

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

17-95-205

На правах рукописи
УДК 538.945

КЕШКА
Борис

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ (ВЧ) СКВИДЫ
1. ТЕОРИЯ ДВОЙНОГО ВЧ-СКВИДА
2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ТРАДИЦИОННОГО ВЧ-СКВИДА
С УЧЕТОМ ВОЗДЕЙСТВИЯ ШУМА

Специальность: 01.04.02 — теоретическая физика

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

Дубна 1995

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики
им. И.М. Франка Объединенного института ядерных исследований

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук

Б.В. Васильев

Официальные оппоненты:
доктор физико-математических наук

М.Ю. Куприянов

доктор физико-математических наук

В.М.Дубовик

Ведущая организация:
ФИРАН им.Лебедева, Москва

Защита диссертации состоится июня 1995 г. в часов
на заседании специализированного совета К047.01.01 при Лаборатории
теоретической физики Объединенного института ядерных исследований по адресу:
Московская обл. г. Дубна.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединенного института
ядерных исследований.

Автореферат разослан мая 1995 г.

Ученый секретарь
специализированного совета К047.01.01
доктор физико-математических наук

А.Е. Дорохов

Актуальность темы

СКВИДы (SQUID-Superconducting QUantum Interference Devices) способны детектировать отдельные части кванта магнитного потока, в то время как сам квант магнитного потока может соответствовать очень маленьким магнитным полям. Возможности таких приборов, которые разрешают квант магнитного потока ведут к развитию высокочувствительных детектирующих систем.

Возможно, что одной из самых очевидных систем подобного рода является магнитометр, который при площади кольца 1см способен разрешать квант потока с точностью до 10^{-3} , что эквивалентно разрешению магнитного поля 10^{-14} Тл (10^{-10} гаусс). До их открытия самый чувствительный прибор был рубидиевый магнитометр, разрешение которого порядка 10^{-9} Тл. Ученые и инженеры из разных областей разработали ряд приложений для сверхпроводящей магнитометрии.

Начиная с 1970-х годов ученые пользуются в лабораторных исследованиях серийно выпускаемыми СКВИД-магнитометрами. Пассивное поведение многих материалов было исследовано с помощью СКВИДов. В настоящее время СКВИД-магнитометры играют важную роль в исследованиях сверхпроводящих материалов. С их помощью измеряется ключевое сверхпроводящее свойство: диамагнетизм высокотемпературных сверхпроводников.

Однако, самый большой интерес в сверхпроводящей магнитометрии состоит в приложениях вне лабораторий. Здесь СКВИДы нашли целый спектр применений, начиная с измерений геологических изменений внутри земной коры и кончая изучением активности головного мозга (магнитоэнцефалография). Одно из самых перспективных приложений СКВИД-магнитометрии является поиск полезных ископаемых. Ни одно из приложений не обещает принести больше пользы человечеству, чем биологическое применение: сверхпроводящие магнитометры в ближайшем будущем обеспечат

нехирургические диагностические процедуры, которые являются более быстрыми, более точными и безболезненными.

По этим причинам ясно, что один из ключевых пунктов в получении лучших результатов является увеличение сигнала СКВИДа и улучшении отношения сигнал-шум. Пять лет тому назад было экспериментально доказано, что новый прибор, а именно высокочастотный (ВЧ) двойной (Д) СКВИД имеет намного более высокий внешний сигнал, чем традиционный ВЧ-СКВИД, и поэтому его можно успешно использовать в магнитометрии вместо обычного ВЧ-СКВИДа. Это нововведение не следует особо сложных изменений в аппаратуре. Теперь очевидно, почему так важно теоретически выяснить, как работает этот новый сверхпроводящий прибор и почему у него такой высокий внешний сигнал.

С другой стороны, недавно теоретики и экспериментаторы стали уделять большое внимание воздействию шума на слабые сверхпроводящие контуры т.е. контуры, содержащие слабые связи. Такого рода исследования имеют большое значение сами по себе, и с технологической точки зрения, так как они устанавливают предел чувствительности таких приборов, как например СКВИДы. После открытия высокотемпературных сверхпроводников и возможности их использования для создания СКВИДов, работающих в жидком гелии, эти проблемы снова стали очень важными, но более сложными из-за новых свойств собственного шума этих сверхпроводников и повышения рабочей температуры до 77К, что приводит к большому уровню термического шума. К сожалению до сих пор существует только несколько полупирических теоретических методов, пытающихся выяснить эти проблемы. Поэтому в этой области исследований требуется фундаментально новый подход (в этой диссертации предложен чисто статистический метод), способный дополнить существующие теории.

