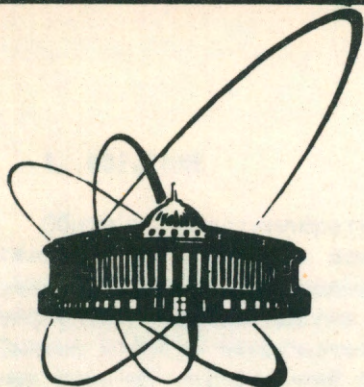


88-255

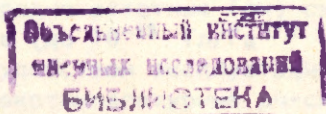


ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА

P13-88-255

В.Ф.Бобраков, Б.В.Васильев, В.Н.Полушкин

СКВИД, РАБОТАЮЩИЙ  
ПРИ АЗОТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ



Направлено в журнал "Письма в ЖЭТФ"

1988

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Обычные низкотемпературные сквиды являются высокочувствительными приборами, с помощью которых проводятся высокоточные измерения магнитных полей, их градиентов, электрических напряжений и многих других величин, преобразуемых в магнитные. Однако широкое использование сквидов в практике вне современных научных лабораторий сдерживается тем, что для обеспечения их работоспособности требуется жидкий гелий. Открытие высокотемпературных сверхпроводников обещает произвести переворот в измерительной технике благодаря широкому внедрению высокочувствительных приборов на основе сквидов, работающих при азотной температуре. Поэтому работы по созданию сквида из высокотемпературного сверхпроводника были начаты сразу во многих лабораториях разных стран. Первым успехом на этом пути было создание так называемого балк-сквида<sup>/1-4/</sup>, представляющего собой кусочек керамики из ВТСП, вокруг которого намотана радиочастотная катушка. Магнитное поле, создаваемое катушкой, разрушает многочисленные слабые связи между зернами сверхпроводника, что вызывает реакцию, похожую на отклик обычного радиочастотного сквида, однако сопровождается очень большими шумами. Эти шумы лежат на уровне  $10^{-9}$  Тл/Гц<sup>1/2</sup>, т.е. превышают шумы обычного низкотемпературного сквида примерно на четыре порядка, и поэтому такой сквид интересен только как демонстрационный.

Наиболее чувствительными низкотемпературными сквидами являются тонкопленочные сквиды постоянного тока<sup>/5/</sup>. Однако высокотемпературные тонкопленочные сквиды до сих пор не созданы. Несмотря на усилия в этом направлении, наилучшие пленочные сквиды имеют рабочую температуру около 60 К и примерно ту же чувствительность, что и балк-сквиды<sup>/6/</sup>.

Наибольшее применение в практике до настоящего времени нашли низкотемпературные радиочастотные (рч) сквиды, сочетающие высокую чувствительность (до  $10^{-13}$  Тл/Гц<sup>1/2</sup> в области белого шума) с надежностью и удобством эксплуатации. К настоящему времени уже созданы высокотемпературные рч-сквиды, работающие при 78 К и имеющие чувствительность на уровне  $(10^{-11} - 10^{-12})$  Тл/Гц<sup>1/2</sup> /7,8/. Цель настоящей работы - описать высокотемпературный рч-сквид с чувствительностью, приближающейся к  $10^{-13}$  Тл/Гц<sup>1/2</sup>.

## 2. ПРИГОТОВЛЕНИЕ СКВИДА

Этот сквид изготавливался из керамики  $Y_1Ba_2Cu_3O_7$ , полученной с помощью стандартной процедуры твердотельного синтеза <sup>9/</sup>. Измерения зависимости сопротивления этой керамики от температуры, выполненные обычным четырехзондовым способом, показали, что она переходит в полностью сверхпроводящее состояние при температуре выше 90 К /рис.1/.

