

Сверхпроводящие квантовые интерференционные датчики (сквиды) и их применение.

1. Актуальность.

Вопрос об изучении и применении сквидов остаётся актуальным на сегодняшний день благодаря тому, что они обладают исключительной чувствительностью к магнитным полям и могут быть использованы для решения многочисленных задач в таких областях как: медицина, геофизика, промышленность и многие др.

2. Что из себя представляет сквид?

В простейшем случае сквид – это кольцо из сверхпроводящего материала, в котором присутствуют один или несколько Джозефсоновских контактов.

3. Какие эффекты необходимы для понимания того, как сквид измеряет величину магнитного поля?

Сверхпроводимость

Квантование магнитного потока

Эффект Джозефсона

Эффект Мейсснера

Эффект макроскопической квантовой интерференции

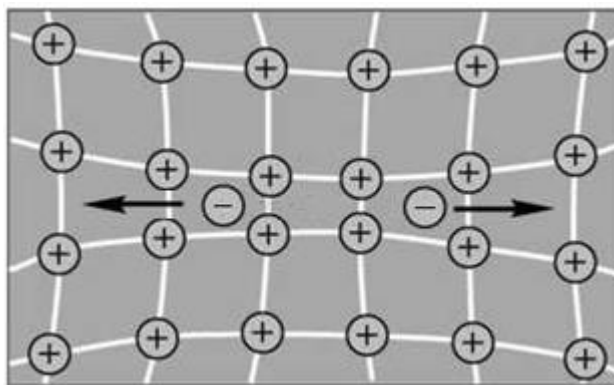
4. Пояснение каждого понятия.

Сверхпроводимость – это фазовое состояние вещества, находясь в котором оно обладает строго нулевым сопротивлением R для постоянного тока, при этом $B_{in} = 0$.

Ток сверхпроводимости отличается от тока проводимости в электродинамике (который определяется сторонними силами, например ЭДС). Для поддержания тока сверхпроводимости не требуются внешние электрические силы. Тогда под действием каких сил происходит незатухающее упорядоченное движение электронов? На этот вопрос ответила микроскопическая теория сверхпроводимости (теория БКШ по имени трёх учёных: Бардина – Купера – Шриффера). В ней доказывается, что при

определенных условиях между электронами в сверхпроводнике возникает сила притяжения и они объединяются в так называемые Куперовские пары. Эти пары обладают нулевым суммарным спином и поэтому являются бозе-частицами (т.е. подчиняются статистике Бозе-Эйнштейна). Такие частицы могут при температуре ниже критической скапливаться на самом нижнем энергетическом уровне, т.к. для них не действует принцип запрета Паули. Для того, чтобы выйти из этого состояния бозе-частице необходимо преодолеть энергетический барьер величиной 2Δ (Δ на каждый электрон в паре). Все такие частицы при этом описываются единой волновой функцией или, другими словами, когерентны. Характерное расстояние между двумя электронами в Куперовской паре называется длиной когерентности волновой функции Куперовских пар (обозначается ξ) и для различных сверхпроводников принимает значения $10^{-7} - 10^{-5}$ см.

Итак, сверхпроводимость можно представить себе таким образом: при температуре меньше критической для данного сверхпроводника электрический ток переносится Куперовскими парами, которым очень трудно рассеяться на дефектах кристаллической решетки и различных примесях т.к. каждому электрону для рассеяния вначале нужно преодолеть энергию Δ для разрыва Куперовской связи, а вероятность этого при температурах меньше критической крайне мала.



Куперовская пара

Будем рассматривать сверхпроводящее кольцо. Поскольку при $T < T_c$ рассеяния электронов не происходит, то сопротивление сверхпроводника равно 0, возбужденный ток сверхпроводимости таким образом будет существовать бесконечно долго. Магнитный поток, пронизывающий кольцо, принимает значения кратные элементарному кванту потока:

$$\Phi_0 = \frac{h}{2e} = 2.07 \times 10^{-15} \text{ Вб.}$$

$$\Phi = m\Phi_0 ; m = 0,1,2, \dots$$

Это явление называется квантованием магнитного потока.

Для рассмотрения эффекта Джозефсона вспомним понятие туннельный эффект – преодоление частицей потенциального барьера с некоторой вероятностью, который она по классическим представлениям преодолеть не может, т.к. её кинетическая энергия недостаточна, хотя в области за барьером она вполне могла бы существовать.

Эффект Джозефсона.

