

# Проектирование СПИС многопетлевого ПТ-Сквида для сверхпроводниковых многоканальных магнитометрических и градиентометрических систем

А.Л. Гудков, А.А. Гогин, А.И. Козлов, А.Н. Самусь

ЗАО "Компэлст", ФГУП "НИИ Физических Проблем им. Ф.В. Лукина", gudkov@niifp.ru

**Аннотация** — Представлены результаты проектирования отечественных сверхпроводниковых интегральных схем (СПИС) на основе многопетлевого ПТ-Сквида для многоканальных магнитометрических и градиентометрических измерительных систем. Изложены особенности проектирования СПИС многопетлевого ПТ-Сквида и приведены результаты экспериментальной проверки разработанной конструкции СПИС.

**Ключевые слова** — Джозефсоновский переход, сверхпроводниковый квантовый интерферометр – Сквид, Сквид постоянного тока (ПТ-Сквид), магнитометрические и градиентометрические системы.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Чувствительным элементом сверхпроводниковой интегральной схемы (СПИС) является сверхпроводящий квантовый интерферометр (Сквид) [1],[2]. Сквид постоянного тока (ПТ-Сквид) состоит из двух джозефсоновских переходов, включенных в сверхпроводящее кольцо. При изменении наложенного на кольцо внешнего магнитного потока  $\Phi$  значение критического тока  $I_c$  ПТ-Сквида является осциллирующей функцией  $\Phi$  с периодом  $\Phi_0$  ( $\Phi_0 = 2,07 \cdot 10^{-15}$  Вб – квант магнитного потока). В конструкции СПИС можно использовать как переходы с непосредственной проводимостью Nb/ $\alpha$ -Si/Nb, так и переходы туннельного типа Nb/ $AlO_x$ /Nb. В последнем случае вольтамперная характеристика (ВАХ) переходов имеет гистерезисный характер и в конструкции необходимо дополнительно ввести шунтирующие резисторы для получения однозначной ВАХ. Требования к конструкции СПИС и ее чувствительному элементу – ПТ-Сквиду вытекают из конкретных практических задач. Тем не менее, для большинства практических применений можно выделить основные требования и на их основе разработать приемлемые конструкции СПИС.

## II. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПТ-СКВИДА

Для достижения оптимальных параметров Сквида необходимо в первую очередь выполнить следующие основные условия: безразмерная индуктивность ПТ-Сквида, равная  $l = 2\pi L_0 I_c / \Phi_0$ , должна быть  $l \sim 1$

(где  $L_0$  – геометрическая индуктивность ПТ-Сквида); глубина модуляции критического тока  $I_c$  ПТ-Сквида должна быть не менее 50%, что выполнимо при условии  $l < 1$ . Необходимо также добиться симметричности плеч интерферометра ПТ-Сквида ( $L_1 I_{c1} = L_2 I_{c2}$ ), обеспечивая инвариантность положения рабочей точки по отношению к рабочей температуре и току смещения [1]-[4]. Дополнительными физическими условиями для оптимального выбора параметров СПИС ПТ-Сквида являются следующие требования:

- безгистерезисная ВАХ джозефсоновских переходов, параметр Стюарта-Маккамбера

$$\beta_c = 2\pi I_c R_n^2 C / \Phi_0 < 1,$$

где  $C$  – геометрическая емкость джозефсоновского перехода,  $R_n$  – нормальное сопротивление перехода; - безразмерный шумовой параметр, характеризующий тепловое размытие резистивной ветви ВАХ перехода,

$$\Gamma = 2\pi k_B T / I_c \Phi_0 \sim 0,05,$$

где  $T$  – рабочая температура ПТ-Сквида,  $k_B$  – постоянная Больцмана;

- достаточно большие значения характерного напряжения  $V_c = I_c \cdot R_n = 50 - 100$  мкВ, обеспечивающие приемлемые значения амплитуды модуляции выходного напряжения ПТ-Сквида  $\Delta V$  в несколько десятков микровольт.

Из флуктуационного значения индуктивности  $L_f \approx 1,7 \cdot 10^{-9}$  Гн (при  $T = 4,2$  К) и перечисленных выше физических условий можно оценить величину основных параметров ПТ-Сквида:  $L_f \gg L_0 \leq 10^{-10}$  Гн;  $I_c \sim 20$  мкА;  $C < 10^{-13}$  Ф.

