

Высокотемпературные ВЧ сквиды для работы в магнитных полях. Влияние тепловых флуктуаций

В. И. Шнырков, В. П. Тимофеев, А. С. Гарбуз

*Физико-технический институт низких температур им. Б. И. Веркина НАН Украины,
Украина, 310164, г. Харьков, пр. Ленина, 47*

Ч. Г. Ким

Sun Moon University, 100 Kaisan-Ri, Asan-Si, Chungnam, 336840 Korea

Статья поступила в редакцию 3 марта 1999 г.

Проведена оптимизация характеристик объемных ВТСП ВЧ сквидов в пределе больших тепловых флуктуаций. Показано, что интенсивные тепловые флуктуации приводят к такому изменению импеданса интерферометров, что фактически они работают в квазибезгистерезисном режиме. При использовании текстурированной керамики удается изготавливать сквиды, устойчиво работающие в открытом пространстве и/или в достаточно больших магнитных полях ($H = 150\text{--}200$ А/м) с чувствительностью на уровне $2 \cdot 10^{-13}$ Тл/Гц^{1/2}. На базе этих сквидов создан и испытан портативный измеритель магнитной восприимчивости образцов в постоянных (до 150 А/м) и переменных (до 4 А/м) магнитных полях с чувствительностью по магнитному моменту не хуже $1,6 \cdot 10^{-10}$ А·м².

Проведено оптимізацію характеристик об'ємних ВТНП ВЧ сквідів в границях з великих теплових флуктуацій. Показано, що інтенсивні теплові флуктуації приводять до такої зміни імпедансу інтерферометрів, що фактично вони працюють у квазібезгістерезисному режимі. При використанні текстурованої кераміки вдається виготовити сквіди, які стійко працюють у відкритому просторі чи/або у достатньо значних магнітних полях ($H = 150\text{--}200$ А/м) з чутливістю на рівні $2 \cdot 10^{-13}$ Тл/Гц^{1/2}. На базі цих сквідів зроблено та випробовано портативний вимірювач магнітної сприйнятливості зразків у постійних (до 150 А/м) та змінних (до 4 А/м) магнітних полях з чутливістю до магнітного моменту не гірше $1,6 \cdot 10^{-10}$ А·м².

PACS: 85.25.Dq, 74.50.+r

Введение

Современные ВТСП сквиды, выполненные по тонкопленочной технологии [1], имеют высокие характеристики в слабых магнитных полях. При работе в поле Земли спектральная плотность шума пленочных ВТСП сквидов возрастает более чем на порядок [2] в области низких частот (1–100 Гц), т.е. в той части спектра, в которой наиболее ярко проявляются преимущества сквидов перед другими детекторами магнитного поля. Эти избыточные шумы как правило связаны со специфическими свойствами ВТСП материалов (см., например, [3,4]) и во многих случаях ограничивают применения сквидов в физических исследованиях.

В работе [4] нами было отмечено, что спектральная плотность шума, связанная с «джозефсоновскими флуктуаторами», состоящими из замкнутых слабыми связями сверхпроводящих контуров, немонотонно зависит от температуры и магнитного поля. Как следует из теории таких флуктуаторов [5], экстремумы шума явным образом зависят от их характеристик и коэффициента связи с контуром квантования. Поэтому разумно предположить, что, устранив основные из них, например расположенные вблизи джозефсоновского контакта, можно уменьшить спектральную плотность шума сквида S_{Φ} при работе в открытом пространстве. В этой статье рассмотрены некоторые вопросы оптимизации объемных ВТСП ВЧ

(одноконтактных) скивдов для работы во внешних полях до 150 А/м и их использование в измерителе магнитной восприимчивости.

1. Высокочастотный скивд в пределе больших флуктуаций

Переход от гелиевого уровня охлаждения к азотному приводит к увеличению энергии тепловых флуктуаций $k_B T$ и связанному с этим возрастанию флуктуаций магнитного потока Φ_N^2 в индуктивности скивда L :

$$\Phi_N^2(T) \cong k_B T L . \quad (1)$$

Исследования сверхпроводящих квантовых интерферометров в присутствии больших тепловых флуктуаций, выполненные в 70-е годы (см., например, [6]), показали, что результат их воздействия на скивд может быть описан уменьшением эффективного критического тока джозефсоновского контакта $I_c^*(T)$

$$I_c^*(T) = I_c(T) \exp \{-L/2L_F(T)\} \quad (2)$$

и соответствующим ему изменением зависимости внутреннего потока в интерферометре Φ от внешнего Φ_e . Здесь L_F — значение зависящей от температуры флуктуационной индуктивности скивда, равной

$$L_F(T) = (\Phi_0/2\pi)^2/k_B T = 10^{-10} \text{ Гн при } T = 77 \text{ К}, \quad (3)$$

Φ_0 — квант магнитного потока, k_B — постоянная Больцмана.