Цель диссертации

1. Теоретическое исследование поведения симметричного и асимметричного ВЧ Д-СКВИДа.
2. Теоретическое исследование воздействия шума на работу традиционного ВЧ СКВИДа.

Научная новизна работы

Первая часть диссертации впервые рассматривает точное теоретическое исследование симметричного ВЧ Д-СКВИДа (т.е. традиционный ВЧ-СКВИД, в котором вместо слабой связи используется симметричный ПТ-СКВИД). Теория основана на компьютерном моделировании, которое численно решает систему двух трансцендентных уравнений, описывающих динамику системы. До сих пор в литературе существовали только приближенные теоретические исследования (основанные на предположении, приводящем систему двух трансцендентных уравнений к системе двух линейных уравнений).

Кроме этого впервые предложен новый тип ВЧ Д-СКВИД: асимметричный. Рассматриваются оба типа асимметрии: разность между критическими токами двух слабых связей и асимметричное токовое питание ПТ-СКВИДа. Как и в случае симметричного ВЧ Д-СКВИДа теоретическое рассмотрение основано на численном решении системы двух трансцендентных уравнений, описывающих динамику системы. Впервые теоретически доказано, что ВЧ Д-СКВИД может быть использован как амплитудный модулятор магнитного потока.

Во второй части диссертации впервые дано четкое теоретическое исследование поведения традиционного ВЧ-СКВИДа с учетом воздействия шума. Предлагаемый теоретический метод (чисто статистический) основан на возможности применения методики Марковских процессов, в частности уравнение Фоккера-Планка-Колмогорова. До сих пор эта проблема была исследована несколькими теоретиками, которые применяли в основном полупирические методы. Теория, предлагаемая в диссертации, рассматривает

вероятностные процессы, происходящие во время работы ВЧ-СКВИДа, без каких-либо аппроксимаций и дает наибольшую информацию о поведении такого рода систем. Более того, она позволяет рассматривать разные источники шума и исследовать влияние каждого из них на режим работы.

Практическая новизна работы

Теория ВЧ Д-СКВИДа, развитая в первой части диссертации позволяет определять (относительно четырех его параметров) три качественно разных режима работы. Для каждого из них проведена оптимизация системы, работающей как инструмент для очень тонких измерений. Более того показано, что Д-СКВИД, работающий в одном режиме может переключаться (с изменением постоянного магнитного потока всего лишь на половину кванта) с линейного поведения относительно возбуждения ВЧ магнитного потока к нелинейному. Это фундаментально новая черта поведения СКВИДа, которая в будущем может найти много применений. В диссертации дан только один пример: ВЧ Д-СКВИД, работающий как амплитудный модулятор магнитного потока.

Теория, развитая во второй части диссертации (Теоретическое исследование ВЧ-СКВИДа с учетом воздействия шума) дает нам инструмент, позволяющий рассматривать разные источники шума (собственный шум СКВИДа, производимый слабой связью, внешние источники шума (например шум колебательного контура или входной шум усилителя)) и исследовать влияние на режим работы ВЧ-СКВИДа для каждого из них. Это полезно для выяснения того на каких источниках шумов нужно сконцентрировать исследования, чтобы получить наивысшее значение для отношения сигнал-шум и для определения предельной чувствительности таких приборов (именно тех, которые реализованы в технологии ВТСР).

Апробация работы

Основные результаты диссертации докладывались на семинарах Лаборатории Нейтронной Физики им. Франка Объединенного Института Ядерных Исследований (Дубна, Россия), Института Атомной Физики-Института Физики и Ядерных Технологии (Бунарест, Румыния), на международных совещаниях "Forum on new Materials-Eighth CIMTEC", Флоренция, Италия, июль 1994, "Nonlinear Superconducting Devices and High Tc Materials", Капри, Италия, октябрь 1994.

Публикации и объем работы

Диссертация состоит из, четырех глав. Она содержит 114 страниц текста, включающего 28 рисунков, 2 таблицы и список литературы из 39 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В главе 1 рассматривается механизм и работа одного класса (ВЧ) СКВИДов исходя из основных свойств сверхпроводников.

