

02

Разработка топологий тонкопленочных СКВИД-датчиков для сверхчувствительных измерений магнитных полей

© Е.А. Костюрина, К.В. Калашников, Л.В. Филиппенко, В.П. Кошелеец

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
Москва, Россия

E-mail: kostyurina@hitech.cplire.ru

Разработана и оптимизирована топология тонкопленочных СКВИД-датчиков на базе туннельных переходов Nb/AIO_x/Nb для создания на их основе систем неразрушающего контроля материалов и других диагностических систем, обладающих чувствительностью по магнитному полю < 10 фТ/Гц^{1/2}.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 15-19-00206).

Системы на основе сверхпроводниковых квантовых интерференционных устройств (СКВИД) прекрасно зарекомендовали себя в области сверхчувствительных измерений слабых магнитных полей. Одним из перспективных направлений использования магнитометров на базе СКВИД-датчиков является создание на их основе систем неразрушающего контроля материалов и металлических конструкций [1,2], в которых необходима чувствительность по магнитному полю < 10 фТ/Гц^{1/2} с уровнем пространственного разрешения дефектов менее 1 мм в составных металлических структурах толщиной до 15 мм.

Основой двухконтактного СКВИД является сверхпроводящее кольцо с двумя параллельно включенными джозефсоновскими переходами. Принцип работы СКВИД основан на регистрации выходного напряжения V_{out} (либо тока в соответствующем режиме измерения), индуцированного магнитным потоком, проходящим через петлю СКВИД с коэффициентом преобразования $\partial V_{out}/\partial \Phi_{SQUID} > 10^{10}$ В/Вб, связывающим входной магнитный поток в СКВИД и выходное напряжение на сигнальной характеристике $V_{out}(\Phi_{SQUID})$ [3].

Измерение магнитных полей с помощью СКВИД требует безгистерезисности его ВАХ, что соответствует значениям параметра МакКамбера $\beta_c = (2e/h)I_c CR^2 < 1$, где I_c , C и R — критический ток, емкость и полное сопротивление перехода соответственно. Кроме того, оптимальная глубина модуляции вольт-амперной характеристики СКВИД реализуется при значении безразмерной индуктивности кольца СКВИД $\beta_L = 2LI_c/\Phi_0 \sim 1$, где L — индуктивность кольца, а Φ_0 — квант магнитного потока [4]. При этом характерное напряжение $V_c = I_c R$ должно быть не менее 100 мВ. Разработке и оптимизации топологии СКВИД-детектора с интегрированной входной катушкой с чувствительностью не хуже 0.4 мА/Φ₀, обладающего характерным напряжением не менее 100 мВ и собственными шумами не хуже 10 мΦ₀/Гц^{1/2}, посвящена настоящая работа.

Традиционные топологии СКВИД-детекторов типа „шайба“ обладают рядом недостатков, таких как боль-

шая паразитная индуктивность щели, высокая чувствительность к паразитным магнитным полям и сильное влияние шумов токов смещения на детектор. Для повышения чувствительности СКВИД-датчика, а также уменьшения его собственных шумов была разработана высокосимметричная конструкция, позволяющая преодолеть перечисленные недостатки.

Топологически микросхема СКВИД-детектора представляет собой сложную тонкопленочную многослойную структуру, состоящую из шести основных слоев (рис. 1). На подложке из монокристаллического кремния с защитным слоем из Al₂O₃ формируется базовый электрод M1, представляющий собой симметричное соединение под углом 90° четырех структур классической геометрии типа „шайба“. Такая конструкция представляет собой прямоугольную пленку из ниобия, в центре которой соединяются четыре щели под углом 90°. На концах щелей расположены круглые отверстия, два из которых индуктивно связаны с входными катушками, а оставшиеся два — с катушками модуляции. Размеры отверстий и длина щели определяют индуктивность петли СКВИД, оптимальное значение которой для критического тока одного перехода 6–12 мА составляет около 70–140 пН, что соответствует оптимальной глубине модуляции вольт-амперной характеристики СКВИД.

Два джозефсоновских перехода формируются в непосредственной близости от пересечения щелей (по разные стороны от него). Площади переходов равны друг другу и составляют 1–2 мкм² для разных вариантов образцов. Переходы формировались из трехслойной структуры Nb/AIO_x/Nb методом Selective Niobium Etching and Anodization Process [5]; в результате нижняя пленка ниобия и торцы покрывались тонкой пленкой оксида ниобия Nb₂O₅.

