

**Резюме проекта (ПНИР), выполняемого в рамках ФЦП
«Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития
научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 год»
по этапу №2 (01 января 2015 – 30 июня 2015)**

Номер Соглашения о предоставлении субсидии: **14.613.21.0022**

Тема: **«Разработка физических основ построения сверхпроводниковых электронных устройств для широкополосных приемных систем с прямой оцифровкой сигналов»**

Приоритетное направление: Информационно-телекоммуникационные системы

Критическая технология: нет

Период выполнения проекта: 28 ноября 2014 – 31 декабря 2015

Получатель субсидии: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова»

Иностраный партнер: Национальная лаборатория сверхпроводимости Института физики Китайской академии наук

Ключевые слова: Широкополосные приемные системы, прямая оцифровка сигналов, сверхпроводниковые АЦП, активные электрически малые сверхпроводниковые антенны, макроскопические квантовые эффекты в сверхпроводниках, сверхпроводниковые фильтры, низкотемпературные сверхпроводники, высокотемпературные сверхпроводники, тонкопленочная технология, сверхпроводящие квантовые решетки, квантовые ячейки, высокая линейность, большой динамический диапазон.

1 Цель прикладного научного исследования и экспериментальной разработки

Целью выполняемых научных исследований является получение значимых научных результатов и технологических решений, позволяющих научно-исследовательским организациям развивать новые технологии (мирового уровня) приема, обработки и защиты информации на основе широкополосных приемных систем с прямой оцифровкой сигналов. Появление таких новых технологий будет сопровождаться выводом на рынок новой продукции и новых видов информационных услуг через:

- 1) существенное расширение одновременного приема (передачи) контента различного типа с параллельной обработкой принимаемых сигналов;
- 2) развития технологий удаленного доступа к вычислительным центрам;
- 3) развитие облачных технологий хранения и обработки информации;
- 4) развитие новых технологий защиты информации посредством программно-определяемой связи, в рамках которой частота и тип кодировки радиосигнала устанавливается динамически в широкой полосе частот, условно, от 0 до 10 ГГц.

Основной задачей научных исследований является разработка физических основ построения сверхпроводниковых электронных устройств для широкополосных приемных систем с прямой оцифровкой сигналов осуществляемой с использованием сверхпроводниковых АЦП, Таковыми устройствами являются:

- 1) широкополосные устройства активного типа с высокой линейностью характеристик (до 100 дБ и выше) и большим динамическим диапазоном (до 100 дБ и выше)), в том числе активные электрически малые антенны,
- 2) широкополосные сверхпроводящие линии передачи СВЧ сигналов и филь-тры для согласования антенного тракта как с антенной, так и со сверхпроводниковым АЦП.

В задачи проекта входит также исследование возможностей реализации и интеграции этих устройств (пассивного и активного типов) на основе высокотемпературных сверхпроводников (что позволит использовать азотный уровень охлаждения).

2 Основные результаты проекта

На предыдущем этапе выполнения работ были получены следующие существенные результаты:

Основным направлением работ была выбрана разработка физических основ построения широкополосных активных устройств с большим динамическим диапазоном линейного преобразования сигналов на основе высокоэффективных сверхпроводящих квантовых решеток (СКР) с использованием сверхпроводниковых цепей сопряжения.

Линейность СКР определяется линейностью откликов используемых квантовых ячеек, требуемый динамический диапазон достигается за счет общего числа квантовых ячеек, а импеданс устанавливается соотношением параллельных и последовательных электрических соединений в квантовой решетке.

Рассмотрены возможные реализации активных ЭМА трансформаторного типа на основе СКР, ячейки которой интегрированы со сверхпроводящими трансформаторами магнитного по-

тока, а также бестрансформаторные активные ЭМА. Для бестрансформаторной конструкции динамический диапазон растет пропорционально линейному размеру чипа, на котором реализована ЭМА, в то время как для трансформаторной ЭМА динамический диапазон увеличивается как корень квадратный из линейного размера чипа.

