

Разработка топологий тонкопленочных СКВИД-датчиков для сверхчувствительных измерений магнитных полей

Е.А. Костюрина^{1,2,*}, К.В. Калашников^{1,2}, Л.В. Филиппенко¹, В.П. Кошелец^{1,§}

¹ Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, ул. Моховая, 11, стр. 7, Москва.

² Московский физико-технический институт, пер. Институтский, 9, Долгопрудный.

*kostyurina@hitech.cplire.ru, §valery@hitech.cplire.ru

Разработана и оптимизирована топология тонкопленочных СКВИД-датчиков на основе туннельных переходов Nb/AlO_x/Nb для создания на их основе систем неразрушающего контроля материалов и других диагностических систем, обладающих чувствительностью по магнитному полю < 10 фТл/√Гц.

Введение

Системы на основе сверхпроводниковых квантовых интерференционных устройств (СКВИД) прекрасно зарекомендовали себя в области сверхчувствительных измерений слабых магнитных полей. Магнитометры на основе СКВИД-датчиков способны измерять магнитные поля порядка 10⁻¹³ Тл.

Основой двухконтактного СКВИДа является сверхпроводящее кольцо с двумя параллельно включенными джозефсоновскими переходами. Принцип работы СКВИДа основан на регистрации выходного напряжения $V_{\text{вых}}$, индуцированного магнитным потоком, проходящим через петлю СКВИДа с коэффициентом преобразования $\partial V_{\text{вых}} / \partial \Phi_{\text{СКВИД}} > 10^{10}$ В/Вб, связывающим входной магнитный поток в СКВИДе и выходное напряжение на сигнальной характеристике $V_{\text{вых}}(\Phi_{\text{СКВИД}})$.

Для того чтобы СКВИД можно было использовать для измерения магнитных полей, его ВАХ должна быть безгистерезисной. Это соответствует значениям параметра МакКамбера $\beta_c = (2e/h)I_c CR^2 < 1$, где I_c , C и R – это, соответственно, критический ток, емкость и полное сопротивление перехода. Кроме того, оптимальная глубина модуляции вольт-амперной характеристики СКВИДа реализуется при значении безразмерной индуктивности кольца СКВИДа $\beta_L = 2LI_c/\Phi_0 \sim 1$, где L – индуктивность кольца, а Φ_0 – квант магнитного потока. При этом характерное напряжение $V_c = I_c R$ (которое определяет амплитуду сигнальной характеристики) должно быть не менее 100 мкВ.

Разработка топологии СКВИД-датчика

Для того чтобы СКВИД-датчик обладал высокой чувствительностью и малыми собственными шумами, была создана высокосимметричная конструкция, обладающая малой чувствительностью к паразитным магнитным полям и низким влиянием шумов токов смещения на детектор.

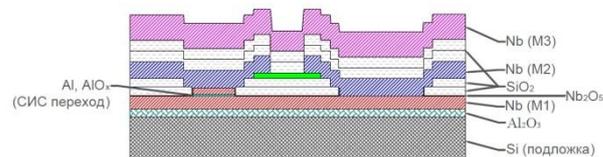


Рис. 1. Схематический разрез микросхемы в области шунтированного СИС-перехода

Топологически микросхема СКВИД-детектора представляет собой сложную тонкопленочную многослойную структуру, состоящую из шести основных слоев (рис.1). Топология микросхемы схематично изображена на рис. 2. На подложке из монокристаллического кремния с защитным слоем из Al₂O₃ формируется базовый электрод М1, который представляет собой симметричное соединение под углом 90° четырех структур классической геометрии типа «шайба», а именно прямоугольную пленку из ниобия, в центре которой соединяются четыре щели под углом 90°. На концах щелей расположены круглые отверстия, два из которых будут индуктивно связаны с входными катушками, а оставшиеся два – с катушками модуляции. Размеры отверстий и длина щели определяют индуктивность

петли СКВИДа, оптимальное значение которой для критического тока одного перехода 6-12 мкА составляет около 70-140 пГн, 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.

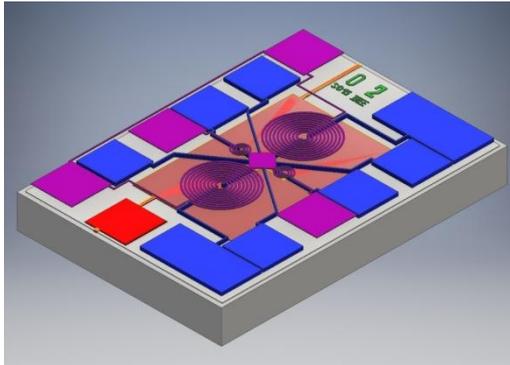


Рис. 2. Топология микросхемы. Показаны слои металлизации: M1 (красный), M2 (синий), M3 (пурпурный)

Для получения безгистерезисной ВАХ переходы необходимо шунтировать. Шунтирующие элементы из Mo толщиной 70 нм соединяются с нижним электродом напрямую, как показано на рис. 1.

Постоянный ток смещения задается на детектор с помощью четырех диагональных симметрично расположенных дорожек в слое 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 СКВИДа, 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 сформированы сверхпроводящие экраны над щелями, позволяющие экранировать магнитное поле токов в кольце СКВИДа и, тем самым, уменьшать вклад щелей в индуктивность петли СКВИДа примерно на 80%. Это позволяет увеличить критический ток перехода примерно в два раза с той же расчетной глубиной модуляции.

В третьем слое металлизации M3 сформированы две входные (индуктивность около 0.3–1.3 мкГ) и две модуляционные (10 нГн) катушки, индуктивно

связанные с отверстиями СКВИДа. 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 не закрытой катушкой остатка щели. Стоит отметить, что построенный таким образом СКВИД является градиентометром первого порядка, то есть нечувствительным к внешним постоянным магнитным полям.

По разработанным топологиям датчиков были спроектированы фотошаблоны и изготовлена первая тестовая партия экспериментальных образцов. На рис. 3 изображена сигнальная характеристика одного из СКВИД-датчиков. Данный СКВИД обладает чувствительностью по входу 2 мкА/Φ₀ и собственными шумами менее 5 · 10⁻⁶ Φ₀/√Гц. СКВИДы с получившимися характеристиками оптимальны для использования в системах для сверхчувствительных измерений магнитных полей.

Подробные результаты эксперимента будут описаны в статье и представлены на конференции.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №15-19-00206).

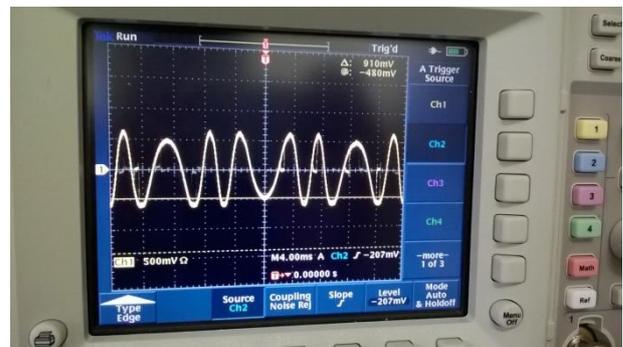


Рис. 3. Сигнальная характеристика СКВИДа

Литература

1. J. Clarke, A. I. Braginski, "The SQUID Handbook", vol.1-2.
2. L.V. Filippenko, *et al.*, Integrated Superconducting Receiver: fabrication and yield, IEEE Trans. on Appl. Supercond., v.11, No 1, pp. 816-819 (2001).