

**Резюме проекта (ПНИР), выполняемого в рамках ФЦП
«Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития
научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 год»
по этапу №1 (28 ноября 2014 – 31 декабря 2014)**

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 данном этапе выполнения научных исследований за счет средств субсидии были получены следующие результаты:

- выполнен аналитический обзор современной научно-технической, нормативной, методической литературы, затрагивающей научно-техническую проблему, исследуемую в рамках научных исследований, в том числе обзор научных информационных источников: статьи в ведущих зарубежных и (или) российских научных журналах, монографии и (или) патенты);
- проведены патентные исследования в соответствии с ГОСТ 15.011-96;
- обоснован выбор направления исследований;
- разработаны физические основы построения аналоговых устройств с высокой линейностью характеристик и большим динамическим диапазоном;
- разработаны физические основы построения активных электрически малых антенн

(ЭМА) на основе сверхпроводящих квантовых решеток (СКР);

- рассчитаны характеристики сверхпроводящих квантовых ячеек и оптимизация параметров ячеек для достижения наибольшей линейности отклика напряжения.
- изучено влияние нагрузки на характеристики сверхпроводящих квантовых решеток (СКР) и активных электрически малых антенн (ЭМА) на их основе;
- разработаны технические решения согласования активных устройств на основе СКР с антенно-волноводным трактом и устройствами оцифровки сигналов.

За счет средств иностранного партнера на данном этапе научных исследований были получены следующие результаты:

- разработаны алгоритмы численных расчетов фильтров и согласующих элементов на основе тонких пленок сверхпроводников, отвечающих задачам Проекта.
- рассчитаны фильтры и согласующие элементы на основе тонких пленок сверхпроводников с заданными для целей Проекта характеристиками.
- оптимизированы технологические режимы формирования пленочных структур на основе высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) с характеристиками, обеспечивающими создание пассивных устройств с заданными для целей Проекта параметрами, на оборудовании иностранного партнера.

В рамках выполнения аналитического обзора современной научно-технической литературы было проанализировано более 100 источников, включая статьи в ведущих зарубежных и российских научных журналах, монографии и патенты; затрагивающих решаемую научно-техническую проблему.

Проведенными патентными исследованиям установлено, что в проанализированных источниках не найдено сведений о наличии завершенных исследований и конструкционных реализаций устройств, которые могли бы составить основу для создания активных сверхпроводниковых электронных устройства с большим динамическим диапазоном линейного преобразования сигнала для широкополосных приемных систем с прямой оцифровкой сигналов. Патентоспособность результатов настоящего прикладного научного исследования следует оценить как крайне высокую.

При проведении обоснования выбора направления исследований основным направлением 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. Для решения поставленных задач необходимо выполнение детального анализа свойств сверхпроводящих квантовых ячеек, поскольку характеристики квантовых яче-

ек лежат в основе интегральных характеристик СКР и определяют достижимые параметры и предельные характеристики устройств на их основе.

В рамках разработки физических основ построения аналоговых устройств с высокой линейностью характеристик и большим динамическим диапазоном сформулированы подходы к достижению требуемой линейности, динамического диапазона и импеданса устройств на основе СКР. 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. В обоснование необходимости перехода к многоэлементным джозефсоновским структурам положены выполненные сравнительные численные оценки достижимых характеристик устройств на основе одиночных джозефсоновских переходов.

При изучении физических основ построения активных электрически малых антенн (ЭМА) на основе сверхпроводящих квантовых решеток рассмотрены возможные реализации активных ЭМА трансформаторного типа на основе СКР, ячейки которой интегрированы со сверхпроводящими трансформаторами магнитного потока, а также бестрансформаторные активные ЭМА. Проведен сравнительный анализ характеристик таких ЭМА. Показано, что бестрансформаторная конструкция ЭМА позволяет достигать более высокого динамического диапазона, который для такой антенны растет пропорционально линейному размеру чипа, на котором реализована ЭМА, в то время как для трансформаторной ЭМА динамический диапазон увеличивается только как корень квадратный из линейного размера чипа.

Выполнено аналитическое рассмотрение и численное моделирование сигнальных и шумовых характеристик сверхпроводящих квантовых ячеек двух типов: (i) би-сквид 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. Выполнено аналитическое рассмотрение характеристик идеализированной дифференциальной ячейки в пределе пренебрежимо малых индуктивностей связи джозефсоновских элементов в плечах ячейки. Выполнено численное моделирование практической дифференциальной ячейки с конечной величиной индуктивностей связи джозефсоновских элементов. Проведен анализ влияния радиуса взаимодействия джозефсоновских элементов на характеристики дифференциальной ячейки. Численно решена оптимизационная задача на параметры ячейки и параметры токовых и магнитных смещений. Выполнен численный анализ линейности отклика напряжения дифференциальной ячейки в области многих параметров, показано, что линейность отклика такой ячейки может достигать значения 100 дБ.

Выполнено изучение влияния нагрузки на характеристики сверхпроводящих квантовых решеток (СКР) и активных электрически малых антенн (ЭМА) на их основе. В силу того, что СКР является активным устройством в виде двухполюсника, подключаемая нагрузка изменяет динамически питание СКР и тем самым существенно снижает линейность характеристик. Предложен и обоснован посредством численного моделирования 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. Условия оптимального сопряжения рассматриваемых устройств с нагрузкой диаметрально отличается от стандартного условия согласования пассивного устройства, например пассивной антенны – равенству импедансов устройства и нагрузки, выполнение которого необходимо для достижения максимальной мощности, отдаваемой в нагрузку. В случае рассматриваемых активных устройств на основе СКР, отдаваемая в нагрузку мощность обеспечивается источником тока питания СКР (не является мощностью, полученной от входного электромагнитного сигнала). Разработана и обоснована последовательность конструирования устройств на основе СКР, начиная от выбора (i) технологии изготовления сверхпроводниковых интегральных схем, (ii) параметров квантовых ячеек, конфигурации СКР на одном или нескольких чипах и заканчивая сопряжением СКР–устройства со входными цепями сверхпроводникового аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Наиболее оптимальное для 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. Общая схема расчетов базируется на сочетании предложенного метода оценки матрицы связи с численным моделированием топологии резонаторов и общей структуры фильтра в программном комплексе Sonnet.

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 $YBa_2Cu_3O_{7-x}$. 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.

Все задачи этапа проекта выполнены в полном объеме. Достигнуты соответствующие требованиям Соглашения о субсидии значения программных индикаторов за отчетный период.

Полученные на данном этапе работ результаты полностью соответствуют или превосходят ожидаемые результаты, 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.