Это можно показать, взяв промежуточные рабочие точки.

Можно увеличивать Фе и дальше. Амплитуда сигнала будет периодической функцией Фе с периодом Фо. Но если учесть фазу сигнала (фазочувствительный детектор), то период будет Фо.

6. При малых Фе величина Vo примерно пропорциональна Фе.

7. Сигнал частоты f со СКВИДа усиливается и поступает на синхродетектор. Выходной сигнал синхродетектора при малых Фе пропорционален амплитуде сигнала частоты f, т.е. Vo, т.е. Фе. Но СКВИД и нужен как чувствительный прибор для малых сигналов!

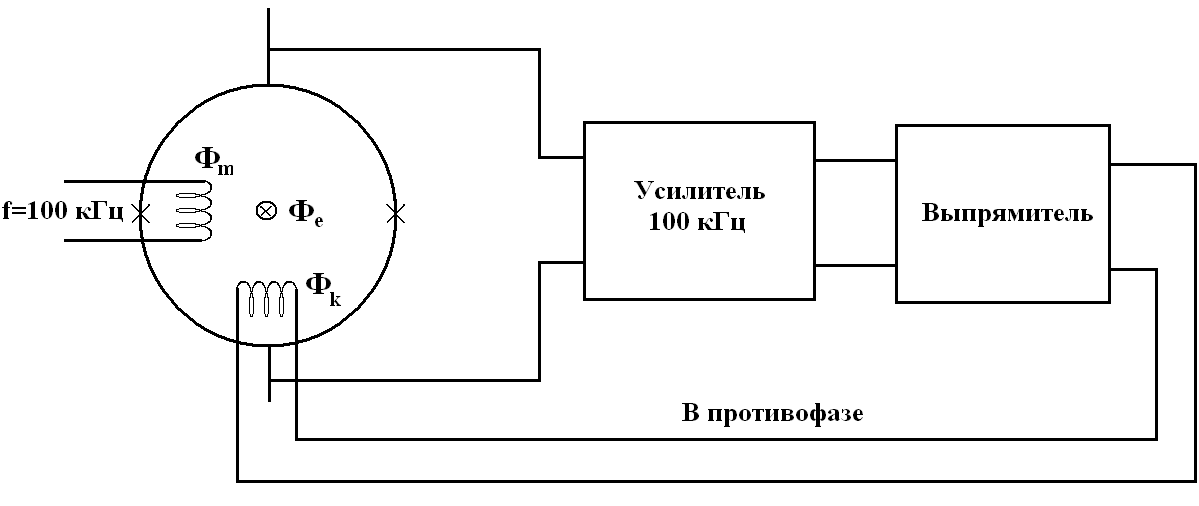
8. Отмечу очень важную вещь. Вышеприведенный график зависимости Vо от Фе – это готовая градуировка! Можно мерить изменение потока Фе (и поля Фе/S) в долях Фо, т.е. в абсолютных единицах.

Вот это и есть принцип работы ПТ-СКВИДа.

**11.4. ПТ-СКВИД потокозапирающей системы.**

Можно сделать отрицательную обратную связь в схеме СКВИДа. Т.е поместить доп. катушку в контур, на которую подать компенсирующий сигнал. Этот сигнал будет компенсировать изменение измеряемого внешнего потока Фе (т.е. рабочая точка будет стоять на месте при изменении Фе).

