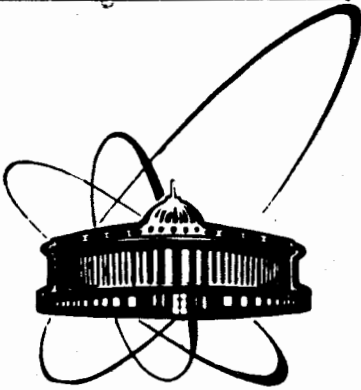


с 3933



ф  
ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА

Д13-89-586

Б.В.Васильев, А.Г.Лихачев, В.Н.Полушкин,  
С.В.Учайкин

МАГНИТОКАРДИОМЕТР НА ОСНОВЕ  
ОДНОИНДУКТИВНОГО  
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СКВИДА

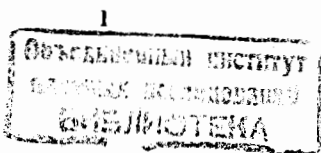
Направлено в журнал "Superconductor Science  
and Technology"

1989

К концу 1988 года были созданы высококачественные двухиндуктивные радиочастотные сквиды, работающие при температуре жидкого азота [1-5]. Такие сквиды являются, по-существу, градиентометрами с малой базой, обычно <5мм. Следствием этого является их относительно слабая чувствительность к внешним магнитным полям, что позволяет в отсутствие высококачественных сверхпроводящих экранов провести исследование динамики этих сквидов, измерить их индуктивность и собственные шумы, оценить разрешение по энергии, которое может быть получено в перспективе в устройствах на основе таких сквидов. Разработка достаточно тонкой проволоки, обладающей сверхпроводимостью при температуре жидкого азота, из которой можно было бы изготовить сверхпроводящий трансформатор магнитного потока, даст возможность создать, по-видимому, весь спектр приборов, которые использовали традиционные низкотемпературные сквиды.

Однако в отсутствие тонкой ВТСП-проволоки слабая чувствительность двухиндуктивных сквидов к внешним магнитным полям делает их непригодными для практического приборостроения. Тем не менее малые собственные джонсоновские шумы, близкие по уровню к гелиевым сквидам при значительно большем удобстве работы с жидким азотом, чем с жидким гелием, побуждают исследователей искать решения по применению именно ВТСП-сквидов для проведения высокочувствительных измерений.

Одним из путей повышения чувствительности двухиндуктивных сквидов является введение разбаланса между отверстиями. Этого можно достигнуть, изготовив двухиндуктивный сквид, имеющий отверстия с разными диаметрами [5], или введением в одно из отверстий сверхпроводящего стержня [6]. Однако это не устраняет главный их недостаток: по их внешнему контуру, охватывающему оба отверстия, течёт экранирующий ток, что заметно снижает чувствительность.



Этого недостатка лишён одноиндуктивный высокотемпературный сквид. Такой сквид был изготовлен нами из керамики  $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ , полученной с помощью стандартной процедуры твёрдотельного синтеза [7]. В дальнейшем отбиралась та керамика, у которой плотность критического тока  $j_c > 100A/cm^2$ .

В таблетке из такой керамики размером  $10 \times 10 \times 2$  мм в центре просверливалось отверстие диаметром 0,8 мм, служащее контуром квантования для сквида. Между отверстием и кромкой таблетки механически прорезалась щель, внутри которой оставался мостик, замыкающий контур квантования. Мостик обычно имел характерные размеры 10 мкм и должен был обладать критическим током  $I_c \approx 10$  мкА, так, чтобы гистерезисный параметр сквида

$$\beta = 2\pi L_S I_c / \Phi_0$$

был меньше (5+10). Здесь  $L_S$  — индуктивность контура квантования,  $\Phi_0$  — квант магнитного потока.

Для того, чтобы избежать попадания влаги на сквид, применялся герметичный защитный кожух. Для подавления внешних помех при измерении основных параметров сквид вместе с сосудом Дьюара мог быть помещен в магнитный экран (из отожженного пермаллоя), подавлявший земное магнитное поле и внешние магнитные помехи более чем в 1000 раз.

На рис. 1 представлена блок-схема магнитометра. Как обычно, сквид 1 накачивался на высокой частоте ( $f_p \approx 20$  МГц) ВЧ-генератором 2 и опрашивался при помощи индуктивно связанного с ним колебательного контура  $L_T C_T$  — 3, настроенного приблизительно на резонансную частоту контура —  $\omega_p$ . При этом для получения максимального отклика коэффициент связи подбирается согласно соотношению

$$k^2 Q \approx \pi / 2.$$

Напряжение на контуре усиливается маломощным радиочастотным усилителем 4 и детектируется амплитудным детектором 5. Продетектированный сигнал преобразуется блоком низкой частоты 6, осуществляющим потокозамкнутый режим магнитометра. Все указанные электронные блоки полностью идентичны электронным блокам для низкотемпературных сквидов.