В простой резистивной модели джозефсоновского контакта спектральная плотность шума скивда является функцией отношения тепловой энергии к джозефсоновской энергии связи:

$$\Gamma = 2\pi k_B T / I_c \Phi_0 , \quad (4)$$

которое для получения предельной чувствительности должно быть значительно меньше 0,1 (соответственно $I_c \gg 30$ мкА). Выполнение этого условия и требования $L < L_F/\pi$ для объемных интерферометров достаточно сложно и, как правило, ВТСП ВЧ скивды работают в пределе больших флуктуаций.

В пределе интенсивных флуктуаций возникает вопрос о выборе оптимального коэффициента связи k между резонансным контуром, имеющим добротность Q , и контуром квантования. Обычно считается, что его значение можно выбирать из условия $k^2 Q = 1$ для гистерезисного режима и

$k^2 Q l \gg 1$ для безгистерезисного. Оба эти условия не совсем корректны в пределе больших флуктуаций, когда $\Gamma = 0,5-0,2$, в связи с изменением безразмерной индуктивности скивда (2) $l^* = 2\pi L I_c^* / \Phi_0$. Такой результат легко интерпретировать следующим образом: интенсивные флуктуации приводят к уширению плотности вероятности распада метастабильных токовых состояний интерферометра до такой степени, что его импеданс меняется, делая зависимость $\Phi(\Phi_e)$ квазибезгистерезисной.

В работе [7] было показано, что при увеличении значения $k^2 Q l$ в безгистерезисном режиме крутизна преобразования быстро возрастает, достигая значений $10^{11}-10^{12}$ В/Вб. При дальнейшем повышении этого произведения спектральная плотность шума скивда резко растет. Последующий анализ показал [8], что в случае $k^2 Q l > 2-3$ даже в безгистерезисном режиме возникают стохастические колебания, которые и приводят к ухудшению чувствительности датчика. Поэтому условие оптимального согласования при $l < 1$ должно выглядеть следующим образом:

$$1 \leq k^2 Q l < 2-3 . \quad (5)$$

Индуктивность объемных ВТСП ВЧ скивдов, исследованных в настоящей работе, составляет $3 \cdot 10^{-10}$ Гн, что на порядок больше, чем L_F/π . Этот выбор обусловлен компромиссом между ростом собственных шумов датчика и увеличением коэффициента связи скивд-магнитометра с измеряемым образцом. При такой индуктивности эффективное значение критического тока интерферометра (2) изменяется как $I_c^* = I_c \exp(-1,5) = 0,22 I_c$, что для критических токов джозефсоновского контакта $I_c < 5$ мкА делает его зависимость $\Phi(\Phi_e)$ безгистерезисной даже без учета больших значений Γ .

Решение уравнения Эйнштейна — Фоккера — Планка для автономного контакта (см., например, [9]) при интенсивных флуктуациях $\Gamma = 0,3-0,5$ показывает, что практически все ВЧ ВТСП скивды, описанные в литературе, работают в «безгистерезисном» режиме. Поэтому для оптимального согласования и получения максимального коэффициента преобразования, размаха сигнальной характеристики и увеличения чувствительности значение $k^2 Q$ необходимо сделать намного большим, чем в «обычном» гистерезисном режиме:

$$1/l^*(L/L_F, \Gamma) = k^2 Q . \quad (6)$$

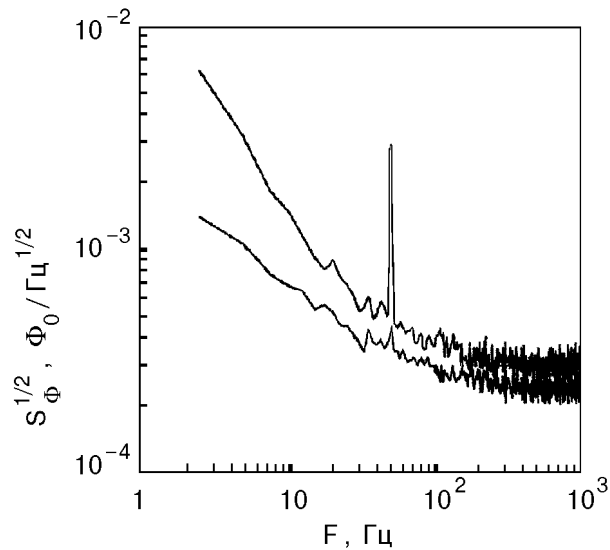


Рис. 1. Зависимость от магнитного поля спектральной плотности шума ВТСП ВЧ сквида с $L = 3 \cdot 10^{-10}$ Гн при $T = 77$ К. Сквид помещен в ВТСП и двухслойный пермаллоевый экраны (нижняя кривая, $B = 0,02$ А/м); шум датчика в алюминиевом экране при наличии земного поля (верхняя кривая, $B = 40$ А/м).

