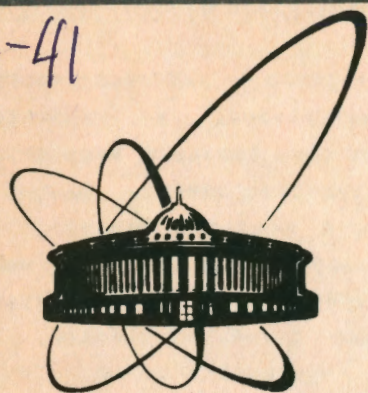


92-41



**ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

P13-92-41

В.Ф.Бобраков, В.Н.Полушкин

**ПИКОВОЛЬТМЕТР НА ОСНОВЕ РАДИОЧАСТОТНОГО
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СКВИДА**

Направлено в журнал "Приборы и техника эксперимента"

1992

Пиковольтметр на основе радиочастотного
высокотемпературного сквида

Разработан и исследован пиковольтметр на основе радиочастотного высокотемпературного сквида. Чувствительность прибора $40 \text{ пВ/Гц}^{1/2}$. Показано, что чувствительность сверхпроводниковых вольтметров выше чувствительности лучших полупроводниковых при выходном импедансе источника сигнала менее 10 Ом . Чувствительность вольтметра может быть повышена, если использовать сверхпроводящую катушку индуктивности, связывающую измерительную цепь со сквидом.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1992

Перевод авторов

Bobrakov V.F., Polushkin V.N.

P13-92-41

The Picovoltmeter Based on the Radiofrequency
High-T_c SQUID

The picovoltmeter based on radiofrequency high-T_c SQUID has been developed and investigated. The noise referred to the input of the instrument was about $40 \text{ пВ/Гц}^{1/2}$. The sensitivity of high-T_c superconductor voltmeters has been shown to be higher than the sensitivity of the best semiconductor ones while output impedance of the signal source is less than $10 \text{ }\Omega$. Using superconducting coil coupling input measurement circuit to the SQUID, the sensitivity of the voltmeter can be appreciably improved.

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

Введение

Появление высокотемпературного радиочастотного сквида [1] первоначально рассматривалось в качестве экзотического факта, подтверждающего существование квантовых эффектов в высокотемпературных сверхпроводниках. Однако неожиданно высокая чувствительность и создание механически стабильной конструкции датчика, выдерживающей многократные термоциклирования от комнатной температуры до температуры жидкого азота и обратно, постепенно формируют область, в которой его применение является предпочтительным. Так, магнитометр на основе высокотемпературного сквида с успехом может быть использован при решении ряда геофизических задач [2], в медицине при проведении экспресс-диагностики сердечной деятельности [3], в физических экспериментах [4]. Одним из традиционных применений низкотемпературных сквидов является создание на его основе сверхпроводниковых вольтметров. Чувствительный вольтметр на основе ВТСП-сквида также мог бы найти применение, например, при создании установок для исследования резистивного состояния в высокотемпературных сверхпроводниках. Предварительные расчеты показывают: такие измерительные системы с ВТСП-сквидом будут иметь чувствительность на 1-2 порядка выше чувствительности систем на полупроводниковых элементах и, что немаловажно, при приблизительно одинаковых габаритных размерах, а также стоимости их изготовления и эксплуатации.

Учитывая все выше сказанное, нам представлялось интересным создать и всесторонне исследовать вольтметр на основе разработанных в нашей Лаборатории ВТСП-сквидов [5]. Результаты этих исследований представлены в настоящей статье.

Функциональная схема и конструкция вольтметра

Общая идеология построения вольтметра на основе ВТСП-сквида такая же, как и для низкотемпературного сверхпроводникового вольтметра [6]. Чтобы обеспечить малый уровень собственных шумов и высокое входное сопротивление,

система была построена фактически как усилитель с последовательной обратной связью по напряжению. Полная функциональная схема представлена на рис. 1.