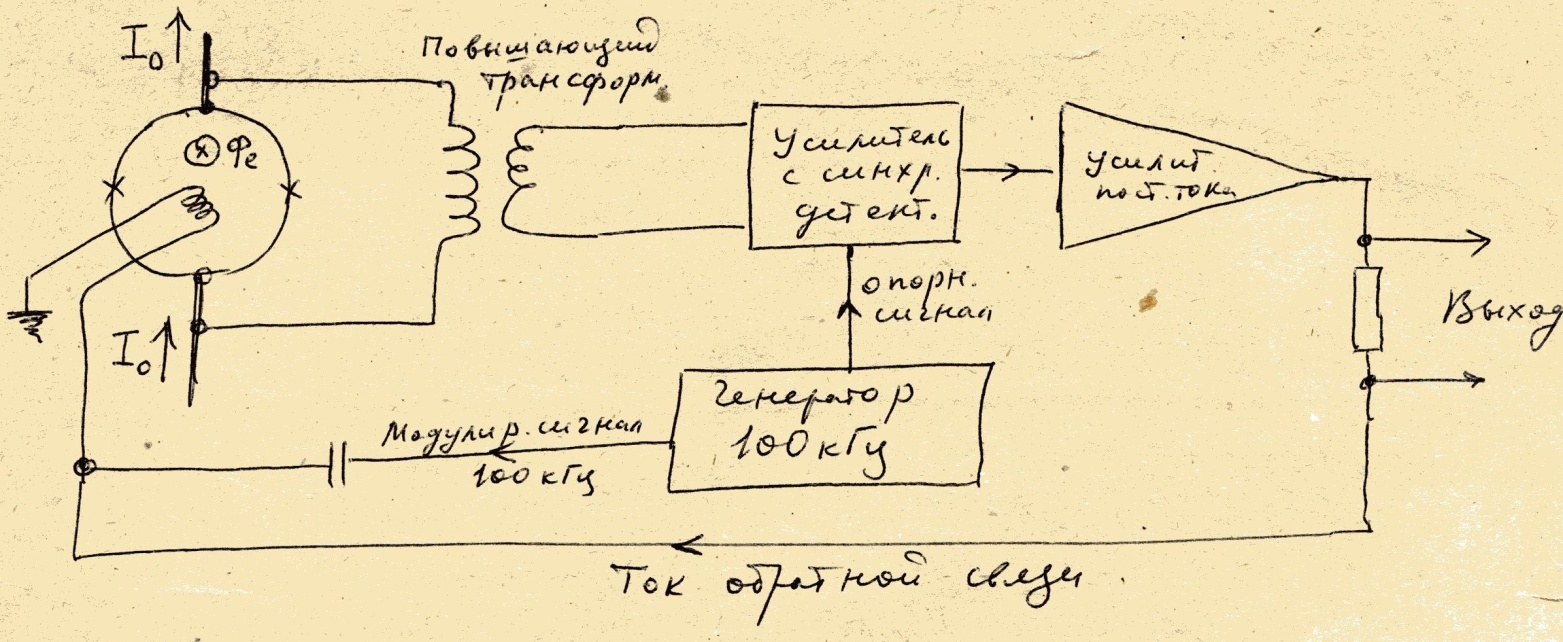
Идея такой схемы



В контуре поток Фе+Фk сохраняется. Появился сигнал частоты f, усилился , выпрямился и в противофазе подан в контур СКВИДа. Т.е. поток в контуре сохранился: ПТ-СКВИД потокозапирающей системы.

Это нуль-детектор. Можно увеличить чувствительность. Рабочая точка, конечно, не в нуле, а в максимуме чувствительности (и амплитуда модуляции не Фо/4, конечно).

Простая схема (упрощенная).



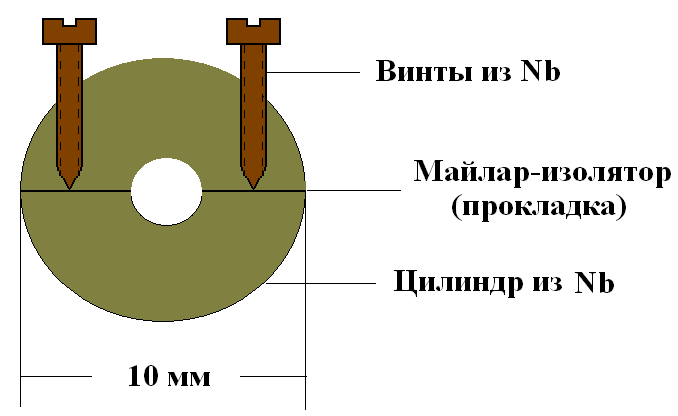
Выходное напряжение пропорционально току обратной связи, т.е. измеряемому магнитному потоку, приложенному извне. Ток обратной связи поддерживает полный квазистатический магнитный поток в контуре, равным значению n·Фо. В приведенной схеме использована одна катушка для модуляции потока (Фk) и обратной связи.

Хорошая полная схема приведена в книге «Слабая сверхпроводимость», под ред. Шварца и Фонера, изд. «Мир», 1980 г., стр. 18.

Это было краткое знакомство с теорией ПТ-СКВИДов.

