

На правах рукописи



КАЛАШНИКОВ Константин Владимирович

КРИОГЕННЫЙ ГАРМОНИЧЕСКИЙ ФАЗОВЫЙ ДЕТЕКТОР И СИСТЕМА
ФАЗОВОЙ АУТОПОДСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ НА ЕГО ОСНОВЕ

Специальность 01.04.03 – «Радиофизика»

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

МОСКВА – 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова Российской академии наук (ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН), г. Москва

Научный руководитель: **Кошелец** Валерий Павлович,
доктор физико-математических наук,
профессор

Официальные оппоненты: **Гольцман** Григорий Наумович,
доктор физико-математических наук,
профессор, заведующий кафедрой общей и
экспериментальной физики факультета
физики и информационных технологий
Московского педагогического
государственного университета

Соловьев Игорь Игоревич,
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник отдела
микроэлектроники НИИЯФ имени
Д.В. Скобельцына МГУ имени
М.В. Ломоносова.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт прикладной
физики Российской академии наук (г. Нижний
Новгород)

Защита состоится «19» декабря 2014 г. в 10 часов на заседании
диссертационного совета Д 002.231.02 при ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН
по адресу: 125009, Москва, ГСП-9, ул. Моховая, д.11, корп.7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте
ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН <http://www.cplire.ru/rus/dissertations.html>.

Автореферат разослан «__» _____ 2014 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физико-математических наук



А.А. Потапов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

В последнее десятилетие активно развивается такое направление радиофизики, как прием и обработка сигналов терагерцового диапазона (300 ГГц – 3 ТГц). Сложность освоения данного частотного диапазона обусловлена его промежуточным положением между оптической и СВЧ спектральной областью; в терагерцовом диапазоне плохо работают как радиофизические, так и оптические методы генерации и приема волн. В связи с этим идет активное исследование новых типов генераторов и детекторов, работоспособных в субТГц диапазоне частот.

Одним из самых перспективных генераторов ТГц излучения является сверхпроводниковый генератор, основанный на длинном джозефсоновском переходе (ДДП). Такой генератор на основе пленок ниобия обладает широким диапазоном перестройки (250 – 700 ГГц) и выходной мощностью, достаточной для накачки СИС-смесителя (около 1 мкВт); кроме того, может быть интегрирован на одну микросхему со смесительными элементами. В ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН создан сверхпроводниковый интегральный приемник с рабочим диапазоном 450-750 ГГц, в котором все элементы – сверхпроводниковый генератор гетеродина на основе ДДП, СИС-смеситель с приемной антенной и гармонический смеситель для фазовой стабилизации СГГ расположены на одной микросхеме. Уникальные характеристики СИП (высокая чувствительность, низкая шумовая температура, широкий диапазон перестройки) позволили успешно использовать его в качестве бортового спектрометра в составе международной миссии TELIS по исследованию спектральных линий некоторых атмосферных газов.

Спектральное разрешение любого гетеродинного приемника, главным образом, определяется формой линии генерации гетеродина. Известно, что форма линии излучения ДДП близка к лоренцевской кривой, причем ширина

линии на полувысоте (-3 дБ по мощности) может варьироваться в диапазоне от сотен килогерц до нескольких десятков мегагерц. Для достижения высокого спектрального разрешения приемника спектр гетеродина должен иметь форму, близкую к дельта-функции. С этой целью ДДП синхронизируется с высокостабильным опорным синтезатором с помощью полупроводниковой системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), находящейся вне криообъема при комнатной температуре (отсюда условное название «комнатная система ФАПЧ»). Ширина полосы такой системы ограничена временными задержками в петле обратной связи и составляет около 10 МГц.