Кроме того, конструкция всей СПИС должна быть разработана таким образом, чтобы все геометрические резонансы на ВАХ находились вне рабочей области. В большинстве практических применений СПИС используется для регистрации сигнала от источников с относительно большим импедансом. Поэтому конструкция СПИС должна содержать следующие элементы:

- согласующий сверхпроводящий трансформатор магнитного потока, обеспечивающий малые потери на

согласование с измеряемым объектом;

- сверхпроводящие контактные площадки для обеспечения сверхпроводящего соединения между приемной катушкой трансформатора магнитного потока и входной катушкой ПТ-Сквида;

- контур обратной связи, необходимый для использования ПТ-Сквида в составе электронной схемы обработки сигнала.

Магнитометрическая или градиентометрическая система для анализа магнитных полей не должна быть подвержена также влиянию источников внешних шумов и сама не должна быть источником шума. Полное устранение или, что более реально, компенсация внешних электромагнитных полей должна быть в этом случае основной целью при проектировании СПИС для магнитометрических систем. Правильно сконструированный ПТ-Сквид должен иметь параметры, близкие к предельным значениям: чувствительность ПТ-Сквида к магнитному потоку должна составлять порядка  $10^{-6} \Phi_0 / \Gamma \text{ц}^{1/2}$  (при  $T = 4,2$ ) и энергетическое разрешение порядка  $10^{-32} \text{ Дж} / \Gamma \text{ц}$ .

### III. КОНСТРУКЦИЯ МНОГОПЕТЛЕВОГО ПТ-СКВИДА

На основании перечисленных основных требований была разработана конструкция СПИС на основе многопетлевого ПТ-Сквида [5] с улучшенными метрологическими параметрами по сравнению с более ранними разработками [6],[7]. На рис. 1 схематически представлена конструкция многопетлевого ПТ-Сквида, где жирной линией показана внешняя обмотка трансформатора потока, выполненная в виде меандра.

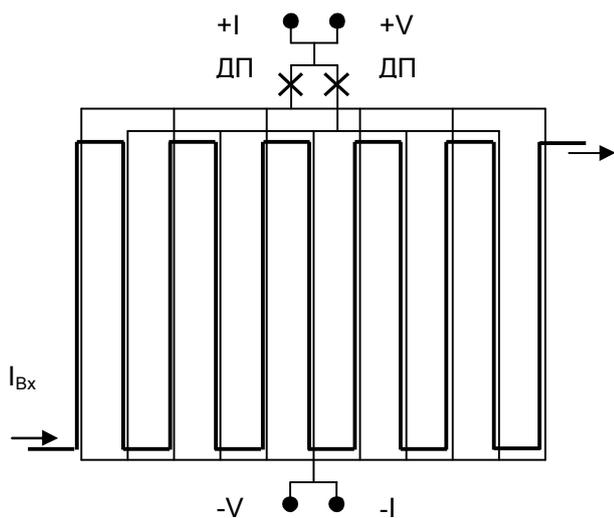


Рис. 1. Схематическое представление конструкции многопетлевого ПТ-Сквида (ДП – джозефсоновские переходы)

Отличительной особенностью данной конструкции является то, что все контуры Сквида включены так, что образуют планарную градиентометрическую систему, позволяющую достигнуть весьма эффективной помехозащищенности даже в случае сильно локализованных и близко расположенных источников электромагнитных помех [6]. Особенностью разработанной конструкции СПИС является наличие всего двух функциональных сверхпроводящих слоев. На рис. 2 представлены фрагменты топологии центральной части многопетлевого (36-контурного) ПТ-Сквида.

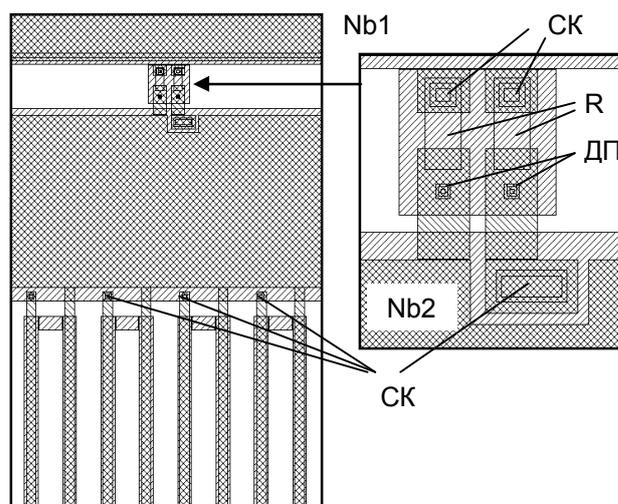
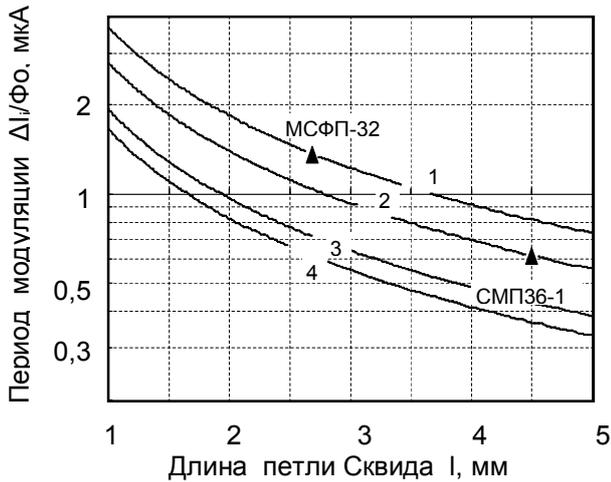


