
К - 619

13 - 12964

КОЛЫЧЕВА
Елена Владимировна

КВАНТОВЫЙ СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР
И НЕКОТОРЫЕ ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ

Специальность 01.04.01 - экспериментальная физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель -

кандидат физико-математических наук Б.В.Васильев,

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук
старший научный сотрудник В.В.Шмидт,

доктор физико-математических наук
старший научный сотрудник К.К.Лихарев.

Ведущая организация:

Институт радиотехники и электроники АН СССР, г. Москва.

Защита диссертации состоится " _____ " 19 ____ года

в _____ часов на заседании специализированного совета Д.047.01.05 при Лаборатории нейтронной физики и Лаборатории ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований, г.Дубна, Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан " _____ " 1979 года.

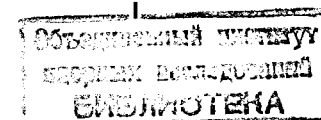
Ученый секретарь специализированного совета

Д.В.Таран

Актуальность темы. Квантовый сверхпроводящий интерферометр (КСИ), чувствительным элементом которого является сверхпроводящий квантовый интерференционный датчик - сквид, представляет собой сравнительно новый прибор, в основе работы которого лежат два физических явления: квантование магнитного потока и эффект Джозефсона. Первые работы, содержащие детальный анализ процессов, происходящих в высокочастотном сквиде, относятся к 1967 году. Последующее развитие теоретических и экспериментальных исследований в этой области привело к созданию на основе КСИ высокочувствительных измерительных систем: магнитометров с чувствительностью 10^{-11} Гс/ $\sqrt{\text{Гц}}$, пикоамперметров, фемтовольметров, а также ряда уникальных установок для решения специализированных задач в области физики твердого тела, низкотемпературной термометрии, медицины, биологии, геофизики и т.д.

Настоящая работа посвящена исследованию путей создания на основе высокочастотных сквидов различных конструкций высокочувствительного КСИ, работающего на частотах 10 МГц, и возможностей его применения в качестве магнитометра в измерительных системах для определения верхней границы величины электрического дипольного момента электрона, проверки принципа эквивалентности и получения магнитокордиограммы.

Актуальность выбранной темы определяется прежде всего тем, что в настоящее время КСИ на основе высокочастотных сквидов является наиболее простым и доступным (в отличие от КСИ с СВЧ-сквидами и двухконтактных интерферометров) инструментом, позволяющим получать уникально высокую чувствительность построенных на его основе измерительных систем. Однако большая часть КСИ, разработанных в Советском Союзе и за рубежом, базируется на симметричных сквидах, в то время как ряд задач может быть более успешно решен



с помощью скивдов, имеющих другую топологию. Детальное исследование оптимальных параметров высокочастотных скивдов позволяет разработать и использовать в измерительных системах одноиндуктивные и многоиндуктивные скивды, а также градиентометрические скивды с большой базой и в ряде случаев отказаться от применения сверхпроводящих трансформаторов магнитного потока, необходимость использования которых в большинстве систем на основе симметричных скивдов приводит к усложнению схем.

Цель работы. Целью настоящей работы является:

1. Исследование путей повышения чувствительности метода настройки скивдов при комнатной температуре и создание высокочувствительной схемы настройки для симметричных скивдов и скивдов сходной топологии с точечными контактами $NB-NB_xO_y-NB$.

2. Исследование методов расчета цилиндрических сверхпроводящих экранов для КСИ и экспериментальное изучение экранирующих свойств сверхпроводящих цилиндров с дном.

3. Определение с помощью КСИ верхней границы величины электрического дипольного момента электрона и проверка принципа эквивалентности.

4. Создание на основе КСИ магнитокардиографа, работающего в "открытой" (не защищенной от внешних магнитных полей) лаборатории, с простой системой компенсации фоновых переменных магнитных полей.

Научная новизна. Основные результаты и схемные решения, описанные в работе, получены впервые.

1. Проведенный анализ путей повышения чувствительности схем настройки скивдов при комнатной температуре позволил разработать приставку к серийному измерителю добротности, обеспечивающую 100-процентный выход при настройке симметричных скивдов и других скивдов сходной топологии. Чувствительность разработанной схемы настройки более чем на порядок превышает чувствительность традиционных схем.

2. Предложен метод расчета сверхпроводящих экранов, позволяющий оценить размеры экранов как простейшей, так и более сложной конфигурации, необходимых для защиты чувствительного элемента КСИ от внешних переменных магнитных полей. Полученные для цилиндрических экранов с дном результаты расчета проверены экспериментально. Дано объяснение экспериментально наблюдаемой аномалии в поведении зависимости коэффициента экранировки сверхпроводящего цилиндрического экрана с дном, помещенного в однородное аксиальное магнитное поле.