Выполнено рассмотрение характеристик сверхпроводящих квантовых ячеек двух типов: (i) би-сквида и (ii) дифференциальная квантовая ячейка. Построена аналитическая теория би-сквида., решена оптимизационная задача на параметры би-сквида, в том числе, с учетом существования технологического разброса критических токов джозефсоновских элементов. Выполнен анализ линейности отклика напряжения дифференциальной ячейки в области многих параметров, показано, что линейность отклика такой ячейки может достигать значения 100 дБ.

Предложен и обоснован способ эффективной компенсации негативного влияния нагрузки, позволяющий почти полностью компенсировать влияние импеданса нагрузки, превышающего импеданс плеч СКР в 20...15 раз.

Разработаны общие подходы к техническому решению согласования активных устройств на основе СКР с антенно-волноводным трактом и устройствами оцифровки сигналов. Наиболее оптимальное для аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и максимально невозмущающее для СКР сопряжение может быть достигнуто с использованием сверхпроводникового трансформатора импедансов, интегрированного с широкополосным фильтром.

Китайским Партнером были разработаны алгоритмы численных расчетов фильтров и согласующих элементов на основе тонких пленок высокотемпературных сверхпроводников – ВТСП. Рассчитан широкополосный полосовой фильтр, состоящий из 12 резонаторов на основе тонких пленок ВТСП, с центральной частотой 1,455 ГГц для использования в широкополосных приемных системах. Выполнена оптимизация технологических режимов формирования пленочных структур на основе ВТСП $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ и создана технология формирования пленочных структур $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ на подложках MgO с характеристиками, сравнимыми с теми, которые достигаются на более дорогостоящих подложках $LaAlO_3$, что в перспективе позволит снизить стоимость создаваемых устройств.

При выполнении работ второго (текущего) этапа в первом квартале 2015 года были получены следующие результаты:

Разработана методика трехмерного численного моделирования сверхпроводниковых тонкопленочных микро и нано структур в поле электромагнитной волны. Развита методика выполнения трехмерного моделирования электромагнитного поля и токов в условиях, когда существуют три сильно отличающиеся характерных масштаба (размер области моделирования Z (больше или порядка длины падающей электромагнитной волны $\lambda = 3 - 30$ см); размер

тонкопленочного объекта $D = 10 - 100$ мкм; и толщина пленок $d = 100 - 300$ нм).

В результате выполнения трехмерного численного моделирования были изучены распределения экранирующих токов в сверхпроводниковых объектах, присущие разным фазам осцилляции электромагнитного поля волны. Эти данные крайне необходимы для создания правильной конструкции и оптимальной топологии сверхпроводящих квантовых ячеек и устройств на их основе.

Выполнен расчет характеристик преобразования магнитной компоненты высокочастотной волны в выходное напряжение квантовой ячейки с использованием результатов трехмерного численного моделирования электромагнитного поля в численном моделировании джозефсоновских цепей. Показано, что выходной сигнал формируется под действием магнитной компоненты волны аналогично низкочастотному магнитному полю. Влияние электрической компоненты волны, связанное с индицированием поверхностных зарядов проявляется через размерный эффект. Этот эффект отвечает за нарушение симметрии распределения магнитного потока вдоль цепочки джозефсоновских переходов квантовой ячейки и тем самым ограничивает максимально достижимую величину линейности характеристик многоконтурных квантовых ячеек.

Выполнен расчет приемной диаграммы направленности сверхпроводящей квантовой ячейки с использованием модельной трехслойной структуры. Приемная диаграмма направленности активной электрически малой антенны бестрансформаторного типа на основе решетки из одинаково ориентированных квантовых ячеек повторяет диаграмму направленности одной ячейки. В случае сверхпроводящей активной антенны (на основе квантовой решетки) трансформаторного типа диаграмма направленности определяется контуром сверхпроводящего трансформатора и, таким образом, фактически совпадает с диаграммой направленности пассивной электрически малой антенны магнитного типа (витка).

На основании полученных ранее теоретических результатов были разработаны топологии сверхпроводящих квантовых ячеек, сверхпроводящих квантовых решеток (СКР) и прототипов активных электрически малых антенн (ЭМА), предназначенные для их реализации с использованием многослойной тонкопленочной ниобиевой технологии с плотностью критического тока джозефсоновских переходов $4,5$ кА/см².

