

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА



С393 мс

В-191

ЛЯП

P13 - 11253

2141 / 4-78

Б.В.Васильев, Е.В.Колычева, Г.С.Кривой

ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ СКВИДЫ

1978

P13 - 11253

Б.В.Васильев, Е.В.Колычева, Г.С.Кривой

ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ СКВИДЫ

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ЦЕНТРАЛЬНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Высокочувствительные сквиды

Рассмотрен метод повышения чувствительности сверхпроводящих квантовых интерферометров за счет использования многоиндуктивных сквидов большого объема, в которых несколько контуров квантования соединены параллельно. Экспериментально показано, что для сквида с объемом $\sim 200 \text{ см}^3$, имеющего двенадцать контуров квантования диаметром 1,2 см, чувствительность достигает $\sim 10^{-11} \text{ Гс}/\sqrt{\text{Гц}}$.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1978

High Sensitive Squids

A method of sensitivity rising for superconducting quantum interferometers by using large-volume many-inductive squids with several parallel loops is described. There is an experimental indication that for the 200 cm^3 SQUID with 12 parallel loops, 1.2 cm in diameter, the sensitivity is about $10^{-11} \text{ G}/\sqrt{\text{Hz}}$.

The investigation has been performed at the Laboratory of Neutron Physics, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1978

В настоящее время в технике физического эксперимента широко используются квантовые сверхпроводящие интерферометры /КСИ/ ^{1/}, в которых первичным измерительным преобразователем магнитного поля в напряженне служит сверхпроводящий квантовый интерференционный датчик - сквид ^{2/}, индуктивно связанный с колебательным контуром КСИ.

Основными характеристиками системы сквид-контур как измерительного преобразователя, являются:

1/ крутизна преобразования $A = \frac{dU_t}{dB}$, где U_t - ампли-

туда напряжения на колебательном контуре КСИ, B - индукция приложенного к сквиду магнитного поля.

2/ приведенная к сквиду спектральная плотность $W_{BN} = \langle B_N^2 \rangle^{1/2} \text{ Гц}^{-1/2}$ собственных шумов системы сквид-контур / B_N - флуктуация магнитной индукции в этой системе/.

Оба эти параметра зависят от конструкции сквида, а именно - от его индуктивности L и площади контура квантования S ^{3/}.

Крутизна преобразования определяется периодичностью сигнала по магнитному полю и разностью амплитуд напряжения на колебательном контуре КСИ, соответ-

ствующих магнитным полям на сквиде, равным $\frac{k\Phi_0}{S}$ и

$\frac{(2k+1)\Phi_0}{2S}$ / k - целое число, $\Phi_0 = 2,07 \cdot 10^{-15} \text{ Вб}$ - квант

магнитного потока/. Периодичность сигнала по полю выражается через площадь контура квантования:

$$\Delta B = \Phi_0 / S. \quad /1/$$

Амплитуда сигнала зависит от индуктивности сквида, поэтому, когда зависимость $U_t(B)$ имеет "треугольную" форму, крутизна преобразования

$$A \sim \frac{S}{\sqrt{L}}, \quad /2/$$

как это следует из выражения для крутизны преобразования по потоку /4/.

Приведенная к сквиду спектральная плотность шумов системы сквид-контур, определенная в терминах магнитного потока, пропорциональна индуктивности сквида /5/. В терминах магнитного поля спектральная плотность шумов, приведенная к сквиду, будет также зависеть от площади контура квантования:

$$W_{B_N} \sim \frac{L}{S}. \quad /3/$$

Для обычного одноиндуктивного сквида /1/, у которого площадь квантования и индуктивность линейно связаны, увеличение чувствительности может быть достигнуто за счет уменьшения индуктивности путем увеличения эффективной длины сквида. Другой путь увеличения чувствительности был указан Циммерманом /3/. Применение многоиндуктивных /частичновитковых/ сквидов, содержащих несколько контуров квантования, соединенных параллельно. В многоиндуктивном сквиде периодичность сигнала по магнитному полю определяется площадью одного отверстия, в то время как суммарная индуктивность определяется как результат параллельного соединения индуктивностей. Поэтому спектральная плотность шумов, приведенная к сквиду, имеющему N равных и параллельно соединенных контуров квантования, будет в N раз меньше, чем у сквида, имеющего один такой же контур. При этом крутизна преобразова-

ния A возрастает в N раз за счет уменьшения индуктивности*.