3. В макроскопическом опыте с использованием КСИ определен верхний предел величины электрического дипольного момента иона Fe^{+3} . Полученный результат позволил оценить величину электрического дипольного момента электрона.

4. Исследована зависимость от ориентации в пространстве изменения магнитной индукции в феррите при приложении к нему электрического поля, что в свете выводов общей теории относительности можно трактовать как экспериментальную проверку принципа эквивалентности.

5. На основе симметричного градиентометрического скивда с базой 10 см создан магнитокардиограф с простой системой компенсации фоновых переменных магнитных полей и нетрадиционной схемой выделения полезного сигнала, работающий в "открытой" лаборатории.

Практическая ценность работы заключается:

- в создании высокочувствительной схемы настройки скивдов при комнатной температуре, позволяющей получать скивды с параметром $\ell = \frac{2\pi L I_c}{\Phi_0}$ (L - индуктивность скивда, I_c - критический ток джозефсоновского перехода, $\Phi_0 = h/2e = 2,07 \cdot 10^{-7}$ Гс·см² - квант магнитного потока), заданным в узком диапазоне;

- теоретическом и экспериментальном исследовании сверхпроводящих цилиндрических экранов;

- создании на основе КСИ высокочувствительных измерительных систем для определения верхней границы величины электрического дипольного момента электрона в макроскопическом опыте, экспериментальной проверки принципа эквивалентности и получения магнитокардиограмм.

Объем работы. Диссертация состоит из пяти глав и заключения. Работа содержит 148 страниц машинописного текста, 1 таблицу, 37 рисунков и список литературы из 102 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе (введение) определен предмет исследования, сформулирована цель работы, обоснована актуальность выбранной темы и научная новизна полученных результатов.

Во второй главе на основе имеющихся в литературе данных рассмотрены основные принципы работы КСИ с ВЧ-сквидами, вопросы оптимизации КСИ по параметру связи k^2Q . Проанализированы пути повышения чувствительности КСИ по магнитному полю за счёт использования многоиндуктивных сквидов с большой площадью контуров квантования I/I_c и сверхпроводящего трансформатора магнитного потока.

В третьей главе проведен расчет оптимальных параметров схемы настройки при комнатной температуре симметричных сквидов и сквидов сходной топологии. Рассматриваемая схема настройки представляет собой колебательный контур, индуктивно связанный со сквидом и питаемый на резонансной частоте от генератора ВЧ-тока. Изменение сопротивления точечного контакта сквида в процессе его настройки приводит к соответствующему изменению напряжения на колебательном контуре. Величина относительного изменения напряжения на колебательном контуре в традиционных схемах не превышает нескольких процентов, что затрудняет плавную регулировку сопротивления точечного контакта при настройке сквида.

Расчет показывает, что для симметричных сквидов чувствительность метода увеличивается, если поместить в свободное отверстие сквида ферритовый стержень, эффективная магнитная проницаемость которого $\mu \gg 1$. Максимальная чувствительность при этом может быть получена в схеме, рабочая частота которой близка к оптимальной $\omega = (\mu + 1)R_{min} / \mu L$, где L - индуктивность отверстия сквида, R_{min} - сопротивление точечного контакта сквида, соответствующее максимально допустимому критическому току I_c . Использование схемы настройки с оптимальными параметрами позволяет повысить чувствительность метода более чем на порядок по сравнению с традиционными схемами.

Для настройки симметричных сквидов и сквидов сходной топологии с точечными контактами $NB-NB_xO_y-NB$ удобно использовать серийный измеритель добротности, подключив к нему катушку индуктивности. С помощью разработанной приставки к измерителю добротности типа Е9-4 проведена настройка симметричных сквидов с оксидированными в атмосфере воздуха контактными винтами для различной толщины окисной пленки. Результаты экспериментов показывают, что оптимальным с точки зрения надежности точечного контакта и плавности его настройки является оксидирование контактного винта до коричнево-синего цвета. Полученная высокая чувствительность схемы настройки позволяет использовать ее для диагностики состояния сквида в процессе его эксплуатации и хранения.