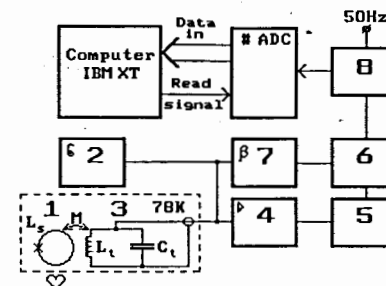


Рис. 1. Блок-схема магнитокардиометра. 1-одноиндуктивный сквид; 2-ВЧ-генератор; 3-колебательный контур; 4-радиочастотный усилитель; 5-амплитудный детектор; 6-блок низкой частоты;

#### Основные характеристики магнитометра

Методика измерения основных технических характеристик сквида более подробно описана в [2].

Индуктивность сквида может быть получена из равенства:

$$L_S = I_0^2 C_T / \Phi_0^2 (\omega_{p1}^{-2} - \omega_{p2}^{-2}),$$

где  $I_0$  — значение тока через  $L_T$ , вызывающего изменение потока в сквиде на  $\Phi_0$ ;

$C_T$  — ёмкость колебательного контура;

$\omega_{p1}$  — резонансная частота колебательного контура, измеряемая при малом уровне накачки, при котором контакт сохраняет сверхпроводимость, и диссипативные процессы в сквиде не наблюдаются;

$\omega_{p2}$  — резонансная частота колебательного контура, измеряемая при большом уровне накачки, когда джозефсоновский контакт находится в несверхпроводящем состоянии.

Измерения показали, что при диаметре контура квантования 0,8 мм

$$I_0 \approx (0,8 \pm 0,1) \text{ мкА},$$

$$k \approx (0,15 \pm 0,01),$$

$$C_T \approx (220 \pm 10) \text{ пФ},$$

$$f_{p1} = (17,7 \pm 0,1) \text{ МГц,}$$

$$f_{p2} = (17,35 \pm 0,1) \text{ МГц}$$

и собственная индуктивность сквида  
 $L_s = (2,5 \pm 0,1) \cdot 10^{-10} \text{ Гн.}$

Зависимость спектральной плотности шумов по магнитному потоку  $\Phi_N$  представлена на рис. 2.

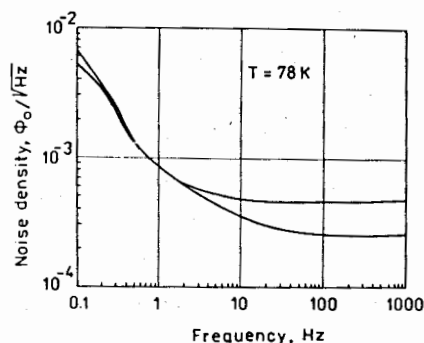


Рис. 2. Спектральная плотность шумов сквида по магнитному потоку:

- кривая 1 соответствует сквиду в толстостенном (-1см) медном экране;
- кривая 2 соответствует сквиду без медного экрана.

Вычисления дают, что в области белого шума разрешение по энергии

$$\epsilon = \Phi_N^2 / 2L_s \approx 9 \cdot 10^{-28} \text{ Дж/Гц.}$$

Важнейшим моментом калибровки магнитометра является измерение реальной чувствительности сквида по полю. Поскольку уровень окружающих шумов не удалось снизить ниже  $6 \cdot 10^{-11} \text{ Тл}$ , то радиопрозрачный пластиковый криостат со сквидом был помещён в кольца Гельмгольца, причём так, что сам сквид располагался в геометрическом центре колец. Диаметр колец составлял 50см. Каждая катушка содержала 900 витков. Катушки были включены последовательно, так что 1мА протекающего в них тока создавал в точке расположения сквида поле  $3,2 \cdot 10^{-6} \text{ Тл}$ . При помощи колец Гельмгольца мы определили период вольт-эрстедной характеристики по полю

$$B_0 = 3,8 \cdot 10^{-10} \text{ Тл.}$$

Зная периодичность ВЭХ, легко получить оценку чувствительности сквида по полю:

$$\langle B_N \rangle = \langle \Phi_N \rangle B_0 / \Phi_0,$$

где  $\langle \Phi_N \rangle$  - спектральная плотность шумов сквида по магнитному потоку (см. рис. 2).

Видно, что в области белого шума чувствительность сквида по полю

$$\langle B_N \rangle \approx 3,8 \cdot 10^{-10} \cdot 3 \cdot 10^{-4} \approx 1,14 \cdot 10^{-13} \text{ Тл/Гц}^{1/2}$$

Такой чувствительности вполне достаточно для большого числа применений.

Одной из наиболее интересных областей применения сквид-магнитометров является биомагнетизм, в частности, измерение магнитокардиограммы сердца человека. Низкотемпературные сквиды уже давно используются для этой цели, и в настоящее время получено много интересных и важных научных результатов [9]. Однако широкому распространению данных приборов в практической медицине препятствуют два общих для прикладной сверхпроводимости фактора: высокая стоимость и громоздкость криогенного гелиевого обеспечения. В связи с этим интенсивно изучается вопрос о возможно широкой замене низкотемпературных сверхпроводников высокотемпературными. Одной из таких областей является, по нашему мнению, магнитокардиография. На рис. 3 представлена магнитокардиограмма, зарегистрированная при помощи описанного выше магнитометра в полосе частот 60Гц. Магнитокардиограмма снималась в алюминиевом боксе (толщина стенок ~5мм) в 20 метрах от ближайшего здания Института.