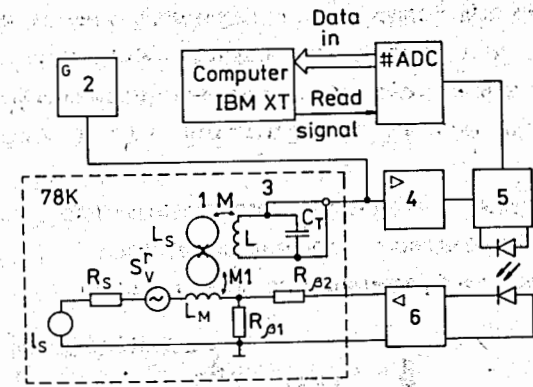


Рис. 1. Функциональная схема вольтметра на основе ВТСП-сквида. R_s , L_M , $R_{\beta 1}$ - входная измерительная цепь, 1 - сквид, 2 - источник радиочастотного тока смещения, 3 - колебательный контур, считывающий информацию со сквида, 4 - маломушящий радиочастотный усилитель, 5 - низкочастотный блок, 6 - согласующий видеоусилитель.

Источник измеряемого сигнала E_s с активным выходным импедансом R_s , индуктивность L_M и резистор обратной связи $R_{\beta 1}$ составляют входную измерительную цепь, расположенную в криостате при температуре жидкого азота в непосредственной близости от сквида. Входная измерительная цепь связана со сквидом посредством взаимной индуктивности M между L_M и контуром квантования сквида L_S . Ток, создаваемый источником полезного сигнала E_s в измерительной цепи, компенсируется током обратной связи от напряжения на $R_{\beta 1}$. Сам сквид выступает в качестве нуль-индикатора магнитного потока в катушке индуктивности L_M .

Схемы считывания, преобразования и усиления сигнала сквида обычны. Они многократно описаны в литературе, например, в [5]. Отличием в нашей системе является только то, что с целью расширения функциональных возможностей в цепи обратной связи предусмотрена оптронная развязка, а в самом блоке обратной связи (6 на рис. 1) используется плавающее

питание. В данном случае мы имеем возможность развязать слаботочную земляную шину цепей преобразования и усиления сигнала сквида от земляной шины источника сигнала. Благодаря этому пиковольтметр может быть использован как дифференциальный усилитель в четырехточечном методе измерения напряжения. Это особенно важно, например, при измерении плотности критического тока в сверхпроводящей керамике, когда через образец должен пропускаться ток в несколько десятков ампер.

Чтобы получить представление о расположении основных элементов пиковольтметра, на рис.2 дано схематическое изображение его конструкции.

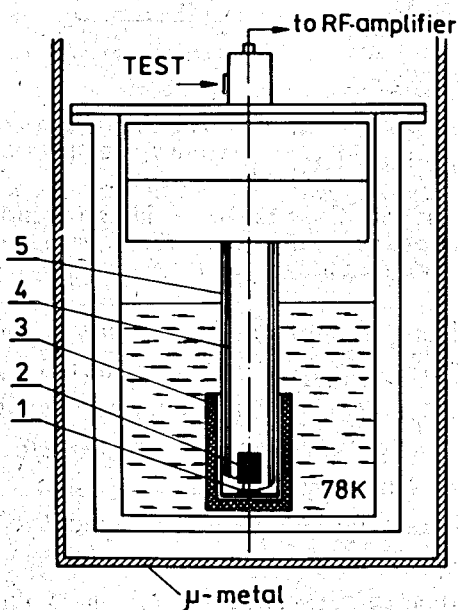


Рис.2. Конструкция ВТСП-сквид-вольтметра.

