

05; 12

© 1990 г.

## ИНТЕГРАЛЬНЫЙ ПТ СКВИД-МАГНИТОМЕТР

Ю. Е. Журавлев, В. П. Кошелец, А. Н. Матлашов,  
И. Л. Серпученко

Исследуется интегральный ПТ сквид на основе туннельных джозефсоновских переходов Nb—Al<sub>x</sub>O<sub>y</sub>—Nb площадью 16 мкм<sup>2</sup>, шунтированных низкоиндуктивным сопротивлением. Реализован магнитометр с входным энергетическим разрешением  $3.9 \times 10^{-31}$  Дж/Гц.

## Введение

Сверхпроводящие квантовые интерферометрические датчики — сквиды широко используются для проведения чувствительных измерений [1]. Наиболее низким уровнем собственного шума и высокой стабильностью при термоциклировании обладают интегральные сквиды со смещением постоянным током, или ПТ сквиды. Высокая надежность ПТ сквидов реализуется при их изготовлении с помощью интегральной технологии на основе только тугоплавких материалов. Из анализа публикаций, посвященных проблемам создания интегральных ПТ сквидов [2, 3], можно заключить, что наилучшими параметрами обладают сквиды с туннельными джозефсоновскими переходами малой площади, шунтированные низкоиндуктивным сопротивлением.

Шумовые свойства сквидов описываются их собственным энергетическим разрешением, которое равно минимальной регистрируемой энергии магнитного потока в контуре сквида, и входным энергетическим разрешением, определяемым энергией шумового тока в катушке связи сквида [4]. Уменьшение индуктивности контура сквида до нескольких пикогенри позволяет реализовать высокое собственное энергетическое разрешение [5]. Однако при этом уменьшается взаимоиנדукция между контуром сквида и катушкой связи, поэтому такие сквиды трудно связать с внешними устройствами. Одним из вариантов решения этой проблемы является создание многоконтурных интегральных сквидов [6]. Но усложнение конфигурации сверхпроводящих берегов приводит к возникновению вносящих дополнительный низкочастотный шум СВЧ резонансов, и высокое энергетическое разрешение удается реализовать лишь на коротких участках сигнальной характеристики. К сожалению, проблемы возникновения СВЧ резонансов в ПТ сквидах и их влияние на низкочастотные шумы еще недостаточно исследованы.

Широко известна конструкция интегрального ПТ сквида с широким сверхпроводящим контуром и спиральной катушкой связи, напыляемой поверх него [7]. Толщина разделяющего их слоя диэлектрика составляет лишь 500—800 нм, поэтому витки катушки связи вносят значительную паразитную емкость, отрицательно влияющую на работу сквида [8]. Расстояние между катушкой связи и сквидом можно увеличить при их напылении на разных подложках и прижатии друг к другу через изолятор толщиной порядка нескольких микрон. В такой конструкции удастся получить выигрыш во входном энергетическом разрешении по сравнению с полностью интегральным вариантом сквида. Это связано с тем, что, несмотря на уменьшение коэффициента потокосцепления контура сквида и катушки связи, не происходит заметного роста собственных шумов сквида после прижатия катушки связи.

Целью настоящей работы является создание малощумящего интегрального ПТ сквида с прижимной тонкопленочной катушкой связи и магнитометра на его основе.

### Оптимизация параметров сквида

Критерием для оптимизации параметров сквида является реализация максимального входного энергетического разрешения, т. е. минимизация величины  $E_c$  — спектральной плотности энергии шумового тока в катушке связи сквида

$$E_c = \frac{\Phi_c^2}{2k^2L}, \quad (1)$$

где  $\Phi_c$  — спектральная плотность собственного шумового магнитного потока сквида,  $k$  — коэффициент связи контура сквида и катушки связи,  $L$  — собственная индуктивность сквида.