Рис. 2. Фрагменты топологии многопетлевого ПТ-Сквида (СК – сверхпроводящие контакты Nb1/Nb2, R – шунтирующие резисторы)

Конструкция ПТ-Сквида представляет собой многослойную структуру из тонких пленок сверхпроводника (Nb), диэлектрика ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) для межслойной изоляции, туннельной прослойки ( $\text{AlO}_x$ ) между Nb-электродами и нормального металла (Mo) в качестве резистивного шунтирующего слоя. В конструкции СПИС предусмотрена входная шина, индуктивно связанная с контуром Сквида, и шина модуляции внешнего потока. Размеры кристалла СПИС составляют  $4 \times 6 \text{ мм}^2$ . Размер джозефсоновских переходов  $6 \times 6 \text{ мкм}^2$ . Ширина сверхпроводящей входной шины  $15 \text{ мкм}$ . Индуктивность одной петли Сквида можно оценить по модели для двухпроводной линии  $L_1 = \mu_0 I_1 / \pi (\ln(a/0,5w) + 0,5)$ , где  $I_1 = 4 \text{ мм}$  – длина петли контура,  $a = 55 \text{ мкм}$  – расстояние между центрами соседних шин в контуре,  $w = 15 \text{ мкм}$  – ширина сверхпроводящей шины. Тогда индуктивность многопетлевого Сквида, состоящего из  $N$  параллельно подключенных к нему петель, равна  $L_0 = L_1/N$ , а индуктивность входной шины равна  $L_i = L_1 N$ . Взаимоиндукция между входной шиной и Сквидами равна  $M^2 = K^2 L_i L_0$ , где  $K$  – коэффициент связи, зависящий в ос-

новном от толщины используемого изолятора между сверхпроводящими слоями ниобия. Таким образом, расчетный период модуляции по току во входной катушке равен  $\Delta I_i = \Phi_0/M$ . На рис. 3 представлены результаты расчетов периода модуляции магнитного потока по току во входной катушке при разных параметрах микрополосков, образующих конструкцию многопетлевого Сквида.



№	a, мкм	w, мкм
1	30	15
2	55	15
3	110	10
4	200	10

Рис. 3. Зависимости периода модуляции по току во входной катушке от длины петель многопетлевого ПТ-Сквида при разных параметрах микрополосков

Результаты расчетов показывают, что для достижения величины периода модуляции по току во входной катушке менее  $1 \text{ мкА}/\Phi_0$  при заданном количестве петель необходимо либо увеличивать длину петель Сквида, либо уменьшать ширину микрополосков, при увеличении расстояния между ними. Увеличение длины петель приводит, однако, к общему увеличению габаритов кристалла СПИС. Оптимальный размер кристалла не должен превышать 3 - 4 мм, из-за возможности возникновения паразитных радиочастотных резонансов в схеме. Следовательно, на практике необходимо стремиться к конструкции микрополосков шириной менее 10 мкм и увеличивать расстояние между ними до 100 - 200 мкм.