Разработка СИП для частот 1 ТГц и выше приводит к необходимости использования новых типов ДДП (например, на основе структур $\text{NbN}/\text{AlN}/\text{NbN}$ и $\text{NbN}/\text{MgO}/\text{NbN}$) с большими щелевыми напряжениями и, соответственно, с большей максимально возможной частотой генерации. Ожидается, что большие поверхностные потери в этих структурах приведут к тому, что ширина линии генерации такого гетеродина значительно превысит 10 МГц. Такую линию уже невозможно эффективно синхронизировать комнатной системой ФАПЧ. Таким образом, возникает задача создания системы синхронизации с шириной полосы в несколько десятков мегагерц. Это требует значительного сокращения задержек в петле обратной связи. Поскольку скорость распространения сигнала ограничена скоростью света, достижение малых задержек требует максимально компактного расположения всех элементов ФАПЧ, вплоть до интеграции их в одно устройство. Поскольку полупроводниковые приборы при гелиевых температурах не работоспособны, использование сверхпроводниковых структур, в частности, туннельных переходов сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник выглядит перспективным для построения полностью криогенной интегральной системы ФАПЧ.

Использование СИП в задачах радиоинтерферометрии требует низкого уровня фазовых шумов ДДП. Так, например, оценки показывают, что для

интерферометра проекта Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) с базой около 15 км и рабочей частотой гетеродина 600 ГГц среднеквадратичный фазовый шум не должен превышать 75 фс. Для достижения такого уровня шума необходимо синхронизировать более 95 % мощности излучения гетеродина, что может быть реализовано с помощью систем ФАПЧ с полосой более 50 МГц. Поэтому задачи интерферометрии также требуют создания более эффективных систем стабилизации ДДП.

Среди важных проблем развития идеи СИП также стоит задача создания многоэлементного матричного приемника. Одновременная работа нескольких генераторов гетеродина предполагает создание отдельной системы ФАПЧ для каждого из ДДП, что, при использовании комнатной системы ФАПЧ, значительно усложняет и удорожает весь матричный приемник. Следовательно, и здесь мы приходим к задаче создания более простой и компактной системы синхронизации с полосой регулирования в несколько десятком мегагерц.

Ранее уже была предпринята попытка создания полностью криогенной системы ФАПЧ для СГГ, в которой субТГц сигнал генератора сначала понижался на гармоническом СИС-смесителе до промежуточной частоты 4 ГГц. Затем ПЧ сигнал усиливался холодным НЕМТ усилителем и сравнивался с сигналом опорного синтезатора на фазовом детекторе, роль которого выполнял туннельный СИС-переход. Сигнал обратной связи снова усиливался еще одним НЕМТ усилителем и прикладывался к управляющему электроду СГГ, меняя тем самым его мгновенную частоту.

Однако, существенным недостатком данной системы является необходимость использования НЕМТ усилителей в петле обратной связи, которые имеют значительные размеры и тепловыделение и не позволяют расположить всю систему ФАПЧ достаточно компактно и реализовать полосу синхронизации более 40 МГц. Естественным продолжением идеи криогенной системы ФАПЧ является сокращение петли обратной связи за счет

объединения функций гармонического смесителя и фазового детектора в одном элементе. Исследованию такого элемента, его свойств и режимов работы, а также созданию и оптимизации сверхширокополосной системы ФАПЧ на его основе и посвящена данная работа.

Цели работы

Основными целями данной диссертационной работы является:

- Расширение базы сверхпроводниковой микроэлектроники за счет использования туннельного СИС-перехода в новом функциональном качестве криогенного гармонического фазового детектора (КГФД).
- Исследование возможности создания интегральной криогенной системы ФАПЧ для СИП, в которой все элементы петли обратной связи находятся в непосредственной близости от сверхпроводникового генератора гетеродина.
- Численное моделирование системы ФАПЧ, определение необходимых параметров системы для реализации ее полосы синхронизации более 50 МГц.
- Экспериментальная реализация системы ФАПЧ с шириной полосы синхронизации более 50 МГц, исследование ее свойств. Сравнение качества синхронизации (спектральное качество, фазовые шумы, временная стабильность), достигаемого с помощью реализованной в работе и традиционной систем ФАПЧ.
- Исследование мощностных характеристик КГФД в зависимости от его параметров и режимов смещения (квазичастичный и джозефсоновский), оптимизация системы ФАПЧ на основе КГФД.