Джозефсоновские туннельные шунтированные переходы имеют гистерезисные вольт-амперные характеристики (ВАХ). Гистерезис ВАХ устраняется путем шунтирования переходов сопротивлением  $R$  так, чтобы параметр гистерезиса был меньше единицы [9]

$$\beta_c = \frac{2\pi I_0 R^2 C}{\Phi_0} < 1, \quad (2)$$

где  $I_0$  — критический ток одного перехода,  $R$  — сопротивление шунта,  $C$  — емкость перехода,  $\Phi_0 = 2.07 \times 10^{-15}$  Вб — квант магнитного потока.

Минимальный собственный шум ПТ сквида достигается при величине основного безразмерного параметра интерферометра, близкой к трем [10],

$$l = \frac{2\pi I_0 L}{\Phi_0} \simeq 3. \quad (3)$$

При этом для  $E_c$  верно выражение

$$E_c = \frac{5k_B T \Phi_0}{k^2 I_0 R}, \quad (4)$$

где  $k_B$  — постоянная Больцмана,  $T$  — температура.

Из уравнения (4) следует, что для оптимизации сквида необходимо реализовать максимальное произведение  $k^2 I_0 R$  при выполнении условий (2) и (3).

Для плоской спиральной катушки связи, плотно прижатой к широкому сверхпроводящему контуру сквида, справедливо выражение [11]

$$k^2 = \frac{1}{1 + 3.2sD \left( \frac{1}{d} + \frac{1}{b} \right)}, \quad (5)$$

где  $s$  — отношение расстояния между витками катушки к ширине витка,  $D$  — расстояние от плоскости катушки до плоскости сквида,  $d$  — размер внутреннего квадратного отверстия в широком берегу сквида,  $b$  — ширина берега.

Выражение (5) справедливо в случае, когда расстояние  $D$  меньше ширины витков катушки. Входная индуктивность катушки связи должна иметь величину порядка 1 мкГ. Это достигается при большом числе витков (порядка 100), которые все должны быть расположены над широким берегом контура сквида, следовательно, размер  $b$  следует выбирать много большим  $d$ . Принимая во внимание известное соотношение  $L = 1.25 \mu_0 d$  [7], выражение (5) можно преобразовать к виду

$$k^2 \simeq \frac{1}{1 + \frac{4\mu_0 s D}{L}}, \quad (6)$$

где  $\mu_0 = 4 \times 10^{-7}$  Г/м — магнитная проницаемость вакуума.

Примем параметр гистерезиса джозефсоновских переходов равным единице, а шаг намотки катушки связи — удвоенной ширине витка, тогда из соотношений (2), (3) и (6) получим

$$k^2 I_0 R \sim \frac{1}{\sqrt{L} \left(1 + \frac{8\mu_0 D}{L}\right)}. \quad (7)$$

Правая часть соотношения (7) имеет максимум при  $L=8\mu_0 D$ , следовательно, произведение в левой части максимально при этой величине индуктивности контура сквида, которую и можно считать оптимальной с точки зрения получения наилучшего разрешения по входной энергии. При использовании прижимной пленочной катушки связи с толщиной изоляционной прокладки около