Изготовленные таким образом переходы обладают нормальным сопротивлением $R_n \sim 200 \Omega$. Требование безгистерезисности ВАХ приводит к необходимости шунтирования туннельного перехода сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник (СИС) сопротивлением порядка 10 Ω, в качестве которого использовались полоски

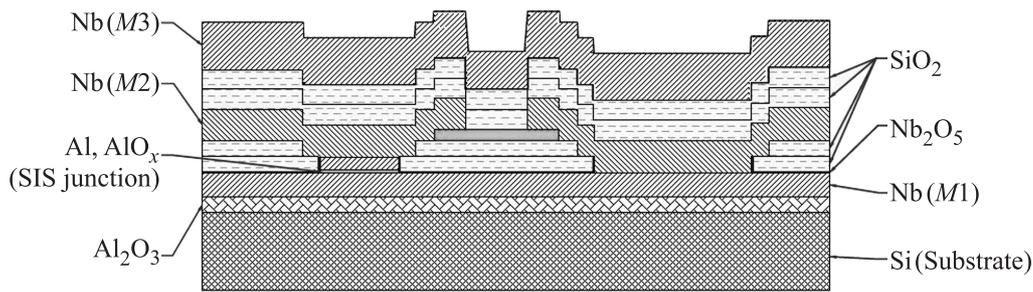


Рис. 1. Схематический разрез микросхемы в области шунтированного СИС-перехода.

молибдена толщиной 70 nm, имеющие сопротивление при 4.2 К около $2 \Omega/\square$. Межслойное соединение шунта с нижним электродом возможно либо с помощью непосредственного электрического контакта, либо через туннельный переход большой площади. Второй способ проще в реализации, но является менее предпочтительным, поскольку в этом случае при частотах, близких к плазменной частоте СИС-переходов, ВАХ имеет особенности, затрудняющие работу СКВИД. Поэтому шунтирование реализовывалось посредством прямого соединения шунта с нижним электродом, что потребовало дополнительной технологической операции.

Постоянный ток смещения подается на детектор с помощью четырех диагональных симметрично расположенных дорожек во втором слое металлизации *M2* (рис. 2). Высокая симметрия дорожек задания токов смещения и шунтирующих элементов обеспечивает взаимную компенсацию создаваемых ими магнитных потоков, а также уменьшает влияние текущих через переход токов как на петлю СКВИД, так и на входные и модуляционные катушки, что делает датчик нечувствительным к токовым флуктуациям.

В одном из вариантов реализации СКВИД-датчика во втором слое металлизации над щелями сформированы сверхпроводящие экраны, позволяющие экранировать магнитное поле токов в кольце СКВИД и тем самым

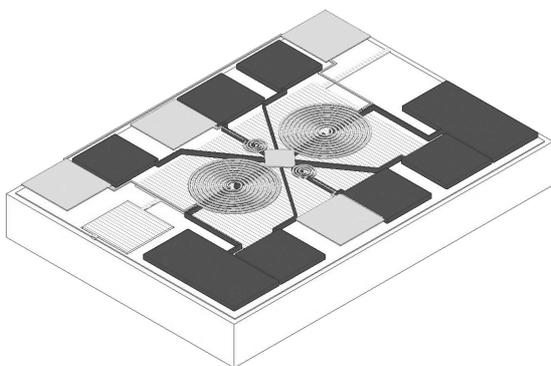


Рис. 2. Топология микросхемы. Показаны слои металлизации: *M1* (белый с темными точками), *M2* (темно-серый), *M3* (светло-серый).

значительно уменьшить вклад щелей в индуктивность петли СКВИД. Таким образом, появляется возможность увеличить критический ток перехода примерно в 2 раза с той же расчетной глубиной модуляции.

В третьем слое металлизации *M3* сформированы две входные (индуктивность около $0.3\text{--}1.3 \mu\text{H}$) и две модуляционные (10 pH) катушки с ширинами w и межвитковыми расстояниями s 2.5 и $5 \mu\text{m}$, индуктивно связанные с отверстиями СКВИД [3,6]. Геометрия расположения входных и модуляционных катушек обеспечивает малую взаимную индукцию между ними, а направление токов в них выбрано таким образом, чтобы создаваемые ими магнитные потоки были попарно противоположны. Также в слое *M3* расположен сверхпроводящий экран, уменьшающий индуктивность участка щели, не закрытого катушкой. Отметим, что построенный таким образом СКВИД является градиентометром первого порядка, а следовательно, нечувствителен к внешним постоянным магнитным полям.