Используемые системы на Сквидах сконструированы таким образом, что либо сам Сквад измеряет магнитное поле, либо для передачи сигнала на Сквад используется сверхпроводящий трансформатор потока. Сверхпроводящий трансформатор потока представляет собой замкнутую сверхпроводящую петлю из нио-

биевой проволоки, приемная катушка которого соединена последовательно с входной сверхпроводящей катушкой  $L_i$  Сквида. Период модуляции выходного сигнала Сквида к току  $\Delta I$  связан с периодом модуляции по магнитному полю  $\Delta H$  условием равенства создаваемого магнитного потока:

$$\Phi = L \cdot \Delta I = \Delta H \cdot S,$$

где  $L$  - индуктивность приемной петли трансформатора магнитного потока,  $S$  - площадь приемного витка. В большинстве практических применений величина радиуса приемного витка трансформатора магнитного потока равна  $R = 1 \text{ см}$ . Тогда индуктивность приемной петли трансформатора составляет  $L \approx \mu_0 \cdot R = 1,28 \cdot 10^{-8} \text{ Гн}$  ( $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$  - магнитная проницаемость вакуума). Если период модуляции выходного сигнала Сквида по току равен  $\Delta I = 1 \text{ мкА}/\Phi_0$ , тогда период модуляции по магнитному полю составляет  $\Delta H = L \cdot \Delta I / S = 4 \cdot 10^{-11} \text{ Тл}/\Phi_0$ . Предельная чувствительность Сквида к магнитному потоку составляет порядка  $(10^{-5} - 10^{-6}) \Phi_0/\text{Гц}^{1/2}$  (при  $T = 4,2 \text{ К}$ ). Следовательно, предельная чувствительность данной конструкции СПИС по магнитному полю находится в диапазоне  $(10^{-14} - 10^{-15}) \text{ Тл}/\text{Гц}^{1/2}$ . На практике для определения реальной чувствительности СПИС по магнитному полю необходимо проведение детального исследования шумовых характеристик джозефсоновских переходов, используемых в данной конструкции СПИС.

#### IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ПРОВЕРКИ КОНСТРУКЦИИ МНОГОПЕТЛЕВОГО ПТ-СКВИДА

На рис. 4 представлена типичная ВАХ ПТ-Сквида на основе шунтированных туннельных джозефсоновских переходов  $\text{Nb}/\text{AlO}_x/\text{Nb}$ .

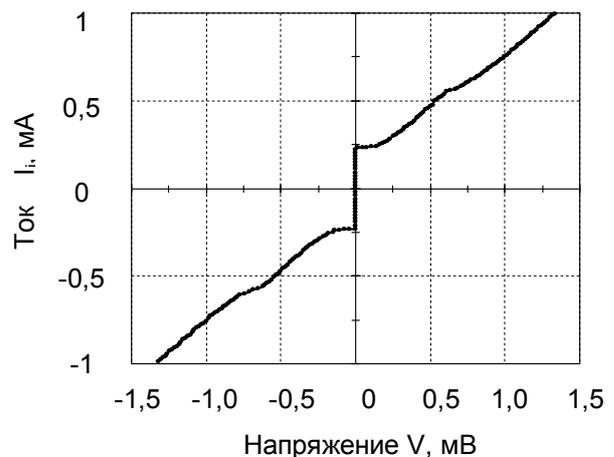
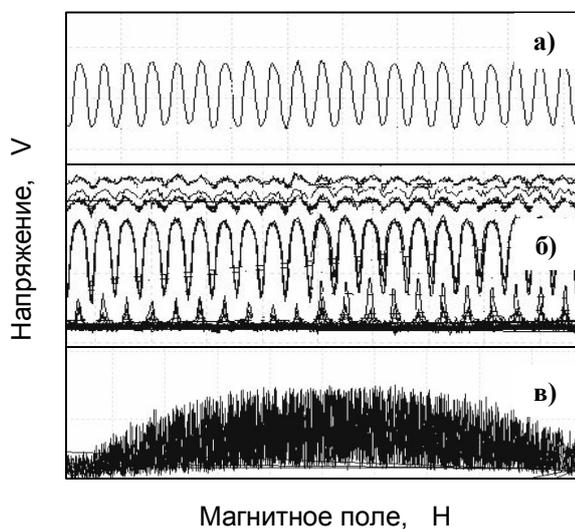


Рис. 4. Вольтамперная характеристика многопетлевого ПТ-Сквида на основе шунтированных переходов  $\text{Nb}/\text{Al}/\text{AlO}_x/\text{Nb}$

На испытанных образцах СПИС получены значения критических токов в диапазоне  $I_c = 50 - 250$  мкА. Нормальное сопротивление джозефсоновских переходов лежит в диапазоне  $R_n = 0,08 - 2,0$  Ом.