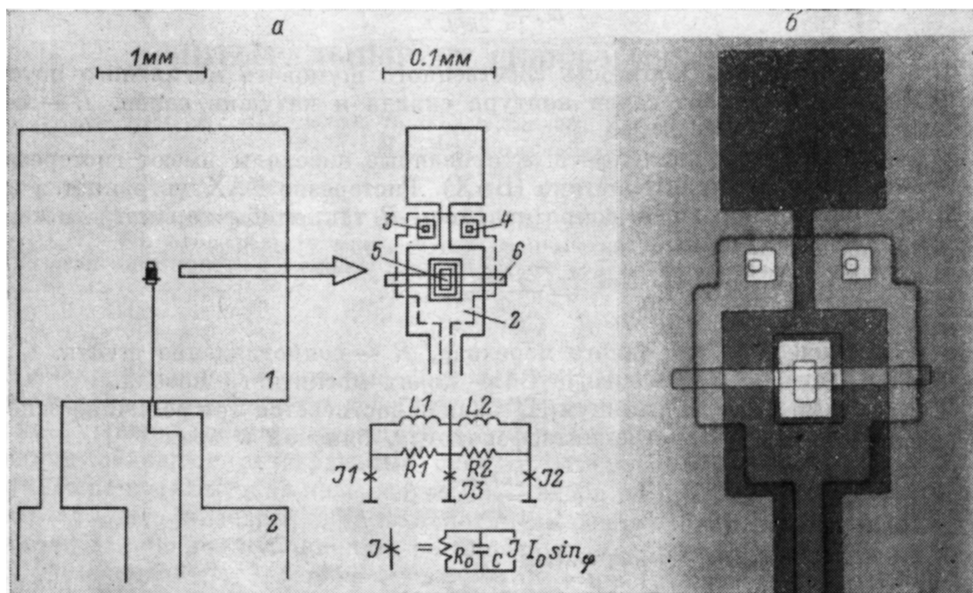


Рис. 1. Геометрия сквида (б) и его эквивалентная схема (а).

1 — нижний сверхпроводящий берег; 2 — верхний берег (на увеличенной центральной части обозначен штриховой линией); 3 — внутреннее окно первого джозефсоновского перехода; 4 — внешнее окно второго перехода; 5 — окна третьего перехода; 6 — полска резистивных шунтов;  $L1, L2$  — индуктивности плеч контура сквида;  $R1, R2$  — сопротивления шунтов;  $J1, J2$  — джозефсоновские переходы малой площади;  $J3$  — переход с большой площадью для подключения шунтов;  $R_0, C, I_0, \Phi$  — сопротивление, емкость, критический ток и фаза перехода соответственно.

10 мкм оптимальная индуктивность сквида составляет  $L=0.1$  нГ. Из соотношения (3) получаем величину критического тока  $I=10$  мкА. Емкость переходов для выбранной нами технологии составляет около 0.5 пФ, из выражения (2) при этом получаем, что сопротивление шунта  $R$  следует выбирать величиной менее 8 Ом.

### Конструкция сквида

На рис. 1 показана конструкция интегрального ПТ сквида с туннельными джозефсоновскими переходами, шунтированными сопротивлением. Для наглядности на центральной части (рис. 1, б) отсутствует пленка верхнего сверхпроводящего берега, а его контур обозначен окном в слое фоторезиста. На рис. 1, а приведена полная эквивалентная схема сквида. Размеры нижнего берега  $2.5 \times 2.5$  мм выбраны достаточными для размещения примерно 50 витков катушки связи. Джозефсоновские переходы размещены вблизи центрального отверстия для устранения паразитной индуктивности щели в нижнем берегу. Центральное отверстие имеет размеры  $70 \times 70$  мкм, что соответствует индуктивности сквида 0.11 нГ. Два одинаковых джозефсоновских перехода сформированы с помощью двойных окон в двухслойном диэлектрике с размером внешнего окна  $15 \times 15$  мкм и внутреннего —  $4 \times 4$  мкм. Расстояние между переходами составляет 40 мкм.

Для подключения шунтов использован третий джозефсоновский переход большой площади. Резистивные шунты размером в три квадрата каждый обра-

зованы прямой полоской пленки шириной 10 мкм. Верхний сверхпроводящий берег нанесен поверх пленки шунтов для уменьшения их индуктивности. Емкость из-за перекрытия верхнего и нижнего берегов сквида примерно на порядок меньше емкости джозефсоновских переходов. Выбранный для удобства конструкции вариант подключения сквида приводит к асимметрии индуктивностей плеч контура квантования, но это не ухудшает параметров сквида.