Научная новизна

- Предложена идея функционального объединения фазового детектора и гармонического смесителя в одном элементе на основе туннельного СИС-перехода и создания на его основе системы фазовой автоподстройки частоты для сверхпроводникового генератора гетеродина.
- Впервые предложена концепция системы ФАПЧ для СГГ, в которой все элементы цепи обратной связи находятся в непосредственной близости от криогенного генератора. Изучена возможность создания интегральной криогенной системы ФАПЧ.
- Исследованы джозефсоновский и квазичастичный режимы смешения СИС-перехода, проведено сравнение эффективности синхронизации ДДП системой ФАПЧ на основе гармонического фазового детектора в данных режимах, показано преимущество первого из них.

Практическая ценность работы

- Апробирована идея создания системы ФАПЧ для СГГ на основе криогенного гармонического фазового детектора, данная концепция защищена патентом РФ. Концепция КГФД может найти свое применение при создании сверхширокополосных систем синхронизации для различных криогенных генераторов терагерцового диапазона, таких как квантовые каскадные лазеры, меза-структуры BiSCCO, а также для использования СГГ в задачах радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой и создания матричного приемника на его основе.
- Предложен способ обнаружения факта синхронизации криогенного терагерцового генератора к опорному синтезатору и оценки качества синхронизации по низкочастотному отклику КГФД без непосредственного наблюдения за спектром генератора.
- Полоса синхронизации системы ФАПЧ для СГГ расширена до 70 МГц, что позволяет эффективно (до 90 % излучаемой генератором мощности)

синхронизовать широкие (более 10 МГц) линии излучения, чего невозможно достичь при использовании традиционной полупроводниковой системы ФАПЧ.

Положения, выносимые на защиту

1. Туннельный СИС-переход может одновременно выполнять функции как гармонического смесителя, так и фазового детектора при работе в составе системы фазовой автоподстройки частоты субТГц криогенного генератора.
2. Криогенный гармонический фазовый детектор может быть использован для создания интегральной системы фазовой автоподстройки частоты сверхпроводникового генератора гетеродина с шириной полосы синхронизации 70 МГц. Такая система способна синхронизировать 92 % излучаемой гетеродином мощности при ширине автономной линии в 10 МГц.
3. Отклик КГФД по постоянному току при малой отстройке частоты генератора от точки синхронизации составляет около 20 мкВ и позволяет оценить качество синхронизации без непосредственного наблюдения за спектром генератора.
4. В джозефсоновском режиме смещения КГФД реализуется большая величина как сигнала (на 7.5 дБ в лучшей рабочей точке), так и отношения сигнал/шум (на 4.5 дБ), нежели в квазичастичном.

Личный вклад автора

- Проведено теоретическое исследование зависимости выходного сигнала гармонического смесителя от параметров приложенных сигналов и постоянного напряжения смещения, по результатам исследования предложены рекомендации по выбору оптимальных режимов работы гармонического смесителя.

- Проведены эксперименты по измерению выходного сигнала гармонического СИС-смесителя в случае большого номера гармоники ($n = 20 - 30$).
- Произведено моделирование системы ФАПЧ в среде Simulink, на основе данной модели изучено поведение низкочастотного отклика гармонического фазового детектора для разных параметров системы ФАПЧ.
- Предложена концепция криогенного гармонического фазового детектора (КГФД), собрана криогенная система ФАПЧ на основе КГФД, измерены спектры и фазовые шумы длинного джозефсоновского перехода, синхронизированного с помощью такой системы.
- Создана экспериментальная установка типа «зонд-вставка» для изучения высокочастотных свойств образцов КГФД. С ее помощью были экспериментально исследованы джозефсоновский и квазичастичный режимы работы КГФД.