Стационарный эффект Джозефсона состоит в том, что постоянный сверхпроводящий ток $I < I_c$ может протекать через Джозефсоновский переход без приложения напряжения. Было выяснено, что эффект Джозефсона наблюдался и в сверхпроводящих слабых связях (обычно металлах) – участках сверхпроводящей цепи, в которых критический ток существенно подавлен, а размер участка – порядка ξ . Также известно, что величина постоянного тока, протекающего через Джозефсоновский переход зависит от разности фаз волновых функций сверхпроводников по разные стороны от перехода таким образом:

$$I = I_c * \sin(\varphi)$$

Где I_c – критический ток слабой связи; φ – разность фаз волновых функций.

При пропускании тока $I > I_c$ через переход и при наличии постоянного магнитного потока имеет место нестационарный эффект Джозефсона – токи I_s и I_n , связанные соотношением $I = I_s + I_n$, (I_n – ток проводимости, переносимый обычными электронами, I_s – ток сверхпроводимости, переносимый Куперовскими парами), начинают осциллировать в противофазе с частотой, пропорциональной напряжению на переходе, (частота осцилляций: $\Omega = \frac{2e}{\hbar} V$); это приводит к осцилляции напряжения – так называемая Джозефсоновская генерация т.к. $V(t) = I_n(t) * R$. Система описывается уравнением:

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{2e}{\hbar} V ;$$

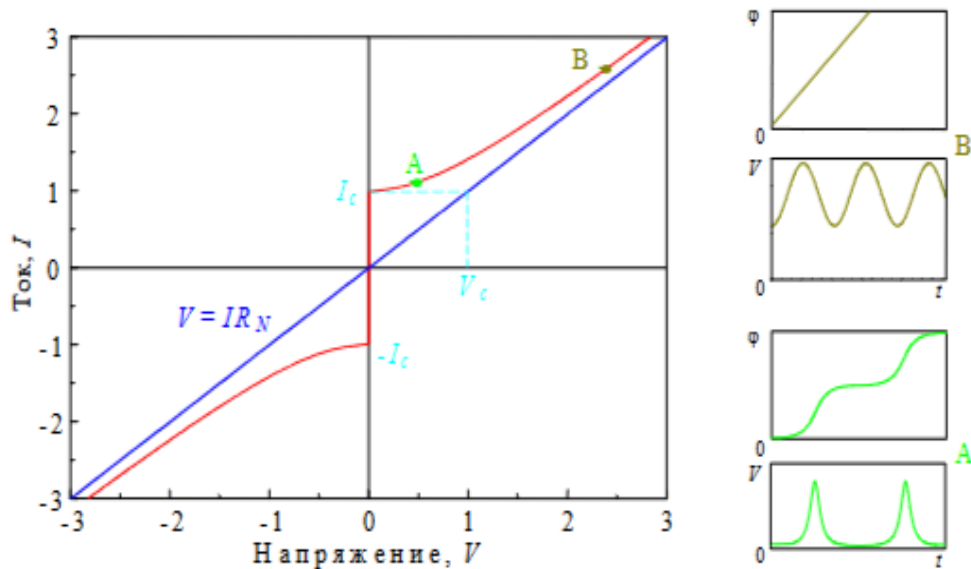
φ – разность фаз между волновыми функциями Куперовских пар по обе стороны от переходов.

ВОЛЬТ–АМПЕРНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Наиболее важной и легко измеряемой характеристикой джозефсоновского элемента является его ВАХ – зависимость среднего напряжения \bar{V} на

переходе от тока через I него. Эта характеристика отражает внутреннюю динамику перехода. ВАХ джозефсоновского элемента и состоит из сверхпроводящей или S –ветви, для которой $\bar{V} = 0$, и двух резистивных или R – ветвей, где $\bar{V} \neq 0$.

При $\bar{V} \rightarrow 0$ характер осцилляций напряжения имеет ярко выраженный импульсный вид, а по мере увеличения частоты джозефсоновской генерации ее форма приближается к синусоидальной при неизменной амплитуде осцилляций.



Эффект макроскопической квантовой интерференции в скивде – немонотонная зависимость критического значения сверхпроводящего тока от величины внешнего магнитного потока, пронизывающего контакт.