### Технология изготовления сквида

Сквид изготовлен полностью из тугоплавких материалов по технологии, близкой к описанной в работах [12, 13]. В качестве джозефсоновских структур использованы туннельные переходы Nb—Al<sub>x</sub>O<sub>y</sub>—Nb. В качестве подложки служит пластина из полированного кристаллического кремния, покрытого

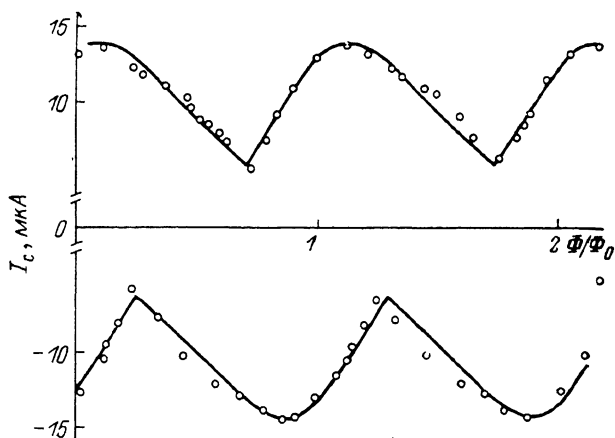


Рис. 2. Зависимость критического тока сквида от внешнего магнитного потока  $I_c(\Phi)$ .

защитным слоем Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> толщиной 200 нм. Сначала на нее производится ВЧ напыление пленки резистивных шунтов из Ti толщиной 150—200 нм ( $R_{\square}^2 = 3$  Ом), их геометрия формируется с помощью химического травления. Все остальные слои изготовлены путем обратной взрывной фотолитографии («lift off»).

Слой нижнего берега сквида из Nb толщиной 220 нм сформирован методом магнетронного распыления. Изоляция из SiO напылена термически двумя слоями толщиной по 270 нм. Искусственный туннельный барьер из Al<sub>x</sub>O<sub>y</sub> [14] толщиной 3 нм сформирован путем термического окисления тонкой пленки Al, полученной ВЧ распылением после ионной очистки поверхности Nb. Величину критического тока переходов можно менять, варьируя давление кислорода при окислении. Верхний ниобиевый берег толщиной 350 нм осажден без разрыва вакуума с помощью магнетронного распыления. Изготовленные таким образом сквиды являются стабильными при многократном термоциклировании и длительном хранении.

### Результаты исследования характеристик сквида

На рис. 2 представлены экспериментальные данные, полученные при исследовании зависимости критического тока сквида от внешнего магнитного потока. Различная крутизна склонов связана с асимметрией плеч интерферометра. Относительная глубина модуляции критического тока сквида составляет около 1/2, т. е. основной безразмерный параметр имеет величину около трех. Можно оценить величину асимметрии индуктивностей плеч сквида и асимметрию критических токов, используя результаты, приведенные в работе [10]. Аппроксимировав склоны зависимости  $I_c(\Phi)$  прямыми линиями, находим, что отношение их наклонов равно 2. Сдвиг по потоку между экстремумами, соответствующими

потоку, кратному  $\Phi_0$ , при прямом и обратном токах смещения, равен  $\Phi_0/8$ . Исходя из этих величин легко показать, что асимметрия критических токов джозефсоновских переходов составляет менее 10 %, а индуктивности плеч отличаются друг от друга в два раза. На основе этих данных проведены численные расчеты с применением алгоритмов, приведенных в работе [15]. Расчет представлен на рис. 2 сплошными кривыми.

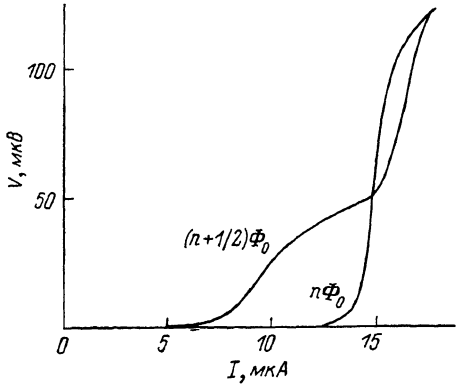


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики скивда при внешнем магнитном потоке, равном  $n\Phi_0$  и  $(n+1/2)\Phi_0$ , полученные экспериментально.

