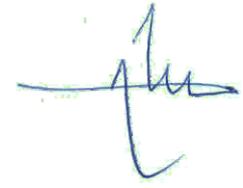


На правах рукописи



Шарафиев Алексей Владимирович

**Многоэлементные джозефсоновские структуры  
для реализации высоколинейных  
широкополосных устройств**

01.04.04 – физическая электроника

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2013

Работа выполнена на кафедре атомной физики, физики плазмы и микроэлектроники физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Научный руководитель: доктор физ.-мат. наук, профессор кафедры атомной физики, физики плазмы и микроэлектроники Физического факультета МГУ Корнев Виктор Константинович

Официальные оппоненты: доктор физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник Института радиотехники и электроники (ИРЭ) РАН Тарасов Михаил Александрович

кандидат физ.-мат. наук, доцент кафедры общей экспериментальной физики Московского педагогического государственного университета (МПГУ) Корнеев Александр Александрович

Ведущая организация: Физико-технологический институт РАН, Москва

Защита диссертации состоится «3» октября 2013 года в 16 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 501.001.66 при Московском государственном университете имени М. В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2, Физический факультет МГУ, ауд. .

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке МГУ имени М. В. Ломоносова.

Автореферат разослан «26» августа 2013 года

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 501.001.66, к. ф.-м. н



И. Н. Карташов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертационная работа посвящена изучению физических основ создания многоэлементных джозефсоновских структур, в которых увеличение динамического диапазона обеспечивается увеличением числа элементарных ячеек, а требуемая высокая линейность функции преобразования магнитного сигнала (магнитной компоненты электромагнитного сигнала) в напряжение достигается за счет использования специально разработанных ячеек с высоколинейным откликом напряжения. Такие структуры могут быть использованы для создания активных высокочувствительных широкополосных устройств, включая усилители и активные электрически малые антенны.

### Актуальность темы

Использование макроскопических квантовых эффектов в сверхпроводниках, позволяет создавать аналоговые и цифровые устройства с характеристиками, недоступными для полупроводниковой электроники. Высокое быстродействие, высокая чувствительность, предельно низкая энергия переключения джозефсоновских элементов  $E_J = \Phi_0 I_C = 2 \cdot 10^{-15} \text{ Вб} \times 10^{-4} \text{ А} = 2 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$  открывают большие перспективы для разработки устройств, которые способны работать в более высоких диапазонах частот сигналов, обеспечивать более высокие скорости обработки информации и предельно высокую чувствительность. Так, на основе сверхпроводящих квантовых интерферометров, или сквидов (англ.: *SQUID* – *Superconducting Quantum Interference Device*), которые имеют энергетическое разрешение порядка  $10^{-30} \dots 10^{-32} \text{ Дж/Гц}$ , то есть близкое к постоянной Планка  $h$ , созданы высокочувствительные магнитометры, нашедшие применение в магнитокардиографии, магнитоэнцефалографии, геофизике, устройствах неразрушающего контроля металлических конструкций и многих других приложениях.

Прогресс в области цифровых устройств на основе быстрой одноквантовой логики, известной как RSFQ-логика (Rapid Single Flux Quantum logic) и допускающей тактовые частоты до 100 ГГц и выше, характеризуется созданием полностью сверхпроводниковых процессоров [1, 2], а также высокочувствительных широкополосных аналого-цифровых преобразователей (АЦП), открывающих новые возможности в развитии технологий приема, обработки и защиты информации на основе широкополосных приемных систем с прямой оцифровкой входного сигнала.

Наиболее активно широкополосные приемные системы с прямой оцифровкой входного сигнала разрабатываются в научных центрах США и Японии [3]-[12], известных своими достижениями в области цифровых устройств на основе быстрой одноквантовой логики и широкополосных АЦП. Для сверхпроводниковых АЦП, реализованных с использованием современной ниобиевой технологии, в гигагерцовом диапазоне частот были продемонстрированы предельно низкая шумовая температура, крайне высокая линейность и динамический диапазон до 90 дБ [10], [13]-[15]. Однако в настоящее время общая эффективность разрабатываемых широкополосных приемных систем ограничивается антенной и следующим за ней усилителем, имеющими более высокую шумовую температуру, более низкую линейность и меньший динамический диапазон по сравнению со сверхпроводниковыми АЦП.

Несмотря на рекордные достижения сверхпроводниковой электроники в области высокочувствительных устройств на основе сквидов, предназначенных для низкочастотных применений (до  $\sim 1$  МГц), создание широкополосных низкошумящих сверхпроводниковых усилителей с большим динамическим диапазоном остается нерешенной, но крайне востребованной задачей. В низкочастотных устройствах на основе сквидов, обладающих высокой чувствительностью, но в то же время, очень малым динамическим диапазоном и ограниченной линейностью, высокая линейность и большой динамический диапазон достигаются за счет использования внешней цепи следящей обратной связи [16]. В широкополосных устройствах реализовать такую цепь эффективной обратной связи не представляется возможным, и поэтому достижение требуемых характеристик широкополосных сверхпроводниковых устройств в настоящее время связывается с необходимостью использования многоэлементных джозефсоновских структур. Поэтому данная работа, посвященная изучению таких многоэлементных систем, является весьма актуальной.

### **Цель диссертационной работы.**

Целью данной работы является теоретическое и экспериментальное изучение физических основ построения многоэлементных джозефсоновских структур с высокой линейностью преобразования магнитного сигнала в напряжение для создания на их основе активных широкополосных систем, в частности, активных электрически малых антенн.

## **Научная новизна.**

Впервые получены следующие результаты:

1. Предложен новый элемент - би-сквид. Выполнен анализ условий линейности отклика напряжения, выполнены расчет и сопоставление шумовых характеристик би-сквида с характеристиками традиционных сквидов.
2. Экспериментально исследованы характеристики последовательных цепочек би-сквидов; получены отклики напряжения на магнитный сигнал с размахом, достигающим 8 мВ.
3. Экспериментально исследованы характеристики последовательных цепочек дифференциальных ячеек, состоящих из двух элементарных параллельных цепочек с взаимно противоположным магнитным смещением. Получены отклики напряжения на магнитный сигнал, характеризующиеся размахом до 20 мВ и линейностью 60 дБ.
4. Экспериментально исследованы характеристики прототипов активных электрически малых антенн трансформаторного типа размером 3,3 на 3,3 мм на основе цепочек дифференциальных ячеек. Получены крутизна преобразования магнитного сигнала в напряжение 750 мкВ/мкТ и линейность преобразования 70 дБ.
5. Экспериментально исследованы характеристики прототипов бестрансформаторных активных электрически малых антенн размером 3,3 на 3,3 мм на основе решеток дифференциальных ячеек. Получена крутизна преобразования магнитного сигнала в напряжение 6500 мкВ/мкТ.

## **Практическая ценность работы.**

Проведенным в диссертационной работе исследованием подтверждается эффективность предложенного решения задачи создания низкошумящих широкополосных сверхпроводниковых устройств, включая активные электрически малые антенны, посредством использования специального вида многоэлементных джозефсоновских структур – сверхпроводящих квантовых решеток.

В процессе выполнения работы был предложен и изучен теоретически и экспериментально новый элемент сверхпроводниковой электроники - би-сквид, способный обеспечивать высокую линейность преобразования магнитного сигнала в напряжение.

Разработаны принципы построения многоэлементных джозефсоновских структур на основе би-сквидов и дифференциальных ячеек с использованием ниобиевой пленочной технологии для создания электрически малых антенн активного типа,

осуществляющих одновременно прием и усиление электромагнитных сигналов. Предложены и реализованы прототипы таких антенн, как с использованием сверхпроводящего трансформатора магнитного потока, так и бестрансформаторного типа.