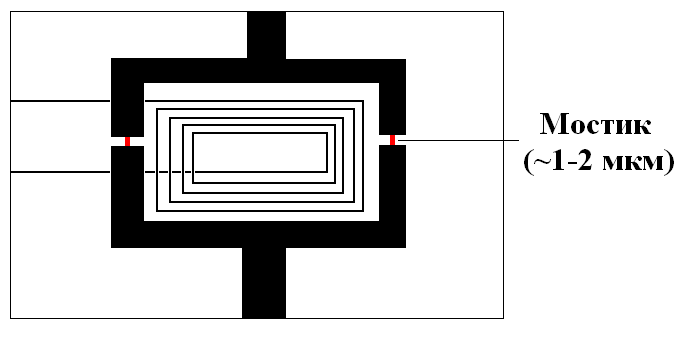
**11.5. Практические конструкции ПТ-СКВИДов.**

1. Точечно-контактный СКВИД Циммермана-Сильвера.



Хорошая резьба. Катушки – в отверстие.

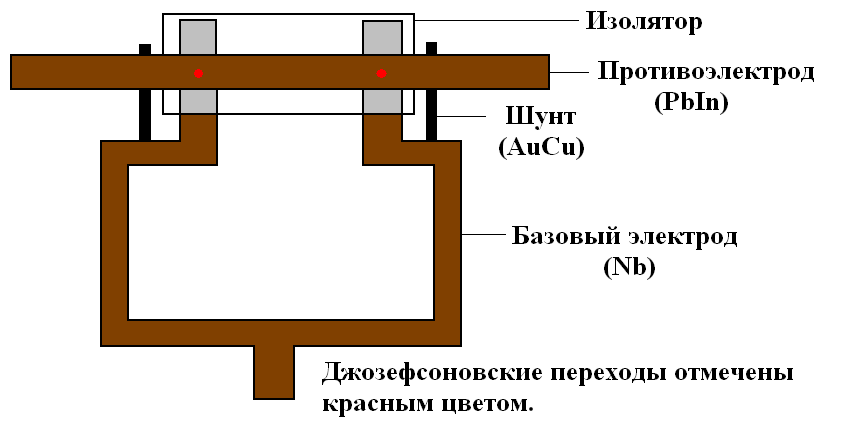
2. Тонкопленочные ПТ-СКВИДы (Мерсеро и др.). На подложке, слабая связь – мостик.



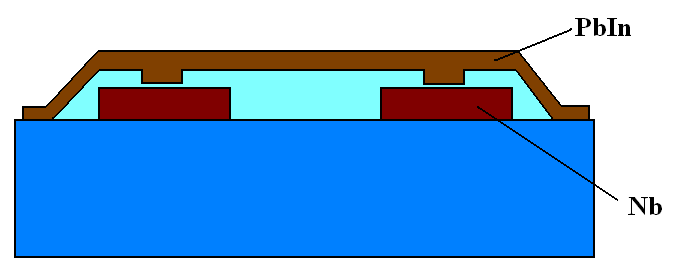
Делают из мягких (Sn) и жестких (Nb) сверхпроводников. Стабильность при перецикливании.

Катушки связи, катушки для измеряемого потока и др. тоже напыляют. Т.е. тогда это многослойная система (+ диэлектрики). Литография.

3. ПТ-СКВИДы на Джозефсоновских туннельных переходах (Кларк и др.).

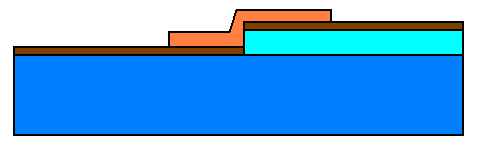


Разрез:



4. ПТ-СКВИДы на торцевых мостиках из Nb3Ge (Ди Лорио, де Лозанн, Бисли).

Сначала был экзотикой, сейчас норма. Торцевой мостик – это такая конструкция:



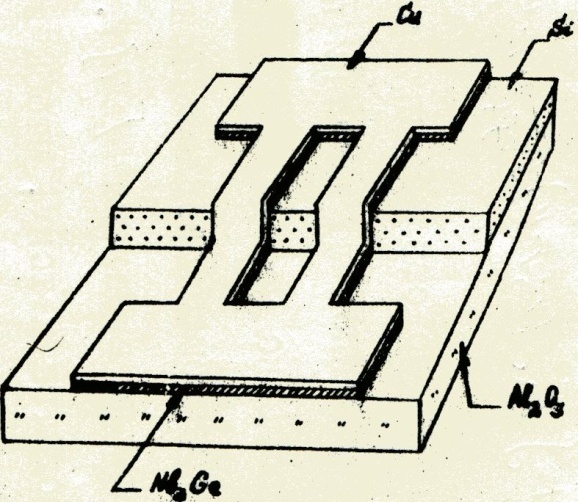
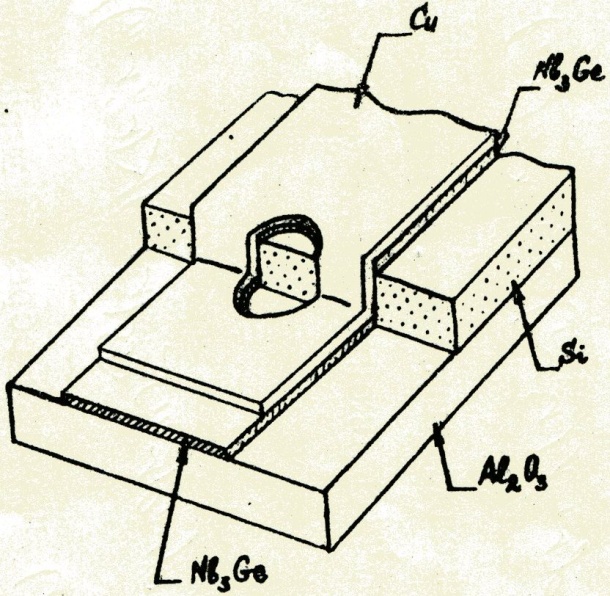
 

Рис. 9 и 10 стр. 28-29

Препринт №47, Головашкин, Павлов.

Сверхпроводящие пленки из Nb3Ge, мостики на торцах из Cu. Отличаются размером петли, т.е. индуктивностью. Здесь длина мостика L=dизолятор.

**11.6. Слабые связи и СКВИДы из ВТСП.**

1. Некоторые оценки.

1) Чтобы при Т≈TN≈78 K получить для ВТСП СКВИДа такое же отношение сигнал/шум как для гелиевых СКВИДов из обычных сверхпроводников, надо Ic увеличить в Т/TN≈20 раз. Действительно, безразмерный параметр (отношение Джозефсоновской энергии к тепловой) γ=ħIc/2ekT должен быть >>1. Тогда СКВИД будет работать нормально. EJ=ħIc/2e-Джозефсоновская энергия связи перехода, kT-тепловая энергия. Надо сохранить отношение Ic/T≈Const при изменении температуры от 4.2 К до 78 К.

2) Но для оптимальной работы надо иметь βс=2IcLs/Фо≈1.

Т.е. индуктивность СКВИДа Ls надо уменьшить в те же 20 раз. Это проблема. Трудность – в связи внешней цепи (катушки) с таким интерферометром (с малой Ls).

3) Достигнутые значения Ic.

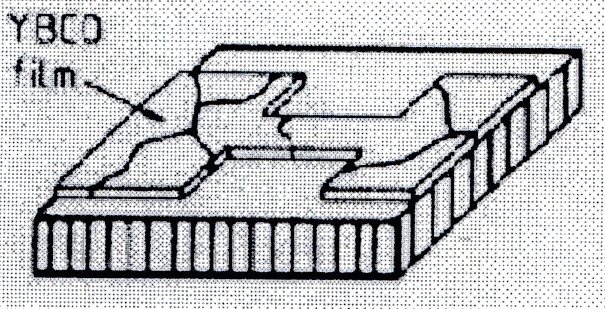
Хорошими значениями считаются криттоки, при которых Vc=IcRN=0.5 мВ (или частота ωс=1.5·1012 Гц). В BaKBiO достигнуто Vc=3.5 мВ. В особых случаях в ВТСП – 10 мВ (ωс=3·1013 Гц). Теория предсказывает 20-30 мВ. Современный рекорд Vc=10 мВ получен на переходе из Bi-2223 (Bi2Sr2Ca2Cu3Ox) с барьером из Bi-2278 (который является диэлектриком, но имеет ту же решетку). Малое значение Vc в реальных ВТСП обычно связано с присутствием на поверхности слоя с малой Δ.