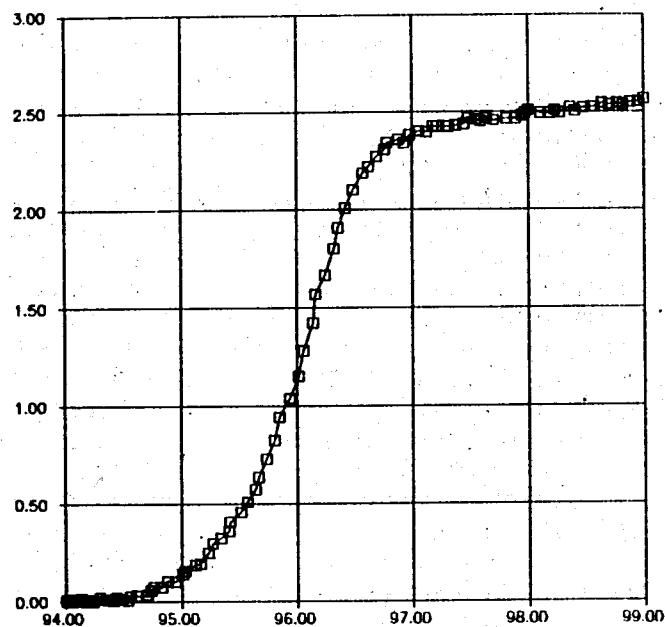


Рис.1. Зависимость сопротивления иттриевой керамики от температуры. По оси абсцисс - температура, К. По оси ординат - сопротивление, относительные единицы.

Из этой керамики перед последним отжигом формировались таблетки, в которых для приготовления сквида механически высверливались отверстия диаметром немного более 1 мм и вытачивался переход с размерами несколько десятков мкм. Таким способом изготавливались как двух-, так и одноиндуктивные сквиды, причем примерно каждый пятый оказывался работоспособным. Измерения параметров сквидов проводились на стандартной аппаратуре, обеспечивающей измерения с низкотемпературными сквидами, выпускаемой Опытным производством ОИЯИ <sup>10/</sup>. Измерения велись в обычном транспортном азотном сосуде Дьюара, при этом для

испытаний при повышенных температурах сквид, закрепленный на измерительной штанге, просто поднимался в горловину сосуда. Для того чтобы избежать попадания влаги на сквид, он при измерениях помещался в герметичную ампулу. Этого было достаточно, чтобы сохранить работоспособность керамических сквидов при многократных циклах охлаждения - отогрев. При этом была замечена некоторая деградация критического тока контакта, но более десятка таких циклов многие сквиды выдерживали. Некоторые сквиды при этих измерениях показали работоспособность только при повышенных температурах, при азотной температуре их критический ток оказывался слишком высоким и выходил за пределы возможностей, которые давала наша аппаратура.

Для подавления влияния внешних помех сквид вместе с сосудом Дьюара помещали в многослойный магнитный экран из отожженного пермаллоя, подавлявший земное магнитное поле до уровня  $10^{-8}$  Тл и внешние помехи до достаточно малого уровня. Однако ранее было замечено, что магнитное поле внутри экрана подвержено медленному дрейфу и флуктуирует, поэтому чувствительность сквида, определенная в таких условиях, может оказаться заниженной из-за воздействия этих флуктуаций.