По разработанным топологиям датчиков были спроектированы фотошаблоны и изготовлена первая тестовая партия экспериментальных образцов. Для СКВИД с площадью переходов $S \sim 2 \mu\text{m}^2$ критический ток $I_c \sim 40 \mu\text{A}$, характерное напряжение $I_c R \sim 140 \mu\text{V}$, что примерно в 2 раза больше расчетных значений. На рис. 3 представлена ВАХ такого СКВИД-датчика.

Среди проблем, влияющих на корректную работу СКВИД-датчика, можно выделить возникновение резонансов, связанных с геометрией СКВИД. Один из типов резонансов обусловлен возникновением стоячих волн в микрополосковой линии, образованной между входной или модуляционной катушкой и нижним слоем металлизации *M1* [7]. При этом резонансные частоты определяются выражением

$$f_s = v/4l, \quad v = (L_{\text{strip}} C_{\text{strip}})^{-1/2},$$

где L_{strip} и C_{strip} — погонные индуктивность и емкость микрополосковой линии соответственно [8].

В используемой топологии в область рабочих частот попадают резонансы, связанные с катушками модуляции. Они приводят к особенностям, которые можно видеть на вольт-амперной характеристике СКВИД (рис. 3). Для катушки в $N = 8$ витков с шагом $10 \mu\text{m}$ ($w = 5 \mu\text{m}$,

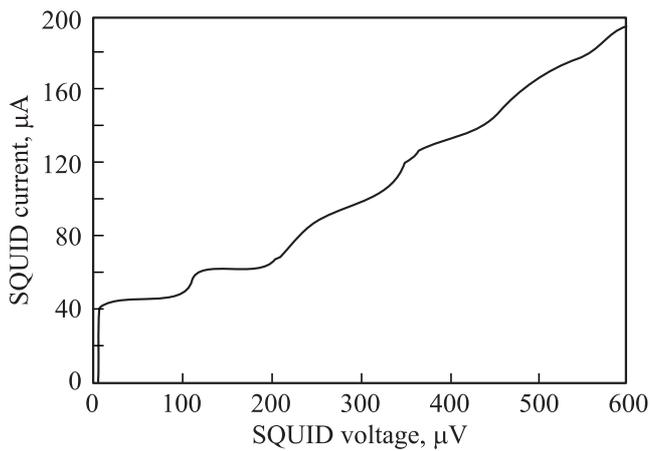


Рис. 3. Вольт-амперная характеристика СКВИД.

$s = 5 \mu\text{m}$) частота основной гармоники, вычисленная по данной формуле, оказывается равной $f = 47 \text{ GHz}$, что соответствует напряжению $V = 97 \mu\text{V}$. Из рис. 3 видно, что первая особенность ВАХ с хорошей точностью соответствует полученной частоте. Частоты высших гармоник вычисляются по формуле $f = n f_s$, n — натуральное число. Наличие рассмотренных резонансов приводит к уменьшению рабочей области датчика, а также к обрезанию сигнальной характеристики, представляющей собой зависимость напряжения на переходах от внешнего поля. Повысить резонансные частоты и вывести их тем самым из рабочей области можно, варьируя параметры катушек, например уменьшая количество витков катушек модуляции. Кроме того, резонансы можно существенно демпфировать путем введения дополнительных резистивных элементов [9,10].

Чтобы избавиться от проблемы, связанной с обрезанием сигнальной характеристики резонансами, измерялась зависимость тока через СКВИД от внешнего поля. Это можно сделать, перейдя из режима задания тока в режим задания напряжения. Такая зависимость представлена на рис. 4 (кроме того, такой метод измерений позволяет оценить безразмерную индуктивность СКВИД $\beta_L = 2LI_c/\Phi_0$ как отношение $I_{\text{max}}/\Delta I$, что приблизительно верно для $\beta_L > 1$ [3]).