Экспериментальные вольт-амперные характеристики (ВАХ) при различных величинах внешнего магнитного потока через контур скивда приведены на рис. 3. Отметим, что при токах смещения более 14 мкА соответствующая потоку  $(n+1/2)\Phi_0$  кривая проходит выше кривой, соответствующей  $n\Phi_0$ . Как показали численные расчеты, это связано с влиянием емкости джозефсоновских переходов. Сходные зависимости приведены в работе [16], где исследовались близкие по параметрам интегральные ПТ скивды. Такой ход ВАХ приводит

к тому, что в семействе сигнальных характеристик два раза возрастает и затем спадает амплитуда сигнала при изменении тока через скивд. На рис. 4 представлено семейство сигнальных характеристик скивда, т. е. зависимостей на-

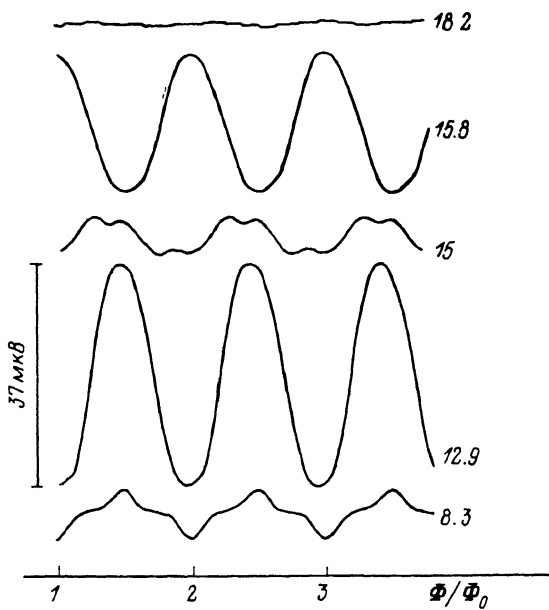


Рис. 4. Зависимости напряжения на скивде от внешнего магнитного потока при различных значениях тока смещения, полученные экспериментально.

пряжения на скивде от внешнего магнитного потока  $\Phi$  при разных постоянных значениях тока смещения, полученное экспериментально. Максимальный размах амплитуды сигнальной характеристики наблюдается при токе смещения 12.9 мкА и составляет 37 мкВ.

## Шумовые характеристики сквид-магнитометра

В магнитометре, созданном на основе интегрального ПТ сквида с прижимной пленочной катушкой связи, применены традиционные схемы блоков электроники. С целью устранения фликкер-шума электроники в магнитометре использована схема модуляция—усиление—демодуляция. Для этого в контур сквида подается магнитный поток амплитудой  $\Phi_0/2$  и частотой около 200 кГц. Переменное напряжение со сквида после согласующего трансформатора усиливается малошумящим усилителем и поступает на синхронный детектор. Выходной сигнал синхронного детектора интегрируется и через высокоомное сопротивление поступает в катушку обратной связи сквида [17].

Тонкопленочная спиральная катушка связи содержит 49 витков. Она сформирована на кремниевой подложке и прижата к контуру сквида. Входная ин-

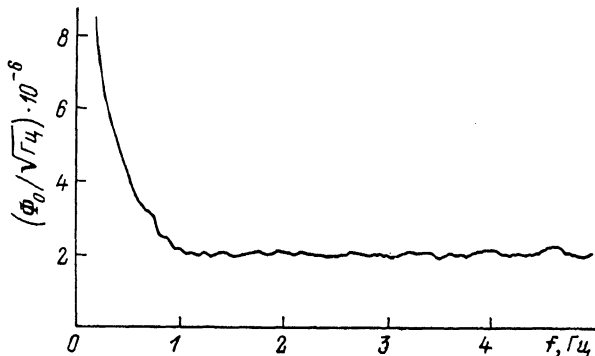


Рис. 5. Спектральная плотность шума сквид-магнитометра, полученная экспериментально.