Есть и другие ограничения. Тем не менее, возможность работать при азотных температурах привлекает. Сейчас созданы ВТСП СКВИДы с чувствительностью, приближающейся к чувствительности гелиевых СКВИДов. ВТСП СКВИД-магнитометр фирмы Conductus (США) на чипе 2х2 см2 (бикристалл SrTiO3). Разрешение примерно равно 10 фТл/Гц1/2, Vc=130 мкВ, RN=13 Ом. Размах сигнальной характеристики ΔV=60 мкВ. При помощи этого СКВИДа (впервые для ВТСП СКВИДов) был зарегистрирован магнитный отклик мозга человека. Видите, что уже есть достижения в ВТСП СКВИДах.

2. Типы слабых связей из ВТСП.

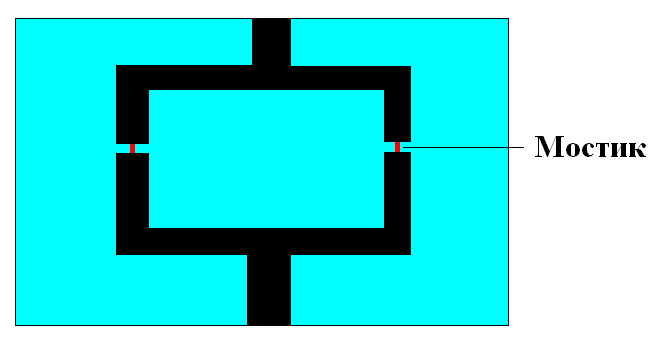
И СКВИДов из двух таких слабых связей.

1) Переход на границе зерна (поликристаллическая пленка).

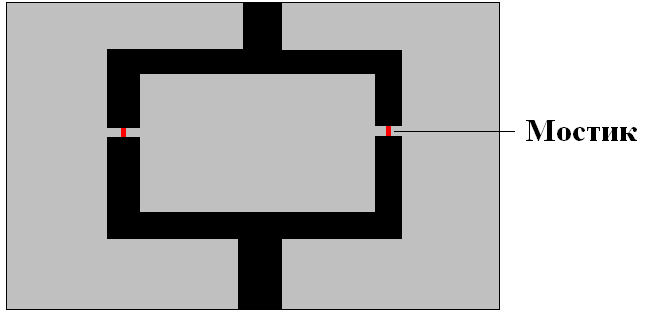


Если достаточно малый мостик, то всего одна граница. Это очень хорошая пленка с размерами зерен ~1 мкм. Обычно ВТСП мостик состоит из большого числа кристаллитов. Но и такие мостики работают. В них работает 1-2 слабые связи (с наименьшими криттоками на пути тока). Первый ВТСП СКВИД (из YBa2Cu3O7) был сделан именно на основе таких мостиков. Ширина мостиков этого СКВИДа была 14 мкм. Второй ВТСП СКВИД (наша работа) имел ширину мостиков уже 2 мкм.

Конструкция пленочного СКВИДа очень проста

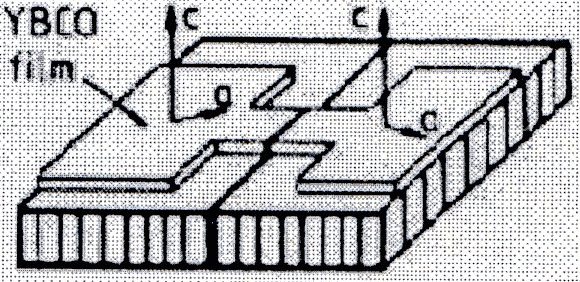


Вариант: подавление сверхпроводимости с помощью облучения через маску энергичными частицами (ионами, Е≥1 МэВ).



На рисунка ВТСП пленка облучена всюду (серый цвет), кроме кольца СКВИДа и мостиков. Преимущество: нет ступенек, удобно наносить другие пленки (покрытия, катушки и т.д.).