В четвертой главе проанализированы методы расчета распределения магнитного поля в окрестностях сверхпроводящих оболочек, обладающих цилиндрической симметрией и помещенных в однородное внешнее магнитное поле. Расчеты проводятся в рамках магнитостатики, где задача сводится к решению уравнения Лапласа с соответствующими граничными условиями. Показано, что для расчета цилиндри-

ческих сверхпроводящих экранов как простейшей, так и более сложной конфигурации удобно использовать метод функции Грина ^{/3/}. С помощью этого метода в первом приближении рассчитано распределение магнитного поля в длинном сверхпроводящем цилиндре с дном, помещенном в однородное внешнее магнитное поле, направленное параллельно оси экрана:

$$\vec{H} = \vec{\nabla} \int_{(r,z)} \frac{0,060}{\sqrt{\rho_1} J_0(\rho_1) \sqrt{\text{ch}(\rho_1 \ell) \text{sh}(\rho_1 \ell)}} J_0(\rho_1 r) \text{ch}[\rho_1(z+\ell)] \quad (1)$$

($\rho_1 = 3,83$ - первый корень уравнения $J_1(x) = 0$),
и перпендикулярно оси экрана:

$$\vec{H} = \vec{\nabla} \int_{(r,z)} \frac{0,320}{\sqrt{\rho_1} J_1(\rho_1) \sqrt{\text{ch}(\rho_1 \ell) \text{sh}(\rho_1 \ell)}} J_1(\rho_1 r) \text{ch}[\rho_1(z+\ell)] \cos \varphi \quad (2)$$

($\rho_1 = 1,84$ - первый корень уравнения $\frac{d}{dx} J_1(x) = 0$),
где $J_n(x)$ - функция Бесселя n -го порядка, r - расстояние от оси экрана, ℓ - глубина экрана, z - расстояние от открытого конца экрана, φ - угол между направлением внешнего поперечного магнитного поля и вектором \vec{r} .

С помощью КСИ со сверхпроводящим трансформатором магнитного потока результаты расчетов проверены экспериментально для точек, лежащих на оси цилиндрического экрана с дном. Расхождение экспериментальных данных с расчетной зависимостью в случае аксиального внешнего магнитного поля объясняется непараллельностью оси первичной катушки трансформатора потока, направления внешнего магнитного поля и оси экрана. Полученная экспериментальная зависимость указывает на необходимость при расчете сверхпроводящих экранов в первую очередь учитывать наиболее проникающую поперечную составляющую внешнего магнитного поля.

Пятая глава посвящена применению КСИ в научных исследованиях и содержит описание трех выполненных с его помощью экспериментов.

В первом эксперименте определялась верхняя граница величины электрического дипольного момента (ЭДМ) электрона ^{/4/}. Несокращение пространственной четности, обнаруженное в слабых взаимодействиях, и найденное в распадах K^0 -мезонов нарушение T -инвариантности указывают на возможность существования у электрона ЭДМ, величина которого лежит на уровне $10^{-23} + 10^{-25}$ е.см. Предсказываемое теорией усиление ЭДМ электрона в атомах, имеющих неспаренные электроны, делает возможным измерение ЭДМ электрона в макроскопическом опыте. Для этого к образцу, содержащему атомы с неспаренными электронами, прикладывается сильное электрическое поле, вдоль которого выстраиваются ЭДМ атомов. Поскольку ЭДМ всегда направлен вдоль спина, либо параллельно, либо антипараллельно ему, то приложение электрического поля приведет к изменению магнитного потока в образце, что может быть зарегистрировано с помощью КСИ.

В качестве образца в эксперименте использовалась таблетка из никель-цинкового феррита, расположенная между обкладками плоского конденсатора в непосредственной близости от одноиндуктивного сквида. Электрическое поле амплитудой 1 кВ/см прикладывалось к образцу в виде разнополярных импульсов с частотой ~ 30 Гц. Для увеличения чувствительности использовался метод синхронного детектирования по частоте электрического поля. В результате проведенных измерений получена оценка для величины электрического дипольного момента иона Fe^{+3} : $d_{Fe^{+3}} = (4,2 \pm 6,0) \cdot 10^{-23}$ е.см, что с учетом коэффициента усиления ЭДМ электрона в ионах Fe^{+3} дает для ЭДМ электрона:

$$d_e = (8,1 \pm 11,6) \cdot 10^{-23} \text{ е.см.}$$

Во втором эксперименте предпринята попытка обнаружить зависимость от ориентации в пространстве изменения магнитной индукции в феррите при приложении к нему электрического поля, что в свете выводов общей теории относительности (ОТО) можно трактовать как экспериментальную проверку принципа эквивалентности ^{/5/}.