В случае, когда поток внешнего магнитного поля, проникающего в контакт равен целому числу квантов Φ_0 результирующий ток через переход становится равным 0 (это следует из фундаментального соотношения для любого сверхпроводящего кольца: $\Delta\varphi = \frac{2\pi\Phi}{\Phi_0}$) при потоке, равном целому числу квантов Φ_0 изменение фазы кратно 2π , волновые функции по обе стороны от перехода находятся в фазе, происходит конструктивная интерференция волновых функций Куперовских пар – возникает циркулирующий ток внутри контура, создающий собственное магнитное поле, компенсирующее внешнее. Результирующий ток через контур становится равным 0.

Упомянем эффект Мейснера, играющий важную роль при работе скивда. Эффект Мейснера – это изменение магнитных свойств вещества при переходе в сверхпроводящее состояние. А именно: при охлаждении в

постоянном и не очень сильном магнитном поле, при температуре меньше температуры сверхпроводящего перехода T_c магнитное поле выталкивается из толщи сверхпроводника. Физически это объясняется тем, что в очень тонком у поверхности сверхпроводника слое начинает течь незатухающий ток, магнитное поле им создаваемое компенсирует внутри вещества внешнее магнитное поле. Толщина “токового” слоя характеризуется параметром λ – называемым глубиной проникновения магнитного поля в сверхпроводник. Таким образом, для всех сверхпроводников существует область магнитных полей, в которой одновременно $R = 0$ и $B_{in} = 0$.

В силу эффекта Мейсснера стенки сверхпроводящего кольца не могут пропускать через себя силовые линии магнитного поля. Поэтому число квантов потока n в сплошном кольце остается «замороженным». Если теперь изменить внешнее поле, то это возбудит незатухающий ток в кольце $\Delta I = \frac{\Delta\Phi_{\text{внеш}}}{L}$, такой, чтобы полный поток оставался равным целому числу квантов.

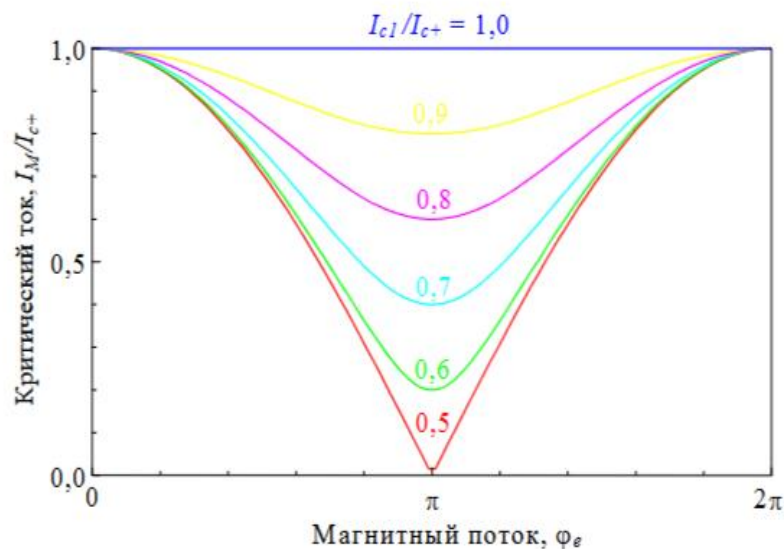


Рис. 5. Критический ток двухконтактного интерферометра I_m как функция потока $\Phi_e = (\Phi_0 / 2\pi)\varphi_e$ внешнего магнитного поля. Ток нормирован на суммарный критический ток джозефсоновских переходов $I_{c+} = I_{c1} + I_{c2}$.

Продолжим рассмотрение сверхпроводящего кольца с одним Джозефсоновским переходом.

Пусть сначала внешнее поле и ток в контуре равны 0. Начнем увеличивать поток Φ внешнего магнитного поля – по правилу Ленца контуре появится сверхпроводящий ток, своим полем компенсирующий внешний поток. При токах через контур меньших критического для перехода вследствие эффекта Мейсснера магнитное поле выталкивается из объема сверхпроводника, создается энергетический барьер для проникновения квантовых вихрей магнитного поля в кольцо. Однако при превышении тока критического значения сверхпроводимость в Джозефсоновском переходе нарушается и квантовые вихри могут проникнуть в область слабой связи, где они остаются локализованными опять же из-за эффекта Мейсснера. Итак, в области слабой связи существуют вихри, называемые Джозефсоновскими вихрями. Их количество строго определено количеством квантов потока, проникших в слабую связь. При превышении тока значения I_c в первый раз в слабую связь войдет 1 квант потока Φ_0 , направление тока изменится на противоположное. Говорят, что контур перешёл в новое квантовое состояние. При дальнейшем увеличении внешнего поля этот процесс будет продолжаться циклически: при определенных значениях внешнего потока ток будет превосходить критический, в область слабой связи будет проникать следующий квант потока, ток будет менять направление и т.д.

