# УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДИСЦИПЛИНЫ

# СЛАБОТОЧНАЯ СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ

КОНСПЕКТЫ ЛЕКЦИЙ

Лекция 16

**13. Применения СКВИДов и СП слабых связей.**

**13.1. Введение: что можно мерить с помощью СКВИДов.**

Как мы видели, СКВИДы представляют собой чувствительные элементы, реагирующие на изменение магнитного потока. В сочетании с другими элементами, преобразующими физические величины в магнитный поток, СКВИДы становятся удивительно разносторонними (см. статью J.Clarke).

J.Clarke. Superconducting quantum interference devices for low frequency measurements. In: Superconducting applications. SQUIDs and Machines.Eds. B.B.Schwartz, S.Foner. Plenum Press, N.Y., 1977, pp.67-124.

Многое я уже упоминал по ходу курса.

1. Ф, ΔФ или **Н**, **ΔН** (Н=Ф/S). Это фундаментальное свойство СКВИДов.

2. Градиенты ∇Ф или ∇**Н**.

3. V, I, R, L – если их «превратить» в Ф или **Н** (ток ведь создает **Н**).

4. Целый ряд других физических характеристик:

-магнитных, например, магнитную восприимчивость χ;

-тепловых, например, теплоемкость;

-температуру и т.д.

Еще один важный момент. Благодаря исключительно высокой чувствительности по энергии (рассматривали) СКВИДы могут не только регистрировать сверхмалые сигналы, но и оказывают при этом самое минимальное воздействие на объект измерения. Т.е. СКВИДы минимально (по сравнению с другими детекторами) искажают информацию, которую несет в себе исследуемый источник. Иногда (квантовые измерения) это важно. Никогда не задумываемся, что, измеряя что-то, воздействуем на объект! Примеры: положение микрочастицы, спин электрона. Для квантовых измерений это очевидно.

Поэтому сейчас трудно представить себе без СКВИДов современное состояние медицины, техники физического эксперимента, метрологии, геофизики и других областей науки и техники.

**13.2. Трансформатор потока.**

Это СП цепь, один из таких преобразующих элементов, о которых шла речь выше (но один из наиболее важных элементов). Он преобразует поток Ф1 в поток Ф2.



Катушка L2 индуктивно связана со СКВИДом.

Исследуемое поле в районе приемной катушки создает в ней поток Ф1. Он индуцирует незатухающий ток в трансформаторе потока. Тогда во входной катушке, связанной со СКВИДом, будет поток Ф2.

Преимущества:

1. Удобно (измеряемое поле в другом месте, например, поля человека).
2. Дополнительные степени свободы: можно оптимизировать параметры в зависимости от задачи (например, минимальное разрешение по потоку Ф будет при L1=L2, а число витков, размеры и т.д. можно менять).
3. Форма катушек: может быть специальная, подгонка под объект; достигается пространственная избирательность.
4. Катушка L1 может состоять из двух и более катушек (чтобы мерить градиенты полей).

**13.3. Применение СКВИДов в измерительной технике.**

1. Магнитометр. Измерение **Н**.

1) Измеряя поток Ф, тем самым мерим Н=Ф/S. Всё зависит от Ф и периодично с Фо. Градуировка абсолютная!

2) Мерят изменение **Н**.

3) Чувствительность~10-12 Гс⋅Гц-½ (с трансформатором потока, лучшие эксперименты). Даже в пленочных ВТСП СКВИДах, работающих при Т=78 К, достигнута чувствительность по магнитному полю **δН≈10-10 Гс⋅Гц-½.**

«Новости ВТСП» т. 7, в. 19, с. 6 (1994).

Здесь указаны цифры «по уровню шума», т.е. когда сигнал становится равным шуму. Современная техника позволяет мерить сигналы (правда, не «разовые») и меньше шума. С помощью накопителей сигнала. Шум усредняется, а сигнал накапливается. Но время измерения увеличивается. Схему измерения **Н** даже рисовать не нужно: это любая схема СКВИДа, которую мы рисовали.

4) Почему чувствительность выражается в единицах Гс⋅Гц-½? Я уже говорил, но сейчас речь о предельных измерениях. Поэтому повторю.

Чувствительность эквивалентна минимальному измеряемому значению. Принимается равным шумовому значению. Пример: пусть мы измеряем магнитное поле с помощью измерения какого-то напряжения V (выходной сигнал СКВИДа и есть напряжение). Это напряжение выделяется на выходном сопротивлении R. Тогда V=αH, т.е. чувствительность (вернее минимально наблюдаемое изменение) δH=1/α δV~δV (α – постоянная). И .