Итак, интенсивные флуктуации изменяют импеданс сверхпроводящего квантового интерферометра таким образом, что стирается граница между «гистерезисным» и «безгистерезисным» режимами ВЧ сквида, т.е. при $\Gamma = 0,2-0,5$ и $L > L_F$ реализуется только квазибезгистерезисный режим, при котором чувствительность можно оценить по обычным формулам для безгистерезисного режима. Частично шумы усилителя и резонансного контура можно уменьшить, увеличивая коэффициент связи до

$$2/l^* (L/L_F, \Gamma) = k^2 Q. \quad (7)$$

Однако в этом случае сокращается частотная полоса и ухудшаются динамические характеристики ВТСП ВЧ сквида.

2. Экспериментальные результаты

Интерферометры ВЧ сквидов с диаметром контура квантования 0,8 мм изготавливались из текстурированной Y-Ba-Cu-O керамики, которая имела высокие плотности критического тока при $T = 77$ К ($j > 10^3$ А/см²). Джозефсоновский контакт формировался с помощью серии лазерных импульсов при непрерывном контроле характеристик сквидов в магнитном поле Земли. Исследования S_{Φ} в присутствии магнитного поля показали, что достаточно хорошими спектрами шума обладает примерно один интерферометр из

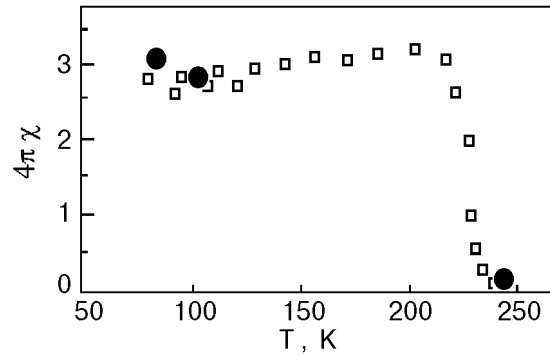


Рис. 2. Температурная зависимость объемной восприимчивости образца $\text{Ga}_{88}\text{La}_{12}$, усредненная по серии проведенных измерений в постоянном магнитном поле 43 А/м. Затемненные кружки — результаты сравнительных испытаний на измерителе магнитной восприимчивости фирмы «Quantum Design» гелиевого уровня охлаждения.

десяти. Мы считаем, что в этом случае удастся создать джозефсоновский контакт без дополнительных контуров «джозефсоновских флуктуаторов», ухудшающих спектральную плотность шума на низких частотах. На рис. 1 показаны спектральные плотности шума магнитного потока объемного ВТСП ВЧ сквида, полученные при экранировании датчика ВТСП и пермаллоевыми экранами, а также в магнитном поле Земли, т.е. в экранах из алюминия. С концентратором магнитного потока эффективное значение приемной площади магнитометра возрастает в 2,7 раза и составляет 1,3 мм², а чувствительность в области квазибелого шума достигает значения $2 \cdot 10^{-13}$ Тл/Гц^{1/2} в магнитном поле Земли.

Такие датчики ВТСП ВЧ сквидов созданы нами для измерительной аппаратуры, работающей в относительно больших магнитных полях 30–300 А/м. Примером может служить измеритель магнитной восприимчивости на базе ВЧ сквида с азотным уровнем охлаждения [10], основными частями которого являются: низкошумящий стеклопластиковый криостат, размещенный в пермаллоевом экране; «обратный» стеклянный дюар для поддержания температуры исследуемого образца в интервале от 77 до 250 К; медный соленоид для создания полей до 300 А/м; термометр и ВТСП ВЧ сквид, связанный взаимной индуктивностью с образцом диаметром 1,5 мм. Расстояние между образцом и контуром квантования сквида 15 мм. Коэффициент преобразования магнитного момента образца в выходное напряжение $k_m = m_Z / U_m = 8,2 \cdot 10^{-8}$ А·м²/В.