Другой, более удобный путь увеличения чувствительности многоиндуктивного сквида - увеличивать площадь контуров квантования, сохраняя индуктивность сквида на уровне $\sim 10^{-9} \Gamma$ за счет увеличения количества отверстий. При этом быстрее, чем при уменьшении индуктивности, растет крутизна преобразования, что позволяет пренебрегать шумами усилителя КСИ. Кроме того, если индуктивность параллельно соединенных отверстий будет слишком мала $/\sim 10^{-11} \Gamma /$, становится существенным вклад в суммарную индуктивность сквида индуктивностей соединительных участков и перехода, и дальнейшего уменьшения индуктивности сквида не происходит, несмотря на возможное уменьшение индуктивности параллельно соединенных отверстий.

Необходимость соединять параллельно отверстия в многоиндуктивном сквиде определяет его конфигурацию. Отверстия обычно располагаются на периферии сквида, на равном расстоянии от перехода Джозефсона. Одноименные выводы витков, образованных отверстиями, соединяются кратчайшим путем, чтобы не увеличивать индуктивности сквида. Кроме того, вся конструкция делается жесткой, чтобы вибрации не изменяли характеристик перехода Джозефсона и самого сквида. Одна из наиболее удачных конструкций такого типа - многоиндуктивный сквид с 12 отверстиями, описанный Циммерманом /3/. Этот сквид представляет собой два цилиндрических ниобиевых блока, в каждом из которых имеется 12 цилиндрических отверстий диаметром 2,25 мм. По образующим отверстий сделаны прорезы. Блоки соосно совмещены и разделены тонким слоем изолятора. Высота

* Для широко распространенного симметричного двухиндуктивного сквида, являющегося градиентометрическим, чувствительность и крутизна преобразования, наоборот, в 2 раза меньше, чем для одноиндуктивного. Причина этого - подведение измеряемого поля только к одному отверстию сквида /1/.

сквида равна 15 мм. В каждом блоке формируются половины витков, в одном правые, в другом - левые. Соединение половин витков производится с помощью полосок ниобиевой фольги, приваренных точечной сваркой к обоим блокам. Точечный контакт Джозефсона создается в области, заполненной изолятором, между двумя ниобиевыми винтами, завинченными по одному в каждый блок с торцов сквида и расположенными на оси системы. Периодичность по магнитному полю этого сквида составляет $5,3 \cdot 10^{-6}$ Гс. Такая конструкция при увеличении размеров, как указано в ^{3/}, может дать чувствительность по полю не хуже 10^{-11} Гс/ $\sqrt{\text{Гц}}$.

Другое конструктивное решение многоиндуктивного сквида предложено в работе ^{6/}. Сквид выполнен из монолитного блока ниобия и имеет 5 отверстий. Нечетное число отверстий и их расположение позволяют создать необходимую конфигурацию, сделав вдоль и поперек оси сквида несколько разрезов. Щели прорезаны на электроэрозионном станке и имеют ширину 0,25 мм. При диаметре отверстий 2,38 мм чувствительность сквида составляет примерно $5 \cdot 10^{-11}$ Гс/ $\sqrt{\text{Гц}}$. Достоинствами такого многоиндуктивного сквида является его монолитность и отсутствие сварных соединений. К сожалению, электроэрозионным станком обычно не удается прорезать отверстия большой глубины и одновременно малого поперечного сечения, так как тонкий и протяженный электрод станка изгибается в процессе резки. Поэтому трудно, видимо, изготовить таким способом многоиндуктивный сквид больших размеров с большим количеством отверстий.

Мы изготовили несколько многоиндуктивных сквидов, аналогичных описанному в ^{3/} и имеющих различное количество отверстий и разные размеры. Фотография одного из них приведена на рис. 1. Для сквида диаметром 70 мм, высотой 32 мм с 12 отверстиями, каждая площадью ~ 110 мм², расчетная периодичность сигнала КСИ по магнитному полю составляет $\sim 2 \cdot 10^{-7}$ Гс. Экспериментально измеренная периодичность совпадает с расчетной в пределах погрешности измерений. По результатам измерений чувствительность этого многоиндуктив-