Еще одной проблемой, связанной с тестированием СКВИД, является большая чувствительность СИС-переходов малой площади к мощным импульсам, вызванным электростатическим разрядом или скачком напряжения питания, что часто приводит к „пробую“ переходов. Для дополнительной защиты образцов было предложено проводить измерения по пятиточечной схеме (рис. 5). Напряжение на СИС-переходах измеряется через контакты 5 и 6, а ток через переход рассчитывается по падению напряжения на резисторе R_2 (V_{sense}). Предложенная схема измерений называется пятиточечной, поскольку в реальных системах провода 4 и 5 объединяются в один, что можно сделать, поскольку ток по ним не течет и падение напряжения пренебрежимо мало.

На рис. 4,а изображена сигнальная характеристика одного из СКВИД-датчиков, представляющая собой зависимость тока через СКВИД от внешнего поля. Видно, что данный СКВИД обладает чувствительностью по входу $0.3 \mu\text{A}/\Phi_0$.

Собственные шумы данного СКВИД составили $\sim 13 \mu\Phi_0/\text{Hz}^{1/2}$, что уже достаточно для применения в системах неразрушающего контроля материалов. Для подавления паразитных резонансов, вызываемых высокочастотными сверхпроводниковыми линиями над

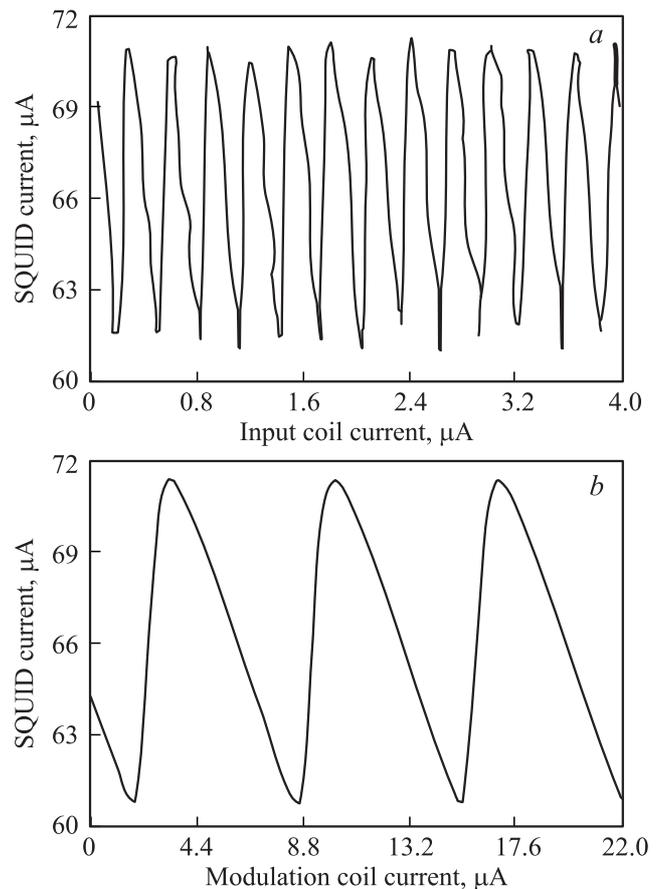


Рис. 4. Сигнальная характеристика СКВИД при задании тока через входную катушку (а) и катушку модуляции (б).

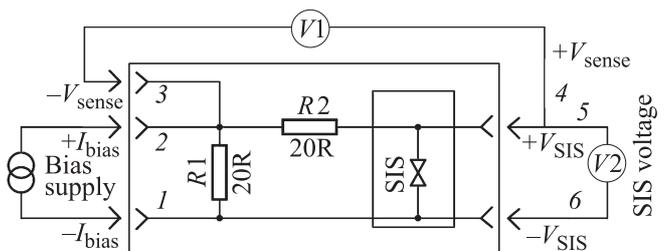


Рис. 5. Пятиточечная схема подключения образца. 1, 2 — контакты задания тока, 3, 4 — дополнительный контакт для измерения напряжения, 5, 6 — контакты для измерения напряжения на СИС-переходе.