Достоверность полученных результатов

Достоверность полученных результатов подтверждена использованием широко распространенных пакетов компьютерного моделирования, проверкой компьютерных моделей экспериментальным исследованием на большом количестве образцов, а также сравнением их с теоретическими расчетами. Достоверность результатов подтверждена их признанием научной общественностью при обсуждениях на научных семинарах, конференциях, а также положительными рецензиями статей при публикации результатов в научных журналах.

Апробация работы

Результаты представленных в диссертации исследований докладывались на ведущих международных конференциях в области сверхпроводниковой электроники:

- International Symposium on Space Terahertz Technology (ISSTT-2010, -2014);
- Superconductivity Centennial Conference "EUCAS-ISEC-ICMC 2011"
- International Symposium "Nanophysics & Nanoelectronics" (Nanosymp '11, '12, '14)
- European Conference on Applied Superconductivity (EuCAS-2013);
а также трижды представлялись на конкурсах молодых ученых им. И.В. Анисимкина в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

Публикации

Основные результаты проведённых исследований опубликованы в **20** работах, в том числе 5 статей – в журналах, входящих в Перечень российских рецензируемых изданий, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, 1 статья – зарубежном рецензируемом журнале, 12 докладов на международных и российских конференциях с публикацией тезисов, 1 глава в монографии и 1 патент РФ.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка публикаций по теме диссертации и списка цитируемой литературы. Работа содержит 96 страниц, 40 рисунков, 1 таблицу и список цитируемой литературы из 84 работ.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В главе 1 (введении) представлен обзор направлений практического и научного использования ТГц излучения. Наиболее чувствительными детекторами излучения для частот до 1.2 ТГц является туннельный контакт сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник на основе пленок ниобия, который часто используется в гетеродинах в качестве смесительного

элемента. В главе описана концепция сверхпроводникового интегрального приемника (СИП), которая заключается в объединении на одной микросхеме малошумящего СИС-смесителя с приемной антенной, сверхпроводникового генератора гетеродина (СГГ) на основе длинного джозефсоновского перехода (ДДП), гармонического СИС-смесителя для системы фазовой автоподстройки частоты СГГ и согласующих структур между этими элементами. Фазовая синхронизация СГГ с опорным синтезатором осуществляется за счет использования полупроводниковой системы ФАПЧ, обладающей полосой синхронизации в 12 МГц.

Рассмотрены основные направления развития концепции СИП, требующих существенное улучшение ряда параметров приемник. Показано, что использование СИП в задачах радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой, повышение рабочего частотного диапазона приемника за счет использования новых типов материалов, а также создание матричного приемника на основе СИП требуют создания широкополосной (более 50 МГц), простой и компактной (без использования усилителей в петле обратной связи) системы ФАПЧ для СГГ.

Дан обзор существующих систем ФАПЧ для различных криогенных генераторов терагерцового диапазона, обсуждены их преимущества и недостатки. На основе приведенного обзора сформулирован основной недостаток таких систем, ограничивающих полосу синхронизации несколькими МГц, – большая длина петли обратной связи и связанная с этим временная задержка сигнала ошибки. В работе предложена идея функционального объединения гармонического смесителя и фазового детектора в одном элементе, которая позволяет упростить всю систему, отказаться от усилителей в тракте ПЧ, уменьшить длину петли до минимума и, тем самым, расширить полосу синхронизации системы ФАПЧ.

В заключение главы сформулирована постановка задачи и цели диссертационной работы.

Глава 2 посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию смесительных свойств туннельного СИС-перехода в режиме гармонического смесителя, а именно его мощностных характеристик, то есть зависимости мощности выходного ПЧ сигнала от параметров приложенных сигналов.