В главе 2 приведен расчет, описывающий поведение симметричного Д-СКВИДа, т.е. ВЧ-СКВИД, в котором симметричный ПТ-СКВИД используется вместо слабой связи. Доказано, что в случае симметричного ВЧ Д-СКВИДа в противоположность традиционному ВЧ-СКВИДу изменение входного сигнала магнитного потока, который подлежит измерению качественно меняет поведение системы и дает на выходе намного более высокий сигнал. Для случая когда соотношение между геометрическим параметром γ и параметром β слабой связи имеет конкретный вид, предложенный в диссертации, была вычислена эффективность СКВИДа. Учитывая подобность режимов работы двойного и традиционного ВЧ-СКВИДов можно оценить превосходство нового СКВИД-прибора. Учитывая другое частное соотношение между γ

и β было подчеркнуто, что особенность симметричного Д-СКВИДа качественно менять свое поведение (от случая с гистерезисом к случаю без гистерезиса) требует тщательного внимания к выбору его параметров. Комбинируя эти теоретические заключения с экспериментальными результатами, полученными к сегодняшнему дню, можно сделать вывод, что эта новая нелинейная система имеет хороший потенциал для дальнейших применений и подходит для тонких измерений.

В главе 3 теоретически рассматривается поведение асимметричного Д-СКВИДа в суперпозиции ВЧ и постоянного магнитных полей для всего спектра его параметров ($\alpha, \beta, \gamma, \theta$). Так как практический интерес касается приборов с $\beta > 1$, то это и было единственным ограничением, касающемся параметров. И так, рассматривалась возможная разность между критическими токами двух слабых связей (через α) и асимметричным токовым питанием ПТ-СКВИДа (через θ). Обсуждается очень интересное свойство этой системы с двумя контурами квантования менять свое поведение в суперпозиции ВЧ и постоянном магнитных полях в зависимости от значения его параметров. В зависимости от них существуют три специфических режимов работы: "а", "б", "с". В третьем разделе были найдены критерии для определения типа режима. Для каждого такого типа режима работы был исследован типичный пример: "а"-(0, 20, 200, 0.5), "б"-(0.5, 20, 20, 0.5), "с"-(0.2, 20, 5, 0.5). Для лучшего понимания влияния других параметров, β брался один и тот же (20) для всех примеров, вследствие чего поведение системы одинаково для всех режимов при целых значений квантов магнитного потока (раздел 3.1). Качественно, параметры асимметрии α и θ имеют эквивалентное влияние на поведение Д-СКВИДа и только в режиме работы "с". Поэтому, для сравнения, рассматривался типичный пример (0, 20, 5, 0.5) для симметричной системы, работающей в этом же режиме. Для других значений параметров качественное представление поведение Д-СКВИДа будет одним из трех анализируемых. В режиме работы "а" с изменением "постоянного" (медленно изменяющегося магнитного потока) поведение системы переходит из нелинейной (постоянный

поток равен целому числу квантов) к линейной (постоянный поток равен полуцелому числу квантов) по отношению к ВЧ возбуждению. Это новое очень интересное свойство ВЧ-СКВИДов, которое может найти применение в будущем. Как известно, для традиционного ВЧ-СКВИДа этот переход можно сделать только за счет изменения величины параметра β от $\beta > 1$ до $\beta < 1$. В разделе 7 представлено одно из этих применений: Д-СКВИД, работающий как амплитудный модулятор магнитного потока.

В режиме работы "с" кроме потокового перехода типа "А" (хорошо известный из поведения традиционного ВЧ-СКВИДа) появляется новый тип "В", который характерен только для работы Д-СКВИДа. Для обоих этих типов были выведены правила потоковых переходов (см. раздел 4).

В разделе 5 вычислены внешние характеристики Д-СКВИДа, работающего как инструмент для измерений и оптимизируются оба стандартных типа накачки. Было также вычислено максимальное теоретическое значение для отношения между средним внешним сигналом ВЧ Д-СКВИДа и традиционного ВЧ-СКВИДа, из чего можно сделать вывод о превосходстве новой СКВИД-системы.

В конце этой главы (раздел 6) показано, что существующие экспериментальные данные могут быть хорошо объяснены, используя теоретическую развитую модель.

Глава 4 рассматривает применение линейного уравнения Фоккера-Планка-Колмогорова (ФПК) к тонкой динамической структуре плато вольтамперной характеристики ВЧ-СКВИДа, возникающей из-за воздействия шума. Хорошо известно, что плато состоит из сложной структуры последовательных некоррелирующих импульсов, возбуждаемых тепловыми шумами колебательного контура и одновременно собственного шума СКВИДа, зависящего от потока. Эта проблема была исследована несколькими авторами, в основном, пользовавшимися полуэмпирическими методами. До сих пор авторы использовали модели, в которых невозможен аналитический подход, поэтому они пользовались компьютерным моделированием. Более того, они рассматривают идеальные колебательные контуры и

пренебрегают емкостью джозефсоновских контактов. Основная проблема состоит в определении временной зависимости потока Φ внутри сверхпроводящего кольца. Причина этого состоит в воздействии шума, которое приводит к тому, что моменты, соответствующие диссипативным магнитным потоковым переходам между метастабильными состояниями интерферометра являются случайными во времени. Такими же являются и моменты последовательных потерь энергии и процессов, восстанавливающих энергетические состояния, которые происходят в колебательном контуре, индуктивно связанным с интерферометром. Поэтому вероятностный характер процесса $\Phi(t)$ вызывает флуктуации внешнего сигнала ВЧ-СКВИДа.