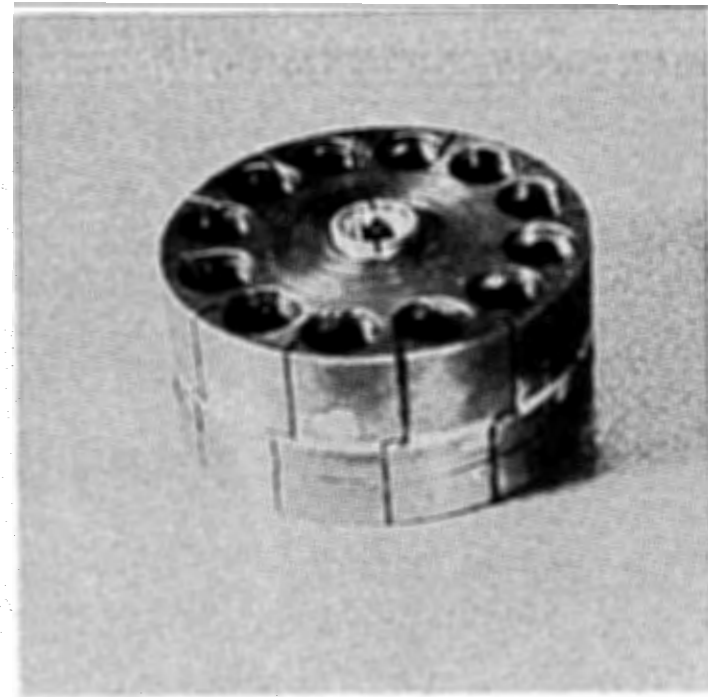


Рис. 1. Внешний вид одного из изготовленных многоиндуктивных сквидов.

ного сквида составила $1 \cdot 10^{-11}$ Гс/ $\sqrt{\text{Гц}}$ и, видимо, может быть еще увеличена. Осциллограмма выходного сигнала КСИ с многоиндуктивным сквидом приведена на рис. 2.

Достигнутая высокая чувствительность к магнитному полю позволяет расширить область применения сквидов в тонких физических экспериментах.

Авторы глубоко благодарны В.В.Игнатьеву, чье мастерство, проявленное при изготовлении многоиндуктивных сквидов, определило успех этой работы.

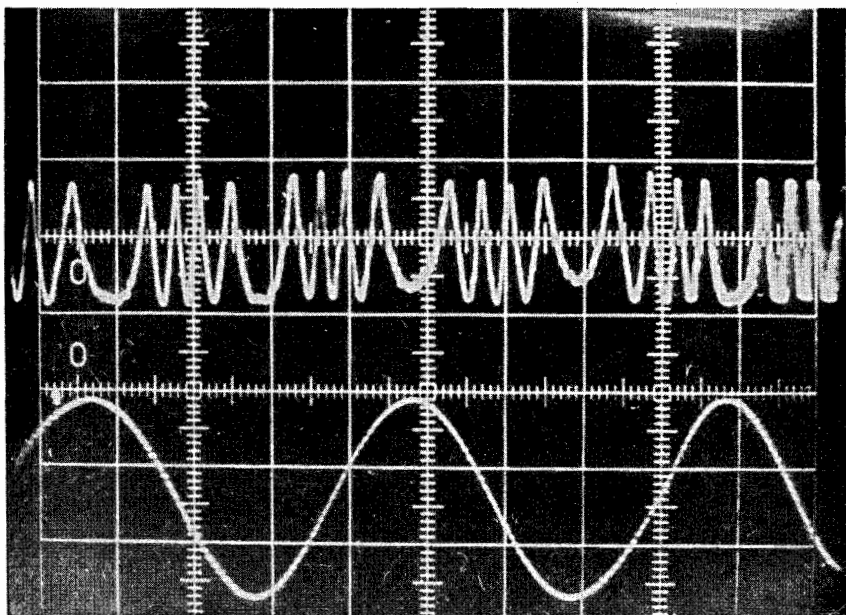


Рис. 2. Осциллограмма выходного сигнала КСИ с многоиндуктивным скивдом. Верхний луч - выходной сигнал КСИ, период по магнитному полю составляет $-2 \cdot 10^{-7}$ Гс; нижний луч - магнитное поле, приложенное к скивду.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лоунасмаа О.В. Принципы и методы получения температур ниже 1К. "Мир", М., 1977, с.207.
2. Zimmerman J.E., Thiene P., Harding J. J.Appl.Phys., 1970, 41, p.1572.
3. Zimmerman J.E. J.Appl.Phys., 1971, 42, p.4483.
4. Васильев Б.В., Данилов В.В., Лухарев К.К. ОИЯИ, P13-8233, Дубна, 1974.
Vasiliev B.V., Danilov V.V., Likharev K.K. IEEE Trans. Magn., MAG-11, 1975, no. 2, p.743.
5. Jackel L.D., Buhrman R.A. J.Low Temp. Phys., 1975, v.19, p.201.
6. Harvey I.K. J.Phys. E: Sci.Instr., 1977, 10, p.434.

Рукопись поступила в издательский отдел
13 января 1978 года.