В начале главы дан обзор теоретических работ, посвященных вычислению отклика СИС-перехода на бигармоническое воздействие. Предложен упрощенный метод вычисления ПЧ сигнала при приложении к СИС-переходу двух сигналов (ВЧ и опорного синтезатора) в случае, когда частота первого из них близка к кратной частоте второго, т.е. $f_{\text{ПЧ}} = f_{\text{ВЧ}} - kf_{\text{синт}}$. На основе данного метода рассчитаны зависимости выходного сигнала гармонического смесителя от постоянного напряжения смещения на переходе и мощности сигнала опорного синтезатора. Показано, что при нулевом напряжении смещения при нечетных номерах гармоники k мощность сигнала ПЧ обращается в ноль, а при четных наблюдаются ее максимумы.

Проведено экспериментальное исследование туннельного СИС-перехода в режиме гармонического смешения (образцы Nb/AlO_x/Nb с площадью 1 мкм², нормальным сопротивлением около 25 Ом, щелевым напряжением 2.8 мВ). Описана экспериментальная установка, позволяющая задавать на СИС-переход ВЧ сигнал порядка 600 ГГц от внешнего генератора и сигнал опорного синтезатора частоты около 20 ГГц. Измерены зависимости выходного сигнала гармонического смесителя от мощностей входных сигналов и напряжения смещения; показано, что максимальная мощность выходного сигнала ПЧ в условиях проведенного эксперимента составляет около -85 дБм.

Было проведено сравнение экспериментально измеренных мощностных характеристик гармонического смесителя в квазичастичном режиме с расчетными, получено хорошее качественное совпадение (рис. 1).

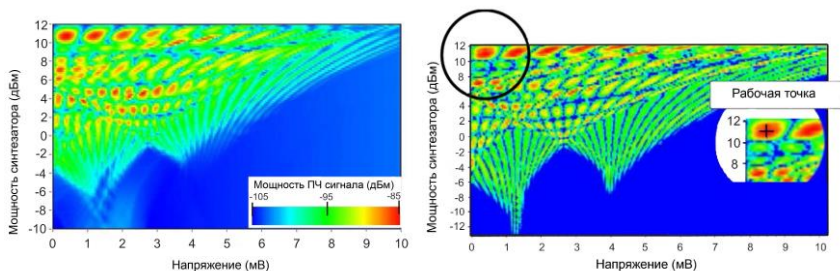


Рис. 1. Сравнение экспериментальной (слева) и расчетной (справа) зависимостей выходного сигнала гармонического смесителя от мощностей входных сигналов и напряжения смещения. Крестиком на вставке отмечена точка с максимальным сигналом ПЧ: $f_{ВЧ} = 635$ ГГц, $f_{сум} = 18$ ГГц, 35-ая гармоника.

Проведен анализ возможности функционального объединения гармонического смесителя и фазового детектора в одном элементе – криогенном гармоническом фазовом детекторе (КГФД). Поскольку дифференциальное сопротивление по току линии управления магнитным полем ДДП (R_d^{CL}) практически во всех режимах его работы больше дифференциального сопротивления по току смещения (R_d), то при создании системы ФАПЧ корректирующий сигнал ошибки эффективнее задавать именно в линию управления магнитным током.

Показано, что амплитуда сигнала ошибки КГФД может достигать единиц мкА, при этом характерное значения дифференциального сопротивления по току линии управления магнитным полем ДДП $R_d^{CL} = 20$ мОм. Из этого сделан вывод, что система ФАПЧ на основе СИС-перехода в качестве гармонического фазового детектора может быть эффективным элементом для реализации полосы ФАПЧ более 50 МГц.

В главе 3 рассмотрена численная модель систем ФАПЧ, в том числе и на основе КГФД, обсуждаются основные параметры и закономерности работы таких систем, определена максимально допустимая временная задержка сигнала в петле обратной связи. Установлено, что рассматриваемая модель адекватно описывает широкополосные системы ФАПЧ, а результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными и могут быть использованы для исследования свойств систем ФАПЧ. На численной модели продемонстрирована работоспособность идеи функционального объединения гармонического смесителя и фазового детектора в одном элементе.