Но - Шум Найквиста (минимальный классический шум). Отсюда при заданных Т и R чувствительность, т.е. минимальное изменение . Δf – ширина полосы частот вашего измерительного прибора. Она у разных исследователей разная.

Вот поэтому и приводят величину минимально наблюдаемого изменения поля, отнесенную к единичной полосе, т.е. . Эта величина от полосы частот уже не зависит, а только от Т, R и возможно других условий (давление, поле и т.п.). Совершенно аналогично и для других величин.

2. СКВИД-микроскоп.

К классу магнитометров относятся и СКВИД-микроскопы.

Пример: ВТСП СКВИД-микроскоп.

Это магнитометр, измеряющий слабые магнитные поля микрообъектов.

«Перст» **8**, в. 22, с. 4 (2001).

Уже зарегистрированы магнитные поля, генерируемые:

-вихревыми токами;

-магнитотактильными бактериями;

-токами утечки в интегральных схемах.

С помощью такого СКВИД-микроскопа достигнуто пространственное разрешение **10 мкм** (при чувствительности к магнитному полю **20 пТл/Гц-½=2⋅10-7 Гс⋅Гц-½.**

1 пТл=10-12⋅104 Гс.

В НТСП СКВИД-микроскопе (при ТНе) чувствительность **1 пТл/Гц-½=10-8 Гс⋅Гц-½.**

Существуют конструкции СКВИД-микроскопов с рефрижераторами замкнутого цикла (например, с рефрижератором Джоуля-Томсона, в котором отсутствуют движущиеся части на холодном конце).

Создан ПТ-ВТСП СКВИД-микроскоп с использованием пленки **YBaCuO** (**d=200 нм**) на бикристаллической подложке SrTiO3. Площадь СКВИДа **1.2⋅10-5 см2**, чувствительность **17.5 пТл.** Конструкция СКВИДа позволяет использовать его без магнитного экрана.

Для микроскопа нужно S→0, т.е. L→0. Проблема чувствительности.

3. Градиентометр.

Измеряет ∇**Н** или первую производную dH/dx.

Схема (виток=катушка):



Постоянное поле **Н** дает сигнал = 0 (встречные токи в катушках 1 и 2).

Разница вызывает сигнал.

Чувствительность достигнута **10-11 Гс⋅см-1⋅Гц-½.** Других приборов, меряющих градиент поля с такой чувствительностью просто нет.

4. Недиагональный градиентометр.



Так располагаются катушки 1 и 2. Мерит изменение поля вдоль оси «у».

5. Градиентометр второй производной.

Мерит d2H/dx2.

7. Вольтметр (упрощенно).

10. Измерение магнитной восприимчивости.

Установка типа градиентометра. В одном плече образец. Всё жестко закреплено.



Без образца сигнал = 0. С образцом измеряется поток, создаваемый в катушке 1.

Точнее:

при 100%-ном заполнении катушки образцом магнитная индукция в катушке 1 будет В=(1+4πχ)Н. И поток через катушку 1 будет Ф1=В⋅S=(1+4πχ)⋅HS=(1+4πχ)⋅Ф2.

Где Ф2=HS – поток через катушку 2 (без образца).

Т.е. сигнал на СКВИДе, пропорциональный разности потоков через катушки, будет пропорционален

ΔФ=Ф1-Ф2=4πχФ2~χ.

Конечно, заполнение катушки образцом трудно сделать полным и это надо учитывать. Поток Ф2 мерится при заэкранированной катушке 1.

Крепление образца:



Астатическая пара катушек = на которую не влияет внешнее поле. В поле возникают доп. силы и может быть смещение катушек, т.е. ложный сигнал. Ведь в этом методе измеряются очень слабые сигналы.

11. Измерение теплоемкости и тепловых потоков (при низких температурах) с помощью СКВИДа.

Здесь К-теплопроводность нормального элемента Ресквида. Значит, возникнет ТЭДС (т.е. разность потенциалов V) на N-слое

V=(ТЭДС)=α·ΔТ.

Здесь α-коэффициент Зеебека.

Значит, СКВИД начнет генерировать на частоте f

ħf=2eV.

Измеряя f и зная α, К, найдем

.

Как измерить f – ниже.

Так мерят потоки тепла. Теплопроводность контакта не мала.

2. Теплоемкость.

Объект Х.

Определив Тх: Тх=То+ΔТ (как и ранее по f=2eV/h) от известного ΔQ, получим

С=ΔQ/ΔТ=(2e/hf)αΔQ.

ΔQ=I2R, либо излучение (которое тогда поглощается чернью).

Можно мерить и др. физические величины.