Полученные результаты могут быть использованы в передовых исследовательских центрах и компаниях, занятых разработкой сверхпроводниковой электроники и развитием технологий приема, обработки и защиты информации, и служить основой для последующих опытно-конструкторских разработок в области высокоэффективных широкополосных приемных устройств с прямой оцифровкой входного сигнала.

### **Достоверность результатов**

Достоверность результатов, приведенных в диссертации, подтверждается тем, что они были получены автором с использованием современных математических методов, вычислительных средств и программного обеспечения, а также современных технологий и экспериментального оборудования. Полученные результаты находятся в соответствии с имеющимися литературными данными. Теоретические результаты подтверждены экспериментальными исследованиями.

### **Личный вклад автора.**

Автором было выполнено численное моделирование всех сверхпроводниковых структур, которые рассматриваются в диссертационной работе, включая расчет шумовых характеристик би-сквидов. Автору принадлежит определяющий вклад в создание аналитической теории би-сквидов. Автором была разработана и оптимизирована топология экспериментальных структур, которые затем изготавливались фирмой Хайпрес, США (Hypres, USA). Все экспериментальные исследования проводились лично автором в лаборатории фирмы Хайпрес.

### **Апробация работы.**

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научном семинаре лаборатории «Криоэлектроника» физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, а также на следующих российских и международных конференциях:

- *Объединенная международная конференция «100-летие сверхпроводимости», (Joined EUCAS-ISEC-ICMC centennial conference, The Netherlands, 2011)* Нидерланды, 18-23 сентября 2011 г.
- *Международная конференция по прикладной сверхпроводимости (Applied Superconductivity Conference, Portland, USA, 2012)*, США, 7-12 октября 2012 г.
- *Международная конференция по сверхпроводниковой электронике (International Superconducting Electronics Conference, Cambridge, USA, 2013)*, США, 7-11 июля 2013 г.
- *Международный симпозиум по электронике, фотонике и возобновляемым источникам энергии «Nano and Giga Challenges»*, Москва - Зеленоград, 12-16 сентября 2011 г.
- *Международная конференция «Микро- и наноэлектроника – 2012»*, Москва - Звенигород, 1-5 октября 2012.
- *Всероссийская научно-техническая конференция «Микроэлектроника СВЧ»*, Санкт-Петербург, Россия, 4-12 июня 2012 г.
- *XIV Всероссийская школа - семинар «Физика и применение микроволн»*, Можайск - Москва, 20-25 мая 2013.

По результатам диссертационной работы опубликовано 7 статей в российских и зарубежных реферируемых журналах.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

В разделе **«Общая характеристика диссертационной работы»** описана актуальность темы, сформулированы цели исследования, раскрыты научная новизна, практическая ценность и личный вклад автора.

**Глава 1** содержит введение, обзор литературы и мотивацию данной работы.

Скви́ды (сверхпроводящие квантовые интерференционные датчики, *англ.: SQUID*) постоянного тока, представляющие в своей основе сверхпроводящее кольцо с включенными в него двумя джозефсоновскими переходами, хорошо известны и широко используются как очень чувствительные преобразователи магнитного сигнала в напряжение, обладающие, однако, очень ограниченной линейностью отклика напряжения. В низкочастотных устройствах на основе сквидов высокая линейность и большой динамический диапазон достигаются за счет использования внешней цепи следящей обратной связи. К сожалению, в устройствах, предназначенных для приема и усиления сигналов суб-гигагерцовых и гигагерцовых частот, реализовать такую внешнюю цепь обратной связи не представляется возможным.

Решение задачи создания широкополосных высокочувствительных и высоколинейных СВЧ устройств может быть достигнуто путем использования многоэлементных джозефсоновских структур, в которых расширение динамического диапазона обеспечивается увеличением числа ячеек (так, например, при использовании цепочки, состоящей из  $N$  скивдов, динамический диапазон увеличивается в  $\sqrt{N}$  раз), а требуемая высокая линейность функции преобразования магнитного сигнала (магнитной компоненты электромагнитного сигнала) в напряжение достигается за счет использования джозефсоновских ячеек с высоколинейным откликом напряжения. Таким образом, основной задачей диссертационной работы являлись синтез таких базовых ячеек и экспериментальное исследование характеристик цепочек и решеток ячеек, а также прототипов устройств на их основе.

В Главе 2 излагаются результаты теоретического и экспериментального изучения би-скивда – нового элемента, в котором последовательно реализуются два нелинейных преобразования сигнала, отвечающие одно- и двухконтактным скивдам. Эти преобразования могут быть сделаны взаимно-обратными, в результате чего достигается высокая линейность вольт-полевой характеристики би-скивда. На рис. 1 показана принципиальная схема би-скивда, а также его модель, которая использовалась для анализа шумовых характеристик, представленных в последующей главе диссертационной работы. Этот анализ был выполнен в соответствии с методом Ланжевена, согласно которому источники тепловых флуктуаций задаются в виде независимых источников флуктуационных токов.

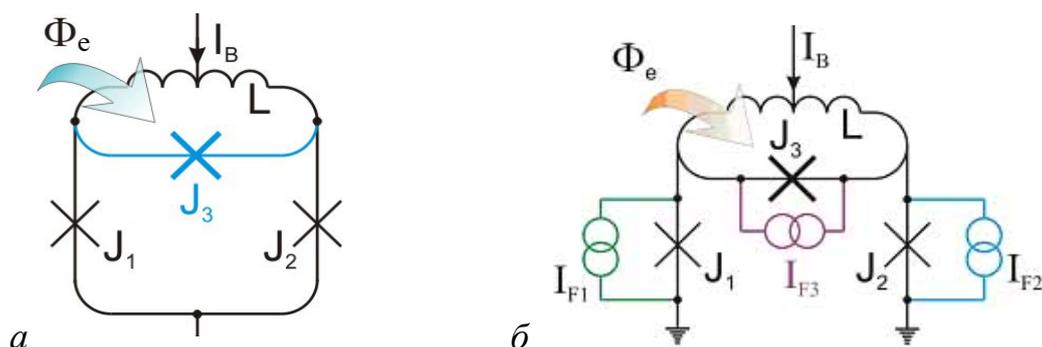


Рис. 1. (а) Принципиальная схема би-скивда. (б) Описание источников тепловых флуктуаций посредством подключения к джозефсоновским переходам независимых источников флуктуационных токов  $I_{F1,2,3}$  в соответствии с методом Ланжевена. Обозначения:  $J_{1,2,3}$  – джозефсоновские переходы,  $L$  – основная индуктивность би-скивда,  $\Phi_e$  – внешний поток,  $I_B$  – ток питания.

Для линеаризации функции отклика напряжения двухконтактного сквида постоянного тока было предложено подключить параллельно основной индуктивности третий джозефсоновский переход, который находится всегда в сверхпроводящем состоянии и играет роль нелинейной индуктивности. Такая модификация сквида постоянного тока превращает его в би-сквид. Дополнительно включенный джозефсоновский переход и основная геометрическая индуктивность  $L$  образуют одноконтактный сквид, осуществляющий нелинейное преобразование магнитного потока входного сигнала в постоянную составляющую разности фаз джозефсоновских переходов  $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$  двухконтактного сквида (рис. 2а), в то время как, в исходном двухконтактном сквиде это преобразование всегда близко к линейному.

При  $l^* \equiv l \cdot (I_{C3}/I_C) \approx 1$  (здесь  $l = 2\pi LI_C/\Phi_0$  – безразмерная индуктивность двухконтактного сквида,  $I_C$  и  $I_{C3}$  – критические токи соответственно основных ( $J_1$  и  $J_2$ ) джозефсоновских переходов и третьего ( $J_3$ ) перехода,  $\Phi_0 = h/2e \approx 2 \cdot 10^{-15}$  Вб – квант магнитного потока) нелинейное преобразование входного потока  $\Phi_e$  в разность фаз  $\Delta\varphi$  делается обратным по отношению к последующему нелинейному преобразованию разности фаз  $\Delta\varphi$  в постоянную составляющую напряжения  $V$  и, таким образом, достигается результирующее линейное преобразование входного сигнала в напряжение (рис. 2б).