ОТО предсказывает воздействие гравитации на электромагнетизм, в результате которого видоизменяются соотношения между электрическими и магнитными индукциями \bar{D} и \bar{B} и полями \bar{E} и \bar{H} в вакууме:

$$\bar{B} = \frac{\bar{H}}{\sqrt{g_{00}}} + [\bar{g} \times \bar{E}], \quad (3)$$

$$\bar{D} = \frac{\bar{E}}{\sqrt{g_{00}}} + [\bar{H} \times \bar{g}], \quad (4)$$

где g_{00} - диагональная компонента метрического тензора, \bar{g} - вектор, проекции которого на оси координат равны величинам перекрестных компонент метрического тензора - $g_{\alpha\alpha}$. В соответствии с данными астрофизики поле \bar{g} в системе отсчета, связанной с неподвижными звездами, вызванное вращением плоской составляющей галактики, дает в зоне земной траектории величину $|\bar{g}| = 2,5 \cdot 10^{-10}$, а направление вектора \bar{g} совпадает с направлением на α Лебедя-звезду Денеб. Таким образом, прикладывая к образцу электрическое поле, перпендикулярное направлению вектора \bar{g} , можно было бы ожидать возникновения магнитной индукции в образце. Однако в силу принципа эквивалентности в свободно падающей лаборатории этот эффект должен быть ненаблюдаем.

В эксперименте в качестве образца использовался столбик, набранный из ферритовых колец и помещенный между обкладками цилиндрического конденсатора внутри необщего станка со стержнем, игравшим роль первичной тороидальной катушки сверхпроводящего трансформатора магнитного потока. Роль вторичной катушки играла при этом рабочая индуктивность используемого в эксперименте одноиндуктивного сквида. Первоначально ось ферритовых колец ориентировалась в направлении вектора \bar{g} и измерялось изменение магнит-

ной индукции в образце при приложении к нему электрического поля, потом ось колец поворачивалась на 180° и измерения повторялись. Разность показаний КСИ регистрировалась как искомый эффект. Затем проводилась контрольная серия измерений, в которой ось ферритовых колец была ортогональна вектору \bar{g} . В этом случае эффект должен был отсутствовать даже в случае нарушения принципа эквивалентности. В результате проведенных измерений получено: в первой серии - $|\bar{g}| = (0,92 \pm 4,20) \cdot 10^{-12}$, во второй - $|\bar{g}| = (0,27 \pm 3,67) \cdot 10^{-12}$, что позволяет сделать вывод об отсутствии в земных условиях эффектов, обусловленных перекрестными компонентами метрического тензора $g_{\alpha\alpha}$ в полном соответствии с принципом эквивалентности.

В пятой главе содержится также описание разработанной на основе КСИ установки для получения магнитокардиограмм /6/. В качестве датчика КСИ здесь использовался симметричный градиентометрический сквид с вертикальной базой длиной 10 см и горизонтально расположенными осями контуров квантования. Такая топология позволяет, поворачивая сквид вокруг вертикальной оси, выбрать направление минимального вертикального градиента горизонтальной составляющей поля сетевой магнитной наводки. В минимуме величина этого градиента не превышала в "открытой" лаборатории $(1 \pm 5) \cdot 10^{-6}$ Э/см, несмотря на близко расположенные приборы с сетевым питанием. Использование метода дискретного синхронного детектирования по сетевой частоте позволяло на фоне такой сетевой наводки получать магнитокардиограммы с удовлетворительным соотношением сигнал/шум. В эксперименте использовался металлический криостат, в отростке которого, свободном от азотной рубашки, размещался сквид. Постоянная времени отростка криостата составляла ~ 5 мс, что позволяло проводить снятие магнитокардиограмм в достаточно широкой полосе частот. Сквид располагался на расстоянии 2-3 см от поверхности тела испытуемого. Для увеличения соотношения сигнал/шум участок

магнитокардиограммы, соответствующий одному циклу сердечной активности, усреднялся по нескольким измерениям.

Вывод. Основные результаты, полученные в работе, состоят в следующем:

1. С помощью многоиндуктивного сквида с 12 параллельно соединенными контурами квантования площадью 110 мм^2 каждый для КСИ, работающего на частоте $\sim 10 \text{ МГц}$, получена чувствительность по магнитному полю $\sim 10^{-11} \text{ Гс}/\sqrt{\text{Гц}}$.

