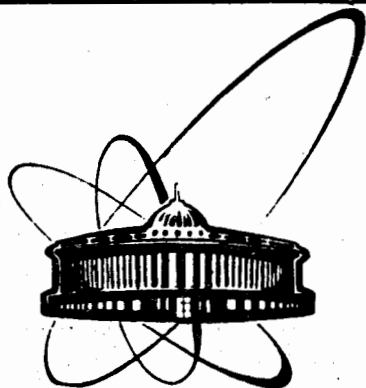


89-85



ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА

В 191

P13-89-85

Б.В.Васильев, В.Н.Полушкин

МАГНИТОМЕТР НА ОСНОВЕ  
ОДНОИНДУКТИВНОГО  
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СКВИДА

Направлено в журнал "Приборы и техника  
эксперимента"

1989

## ВВЕДЕНИЕ

К концу 1988 г. были созданы высококачественные двухиндуктивные радиочастотные сквиды, работающие при температуре жидкого азота <sup>1-5/</sup>. Такие сквиды являются, по существу, градиентометрами с малой базой, обычно меньше 5 мм. 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, использующих 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 собственные джонсовские 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 <sup>15/</sup>, или введя в одно из отверстий сверхпроводящий стержень <sup>16/</sup>. Однако это не устраняет главный их недостаток - по их внешнему контуру, охватывающему оба отверстия, течет экранирующий ток, что заметно снижает чувствительность.

Этого недостатка лишен одноиндуктивный высокотемпературный сквид. Такой сквид был изготовлен нами из керамики  $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$  полученной с помощью стандартной процедуры твердотельного синтеза <sup>17/</sup>. В дальнейшем отбиралась та керамика, у которой плотность критического тока  $j_c > 150 \text{ А/см}^2$ .

В таблетке из такой керамики просверливалось отверстие диаметром порядка 1 мм, служащее контуром квантования для сквида.

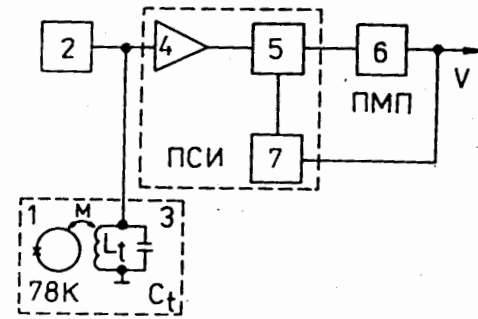


Рис.1. Блок-схема магнитометра на основе одноиндуктивного высокотемпературного сквида. 1 - сквид, 2 - ВЧ-генератор, 3 - колебательный контур  $L_s C_t$ , 4 - малошумящий предварительный усилитель высокой частоты, 5 - амплитудный детектор, 6 - блок низкой частоты, 7 - блок обратной связи.

Между отверстием и кромкой таблетки механически прорезалась щель, внутри которой оставался мостик, замыкающий контур квантования. Мостик обычно имел характерные размеры несколько микрон и имел критический ток  $I_c \approx 10 \text{ мкА}$ , так чтобы гистерезисный параметр сквида  $\beta = 2\pi L_s I_c / \Phi_0$  был меньше  $1/5 \div 1/10$ . 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 сквид вместе с сосудом Дьюара помещали в магнитный экран /из отожженного пермаллоя/, подавляющий земное магнитное поле и внешние магнитные помехи более чем в 100 раз.

На рис.1 представлена блок-схема магнитометра. Как обычно, накачка сквида 1 осуществлялась на высокой частоте  $f_p \approx 20 \text{ МГц}$ / ВЧ-генератором 2 и опрос производился при помощи индуктивно связанного с ним колебательного контура  $L_s C_t$  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 малошумящим 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.

## ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАГНИТОМЕТРА

Методика измерения технических характеристик сквида более подробно описана в <sup>12/</sup>.

Индуктивность сквида может быть получена из равенства:

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

Объединенный институт

где  $I_0$  - значение тока через  $L_t$ , вызывающего изменение потока сквида на  $\Phi_0$ ;  $C_t$  - емкость 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 1 мм

$$I_0 = /0,8 \pm 0,1/ \text{ мкА}$$

$$k = /0,15 \pm 0,01/$$

$$C_t = /220 \pm 10/ \text{ пФ}$$

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

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

и собственная индуктивность сквида  $L_s = /3,78 \pm 0,1/ \cdot 10^{-10}$  Гн.