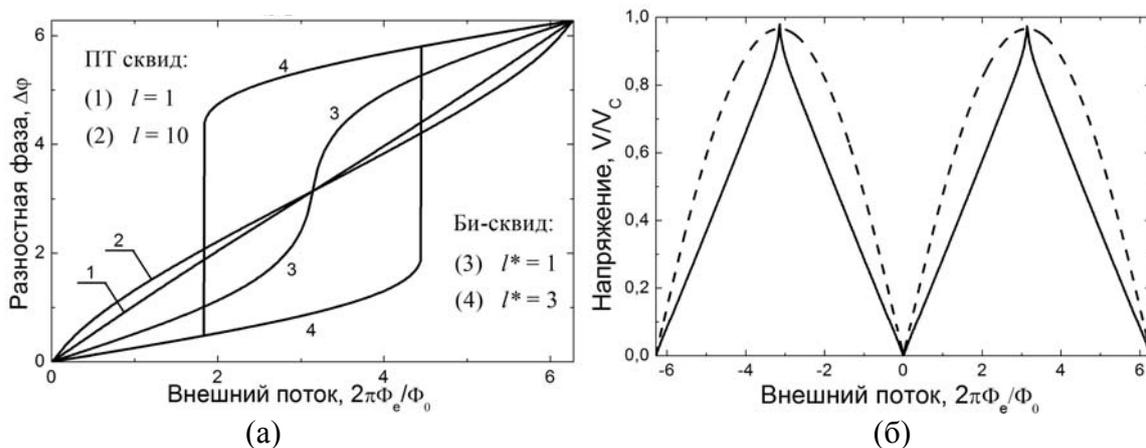


Рис. 2. (а) Преобразование входного магнитного потока  $\Phi_e$  в постоянную составляющую разности фаз джозефсоновских переходов  $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$  в двухконтактном сквиде при  $l = 2\pi LI_C/\Phi_0 = 1$  (линия 1) и  $l = 10$  (линия 2) и в би-сквиде при значениях параметра  $l^* \equiv l \cdot (I_{C3}/I_C) = 1$  (кривая 3) и  $l^* = 3$  (кривая 4). (б) Отклики напряжения би-сквида при оптимальном значении параметра  $l^* \approx 1$  (сплошная линия) и двухконтактного сквида (штриховая линия); в обоих случаях ток смещения  $I_B = 2I_C$ .

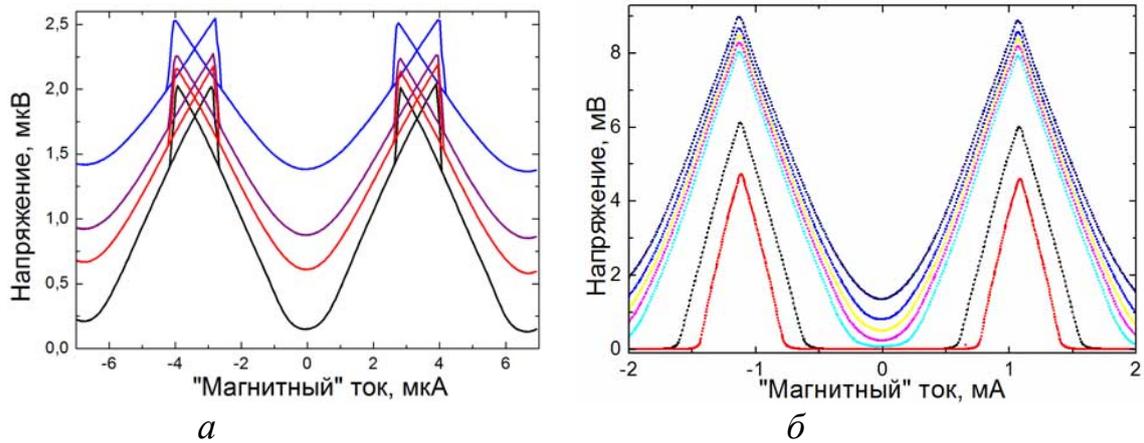


Рис. 3. Семейства экспериментально полученных откликов напряжения цепочек из 20 (а) и 128 (б) би-сквидов. Отклики сняты при разных значениях тока смещения  $I_B$ , величина которого увеличивается от нижних кривых к верхним. “Магнитный” ток – ток в линии задания магнитного потока в би-сквиды.

Аналитическая теория би-сквида, построенная с использованием резистивной модели джозефсоновских переходов с пренебрежимо малой собственной емкостью и в предположении малости амплитуды переменной составляющей разности джозефсоновских фаз  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ , дает систему двух уравнений, определяющих неявно отклик би-сквида  $V(\Phi_e)$ :

$$V/V_C = \sqrt{(I_B/2I_C)^2 - 2\cos^2\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right)}, \quad (1)$$

$$I^* \sin(\Delta\varphi) + \Delta\varphi = -(2\pi \cdot \Phi_e / \Phi_0), \quad (2)$$

где  $V_C = I_C R_N$  – характерное напряжение основных джозефсоновских переходов,  $R_N$  – нормальное сопротивление этих переходов. Параметр  $I^*$  определяет форму отклика напряжения, которая при задании тока смещения  $I_B = 2I_C$  меняется от  $V/V_C = |\sin(\Delta\varphi)|$  при  $I^* \rightarrow 0$  до линейно-треугольного вида при  $I^* \approx 1$ . Дальнейшее увеличение параметра  $I^*$  приводит к появлению петель гистерезиса в областях  $\Phi_e \approx \pm\Phi_0/2 + n\Phi_0$ . Численное моделирование би-сквида подтверждает, что уравнения (1)-(2) описывают отклик напряжения достаточно точно при всех значениях параметра  $I^*$ .

Топология би-сквидов и цепочек последовательно включенных би-сквидов были разработаны на основании численного моделирования сосредоточенных структур с помощью программного пакета PSCAN и анализа индуктивностей многослойных пленочных структур с помощью программного обеспечения L-METER и FastHenry. Экспериментальные структуры были изготовлены фирмой Hupres, США с использованием пленочной ниобиевой технологии формирования сверхпроводниковых

структур с плотностью критического тока туннельных джозефсоновских переходов  $4,5 \text{ кА/см}^2$ . Внутреннее резистивное шунтирование туннельных переходов обеспечивало величину параметра Маккамбера  $\beta = \frac{2e}{\hbar} I_C R_N^2 C$  в пределах  $0,2 \dots 0,25$ , когда согласно результатам численного моделирования влияние собственной емкости  $C$  джозефсоновских переходов на форму отклика напряжения остается пренебрежимо малым. Интегральные схемы, содержащие цепочки от 20 до 128 би-сквидов располагались на чипах размером 5 мм на 5 мм с 40 контактными, расположенными по периметру чипа, и полезной площадью примерно  $3,5 \times 3,5 \text{ мм}^2$ . Интегральные схемы содержали также полосковые линии, индуктивно связанные с би-сквидами цепочек, что позволяло прикладывать одинаковый магнитный поток к каждому би-сквиду цепочки путем пропускания тока через такую линию.

На рис. 3 приведены два примера полученных экспериментально семейств откликов напряжения цепочек би-сквидов, измеренных по мере увеличения тока смещения цепочки  $I_B$ . Гистерезисный характер откликов первого семейства свидетельствует о том, что эффективное значение индуктивного параметра  $l^*$  существенно превышает 1, в то время как второе семейство откликов соответствует оптимальной величине этого параметра  $l^* \approx 1$ .