2. Проведен расчет оптимальных параметров схемы настройки симметричных сквидов и сквидов сходной топологии при комнатной температуре. Показано, что рабочая частота схемы, обеспечивающая максимальную чувствительность метода, должна быть порядка $(\mu+1)R_{min}/\mu L$, где R_{min} — сопротивление точечного контакта сквида при комнатной температуре, соответствующее максимально допустимому критическому току контакта, L — индуктивность контура квантования сквида, связанного с катушкой индуктивности колебательного контура схемы, μ — эффективная магнитная проницаемость ферритового стержня, размещенного в свободном отверстии симметричного сквида. На основании проведенных расчетов разработана приставка к серийному измерителю добротности, предназначенная для настройки симметричных сквидов и сквидов сходной топологии с точечными контактами $N\beta - N\beta_x Q_y - N\beta$, позволяющая получать сквиды с параметром ℓ , заданным в узком диапазоне. Экспериментально определены диапазоны относительного изменения показаний измерителя добротности при настройке симметричных сквидов с параметром $\ell < 2$ и $2 < \ell < 60$ для различной толщины окисной пленки на контактном венте сквида.

3. Предложено для расчета распределения магнитного поля в сверхпроводящих цилиндрических экранах использовать метод функции Грина, позволяющий получать решение задачи как для простейших,

так и для более сложных конфигураций. Показано, что оценка размеров экрана, необходимого для защиты рабочего объема КСИ от внешних магнитных полей в случае, когда длина экрана и расстояние от его открытого конца до рабочего объема КСИ заведомо больше диаметра экрана, может быть сделана с использованием решения задачи в первом приближении. С помощью КСИ экспериментально исследована зависимость коэффициента экранировки длинного сверхпроводящего цилиндра с дном, помещенного в однородное внешнее магнитное поле, от расстояния до открытого конца экрана.

4. При измерении с помощью КСИ электрического дипольного момента электрона в макроскопическом опыте определен верхний предел величины ЭДМ иона Fe^{+3} . Полученная при этом чувствительность превышает чувствительность, достигнутую в эксперименте на атомных пучках при определении ЭДМ атома Cs . С учетом коэффициента усиления ЭДМ электрона в ионах Fe^{+3} найдена оценка величины ЭДМ электрона:

$$d_e = (8,1 \pm 11,6) \cdot 10^{-23} \text{ е.см.}$$

5. Проведено исследование зависимости от ориентации в пространстве изменений магнитной индукции феррита, возникающих при приложении к нему электрического поля, что в свете выводов общей теории относительности можно трактовать как экспериментальную проверку принципа эквивалентности. Полученные результаты позволяют сделать вывод об отсутствии в земных условиях эффектов, обусловленных перекрестными компонентами метрического тензора $g_{\alpha\beta}$ в полном соответствии с принципом эквивалентности.

6. На основе КСИ с симметричным градиентометрическим сквидом, база которого составляет 10 см, разработан магнитокардиограф, работающий в "открытой" лаборатории. Использование метода дискретного синхронного детектирования по сетевой частоте позволяет на фоне небольшой сетевой магнитной наводки получать магнитокардиограммы с удовлетворительным соотношением сигнал/шум.

Основные результаты работы докладывались на:

1. Семинаре "Квантовый интерферометр и его применения в физических исследованиях", 1977, Лаборатория нейтронной физики ОИЯИ, Дубна.
2. Семинаре Научного совета по проблеме "Кибернетика" АН УССР, 1978, Киев.
3. XX Всесоюзном совещании по физике низких температур (НТ-20), 1979, Москва.

Опубликованы в следующих работах:

1. Васильев Б.В., Колычева Е.В., Кривой Г.С. Высокочувствительные сквиды. ОИЯИ, Р13-11253, Дубна, 1978.
2. Васильев Б.В., Колычева Е.В., Кривой Г.С. Настройка сквидов при комнатной температуре. ОИЯИ, Б1-13-11342, Дубна, 1978.
3. Васильев Б.В., Ингатович В.К., Колычева Е.В. Экранирование слабых магнитных полей сверхпроводящими оболочками. ЖТФ, 1978, т. 48, в.9, с.1934-1940.
4. Васильев Б.В., Колычева Е.В. Измерение электрического дипольного момента электрона с помощью квантового интерферометра. ЖЭТФ, 1978, т.74, в.2, с.466-471.
5. Васильев Б.В., Колычева Е.В. Об экспериментальной проверке принципа эквивалентности. ЖЭТФ, 1978, т.75, в.7, с.9-16.
6. Васильев Б.В., Колычева Е.В. Магнитокардиограф, ОИЯИ, Р8-12193, Дубна, 1979.

Рукопись поступила в издательский отдел
28 ноября 1979 года.