Зависимость спектральной плотности шумов по магнитному потоку  $\Phi_n$  представлена на рис.2. Вычисления показывают, 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  $6 \cdot 10^{-11}$  Тл, то радиопрозрачный пластиковый криостат со сквидом был помещен в кольцо Гельмгольца, причем так, что сам сквид располагался в геометрическом центре колец. Диаметр колец составлял 50 см. Каждая катушка содержала 900 витков. Катушки были включены последовательно, так что протекающий в них ток 1 мА со-

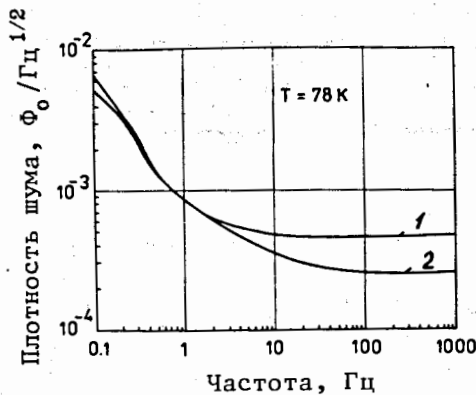


Рис.2. Фурье-спектр шумов керамического радиочастотного сквида при температуре 78 К, использованного в магнитометре. По оси абсцисс - частота, Гц; по оси ординат - плотность шумов,  $\Phi_0/\text{Гц}^{1/2}$ : кривая 1 соответствует сквиду в толсто-стенном /-1 см/ медном экране, кривая 2 соответствует сквиду без медного экрана.

здавал в точке расположения сквида поле  $3,2 \cdot 10^{-10}$  Тл. При помощи колец Гельмгольца мы определили период вольт-эрстедной характеристики по полю

$$V_0 = 3,8 \cdot 10^{-10} \text{ Тл}.$$

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

$$\langle V_n \rangle = \langle \Phi_n \rangle V_0 / \Phi_0,$$

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 равна

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

Такой чувствительности вполне достаточно для большого числа применений, например, в геофизике, медицине для снятия магнитокардиограммы, в других физических экспериментах.

Отметим, что для сквида с диаметром квантования, примерно равным 1 мм, измеренная индуктивность  $L_s = 3,8 \cdot 10^{-10}$  Гн оказывается близкой к предельному значению индуктивности при  $T = 78$  К. Грубая оценка величины предельной индуктивности  $L_{\max}$  получается, если приравнять энергию кольца с током и тепловую энергию. При этом для  $T = 78$  К  $L_{\max} \approx 10^{-10}$  Гн. Более строгий учет влияния шумов определяет граничное значение индуктивности соотношением<sup>8/</sup>:

$$L_{\max} = \Phi_0^2 (\pi\beta)^{-1/2} (2k_b T)^{-1},$$

что при  $\beta = 1$  и  $T = 78$  К дает  $L_{\max} = 10^{-9}$  Гн.

Эти оценки, в общем, можно считать согласующимися с полученными экспериментальными результатами, учитывая, что для сквида с диаметром контура квантования около 1,6 мм обнаруживается заметное увеличение шумов, а сквиды с большими диаметрами отверстий оказываются неработоспособными.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение необходимо отметить, что в печати нередко появляются работы, посвященные альтернативным сквидам.

В отличие от нормальных сквидов в альтернативных переключателях не выступает в качестве перехода Джозефсона. В них на нескольких зернах случайным образом формируются паразитные контуры с индуктивностью  $< 10^{-11}$  Гн, а просверленные отверстия выступа-

ми в качестве концентраторов магнитного поля. Такие устройства как в пленочном, так и в керамическом варианте не что иное, как разновидность известных балк-сквидов. Исследования показывают, что в них отсутствует строгая периодичность по магнитному потоку. При воздействии на них внешнего магнитного поля случайные контуры в перемычке могут исчезать, изменять свои размеры. Кроме того, даже лучшие из таких сквидов имеют очень малую связь контура квантования с внешним полем и, как следствие, чувствительность по полю для них по крайней мере на 2-3 порядка хуже традиционных сквидов, работающих при  $T = 78$  К. Поэтому альтернативные сквиды с концентраторами поля не представляют интереса для использования в качестве датчиков магнитного поля в практическом приборостроении.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Bobrakov V.F. et al. - In: JINR Rapid Commun., No.4[30]-88, Dubna: JINR, 1988, p.101.
2. Полушкин В.Н., Васильев Б.В. - В сб.: Краткие сообщения ОИЯИ, № 1[34]-89. Дубна: ОИЯИ, 1989, с.100.
3. Шнырков В.И. и др. - Физика низких температур, 1988, т.14, № 7, с.9.
4. Harrop S.P. et al. - Supercond. Sci. Technol., 1988, 1, p.68.
5. Карцовник В.В. и др. - В сб.: Всесоюзное совещание по ВТСП, Харьков, ФТИНТ АН УССР, 1988, т.3, с.51.
6. Шнырков В.И. и др. - В сб.: Всесоюзное совещание по ВТСП, Харьков, ФТИНТ АН УССР, 1988, т.3, с.9.
7. Васильев Б.В., Лушиков В.И. - В сб.: Краткие сообщения ОИЯИ, № 2[28]-88, Дубна, 1988, с.33.
8. Лихарев К.К. - Введение в динамику джозефсоновских контактов. М.: Наука, 1985.

Рукопись поступила в издательский отдел  
13 февраля 1989 года.