В данной главе приводятся также результаты исследования би-сквидов, изготовленных с использованием ниобиевой пленочной технологии научного центра IPHT, Германия. Эта технология характеризуется субмикронными размерами туннельных джозефсоновских переходов и отсутствием экранирующего сверхпроводящего слоя.

Наблюдаемое экспериментально размытие нижних углов откликов напряжения возникает как вследствие влияния тепловых флуктуаций, так и технологического разброса критических токов би-сквидов в пределах цепочки. Первый фактор дает большой вклад при малых величинах критических токов джозефсоновских переходов, которые были реализованы в би-сквидах, изготовленных с использованием технологии центра IPHT ( $8 \dots 16 \text{ мкА}$ ), а для цепочек би-сквидов, изготовленных с использованием технологии фирмы Nurges характеризующихся величиной критического тока основных джозефсоновских переходов  $I_C \sim 125 \text{ мкА}$ , наибольший вклад дает разброс критических токов, влияние которого максимально проявляется при токе смещения цепочки  $I_B = 2I_C$ . Механизм влияния этого разброса проиллюстрирован на рис. 4а, где показаны индивидуальные отклики би-сквидов, рассчитанные с учетом разброса их критических

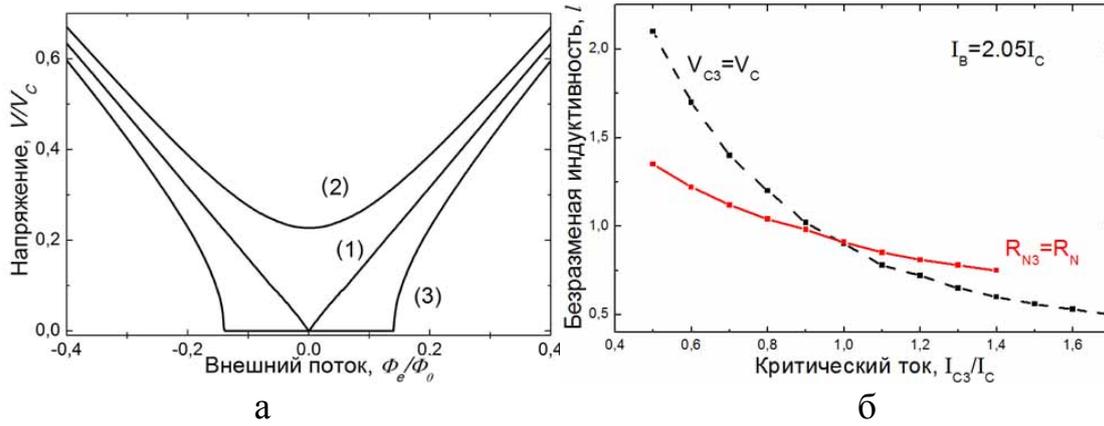


Рис. 4. (а) Отклики напряжения би-сквидов с учетом разброса критических токов (номинальная величина  $I_C$  (1), меньше на 2,5% (2) больше на 2,5% (3)), при смещении цепочки током  $I_B = 2I_C$ . (б) Оптимальное соотношение между параметрами  $l$  и  $i_{c3} \equiv I_{C3}/I_C$  для получения наилучшей линейности при токе смещения  $I_B = 2,05I_C$ . При этом константой является нормальное сопротивление третьего перехода  $R_{N3} = R_N$  (сплошная линия) или характерное напряжение третьего перехода  $V_{C3} \equiv I_{C3}R_{N3} = V_C$  (штриховая линия).

токов. Поэтому дальнейшая оптимизация проводилась с расчетом на больший ток смещения. Существенное уменьшение влияния разброса критических токов может быть получено при увеличении тока смещения на величину этого разброса. Оптимальное соотношение между безразмерной индуктивностью  $l$  и критическим током третьего перехода  $i_{c3} \equiv I_{C3}/I_C$  несколько изменяется при увеличении тока смещения цепочки; для величины тока смещения  $I_B = 2,05I_C$ , достаточной для перекрытия диапазона размытия критических токов в рамках технологии фирмы Nupres, оптимальное соотношение между параметрами  $l$  и  $i_{c3}$  приведено на рис. 4б.

**Глава 3** посвящена описанию результатов численного моделирования динамики би-сквида с использованием программного комплекса PSCAN в присутствии тепловых флуктуаций, когда выполнено условие  $eV \leq kT$  (здесь  $T$  – физическая температура,  $e$  – заряд электрона,  $k$  – постоянная Больцмана,  $V$  – напряжение на джозефсоновском переходе), расчету и сопоставлению шумовых характеристик би-сквида с характеристиками сквида постоянного тока. Согласно методу Ланжевена, источники тепловых флуктуаций могут быть введены в исследуемую цепь посредством подключения к джозефсоновским переходам независимых источников флуктуационных токов (см. рис. 1б) со спектральной плотностью, определенной как для положительных, так и отрицательных частот,

$$S_{IF}(\Omega) = kT/(\pi R), \quad (3)$$

где  $R$  – нормальное сопротивление джозефсоновского перехода ( $R_N$  или  $R_{N3}$  соответственно). Относительный уровень флуктуаций принято характеризовать  $\gamma$ -фактором [17]:  $\gamma = I_T / 2I_C = 2ekT / (I_C \hbar)$ , где  $I_T = 4ekT / \hbar \approx 0.083 \cdot T [K] \mu A$  – эффективный размах тока флуктуаций, величина которого при температуре жидкого гелия ( $T = 4.2$  К) составляет 0.33 мкА.

На рис. 5 показана форма фрагмента отклика напряжения би-сквида, смещенного током  $I_B = 2I_C$ , в отсутствие флуктуаций (а) и в присутствии флуктуаций с величинами  $\gamma$ -фактора 0,0013 (б) и 0,033 (в), характеризующими экспериментальные образцы, изготовленные с использованием технологий соответственно фирмы Нуррес и центра ИРТ, а также при  $\gamma = 0,05$  (г), соответствующем публикации [18]. Эти данные свидетельствуют о том, что основной вклад в наблюдаемое размытие нижних углов откликов напряжения цепочек би-сквидов (рис 3), изготовленных с использованием технологии фирмы Нуррес, дает разброс критических токов джозефсоновских переходов в пределах цепочки.

Чувствительность сквида определяется величиной спектральной плотности низкочастотных (на частоте сигнала) флуктуаций, приведенных к его входу. Для вычисления этой характеристики и сравнения би-сквида со сквидом постоянного тока для обоих устройств были рассчитаны спектральная плотность низкочастотных флуктуаций выходного напряжения  $S_V(0)$  и коэффициент преобразования магнитного потока в напряжение  $dV/d\Phi$  как функции приложенного магнитного потока. Деление  $[S_V(0)]^{1/2}$  на  $dV/d\Phi$  дает среднеквадратичное значение шумов, приведенных ко входу сквида (в единичной полосе частот). На рис. 6 приведены результаты вычисления  $S_V(0)$  и шумов, приведенных к входу, для би-сквида и сквида постоянного тока с одинаковыми общими параметрами. Для би-сквида характерно определенное увеличение шумов, как на его выходе, так и шумов, приведенных к входу. Как показывает детальный анализ, это увеличение шумов не является следствием появления

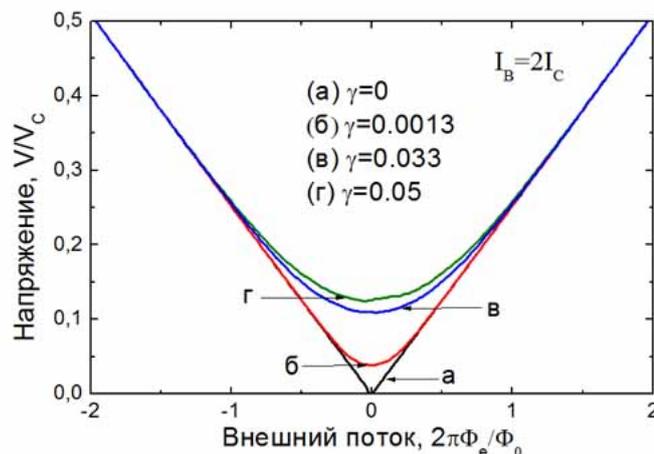


Рис. 5. Флуктуационное размытие нижнего угла отклика напряжения би-сквида, смещенного током  $I_B = 2I_C$ . (а) – в отсутствие флуктуаций, (б) – при  $\gamma = 0,0013$ , (в) – при  $\gamma = 0,033$ , (г) – при  $\gamma = 0,05$ .