Итак, изменение величины внешнего магнитного поля приводит к изменению числа вихрей, “захваченных” в области слабой связи. Каждый вихрь несёт в себе квант магнитного потока, который влияет на фазу волновой функции Куперовских пар, проходящих через него, это приводит к изменению тока, протекающего через сквид.

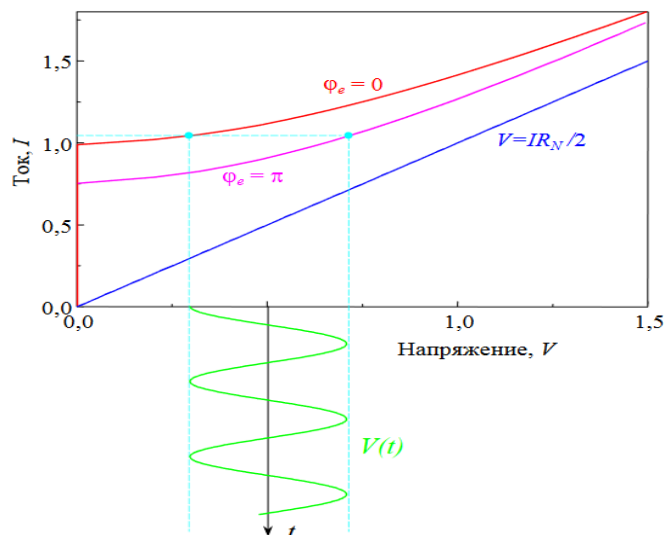


Рис. 6. ВАХ двухконтактного интерферометра для значений внешнего магнитного потока $\Phi_e = 0$ и $\Phi_e = \pi$, а также соответствующая сигнальная характеристика $\bar{V}(t)$ при линейном нарастании внешнего потока Φ_e .

Особенно ярко квантовые свойства сверхпроводящего состояния проявляются при включении в контур двух Джозефсоновских контактов. Полный ток I определяется интерференцией токов, протекающих через контакты:

$$I = I_c * \sin\varphi_1 + I_c * \sin\varphi_2$$

Где φ_1 и φ_2 – скачки фаз волновых функций на переходах, а критические токи для контактов взяты для простоты одинаковыми. В данном случае I обращается в 0 когда поток внешнего поля Φ равен полуцелому числу квантов Φ_0 .

Описанные явления лежат в основе сквидов.

Сквид обычно работает в режиме, при котором через него пропускается постоянный ток, близкий к критическому для данных переходов. Как было сказано раньше изменение внешнего магнитного потока приводит к изменению разности фаз между волновыми функциями Куперовских пар на Джозефсоновских переходах согласно уравнению $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = \frac{2\pi\Phi}{\Phi_0}$, изменение разности фаз влияет на величину сверхпроводящего тока через каждый переход, согласно основному соотношению Джозефсона:

$I = I_{ck} * \sin(\varphi_k)$, $k = 1, 2$ в случае двух переходов. Изменяется полный ток через сквид: $I = I_{c1} * \sin(\varphi_1) + I_{c2} * \sin(\varphi_2)$;

Это приводит к изменению напряжения на сквиде, т.к.

$$V = \left(\frac{\hbar}{2e}\right) \frac{d\varphi}{dt}$$

Измеряя это напряжение мы можем определить малую величину изменения магнитного поля с высокой точностью. Это даёт возможность применять сквиды для решения большого числа задач, где требуется измерять малые величины магнитных полей.

5. Применение сквидов.

Обширное применение сквиды находят в современной медицине.

Технология MEG (Магнитоэнцефалография). MEG позволяет изучать и анализировать активацию различных отделов головного мозга по магнитным полям, создаваемых нейронными токами (эти поля имеют величину порядка 10^{-15} Тл). Для регистрации магнитных полей как раз и используются сквиды. MEG применяется для диагностики эпилепсии, болезней Альцгеймера, Паркинсона и др. Технология MCG (Магнитокардиография) – аналогично MEG использует сквиды для измерения магнитных полей, создаваемых

сердцем. Это отличный метод диагностики и мониторинга сердечно-сосудистых заболеваний. Также сквиды используются для исследования магнитных свойств крови путём измерения её магнитной восприимчивости, которая изменяется в зависимости от концентрации гемоглобина, знание этих свойств необходимо для понимания биохимических процессов, происходящих в организме и их связи с различными заболеваниями.