Сквид 1 и измерительные цепи 2 помещены внутрь высокотемпературного сверхпроводящего экрана 3. Для уменьшения взаимного влияния кабеля, идущие к измерительным цепям, и кабель, связывающий колебательный контур сквида с малошумящим предусилителем, пропущены через разные трубки из нержавеющей стали 4,5. Вся эта вставка расположена в стеклопластиковом криостате, заполненном жидким азотом. Чтобы

избежать в системе избыточного низкочастотного шума, порождаемого скачками вихрей магнитного потока в сверхпроводящем экране, которые могут регистрироваться непосредственно сквидом, сверхпроводящий экран должен быть охлажден в возможно малом внешнем магнитном поле. Для этого перед заливкой азота криостат помещается в пермаллоевый экран (5 на рис.2). После заливки азота необходимость во внешнем пермаллоевом экране отпадает, т.к. экран из Y-Ba-Cu-O с добавками серебра имеет первое критическое поле $H_{c1} \approx 79$ и, как показали долговременные наблюдения при помощи магнитометра на основе ВТСП-сквида с чувствительностью $\sim 1,5 \cdot 10^{-13}$ Тл/Гц^{1/2}, поле Земли не проникает внутрь него [7].

Методика приготовления сквида подробно описана ранее в [8]. Здесь мы не будем повторно излагать ее, а только заметим, что в установке использовался двухдырочный сквид из YBaCuO с диаметрами отверстий $\sim 1,2$ мм и длиной 5 мм. Измерительная катушка L_M была намотана медным проводом диаметром 100 мкм и содержала 80 витков.

Шумовые характеристики пиковольтметра

Основными источниками шумов в ВТСП-сквид-вольтметре являются резисторы во входной измерительной цепи и непосредственно сам сквид. В таком случае выражение для суммарной спектральной плотности напряжения шумов будет иметь следующий вид:

$$S_V^\Sigma = S_V^r + S_V^s, \quad (1)$$

где S_V^r - спектральная плотность напряжения шумов, создаваемых активным входным импедансом измерительной цепи R_T , без учета обратной связи, S_V^s - приведенная ко входу вольтметра спектральная плотность шумового напряжения, создаваемая сквидом.

$$S_V^r = 4k_B T R_T, \quad (2)$$

где $R_T = R_s + R_1 + R_{\beta 1}$, R_1 - сопротивление катушки

индуктивности L_M , T - шумовая температура R_T , k_B - постоянная Больцмана.

Поскольку все сопротивления измерительной цепи находятся в жидком азоте, то $T = 78$ К.

Спектральная плотность шумов, порождаемых сквидом,

$$S_V^S = S_\phi^S R_T / M, \quad (3)$$

где S_ϕ^S - спектральная плотность шумового потока сквида.

Таким образом, суммарная спектральная плотность шума по напряжению в области низких частот, когда выполняется условие $\omega\tau \ll M\eta\beta / (R_T\tau)$,

$$S_V^\Sigma = R_T (4k_B T + R_T S_\phi^S / M^2), \quad (4)$$

где η - крутизна преобразования сквида, τ - постоянная времени интегратора, β - коэффициент преобразования петли обратной связи.

В нашем вольтметре $R_T \approx 0,1$ Ом, $M \approx 4,5 \times 10^{-9}$ Гн. Как это можно видеть из графика на рис. 3, спектральная плотность шумового потока сквида без входной измерительной цепи при $f > 10$ Гц $S_\phi^{1/2} \approx 2 \times 10^{-4} \phi_0 / \text{Гц}^{1/2}$.

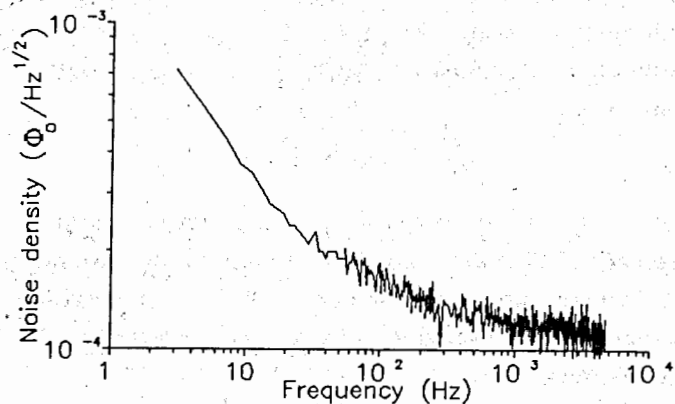


Рис. 3. Спектральная плотность шумового потока сквида без входной измерительной цепи.