дополнительного источника флуктуаций, связанных с третьим джозефсоновским переходом – вклад этих флуктуаций мал по сравнению с основными флуктуациями, источником которых являются базовые (J1 и J2) джозефсоновские переходы.

Причиной увеличения уровня флуктуаций в би-сквиде является изменение функции преобразования приложенного магнитного потока в разность фаз  $\Delta\Phi$  джозефсоновских переходов и, как следствие, изменение закона модуляции максимального сверхпроводящего тока сквида. Согласно рис. 2а, увеличение разности фаз  $\Delta\Phi$ , а следовательно, и уменьшение максимального сверхпроводящего тока в би-сквиде происходит медленнее, чем в сквиде постоянного тока, на большей части полупериода отклика ( $\Phi_e = 0 - \Phi_0/3$ ). Поэтому дифференциальное сопротивление  $dV/dI$ , максимальное при  $\Phi_e = 0$ , уменьшается в би-сквиде с ростом  $\Phi_e$  намного медленнее, определяя более высокое значение спектральной плотности флуктуаций напряжения  $S_V(0) = (dV/dI)^2 2S_{IF}(0)$ , где  $S_{IF}(0)$  – спектральная плотность низкочастотных токовых флуктуаций, обусловленных основными (первым и вторым) джозефсоновскими переходами. Коэффициент преобразования магнитного потока в напряжение  $dV/d\Phi$  в би-сквиде постоянен (за исключением угловых областей отклика) и на большей части полупериода отклика его величина меньше, чем в сквиде постоянного тока. Это дает дополнительное увеличение уровня шумов при их пересчете к входу би-сквида, за исключением небольшой области значений  $\Phi_e$  вблизи  $\Phi_0/2$ .

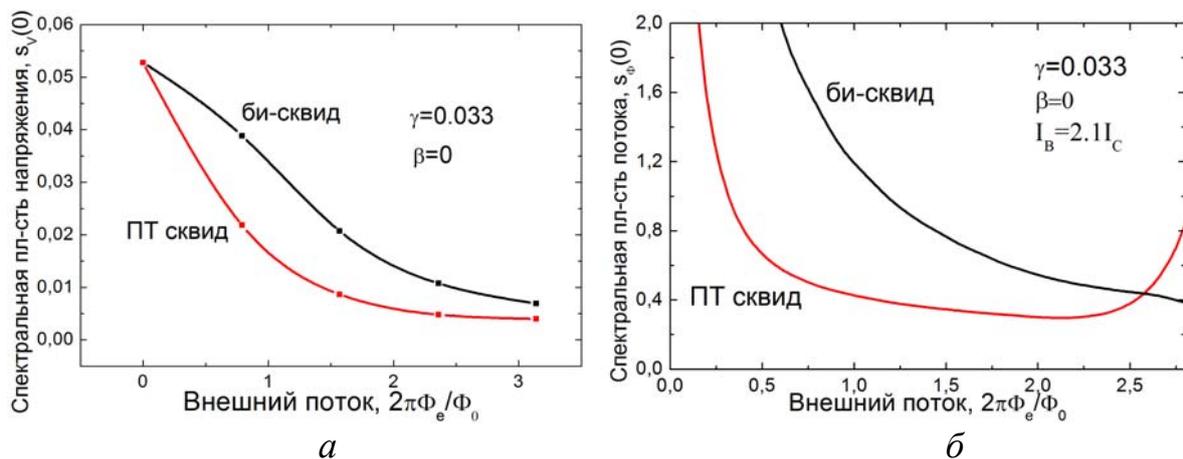


Рис. 6. Результаты численного моделирования би-сквида и сквида постоянного тока с одинаковыми общими параметрами в присутствии флуктуаций, характеризующихся значением  $\gamma = 0.033$ : спектральная плотность низкочастотных флуктуаций выходного напряжения (а) и спектральная плотность шумов, приведенных ко входу сквида (б).

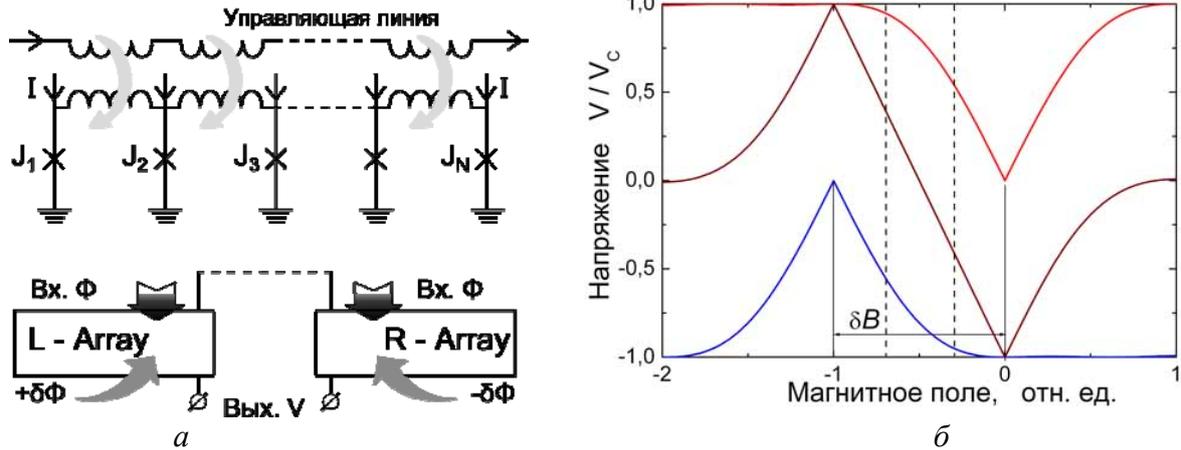


Рис. 7. Элементарная параллельная цепочка и дифференциальная ячейка на основе двух таких цепочек, включенных дифференциально и противоположно смещенных магнитным потоком  $\delta\Phi$  (а); индивидуальные отклики напряжения плеч ячейки и результирующий отклик дифференциальной ячейки (б).

В Главе 4 излагаются результаты экспериментального изучения последовательных цепочек дифференциальных ячеек. Такая ячейка, показанная схематически на рис. 7а, состоит из двух элементарных параллельных цепочек из  $N = 10 \dots 15$  джозефсоновских переходов, включенных дифференциально и противоположно смещенных некоторым магнитным потоком  $\delta\Phi$ . На рис. 7б показаны отклики напряжения плеч ячейки (центральные пики откликов) и результирующий дифференциальный отклик. Форма боковых сторон основного пика отклика напряжения параллельной цепочки  $V_R(\Phi)$  и  $V_L(\Phi)$  на приложенный магнитный поток  $\Phi$  при  $N \geq 10$  приближается к параболическому закону, и разность двух одинаковых параболических функций со смещенными центрами дает линейную зависимость отклика дифференциальной ячейки  $V(\Phi) = V_R(\Phi + \delta\Phi) - V_L(\Phi - \delta\Phi)$ . Ограничение линейности дают следующие по степени малости члены в описании боковых сторон отклика.