В качестве чувствительного элемента, как уже отмечалось, выступал непосредственно сам однощёрочный сквид. Сквид в герметичном медном тонкостенном кожухе размещался на дне биомагнитного криостата, в который был залит в качестве хладагента жидкий азот. Таким образом, сквид находился на расстоянии от грудной клетки, не превышающем 25мм.

Наблюдения показали, что основной шумовой вклад вносит не сквид, а вариации магнитного поля Земли, промышленные наводки и, особенно, вибрации, вызванные как вибрацией бокса,

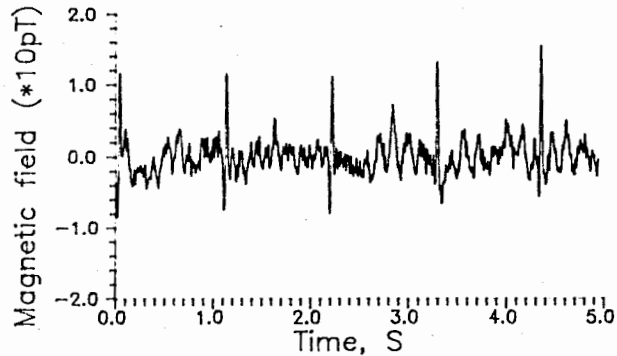


Рис. 3. Магнитокардиограмма сердца человека, зарегистрированная в полосе 60 Гц.

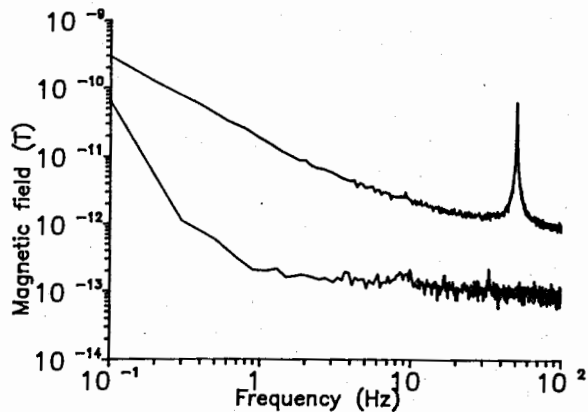


Рис. 4. Спектральная плотность шумов:  
 кривая 1 - спектр окружающих шумов в точке снятия МКГ;  
 кривая 2 - спектр собственных шумов сквида по магнитному полю.

так и кипением жидкого азота. На рис. 4 (кривая 1) приведен спектр окружающих шумов, измеренный описываемым магнитокардиографом, (кривая 2) - собственные шумы прибора. Устранение магнитных помех и наводок потребует определённых усилий в дальнейшей работе, но по

предварительным оценкам максимальное отношение сигнал/шум, которое может быть достигнуто высокотемпературным сквид-магнитокардиографом (при размахе МКГ  $\sim 20$  пТ), не хуже 10:1 в полосе 60 Гц. По-видимому, такого разрешения будет достаточно не только для уверенного чтения кардиограммы, но и для изучения тонкой структуры при использовании техники усреднений.

#### Литература

1. Bobrakov V.F., Polushkin V.N., Vasiliev B.V. Modern Physics Letters B Vol. 3, No. 5 (1989) 415-419.
2. Polushkin V.N., Vasiliev B.V. JINR Rapid Communications, Dubna, 1989, №1, p.100.
3. Шнырков В.И., Цой Г.М., Козырь А.Г., Глянец В.Н. Физ. низких температур, 1988, т.14, №7, с.9.
4. Harrop S.P., Gough C.E., Keene M.N., Muirhead C.M. Supercond. Sci. Technol., 1988, v.1, p.68.
5. Карцовник В.В., Павлов П.П., Павлюк В.А. Всес. совещ. по высокотемпературной сверхпроводимости, Харьков, ФТИНТ АН УССР, 1988, т.3, с.51.
6. Шнырков В.И., Цой Г.М., Шаповаленко В.В. и др. Всес. совещ. по высокотемпературной сверхпроводимости, Харьков, ФТИНТ АН УССР, 1988, т.3, с.9.
7. Васильев Б.В., Лушиков В.И. Краткие сообщения ОИЯИ, Дубна, 1988, №2, с.33.
8. Лихарев К.К. Введение в динамику джозефсоновских контактов. М.: Наука, 1985.
9. Матлашов А.Н. и др. Сообщения на 14 Семинаре по прикладной сверхпроводниковой электронике. Изд. Института кибернетики АН УССР, Киев, 1989.

Рукопись поступила в издательский отдел  
 8 августа 1989 года.