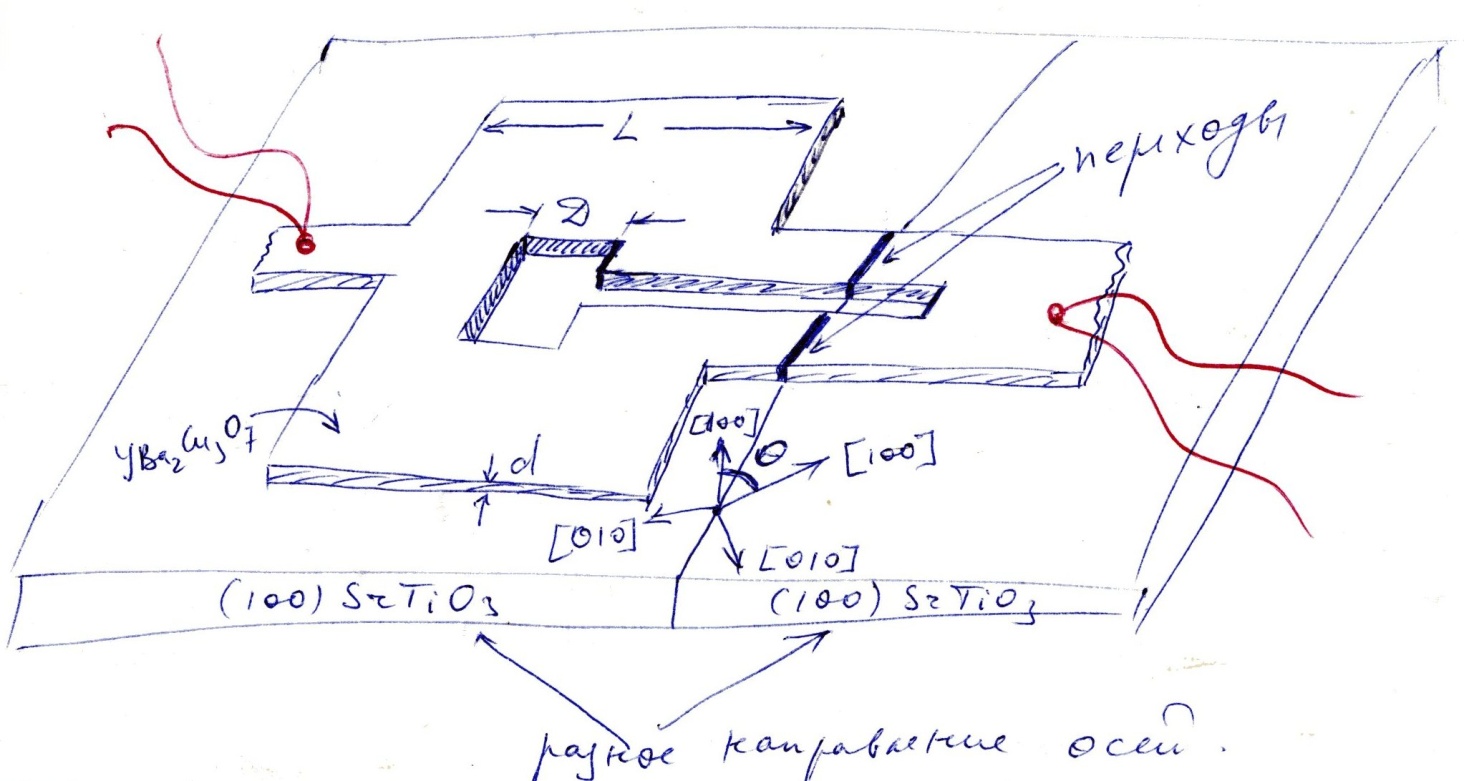
2) Переход на бикристаллической границе (эпитаксиальная пленка на бикристалле).



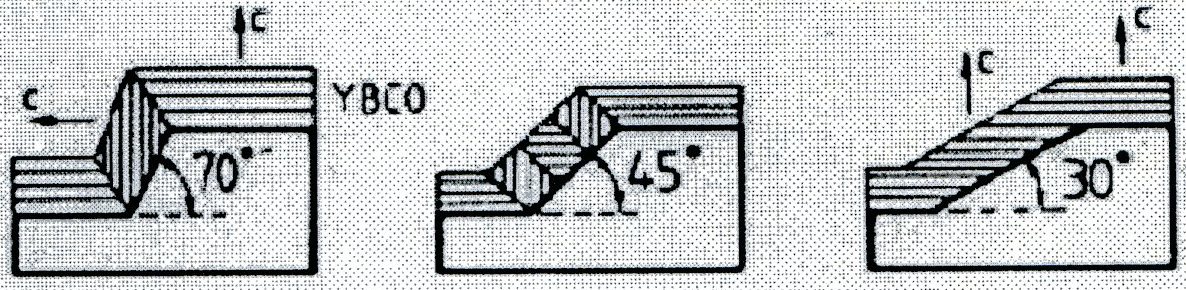
Ось «с» перпендикулярна подложке. Этот тип перехода более контролируем. Бикристалл – это два сваренных кристалла с разным направлением кристаллических осей (угол Θ). Критток в пленке, осажденной на бикристалл, и другие свойства зависят от Θ (критток падает при росте Θ).