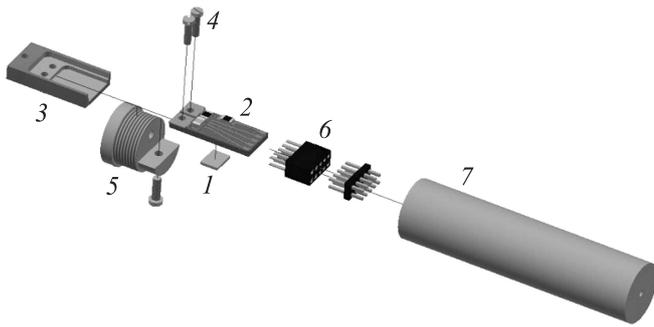


Рис. 6. Схема капсулирования СКВИД-датчика: 1 — микросхема датчика, 2 — стеклотекстолитовая плата, 3 — крышка, 4 — винты, 5 — Nb-держатель, 6 — разъемы для задания токов смещения, 7 — Nb-экран.

экраном, в оптимизированной версии интегрального СКВИД-датчика будут модифицированы катушки модуляции и связи, а также использованы дополнительные резистивные элементы, которые смогут демпфировать нежелательные резонансы. Подробные результаты измерения шумов новой версии СКВИД-датчика будут представлены в отдельной работе.

Для использования СКВИД-датчиков в практических приложениях была разработана монтажная конструкция для соединения микросхемы с внешней электроникой, установки дополнительных электрических компонентов и защиты датчика от механических повреждений. В данной установке микросхема СКВИД-детектора закрепляется на текстолитовой плате с помощью эпоксидного клея, после чего контактные площадки токов смещения и катушек модуляции соединяются с помощью ультразвуковой сварки тонкой алюминиевой проволоки диаметром $25\ \mu\text{m}$ с соответствующими площадками на плате, выходящими на разъем 2×5 типа PBD-10. Провода к ответной части разъема подходят в виде витых пар, объединяющих соответствующие вводы (например, „плюс“ и „минус“ токов смещения), что также делает датчик более устойчивым к электромагнитным помехам в цепях управляющей электроники. Схема капсулирования СКВИД-датчика приведена на рис. 6. На стеклотекстолитовой плате расположен резистор номиналом $1\ \text{k}\Omega$ для отогревания образца, а также фильтр нижних частот. Фильтр образован последовательным соединением конденсатора емкостью $2.5\ \text{pF}$ и резистора сопротивлением $39\ \Omega$ и подключен параллельно с входной и измерительной катушками.

Таким образом, нами разработана и оптимизирована топология СКВИД-датчика, обладающего чувствительностью входной катушки $\sim 0.3\ \mu\text{A}/\Phi_0$, характерным напряжением $V \sim 150\ \mu\text{V}$ и собственными шумами $\sim 1.3 \cdot 10^{-5}\ \Phi_0/\text{Hz}^{1/2}$. Проведено экспериментальное исследование разработанных образцов. Обнаружено, что в них присутствуют резонансы, мешающие корректной работе СКВИД. Определены шаги по дальнейшей оптимизации датчиков с целью использования их в си-

стемах для сверхчувствительных измерений магнитных полей, таких как системы неразрушающего контроля материалов.

Список литературы

- [1] W.G. Jenks, S.S.H. Sadeghi, J.P. Wikswo Jr. *J. Phys. D* **30**, 293 (1997).
- [2] E.V. Burmistrov. *J. Commun. Technol. Electron.* **51**, 1319 (2006).
- [3] *The SQUID handbook* / Eds J. Clarke, A.I. Braginski. Wiley-VCH Verlag, Weinheim (2004). 395 p.
- [4] C.D. Tesche, J. Clarke. *J. Low. Temp. Phys.* **27**, 301 (1977).
- [5] L.V. Filippenko, S.V. Shitov, P.N. Dmitriev, A.B. Ermakov, V.P. Koshelets, J.R. Gao. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **11**, 816 (2001).
- [6] J. Knuutila, M. Kajola, H. Seppä, R. Mutikainen, J. Salmi. *J. Low. Temp. Phys.* **71**, 369 (1988).
- [7] K. Enpuku, R. Cantor, H. Koch. *J. Appl. Phys.* **72**, 1000 (1992).
- [8] W.H. Chang. *J. Appl. Phys.* **50**, 8129 (1979).
- [9] J. Knuutila, A. Ahonen, C. Tesche. *J. Low. Temp. Phys.* **68**, 269 (1987).
- [10] M.E. Huber, A.H. Steinbach, R.H. Ono. *Physica C* **351**, 85 (2001).