Изготовлены экспериментальные образцы сверхпроводящих квантовых решеток (СКР) и прототипов активных электрически малых антенн на основе СКР с использованием многослойной тонкопленочной ниобиевой технологии. Сверхпроводниковые интегральные схемы сформированы на кремниевых подложках размером 5×5 мм².

Разработаны Программа и методики экспериментального исследования сверхпроводящих квантовых решеток (СКР) и прототипов активных электрически малых антенн (ЭМА), позволя-

ющие осуществлять необходимые экспериментальные исследования характеристик и параметров сверхпроводящих квантовых решеток и прототипов активных электрически малых антенн.

Проведено экспериментальное исследование сверхпроводящих квантовых решеток (СКР) и прототипов активных электрически малых антенн (ЭМА), созданных с использованием ниобиевой тонкопленочной технологии. Изучены вольт-амперные характеристики (ВАХ) и характеристики отклика выходного напряжения на магнитный сигнал. Получены размах отклика, достигающий 60 мВ, и крутизна преобразования магнитного поля в напряжение 6,5 мВ/мкА. Это дает оценку чувствительности антенны на уровне $3 \cdot 10^{-14} / \sqrt{\text{Гц}}$. Достигнута линейность преобразования на уровне 70 дБ.

Китайским партнер были получены следующие результаты: (i) разработана топологии фильтров и согласующих элементов на основании результатов численного моделирования; (ii) изготовлены фильтры и согласующие элементы на основе тонких пленок высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП); (iii) разработана программа и методики экспериментального изучения характеристик сверхпроводящих фильтров и согласующих элементов; (iv) выполнено экспериментальное изучение характеристик сверхпроводящих фильтров и согласующих элементов; (v) проведен анализ полноты решения данной задачи.

Все задачи этапа проекта выполнены в полном объеме.

Полученные на данном этапе работ научные результаты полностью соответствуют ожидаемым результатам или их превосходят, что позволяет с уверенностью говорить о перспективности продолжения работ по проекту.

3 Охраноспособные результаты интеллектуальной деятельности (РИД), полученные в рамках прикладного научного исследования и экспериментальной разработки

На данном этапе работ не предусмотрено получение охраноспособных результатов интеллектуальной деятельности.

4 Назначение и область применения результатов проекта

Выполняемые прикладные научные исследования являются поисковыми, направленными на разработку физических основ построения сверхпроводниковых электронных устройств для широкополосных приемных систем с прямой оцифровкой сигналов.

Результаты данных исследований будут предназначены для проведения на их основе дальнейших прикладных разработок, направленных на создание широкополосных сверхпроводниковых приемных систем с прямой оцифровкой сигналов для развития на их основе новых технологий приема, обработки и защиты информации. Такие технологии будут основываться на широкополосном приеме большого числа сигналов от различных источников и последующей параллельной обработке сигналов (разделение сигналов и их дальнейшая обработка, шифровка и дешифровка, запоминание) с использованием высокопроизводительной ЭВМ общего назначения при помощи соответствующих программных средств.

5 Эффекты от внедрения результатов проекта

Разработка технологии приема большого числа сигналов от различных источников и последующей параллельной обработке сигналов крайне востребованна в настоящее время, и результаты исследования смогут найти широкое применение в разных системах беспроводной связи и мобильной связи:

- в базовых станциях мобильной связи для увеличения их производительности и «пропускной» способности в связи с ростом числа абонентов,
- в системах беспроводной связи для одновременной передачи контента различного типа,
- в системах, реализующих технологии удаленного доступа к вычислительным центрам,
- в базовых станциях систем, реализующих облачные технологии хранения и обработки информации,
- в системах, реализующих новые технологии защиты информации посредством программно-определяемой связи, в рамках которой частота и тип кодировки радиосигнала устанавливается динамически в широкой полосе частот, условно, от 0 до 10 ГГц.

6 Формы и объемы коммерциализации результатов проекта

Коммерциализация результатов не предусмотрена проектом.

7 Наличие соисполнителей

Соисполнители по проекту отсутствуют.