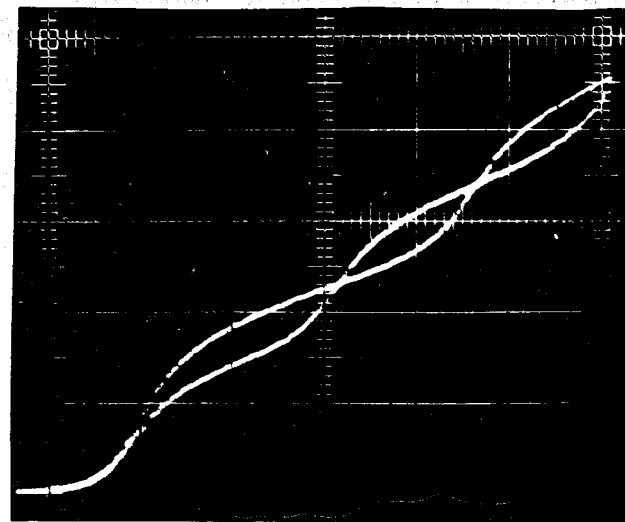


Рис.2. Вольт-амперная характеристика радиочастотного керамического двухиндуктивного сквида, полученная при 78 К. По оси абсцисс - амплитуда накачки сквида. По оси ординат - амплитуда отклика сквида.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Для того чтобы убедиться в работоспособности сквида, сначала измерялась его вольт-амперная характеристика. Для этого, как обычно, модулировалась амплитуда накачки сквида. Это приводило к возникновению обычной ступенчатой картины, хорошо изученной для низкотемпературных рч-сквидов и позволяющей "на глаз" оптимизировать связь сквида с контуром. На рис.2 в качестве примера показана ВАХ двухиндуктивного керамического сквида, полученная при температуре жидкого азота. Модуляция магнитного поля, приложенного к сквиду, при оптимально выбранной накачке вызывала возникновение обычного треугольного сигнала. На рис.3 показан треугольный сигнал с периодом примерно  $1.6 \times 10^{-9}$  Тл, полученный на первых трех плато на двухиндуктивном керамическом сквиде при температуре 78 К. Величина этого сигнала мало зависела от номера плато, на котором велись наблюдения, и, приведенная к контуру, составляла примерно 10 мкВ.

Измерения шумов этого сквида показали, что в их спектре присутствует большой вклад шумов  $1/f$  и начинаются эти шумы

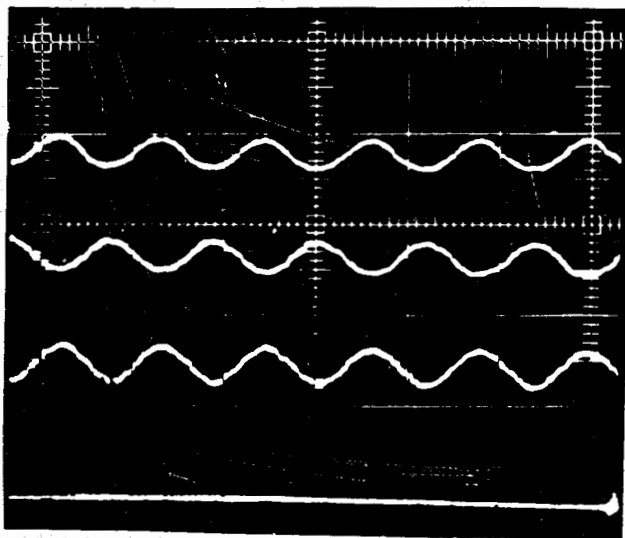


Рис.3. Зависимость сигнала двухиндуктивного радиочастотного сквида от приложенного внешнего магнитного поля, снятая на первых трех плато. Рабочая температура 78 К. Полоса 1 кГц. По оси абсцисс - магнитное поле, 1,3 нТл/дел. По оси ординат - сигнал сквида, 20 мкВ/дел.

при значительно более высоких частотах, чем шумы  $1/f$  низкотемпературного радиочастотного сквида. На рис.4 показан Фурье-спектр шумов высокотемпературного керамического двухиндуктивного радиочастотного сквида, полученный при температуре жидкого азота /верхняя кривая/. Здесь же для сравнения приведен Фурье-спектр шумов стандартного низкотемпературного двухиндуктивного радиочастотного сквида, изготовленного в ОП ОИЯИ, функционирующего при температуре жидкого гелия /нижняя кривая/. Существенным отличием в условиях измерений было то, что шумы ниобиевого сквида измерялись в условиях хорошей экранировки сверхпроводящим экраном, в то время как шумы керамического сквида регистрировались в пермаллоевом экране, который, как уже отмечалось, мог вносить свой вклад.

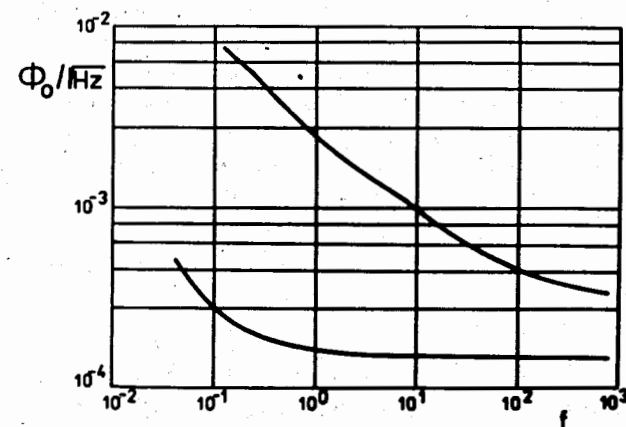


Рис.4. Фурье-спектр шумов керамического радиочастотного двухиндуктивного сквида при температуре 78 К /верхняя кривая/ и стандартного низкотемпературного радиочастотного двухиндуктивного сквида при температуре 4 К /нижняя кривая/. По оси абсцисс - частота, Гц. По оси ординат - плотность шумов,  $\Phi_0 / \text{Гц}^{1/2}$ .

### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Шумы типа  $1/f$  керамического сквида велики скорее всего из-за того, что в площади слабой связи, вероятно, присутствует множество межзеренных контактов, переключающихся случайным образом, как и в балк-сквиде.

Тот факт, что на высоких частотах уровень шумов керамического сквида при азотной температуре составляет примерно  $3 \cdot 10^{-4}$  кванта потока (примерно  $5 \cdot 10^{-13}$  Тл/Гц<sup>1/2</sup>) и оказывается близким к уровню шумов ниобиевого радиочастотного сквида при гелиевой температуре, не вызывает удивления, т.к. известно, что уровень белого шума последнего (порядка  $10^{-4}$  кванта потока) определяется не им самим, а предусилителем.

В заключение отметим, что хотя описанный сквид еще уступает по чувствительности аналогичному низкотемпературному, особенно в области низких частот, его разработка показала, что создание высокотемпературного сквида с хорошей чувствительностью - решаемая задача ближайшего времени. С другой стороны, описанный сквид уже в настоящее время может найти себе применение благодаря своей относительно высокой чувствительности и удобству эксплуатации, в частности, в полевых условиях для изучения аномалий магнитного поля Земли. Кроме того, по-видимому, используя описанный метод, можно изготовить двухиндуктивный сквид с неравными индуктивностями, большая из которых может взять на себя роль трансформатора потока. Такой сквид может использоваться в решении ряда задач физики твердого тела и, возможно, в магнитной кардиографии.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Colclough M.S. et al. - Nature, 1987, 328, p.47-48.
2. Pedrum C.M. et al. - Appl.Phys.Lett., 1987, 51, p.1364.
3. Tichy R. et al. - Jnl. Low Temp.Phys., 1988, 70, p.187-190.
4. Gallap J.C. et al. - Phys.Lett., 1988.
5. Tesche C.D. et al. - IEEE Trans. on Magn., 1985, N2, v.MAG-21, p.1032-1035.
6. Koch R.H. et al. - Appl.Phys.Lett., 1987, 51, p.200-202.
7. Zimmerman J.E. et al. - Appl.Phys.Lett., 1987, 51, p.617-618.
8. Harrop S. et al. - Materials of HTSCM<sup>2</sup>S-Interlaken, March, 1988.
9. Васильев Б.В., Лушиков В.И. В сб.: Краткие сообщения ОИЯИ, N2-88, 1988, с.33.
10. Бобраков В.Ф., Васильев Б.В. ОИЯИ, P13-85-20, 1985, Дубна.

Рукопись поступила в издательский отдел  
19 апреля 1988 года.

Бобраков В.Ф., Васильев Б.В., Полушкин В.Н.

P13-88-255

Сквид, работающий при азотной температуре

Описан двухиндуктивный радиочастотный сквид, изготовленный из высокотемпературной керамики  $Y_1Ba_2Cu_3O_7$ . Сквид функционирует при температуре жидкого азота, проявляя все основные особенности сигнальной характеристики, присущие радиочастотному сквиду. Уровень шумов высокотемпературного сквида в диапазоне высоких частот примерно в три раза превышает соответствующий уровень низкотемпературного сквида. Шумы типа  $1/f$  начинаются примерно от 100 Гц, так что на низких частотах чувствительность высокотемпературного сквида примерно на полтора порядка хуже чувствительности низкотемпературного сквида.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

Preprint Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1988

Перевод О.Ю.Токаревой

Bobrakov V.F., Vasiliev B.V., Polushkin V.N.

P13-88-255

SQUID Operating at Liquid Nitrogen Temperatures

A 2-hole rf-squid fabricated from high-temperature superconducting yttrium-based ceramic is described. Squid operates at liquid nitrogen temperatures and demonstrates all principal features of rf-squid signal. At high frequency the noise level of the high-T squid is only three times as much as the corresponding level of the helium squid. The  $1/f$  noises begin from approximately 100 Hz so that at low frequencies the high-T squid sensitivity is 1.5 order less than the helium squid sensitivity.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1988