Рассмотрение идеализированной дифференциальной ячейки в предельном случае нулевых индуктивностей между джозефсоновскими переходами цепочек (индуктивностей связи) может быть выполнено с использованием аналитических формул для отклика напряжения параллельной цепочки [19]. Такой анализ послужил основанием для практического создания дифференциальных ячеек, а также цепочек и решеток таких из таких ячеек. На основании разработанных послойных топологий фирмой Нуррес, США были изготовлены интегральные структуры с использованием пленочной ниобиевой технологии формирования сверхпроводниковых структур с плотностью критического тока туннельных джозефсоновских переходов  $4,5 \text{ кА/см}^2$ .

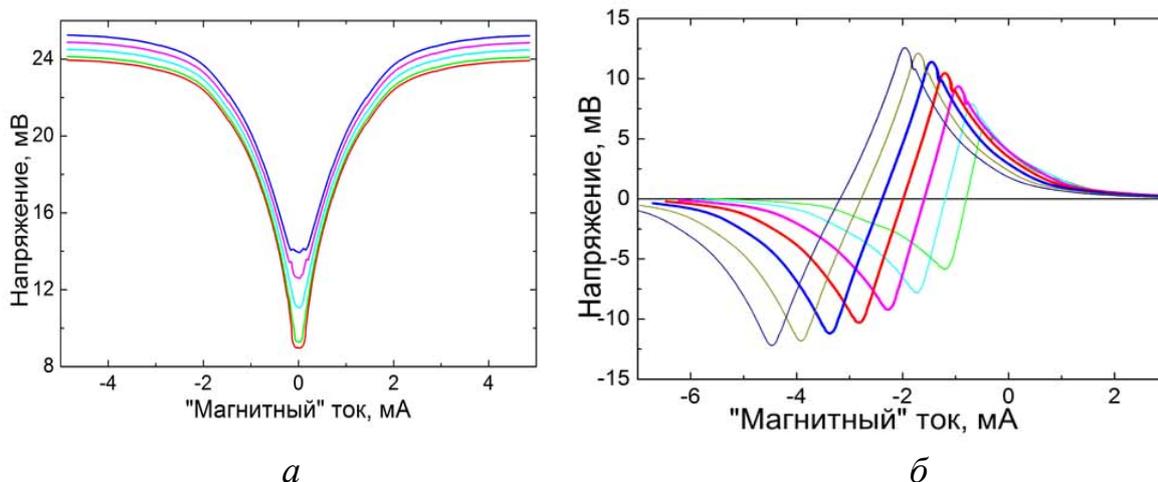


Рис. 8. (а) Семейство индивидуальных откликов напряжения одного из плеч (цепочки последовательно включенных элементарных параллельных цепочек из 10 джозефсоновских переходов) интегральной структуры из 108 последовательно включенных дифференциальных ячеек для разных значений тока смещения цепочки, начиная от  $I_B = 10 \cdot I_C$  (нижняя кривая) и выше. (б) Семейство дифференциальных откликов данной интегральной структуры при различной величине взаимно-противоположного магнитного смещения ее плеч  $\delta\Phi$ . Линии сдвинуты относительно друг друга по оси абсцисс.

Использовалось внутреннее резистивное шунтирование джозефсоновских переходов, обеспечивающее значение параметра Маккамбера  $\beta \approx 0,2$ .

Были изучены характеристики последовательных цепочек, содержащих от 20 до 108 последовательно включенных дифференциальных ячеек. Фактически, каждая такая структура содержит две дифференциально включенных цепочки из соответственно левых и правых плеч (элементарных параллельных цепочек) дифференциальных ячеек. Интегральные схемы содержали также полосковые линии, индуктивно связанные со всеми элементарными цепочками, что позволяло прикладывать к ним одинаковый магнитный поток посредством задания тока через такую линию.

На рис. 8 представлены экспериментально полученные вольт-потокосые характеристики интегральной структуры из 108 последовательно включенных дифференциальных ячеек. Элементарные параллельные цепочки содержали 10 джозефсоновских переходов с критическим током  $I_C = 125$  мкА. Семейство индивидуальных откликов напряжения одного из плеч (цепочки последовательно включенных элементарных параллельных цепочек) этой структуры для разных значений тока смещения цепочки, начиная от  $I_B = 10 \cdot I_C$  (нижняя кривая) и выше, показано на рис. 8а. Семейство дифференциальных откликов напряжения при

различной величине взаимно-противоположного магнитного смещения  $\delta\Phi$  плеч этой структуры показано на рисунке 8б. Размах откликов достигает 25 мВ, линейность, измеренная по оценке амплитуд гармоник выходного сигнала, достигает 60 дБ при использовании 70% размаха отклика. Такая высокая линейность отклика наблюдается в достаточно широком диапазоне величин магнитного смещения  $\delta\Phi$ .

В Главе 5 представлены результаты экспериментального исследования прототипов активных электрически малых антенн (активных ЭМА) на основе цепочек и решеток дифференциальных ячеек. Такие устройства позволяют осуществлять одновременно как широкополосный прием, так и усиление электромагнитных сигналов. Интегрирование цепочки дифференциальных ячеек со сверхпроводящим трансформатором (концентратором) магнитного потока позволяет создавать активные ЭМА трансформаторного типа. Наилучшее соотношение между площадью и индуктивностью сверхпроводящего трансформатора, обеспечивающее наибольшие Мейсснеровские токи и, следовательно, позволяющее задать в ячейки решетки наибольший сигнал, достигается при правильной (близкой к кругу или квадрату) форме трансформатора. Квадратный трансформатор наиболее просто интегрируется с последовательной цепочкой дифференциальных ячеек, соединение которых может быть выполнено в данном случае как с использованием нормального проводника, так и

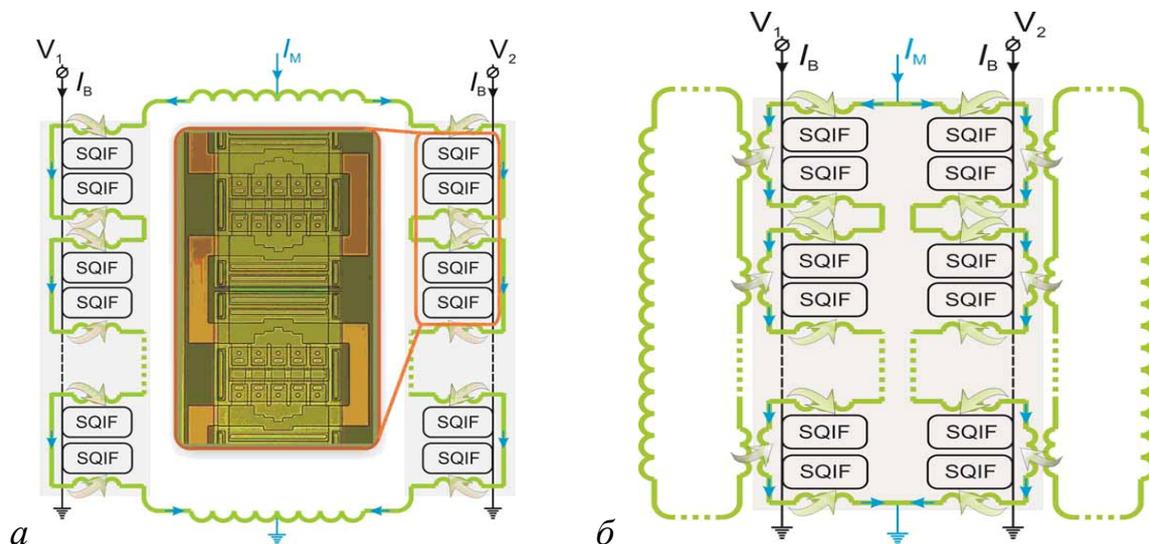


Рис. 9. Принципиальные схемы прототипов активной электрически малой антенны с одним общим трансформатором магнитного потока (а) и двумя трансформаторами (б).  $I_B$  – ток смещения цепочки,  $I_M$  – ток задания противоположного магнитного смещения цепочек. На вставке показана фотография фрагмента цепочки, содержащего 4 элементарных параллельных цепочки “SQIF”.