Согласно (4), $(S_V^\Sigma)^{1/2} \approx 40$ пВ/Гц^{1/2} в области белого шума. Данный результат находится в хорошем соответствии с

экспериментально определенной спектральной плотностью шумового напряжения S_V^Σ , представленной на рис. 4.

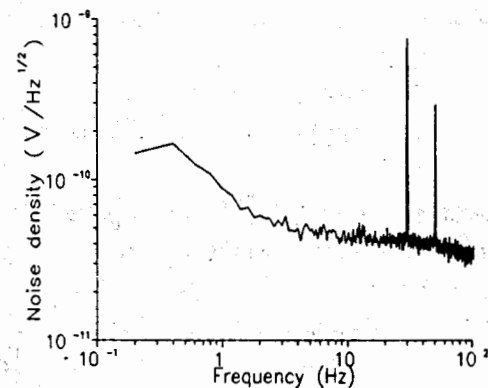


Рис. 4. Суммарная спектральная плотность шумового напряжения вольтметра.

Сравнение с традиционными приборами

Для того, чтобы определить место разработанного вольтметра (усилителя) в сложившейся классификации, необходимо сравнить его основные параметры с параметрами лучших полупроводниковых усилителей, построенных на основе современных маломушьящих полевых транзисторов.

Возьмем один из наиболее маломушьящих усилителей, сообщение о котором недавно появилось в [9]. Первый каскад данного усилителя построен на полевом транзисторе 2SK117N с J-каналом, имеющим следующие основные параметры:

- спектральная плотность шумового напряжения $S_V^{\text{FET}} \approx 1,2$ нВ/Гц^{1/2};

- спектральная плотность шумового тока $S_i^{\text{FET}} \approx 0,25 \cdot 10^{-15}$ А/Гц^{1/2}.

Таким образом, при выходном сопротивлении источника сигнала $R_S \approx 0$ построенный нами сверхпроводниковый пиковольтметр в 30 раз лучше полупроводникового.

В действительности, реальные источники сигналов обладают конечным значением выходного сопротивления. Поэтому полезно

сравнить сверхпроводниковые и полупроводниковые усилители с учетом R_s , то есть принять во внимание их шумовой ток. Полная спектральная плотность шумового напряжения для сквид-пиковольтметра дана в выражении (4). Для полупроводникового усилителя этот же параметр имеет следующий вид [10]:

$$(S_{v\Sigma}^{FET})^{1/2} = (S_v^{FET} + R_s^2 S_i^{FET})^{1/2}. \quad (5)$$

Графики для $(S_{v\Sigma})^{1/2}$ и $(S_{v\Sigma}^{FET})^{1/2}$ в зависимости от R_s представлены на рис. 5, кривые 1 и 2 соответственно.

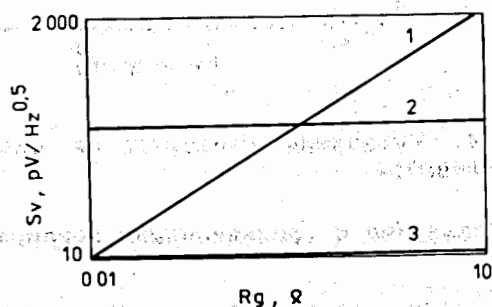


Рис. 5. Графики полных спектральных плотностей шумового напряжения в зависимости от выходного сопротивления источника полезного сигнала. 1 - высокотемпературный сквид-пиковольтметр, 2 - усилитель с полевым транзистором на входе, 3 - низкотемпературный сквид-пиковольтметр.