Такие переходы очень хорошо выдерживают термоциклирование до комнатной температуры. Очень высок выход при изготовлении таких переходов.

СКВИД на основе таких переходов:

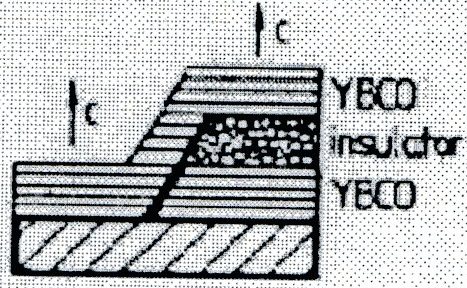


3) Переход на краю ступеньки диэлектрика (ступенчато-торцевой переход)



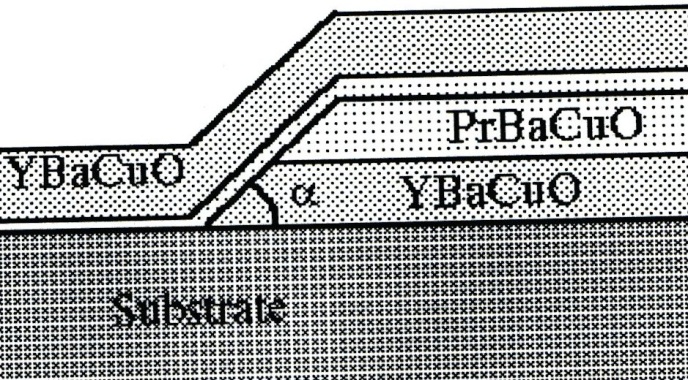
Здесь фактически формируется граница зерна (переход типа 1). Для угла 30о нет Джозефсоновского поведения, т.к. нет зерна. СКВИД делают с помощи литографии Это специфика ВТСП.

4) Переход на краю пленки (торцевой переход)

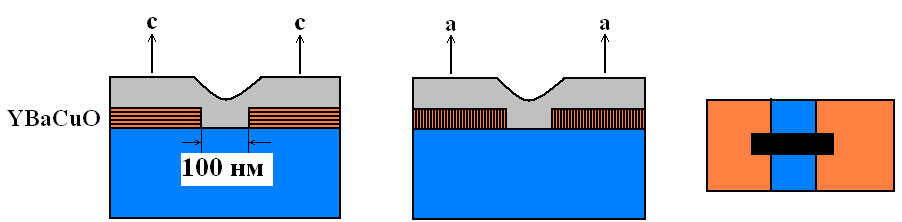


Край делается ионным травлением. Контакт происходит вдоль плоскости «ab». Очень напоминает break-контакт. Этот тип перехода используют и для обычных сверхпроводников.

Когда в качестве изолятора используется пленка PrBa2Cu3O7 (см. рис.), то получают очень высокие значения Vc=IcRN (8 мВ и более, при Т=4.2 К).



5) Мостик из нормального металла с берегами из ВТСП



На пленку ВТСП нанося пленку нормального металла. Мостик – литографией. В нормальном металле длина когерентности ξN~1000 Ǻ.

Трудности изготовления переходов этого типа: все металлы реагируют с ВТСП пленкой, давая полупроводниковый или диэлектрический слой у поверхности. Тогда нет эффекта близости и ухудшаются свойства перехода. Лучшие металлы Ag и Au. Но у них малое удельное сопротивление, а отсюда – малое Vc=IcRN~20-30 мкВ при Т=4.2 К.

6) Туннельный переход (туннельная структура типа «сэндвич»).



Из-за малости длины когерентности ξ~10-15 Ǻ здесь нужен очень хороший барьер и поверхность ВТСП пленок (без загрязнений, напряжений и т.д.). Используют обычно барьер из PrBa2Cu3O7. Это соединение с той же постоянной решетки и обычно не сверхпроводящее. Лучшие пленки получают методом атомной послойной молекулярно-лучевой эпитаксии.

7) Мостик с ослабленным местом.