сверхпроводника.

На рис. 9а показана схематически трансформаторная антенна, представляющая собой примерно прямоугольный сверхпроводящий трансформатор, индуктивно связанный с двумя дифференциально включенными цепочками из соответственно левых и правых плеч (элементарных параллельных цепочек) дифференциальных ячеек. Прототип такой антенны был изготовлен с использованием ниобиевой технологии с плотностью критического тока джозефсоновских переходов  $4,5 \text{ кА/см}^2$ . Антенный прототип занимал площадь  $3,3 \times 3,3 \text{ мм}^2$  на чипе размером  $5 \times 5 \text{ мм}^2$  и был реализован конструктивно в виде двух дифференциально включенных последовательных цепочек, каждая из которых содержит 80 элементарных параллельных цепочек из 10 джозефсоновских переходов. Измерения проводились на частоте до 300 кГц; магнитное поле, прикладываемое к антенне, создавалось с помощью полосковой катушки, сформированной на том же чипе вокруг антенного прототипа. Полный размах отклика антенного прототипа достигает 8 мВ, а крутизна преобразования  $dV/d\Phi \approx 750 \text{ мкВ/мкТл}$ . Была достигнута линейность 70 дБ при использовании от 30% до 80% полного размаха отклика антенны в зависимости от величины магнитного смещения  $\delta\Phi$ .

На рис. 9б показана схематически трансформаторная антенна с двумя идентичными трансформаторами магнитного потока, индуктивно связанными с цепочками из соответственно левых и правых плеч (элементарных параллельных цепочек) дифференциальных ячеек. Данный антенный прототип показал несколько меньшую крутизну преобразования  $dV/d\Phi \approx 500 \text{ мкВ/мкТл}$ .

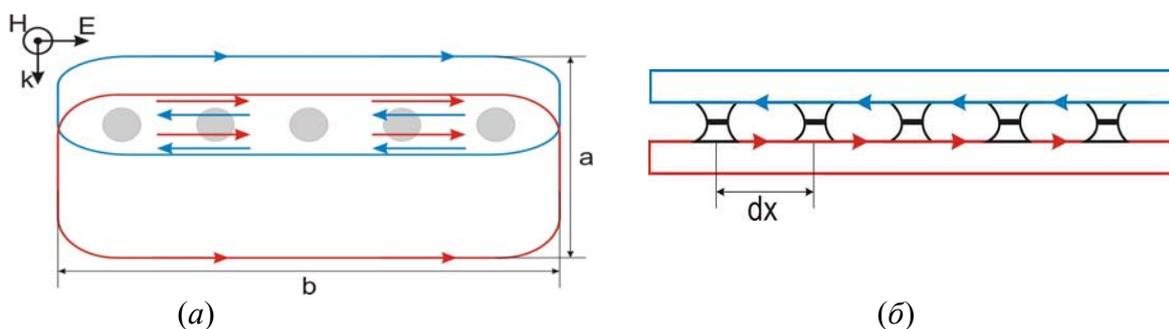


Рис. 10. Схематическое изображение механизма трансформации перпендикулярного магнитного потока вектора  $\mathbf{B}$  падающей волны, приложенного ко всей площади, занимаемой сверхпроводящей ячейкой, в параллельный магнитный поток, приложенный к элементарной параллельной цепочке джозефсоновских переходов. Джозефсоновские переходы показаны кружками на виде сверху (а) и «перемычками» между сверхпроводящими пленочными слоями на виде сбоку (б).

Двумерная решетка дифференциальных ячеек с несверхпроводящим электрическим соединением ячеек может быть использована непосредственно как активная ЭМА бестрансформаторного типа. Такая конструкция антенны позволяет при той же занимаемой площади, что и трансформаторная ЭМА, значительно увеличить число ячеек и, таким образом, значительно увеличить полный размах отклика антенны. Однородность решетки обеспечивает однородную картину распределения магнитной компоненты электромагнитной волны внутри решетки и, следовательно, одинаковый магнитный сигнал, прикладываемый к каждой ячейке (возможно, за исключением крайних рядов, которые можно не использовать в образовании выходного сигнала). На рис. 10 показан схематически механизм трансформации перпендикулярного магнитного потока приложенного ко всей площади, занимаемой сверхпроводящей ячейкой, в параллельный магнитный поток, приложенный к элементарной параллельной цепочке. Экранирующие Мейсснеровские токи, текущие по краям образующих ячейку сверхпроводящих пленок M1 и M2 замыкаются по внутренним поверхностям этих пленок в области их перекрытия, где сформированы джозефсоновские переходы, и таким образом создают магнитный поток, приложенный к параллельной цепочке джозефсоновских переходов.

Прототип бестрансформаторной активной ЭМА был изготовлен с использованием ниобиевой технологии с плотностью критического тока джозефсоновских переходов  $4,5 \text{ кА/см}^2$ . Антенный прототип занимает площадь  $3,3 \times 3,3 \text{ мм}^2$  на чипе размером  $5 \times 5 \text{ мм}^2$  и реализован конструктивно в виде двух дифференциально включенных последовательных цепочек, каждая из которых содержит 560 элементарных параллельных цепочек из 10 джозефсоновских переходов. Для измерения характеристик антенного прототипа магнитное поле прикладывалось с помощью внешней многовитковой катушки. Полный размах отклика напряжения такой антенны достигает 60 мВ, а крутизна преобразования магнитного сигнала в выходное напряжение  $dV/d\Phi \approx 6500 \text{ мкВ/мкТл}$ , что примерно на порядок превосходит характеристики трансформаторного антенного прототипа, занимающего такую же площадь.

Частота сигналов  $\Omega_S$ , принимаемых такой антенной должна удовлетворять условию  $\Omega_S \ll \Omega_C$ , где  $\Omega_C$  – характерная частота джозефсоновских переходов. В рамках использованной ниобиевой технологии интегральных схем джозефсоновские элементы представляли собой туннельные джозефсоновские переходы, шунтированные достаточно низкоомным резистором  $R_S$  для уменьшения параметра Маккамбера  $\beta$  до значения 0,2, обеспечивающим пренебрежимо малое паразитное влияние собственной

емкости джозефсоновских переходов. Характерная частота таких джозефсоновских элементов  $F_C = \Omega_C / 2\pi = I_C R_S / \Phi_0$  близка к 100 ГГц, что допускает значения частоты принимаемых сигналов до нескольких гигагерц. Другим ограничительным условием для такой антенны является требование малости размеров антенны по сравнению с длиной волны принимаемого сигнала. Однако в отличие от пассивных электрически малых антенн, эффективность активной сверхпроводящей антенны не зависит от частоты и, следовательно, не уменьшается с уменьшением частоты принимаемых сигналов.