Эта глава является теоретическим исследованием этой проблемы со статистической точки зрения, использующем методику Марковских процессов, с целью найти плотность вероятности распределения $P(t, \Phi)$. Исследуется реальная проблема:

1. на колебательный контур воздействует шум, который необязательно является белым шумом;
2. джозефсоновский контакт имеет отличное от нуля значение емкости и на него воздействует собственный шум;
3. принимается во внимание процессы обмена энергией между интерферометром и колебательным контуром, которые соответствуют диссипативным магнитным потоковым переходам между метастабильными состояниями интерферометра.

Использовалось частное соотношение между коэффициентом взаимной индуктивности "к" между сверхпроводящим кольцом и колебательным контуром и добротностью "Q" колебательного контура, а именно:

$$k(1-k^2)^{1/2} = 1/(2Q)$$

которое позволяет найти аналитическое решение проблемы и записать уравнение, удовлетворяющее потоку $\Phi(t)$ без каких-либо аппроксимаций. В разделе 3 получено уравнение ФПК для Марковского процесса, эквивалентного $\Phi(t)$ и показано на конкретном примере, как это уравнение выглядит. В разделе 4 описывается новый тип

неопределенности, которая вместе с шумами влияет на работу СКВИДа.

Основные результаты, получение в диссертации:

1. Было теоретически описано поведение симметричного и асимметричного двойного (Д)-СКВИДа в суперпозиции ВЧ и постоянного магнитных полей. Рассматриваются оба типа асимметрии: разность между критическими токами двух слабых связей и между индуктивностей двух ветвей Д-СКВИДа. Был найден двухмерный потенциал этой системы и его стабильные состояния. Теория основана на решении системы двух трансцендентных уравнений, описывающих динамику системы. В зависимости от эго параметров существуют три специфических режима работы. Были найдены критерии определения каждого режима. Для каждого режима был рассмотрен один пример. В одном из этих режимов с изменением "постоянного" (медленно меняющегося) магнитного поля поведение системы меняется от нелинейного (постоянный поток равен целому числу квантов) к линейному (постоянный поток равен полуцелому числу квантов) по отношению к ВЧ возбуждению.
2. Были вычислены внешние характеристики Д-СКВИДа, работающего как инструмент для измерений и оптимизировались оба стандартных типа накачки.
3. Было показано, что существующие экспериментальные данные могут быть хорошо объяснены, используя теоретическую развитую модель.
4. Доказано, что Д-СКВИД может быть использован как амплитудный модулятор магнитного потока.
5. Получено уравнение, описывающее поведение магнитного потока внутри интерферометра для традиционного ВЧ-СКВИДа, учитывающее все возможные источники шума и взаимное воздействие между колебательным контуром и сверхпроводящим кольцом.
6. Получено уравнение Фоккера-Планка-Колмогорова для Марковского процесса, эквивалентного процессу изменения

магнитного потока внутри интерференционного кольца во времени в частном случае, когда учитывается только один источник шума.

Результаты диссертации опубликованы в работах:

1. B.Chesca, On the theory of the symmetrical double SQUID, *Physica C*, 220, p.249- 257, (1994).
2. B.Chesca, Symmetrical two quantization loop SQUID system, Proceedings of the Eighth CIMTEC Conference, Florence, July, 1994, Vol.7, p.538, (1995)
3. B.Chesca, On the theory of the rf pumped double SQUID, *Physica C*, 241, p.123-136, (1995).
4. B.Chesca, Double SQUID behavior in superimposed rf and dc magnetic fields, *World Scientific*, Proceedings of the Conference on Nonlinear Superconducting Devices and High Tc Materials, Capri, October 1994, chapter 5, p.209-217, (1995).
5. B.Chesca, On the theoretical study of an rf-SQUID Operation Taking into Account the Noise Influence, *J.Low Temp.Phys.*, Vol.94, Nos.5/6, p.515-541, (1994).
6. B.Chesca, *Preprint-JINR-P17-92-99* (in Russian), 1992, Dubna.

Рукопись поступила в издательский отдел

11 мая 1995 года.