Ещё одной интересной областью, где применяются сквиды является геофизика.

Сквиды используются в применении к геомагнитным исследованиям не только из-за сверхчувствительности к магнитному полю, но и из практических соображений. Они могут быть легко использованы в полевых условиях благодаря своей компактности, а также могут быть настроены для измерения магнитного поля в различных условиях, на поверхности земли, под водой или в воздухе. Так, распространенной практикой является аэромагниторазведка, в которой сквид-магнитометры устанавливаются на самолёты и используются для сканирования больших площадей с целью обнаружения магнитных аномалий, которые могут дать информацию о наличии и объёме полезных ископаемых в виде железа, никеля и др. Сквиды применяются также для изучения электрической проводимости земной коры, помогают мониторить изменение магнитного поля вблизи вулканов, что полезно при прогнозировании извержений вулканов.

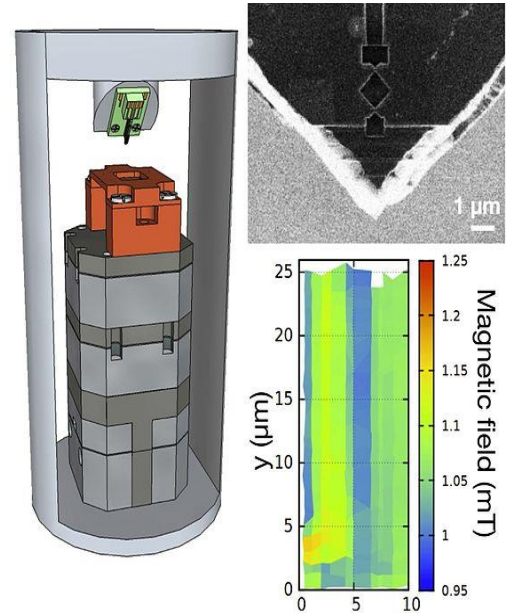
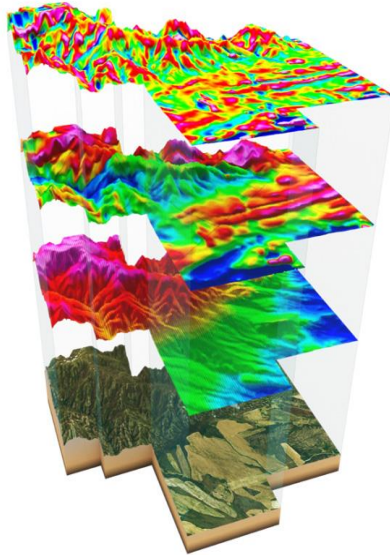
Интересной задачей, в которой потенциально возможно применение сквидов является задача об обнаружении подводных лодок.

Хотя на сегодняшний день хорошо развит метод гидролокации, он применим не везде. Например, на мелководье звуковые волны многократно отражаются от дна и поверхности воды, создавая помехи и затрудняя определение местоположение подводной лодки. Сквиды же могут обнаруживать магнитные аномалии от металлических корпусов подлодок на мелководье на больших расстояниях. Хотя сквид-системы для таких целей остаются дорогими и сложными в эксплуатации, они могут стать важным инструментом для обеспечения безопасности морских границ.

Сквиды также играют важную роль в контроле качества различных материалов (металлы, керамика, полупроводники и др.), позволяя обнаруживать микроскопические дефекты бесконтактным образом.

Метод вихревой дефектоскопии: при воздействии переменного магнитного поля на проводящий материал в нем индуцируются вихревые токи. Дефекты, такие как трещины или пустоты изменяют распределение вихревых токов. Сквиды используются для измерения магнитного поля, создаваемого вихревыми токами. Изменения величины магнитного поля указывают на

наличие дефектов. Схожий метод сквид-микроскопии: сквид-датчик сканирует поверхность материала, измеряя локальное магнитное поле. Это позволяет создавать карты распределения магнитных полей и обнаруживать дефекты.



6. Заключение.

В результате выполнения данной работы я познакомился с основными физическими принципами, на которых работают простейшие сквиды, узнал в каких сферах применяются сквиды.