## **ВЫВОДЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ**

Проведено теоретическое и экспериментальное изучение физических основ создания широкополосных сверхпроводниковых устройств, способных обеспечить большой динамический диапазон и высокую линейность преобразования магнитной компоненты электромагнитного сигнала в напряжение, получены следующие результаты:

1. Предложен новый элемент - би-сквид, выполняющий последовательно два нелинейных преобразования, характер нелинейности которых может быть сделан взаимно-обратным, что в итоге дает линейное преобразование входного магнитного сигнала в выходное напряжение. Выполнен детальный анализ сигнальных характеристик и проведено сопоставление шумовых характеристик би-сквида с характеристиками традиционных сквидов.
2. Разработаны топологии би-сквидов и цепочек би-сквидов для двух различных ниобиевых пленочных технологий формирования сверхпроводниковых интегральных схем. Экспериментально исследованы последовательные цепочки, содержащие от 20 до 128 би-сквидов; получены отклики напряжения с размахом, достигающим 8 мВ.
3. Разработаны топологии последовательных цепочек на основе дифференциальных ячеек, состоящих из двух элементарных параллельных цепочек с взаимно противоположным магнитным смещением. Проведено экспериментальное исследование откликов напряжения цепочек, содержащих от 20 до 108 дифференциальных ячеек. Максимальный размах полученных откликов составляет 25 мВ; линейность преобразования – 60 дБ.
4. Разработаны топологии прототипов активных электрически малых антенн трансформаторного и бестрансформаторного типов на основе сверхпроводящих квантовых решеток дифференциальных ячеек. Проведено экспериментальное

исследование откликов напряжения антенных прототипов, занимающих площадь 3,3мм на 3,3мм. В случае трансформаторного прототипа на основе цепочки из 80 ячеек интегрированной с квадратным сверхпроводящим трансформатором, получены крутизна преобразования 750 мкВ/мкТ и линейность 70 дБ. Для бестрансформаторной антенны, содержащей 560 ячеек, достигнуты размах отклика напряжения 60 мВ и крутизна преобразования 6500 мкВ/мкТ.

#### **Список печатных работ автора по материалам диссертации.**

- [A1] Victor K. Kornev, Igor I. Soloviev, Nikolay V. Klenov, **Alexey V. Sharafiev**, and Oleg A. Mukhanov, “Linear Bi-SQUID Arrays for Electrically Small Antennas,” *IEEE transaction on Applied Superconductivity*, V. 21, Issue 3, part 1, 2011, p.713-716.
- [A2] **A. Sharafiev**, I. Soloviev, V. Kornev, M. Schmelz., R. Stolz, V. Zakosarenko, S. Anders and H.-G. Meyer, “Bi-SQUIDS with submicron cross-type Josephson tunnel junctions” *Supercond. Sci. Technol.* 25 (2012) 045001
- [A3] Victor Kornev, Igor Soloviev, Nikolai Klenov, **Alexey Sharafiev**, Oleg Mukhanov “Array designs for active electrically small superconductive antennas”, *Physica C*, vol. 479, Sept. 2012, p. 119–122
- [A4] В. К. Корнев, И.И. Соловьев, **А. В. Шарафиев**, Н. В. Кленов, “От одно- и двухконтактного сквида к би-сквиду”, *Радиотехника*, №12, 2012, с. 32-41.
- [A5] И. И. Соловьев, В. К. Корнев, **А. В. Шарафиев**, Н. В. Кленов, О. А. Муханов, “Цепочки бисквидов и параллельных СКИФ-структур для построения активных электрически малых антенн”, *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*, № 7, 2012, с. 45-51.
- [A6] Victor K. Kornev, Igor I. Soloviev, **Alexey V. Sharafiev**, Nikolay V. Klenov, and Oleg A. Mukhanov, “Active Electrically Small Antenna Based on Superconducting Quantum Array” *IEEE transaction on Applied Superconductivity*, Vol. 23, No. 3, 2013, p. 1800405.
- [A7] И. И. Соловьев, В. К. Корнев, **А. В. Шарафиев**, Н. В. Кленов, О. А. Муханов, “Подходы к созданию активной электрически малой сверхпроводниковой антенны”, *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*, № 7, 2013, с. 70-74.

#### **Список цитируемой литературы**

- [1] M. Tanaka, F. Matsuzaki, T. Kondo, N. Nakajima, Y. Yamanashi, H. Terai, S. Yorozu, N. Yoshikawa, A. Fujimaki, H. Hayakawa, “Prototypic design of the single-flux-quantum

- microprocessor, CORE1”, *Superconductor Science and Technology* (2003), 16 (12), pp. 1460-1463.
- [2] N. Nakajima, F. Matsuzaki, Y. Yamanashi, N. Yoshikawa, M. Tanaka, T. Kondo, A. Fujimaki, H. Terai, S. Yorozu, “Design and implementation of circuit components of the SFQ microprocessor CORE1”, *Superconductor Science and Technology* (2004), 17 (3), pp. 301-307.
- [3] A. Fujimaki, M. Katayama, et al., “Advanced base-station based on superconductive devices and softwaredefined radio technology,” *Supercond. Sci. Technol.*, vol.12, p.708–710, 1999.
- [4] E. B. Wikborg, V. K. Semenov, and K. K. Likharev, “RSFQ front-end for a software radio receiver,” *IEEE Trans. Appl. Supercon.*, vol. 9, p. 3615–3618, 1999.
- [5] J. Mitola, “Software radio architecture evolution: Foundations, technology tradeoffs, and architecture implications,” *IEICE Trans. Commun.*, vol. E83-B, pp. 1165–1173, 2000.
- [6] D.K. Brock, O.A. Mukhanov, and J. Rosa, “Superconductor digital RF development for software radio,” *IEEE Commun. Mag.*, vol.39, no.2, p.174–179, 2001.
- [7] J. Wong, R. Dunnegan, D. Gupta, et al., “High Performance, All Digital Rf Receiver Tested at 7.5 Gigahertz,” *Military Communications Conference, 2007 (MILCOM 2007)*. IEEE Digital Object Identifier: 10.1109/MILCOM.2007.4455052, p. 1-5, 2007.
- [8] O. A. Mukhanov, D. Kirichenko, I. V. Vernik, et al., “Superconductor Digital-RF Receiver Systems,” *IEICE Trans. Electron.*, Vol. E91–C, No.3, p.306-317, 2008.
- [9] D. E. Kirichenko, T. V. Filippov, and D. Gupta, “Microwave Receivers with Direct Digitization,” *Microwave Symposium Digest*, p. 1449 – 1452, 2009.
- [10] I. V. Vernik, D. E. Kirichenko, et al., “Progress in the Development of Cryocooled Digital Channelizing RF Receivers,” *IEEE Trans. Appl. Supercon.*, vol. 19, p. 1016-1021, 2009.
- [11] D. Gupta, D. E. Kirichenko, V. V. Dotsenko, R. Miller, et al., “Modular, Multi-function Digital-RF Receiver Systems,” *IEEE Trans. Appl. Supercon.*, vol. 21, p. 883-890, 2011.
- [12] Dillinger, Madani, Alonistioti, *Software defined radio : architectures, systems, and functions*, Wiley, 2003.
- [13] O. Mukhanov, D. Gupta, A. Kadin, and V. Semenov, “Superconductor Analog-to-Digital Converters,” *Proc. of the IEEE*, vol. 92, p. 1564-1584, Oct. 2004.
- [14] I. V. Vernik, D. E. Kirichenko, T. V. Filippov, A. Talalaevskii, A. Sahu, A. Inamdar, A. F. Kirichenko, D. Gupta, and O. A. Mukhanov, “Superconducting high-resolution low-pass analog-to-digital converters,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 17, pp. 442-445, Jun. 2007.

- [15] A. Inamdar, S. Rylov, et al., "Progress in Design of Improved High Dynamic Range Analog-to-Digital Converters," *IEEE Trans. Applied Superconductivity*, vol. 19, no. 3, p. 670-675, 2009.
- [16] K. K. Likharev, *Dynamics of Josephson Junctions and Circuits*, New York: Gordon and Breach, 1985.
- [17] К. К. Лихарев, Б. Т. Ульрих *Системы с джозефсоновскими контактами. Основы теории* М.: Изд-во Моск. Ун-та, 1978
- [18] C. D. Tesche and J. Clarke, "A computer model for noise in the dc SQUID", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. MAG-13, No. 1, 1977
- [19] J. Oppenländer, "Superconducting Quantum Interference Filters", *Advances in Solid State Physics* Volume 43, 2003, pp 731-746