Чувствительность установки в поле 150 А/м составляет $1,6 \cdot 10^{-10}$ А·м² и не зависит от

температуры образца. В слабых магнитных полях ($H = 0,02$ А/м) чувствительность возрастает до $5 \cdot 10^{-11}$ А·м². В принципе, эти значения чувствительности могут быть улучшены в 2–3 раза за счет уменьшения расстояния между образцом и сквидом, однако данная установка проектировалась под образцы с максимальным диаметром 8 мм.

На рис. 2 приведена температурная зависимость восприимчивости поликристаллического образца $Gd_{88}La_{12}$ размером $1 \times 1 \times 1$ мм, измеренная в постоянном магнитном поле. Эти результаты хорошо количественно согласуются с данными, полученными при исследовании этого же образца на измерителе магнитной восприимчивости гелиевого уровня охлаждения фирмы «Quantum Design». Кроме того, на нашей установке в полях до 150 А/м исследованы фазовые переходы в ВТСП материалах и магнитные характеристики образцов специальных сталей для атомного реакторостроения, прошедших усталостные испытания [10].

Заключение

За 10 лет развития ВТСП сквидов созданы достаточно хорошие технологии пленочных интегральных детекторов для работы в слабых магнитных полях. Характеристики пленочных сквидов будут улучшаться и их применение в открытом пространстве для развития методов неразрушающего магнитного контроля, медицинской диагностики, геофизических и физических (ЯМР, восприимчивость и т.д.) исследований станет эффективным хотя бы из-за реализации в пленочных ВТСП сквидах предела малых флуктуаций, использования пленочных антенн и высокого качества эпитаксиальных пленок. Однако, как видно из вышеизложенного, при оптимизации объемных ВТСП ВЧ сквидов и всей измерительной установки в настоящее время возможно создание высокочувствительных приборов, работающих в достаточно больших внешних полях, т.е. решения тех задач, которые были сформулированы академиком Б. И. Веркиным сразу после обнаружения квантовой интерференции в оксидных сверхпроводниках [11].

1. E. Dantsker, S. Tanaka, P. A. Nilsson, R. Kleiner, and J. Clarke, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **7**, 2775 (1997).
2. M. L. Lucia, R. Hohmann, H. Soltner, H.-J. Krause, W. Wolf, H. Bousak, M. I. Faley, G. Spornl, and A. Binneberg, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **7**, 2878 (1997).
3. M. J. Ferrari, M. Johnson, F. C. Wellstood, J. Clarke, P. A. Rosenthal, R. H. Hammond, and M. R. Beasley, *Appl. Phys. Lett.* **53**, 695 (1988).
4. В. И. Шнырков, В. П. Тимофеев, Г. М. Цой, В. А. Хлус, А. В. Демин, *ФНТ* **21**, 604 (1995).
5. V. A. Khlus and A. V. Dyomin, *Physica* **C212**, 352 (1993).
6. В. А. Хлус, И. О. Кулик, *ЖТФ* **45**, 449 (1975).
7. I. M. Dmitrenko, G. M. Tsoi, V. I. Shnyrkov, and V. V. Kartsovnik, *J. Low Temp. Phys.* **43**, 413 (1982).
8. S. A. Bulgakov, V. B. Ryabov, V. I. Shnyrkov, and D. M. Vavriv, *J. Low Temp. Phys.* **83**, 241 (1991).
9. В. Н. Полушкин, *Препринт ОИЯИ*, P13, 201 (1989).
10. V. P. Timofeev, V. I. Shnyrkov, S. G. Kim, and H. C. Kim, *Digests of the 1998 Spring Conference, The Korean Magnetics Society* **8**, No 1, 10 (1998).
11. Б. И. Веркин, И. М. Дмитриенко, В. М. Дмитриев, А. Г. Козырь, Г. М. Цой, В. И. Шнырков, *ФНТ* **13**, 651 (1987).

High- T_c rf SQUIDS for operating in magnetic fields. Effect of thermal fluctuations

V. I. Shnyrkov, V. P. Timofeev, A. S. Garbuz, and Cheol Gi Kim

The bulk high- T_c RF SQUID characteristics are optimized in the limit of strong thermal fluctuations of its work. It is shown that these fluctuations change the interferometer impedance so that it operates only in the nonhysteretic regime. By using the textured ceramic it is possible to produce SQUIDS that operate stably in unshielded environment and/or in rather high magnetic fields ($H = 150$ – 200 А/м) and have a sensitivity of about $2 \cdot 10^{-13}$ Т/Hz^{1/2}. On the basis of these SQUIDS a portable susceptometer with a magnetic moment sensitivity of no less than $1.6 \cdot 10^{-10}$ А·м² was developed and tested in dc (up to 150 А/м) and ac (up to 4 А/м) magnetic fields.