На рис. 3 показаны экспериментальные точки измерения периода модуляции выходного сигнала по току во входной катушке для двух конструкций 32- и 36-петлевых ПТ-Сквида. Длина петель Сквида составляла для них разную величину:  $l = 2,7$  мм и  $l = 4,5$  мм, соответственно, ширина микрополосков была одинаковой  $w = 15$  мкм, а расстояние между ними равнялось  $a = 30$  мкм и  $55$  мкм. Измеренная величина периода модуляции по току составляла  $\Delta I_c / \Phi_0 = 1,5$  мкА и  $0,6$  мкА, соответственно. Экспериментальная проверка, как видно из рис. 3, показывает хорошее совпадение полученных результатов с использованной при разработке конструкции моделью двухпроводной линии, справедливой при выполнении условия  $a > w$ .

Сигнальные характеристики  $V(H)$  многопетлевого (36-петлевого) ПТ-Сквида с приемной петлей, расположенной на самом кристалле СПИС и присоединенной непосредственно к входной шине, при разных токах смещения и различной развертке по магнитному полю представлены на рис. 5. Период выходного сигнала (рис. 5,а,б) равен кванту магнитного потока  $\Phi_0$ . Огибающая выходного сигнала (рис. 5,в) при увеличенном магнитном поле определяется конечными размерами джозефсоновских переходов.



**Рис. 5. а) Оптимальный выходной сигнал ПТ-Сквида (амплитуда сигнала  $V = 80$  мкВ, период модуляции  $\Delta H = 0,002$  эрстед, ток смещения  $I \approx 1,2I_c$ ); б) семейство выходных характеристик при увеличении тока в диапазоне  $I = (I_c \div 1,5I_c)$ ; в) огибающая выходного сигнала при увеличенном магнитном поле (период огибающей  $H \approx 2$  эрстед)**

Сигнальная характеристика  $V(H)$  СПИС ПТ-Сквида с приемной петлей была измерена с помощью

внешней калиброванной катушки, расположенной в непосредственной близости к образцу. Период модуляции выходного сигнала по току во внешней калиброванной катушке составляет  $\Delta I_c = 0,1$  мА, что соответствовало периоду модуляции по магнитному полю  $\Delta H = 0,002$  эрстед. При этом величина выходного сигнала лежит в диапазоне  $V = 40 - 100$  мкВ.

## V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанные конструкции СПИС на основе многопетлевого ПТ-Сквида по своим характеристикам близки к характеристикам, требуемым для практического использования. СПИС ПТ-Сквида предназначена для использования в чувствительных магнитометрических и градиентометрических измерительных системах анализа слабых магнитных полей. СПИС ПТ-Сквида данной конструкции ориентированы на применение в качестве чувствительных элементов в многоканальных магнитометрических медицинских системах, таких как магнитокардиограф и магнитоэнцефалограф, предназначенных для диагностики функциональной деятельности органов человека. Магнитометрические системы могут быть использованы в обнаружительных комплексах, метрологии, материаловедении, геологоразведке, и т.п.

Работа выполнена при поддержке Федерального агентства по промышленности (Минпромторг России).

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Kleiner R.H., Koelle D., Ludwig F., Clarke J. Superconducting Quantum Interference Devices: State of the Art and Applications // Proceedings of the IEEE. - 2004. - V 92. - № 10. - P. 1534 - 1548.
- [2] Лихарев К. К., Ульрих Б. Т. Системы с джозефсоновскими контактами. - М.: МГУ, 1978. - 320 с.
- [3] Шварц Б. Б., Фонер С. Слабая сверхпроводимость. Квантовые интерферометры и их применения. - М.: Мир, 1980. - 254 с.
- [4] Бароне А., Патерно Дж. Эффект Джозефсона. - М.: Мир, 1984. - 640 с.
- [5] Гудков А.Л., Гогин А.А., Козлов А.И., Самусь А. Н. СПИС многопетлевого ПТ-Сквида. / Сборник трудов. 7-я Всероссийская научно-техническая конференция "Метрологическое обеспечение обороны и безопасности РФ" - Пос. Поведенки Моск. обл. - 2008. - С. 74 - 76.
- [6] Матлашов А.Н., Журавлев Ю.Е., Масалов В.В., Гудков А.Л. Высокостабильный широкополосный магнитометр на основе ПТ-сквида с торцевыми джозефсоновскими переходами // ПТЭ. - 1989. - № 2. - С. 168-171.
- [7] Масалов В.В., Зубков А.А., Самусь А.Н., Гудков А.Л. Высокостабильные интегральные ПТ-сквида: конструкция, характеристики, области применения // Электронная промышленность. - 1994. - № 7-8. - С. 77-83.