дуктивность катушки связи в прижатом к сквиду состоянии равна 0.7 мкГ, а величина ее взаимной индукции и контура сквида составляет 4.0 нГ. На рис. 5 приведена зависимость спектральной плотности шума магнитометра при размещении сквида в сверхпроводящем экране. Шум со спектральной зависимостью типа  $1/f$  наблюдается только на частотах ниже 1 Гц, его причины специально не исследовались. На более высоких частотах реализовано разрешение по магнитному потоку в контуре сквида  $2 \times 10^{-6} \Phi_0/\sqrt{\Gamma_c}$ . Собственное энергетическое разрешение интегрального ПТ сквида составляет  $0.8 \times 10^{-31}$  Дж/Гц. Разрешение по току в катушке связи равно  $1.1 \times 10^{-12}$  А/ $\sqrt{\Gamma_c}$ , что эквивалентно входному энергетическому разрешению магнитометра  $3.9 \times 10^{-31}$  Дж/Гц.

### Заключение

Основные параметры созданного сквид-магнитометра удовлетворяют требованиям большинства известных практических применений. Перспективным для дальнейшего совершенствования сквид-магнитометра может явиться использование резистивно-одноквантовых логических схем [12, 13] в качестве усиливающей электроники сквида.

Авторы благодарят К. К. Лихарева, О. В. Снигирева и В. В. Масалова за полезные советы и обсуждение результатов работы, а также Л. В. Филиппенко за помощь в изготовлении сквидов и В. К. Каплуненко за помощь в проведении численных расчетов.

### Список литературы

- [1] Одегал М. // ФНТ. 1985. Т. 11. № 1. С. 5—56.
- [2] Third International conf. on superconducting quantum devices. SQUID'85. Berlin: W. de Gruyter, 1985.
- [3] Applid Superconductivity conference. IEEE Trans. Magn. 1987. Vol. MAG-23. N 2.
- [4] Кларк Дж. Сверхпроводящие квантовые интерференционные приборы для низкочастотных измерений. Слабая сверхпроводимость. М.: Мир, 1980. С. 7.
- [5] Ketchen N. B., Voss R. F. // Appl. Phys. Lett. 1979. Vol. 35. P. 812.
- [6] Carelli P., Foglietti V. // IEEE Trans. Mag. 1983. Vol. MAG-19. N 3. P. 299—301.
- [7] Jaycox J. M., Ketchen M. B. // IEEE Trans. Magn. 1981. Vol. MAG-17. N 1. P. 400—403.

- [8] *Seppa H., Ruhanen T.* // IEEE Trans. Magn., 1987. Vol. MAG-23. N 2. P. 1083—1086.
- [9] *McCumber D. E.* // J. Appl. Phys. 1968. Vol. 39. P. 3113—3118.
- [10] *Danilov V. V., Likharev K. K., Snigirev* // SQUID'80 / Ed. H. D. Halbohm. Berlin; New York: W. de Gruyter, 1980. P. 473—507.
- [11] *Романович С. С., Сосницкий В. Н.* Препринт Института кибернетики им. Глушкова АН УССР. № 87-10. Киев, 1987. 26 с.
- [12] *Выставкин А. Н., Кошелец В. П., Лихарев К. К. и др.* // Письма в ЖТФ. 1987. Т. 13. С. 286—290.
- [13] *Koshelets V. P., Liharev K. K., Migulin V. V. et al.* // IEEE Trans. Magn. 1987. Vol. MAG-23. N 3. P. 755—758.
- [14] *Gurwitsch M., Washington M. A., Haggins H. A.* // IEEE Trans. Magn. 1983. Vol. MAG-19. P. 791—794.
- [15] *Semenov V. K., Odintsov A. A., Zorin A. B.* // SQUID'85. Berlin: W. de Gruyter, 1985. P. 71—75.
- [16] *Naito S., Higashino Y.* // Yokagawa Technical Report. 1986. N 3. P. 1—5.
- [17] *Матлашов А. Н., Журавлев Ю. Е., Масалов В. В., Гудков А. Л.* // ПТЭ. 1989. № 26. С. 168—171.

Институт радиотехники  
и электроники АН СССР  
Москва

Поступило в Редакцию  
29 марта 1988 г.  
В окончательной редакции  
16 января 1990 г.