Для сравнения показана линия 3, которая принадлежит вольтметру на основе ПТ-сквида, работающего при температуре жидкого гелия [6]. Отчетливо видно, что разработанный высокотемпературный сквид-пиковольтметр имеет преимущество перед полупроводниковым вплоть до $R_s = 5,5$ Ом и, как и следовало ожидать, занимает промежуточное положение между низкотемпературными сверхпроводниковыми и полупроводниковыми.

Заключение

Таким образом, в ЛНФ ОИЯИ создан пиковольтметр на

основе радиочастотного ВТСП-сквида со следующими характеристиками:

| | |
|--|---------------------------|
| чувствительность в области белого шума | 40 пВ/Гц ^{1/2} ; |
| входное сопротивление на постоянном токе | 10 ⁴ Ом; |
| полоса частот | 0÷20000 Гц; |
| допустимое синфазное напряжение по входу | 50 мкВ; |
| динамический диапазон | 120 дБ. |

При измерении сигналов от низкоомных источников (менее 5,5 Ом) чувствительность сверхпроводникового вольтметра выше по сравнению с лучшими полупроводниковыми приборами. Учитывая то обстоятельство, что рабочие температуры высокотемпературных керамических сквидов и полупроводниковых элементов перекрываются, созданный пиковольтметр следует рассматривать как основу для разработки в будущем гибридных сверхпроводник-полупроводник интегральных микросхем целевого назначения для измерения, усиления, преобразования слабых электрических сигналов. В данном виде стоимость самих сквидовских систем и их эксплуатации в условиях азотного уровня охлаждения будет приближаться к соответствующей стоимости полупроводниковых систем, превосходя при этом их по чувствительности. Есть основания надеяться, что они найдут широкое применение в технике физического эксперимента.

Литература

1. J.E.Zimmerman, J.A.Beall, M.W.Cromar, R.H.Ono.—Operation of a Y-Ba-Cu-O rf SQUID at 81 K. Appl. Phys. Lett., 1987, v.51, №8, p.617-618.
2. V.N.Polushkin, B.V.Vasiliev. — Magnetometer based on single-hole high-T_c SQUID. Sov. Experimental Technique and Devices., 1990, №3, p.182-184.
3. A.G.Likhachev, V.N.Polushkin, S.V.Uchaikin, B.V.Vasiliev.—Gradiometer based on two single-hole SQUIDS. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1990, v.39, №6, p.1034-1037.
4. N.V.Zavaritsky, V.N.Zavaritsky.—Magnetic penetration depth δ_0 and critical current density in YBaCuO crystals. Physica C, 1989, v.162-164, p.443.

5. V.N.Polushkin, B.V.Vasiliev. - Investigation of rf-SQUID behaviour at liquid nitrogen temperature. Modern Physics Letters B, 1989, v.3, №17, p.1327-1335.
6. A.Davidson et al. - An ultra-low noise preamplifier using superconducting quantum devices. Rev. Shi. Instrum., 1974, v.45, №6, p.838-846.
7. В.Н.Полушкин, А.Р.Буев. - Исследование высокотемпературного сверхпроводящего экрана при помощи магнитометра на основе радиочастотного высокотемпературного сквида. Препринт ОИЯИ, P13-92-42, Дубна, 1992.
8. V.F.Bobrov, V.N.Polushkin, B.V.Vasiliev. - SQUID operating at liquid nitrogen temperature. Modern Physics Letters B, 1989, v.3, №5, p.415-419.
9. S.R.Jeffers, F.L.Walls. - A very low-noise FET input amplifier. Rev. Sci. Instrum. 1989, v.60, №6, p.1194-1195.
10. M.J. Buckingham. - Noise in electronic devices and systems. New York, 1983.

Рукопись поступила в издательский отдел

30 января 1992 года.