Методы получения «ослабленного» места (с уменьшенными значениями Тс и Ic) в мостике:

-ионное облучение через маску;

- ионное облучение через резист (с отверстием, сделанным литографией);

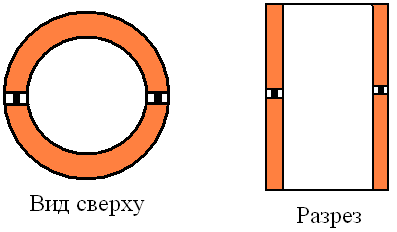
-ионное облучение с фокусировкой;

-алюминиевая полоска снизу или сверху;

-импульс тока через мостик при Т=78 К.

Основная проблема здесь – сделать слабую связь, но не подавить Тс вблизи «ослабленного» места (а значит и максимальную рабочую температуру).

8) ВТСП СКВИДы на основе керамики. Просты. Работают до сих пор.



Пропил сверху и сбоку. Работают и без пропила (просто цилиндр). В таких ВТСП СКВИДах работает внутренний контакт. Поскольку здесь всегда длина мостика L>>ξ (т.к. в ВТСП ξ~10-15 Ǻ).

9) Переходы из некупратных ВТСП.

Считается весьма перспективным BaKBiO (Tc=30 K). У него значительно более высокое ξ, кубическая структура, высокое Vc=3.5 мВ, стабильность при термоциклировании. С элементами из BaKBiO можно работать с рефрижераторами (надежные и достаточно простые до Т=15 К). Соединение MgB2 рассматривается как еще более перспективное: Тс=40 К, выше, чем у BaKBiO.

**11.7. Предел чувствительности.**

1. Обычно определяется шумом усилителя или наводками. Но если их убрать, то:

2. Теоретический шумовой поток для ПТ-СКВИДа (в пределе низких частот):

.

Это «классический» шум, когда Т≠0, иначе – квантовый шум.

Для: L=10-9 Гн – индуктивность кольца,

R=2 Ома – сопротивление в N-состоянии,

Δf=1 Гц – полоса частот,

δФ/Ф=5⋅10-6 (для Т=4.2 К).

Естественно, можно несколько уменьшить L и увеличить R, но не беспредельно. Рекорд на порядок лучше, реальная чувствительность несколько хуже.

3. У СКВИДов разные параметры. «В лоб» сравнивать трудно. Сравнивают разные СКВИДы по их **внутренней энергетической чувствительности ε** (порог чувствительности).

ε = энергии шума в СКВИДе, приходящейся на полосу частот Δf=1 Гц.

4. Для ε теория дает (результат несколько зависит от условий и параметров):

εmin~ ћ/2 ≈ 0.1h.

Это просто соотношение неопределенности:

ΔE⋅Δτ ≥ ћ/2; Δτ ≈ 1/Δf = 1 Гц-1, т.е. ΔE/Δf = ε.

Это уже квантовый шум.

5. Современный рекорд (Ван Харлингер и др.):

ε\* = ε-εf ≈ 0.3h (T=3.4 K).

Здесь ε – экспериментальная энергетическая чувствительность (т.е. мерится именно ε), εf=5**⋅**104**⋅**h/f – их энергетическая чувствительность, определяемая шумом 1/f. Ее в принципе можно определить и перейти в область частот, где εf << ε\*. Но это не всегда просто.

На другом языке:

h=6.62**⋅**10-27 эрг**⋅**сек=6.62**⋅**10-34 Дж**⋅**сек (1 Дж = 107 эрг).

Т.е. 0.1h ≈ 0.7**⋅**10-34 Дж**⋅**сек (теория).

Эксперимент: ε\* ≈ 2⋅10-34 Дж (близко).

Лит.: К.К.Лихарев «Введение в динамику Джоэефсоновских переходов», стр. 126.

Замечание.

Мы уже говорили. Напомним.

Нужно отметить, что с точки зрения построения чувствительных элементов на основе СКВИДа, улучшение энергетического разрешения ε не является самоцелью. Если сделать L→0 (индуктивность петли СКВИДа), то ε→εтеор даже с существующими значениями Vc (шумовой поток δФ~L). Но что значит L→0? Это означает, что диаметр контура СКВИДа →0. Поэтому при передаче измеряемого сигнала на СКВИД с экстремально низкой L потери могут быть столь велики, что достигнутый выигрыш по ε в целом обернется проигрышем по чувствительности к измеряемому сигналу. Т.е чувствительность предельная, а сигнал на этот СКВИД не передашь.

Конец ПТ-СКВИДа.