Показано, что ширина полосы синхронизации определяется временными задержками в петле обратной связи. Проведенные оценки позволяют утверждать, что выходной мощности гармонического смесителя на туннельном СИС-переходе достаточно для использования его в качестве КГФД в системе ФАПЧ с полосой синхронизации в несколько десятков МГц.

Описана экспериментальная реализация сверхширокополосной системы ФАПЧ (рис. 2), в которой за счет объединения функций гармонического смесителя и фазового детектора в КГФД все элементы расположены в непосредственной близости от криогенного генератора, что открывает путь к созданию интегральной системы ФАПЧ для ДДП. В данной системе были достигнуты рекордные параметры – полоса синхронизации 70 МГц, задержка в петле обратной связи менее 4 нс. Показано, что при автономной ширине линии генерации ДДП 16.8 МГц реализованная система ФАПЧ способна синхронизовать до 84% мощности излучения (рис. 3).

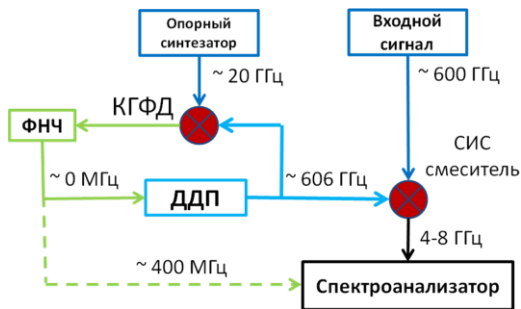


Рис. 2. Блок-схема экспериментальной реализации системы для синхронизации ДДП с помощью КГФД.

Проведено сравнение системы ФАПЧ на основе КГФД с аналогами – полупроводниковой системой ФАПЧ и криогенной системой, в которой СИС-переход использован в качестве традиционного фазового детектора, показано преимущество последней (рис. 4).

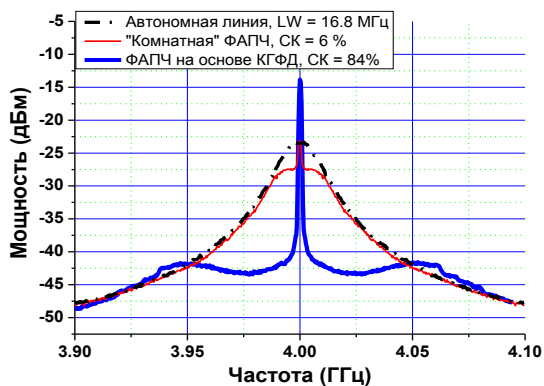


Рис. 3. Экспериментально измеренные спектры излучения ДДП. Автономная линия излучения (жирная кривая) и синхронизированная с помощью полупроводниковой системы ФАПЧ (тонкая кривая) и КГФД (штрихпунктирная кривая).

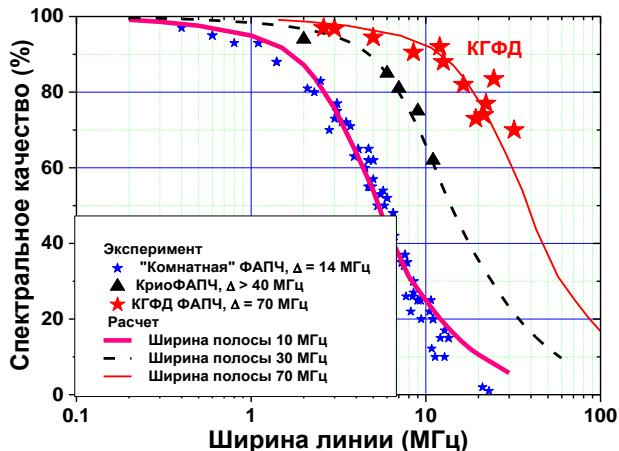


Рис. 4. Зависимости спектрального качества от автономной ширины линии для разных полос синхронизации: экспериментальные значения (точки) и теоретические зависимости (линии) [Pankratov et. al., J. Appl. Phys., 102(6), 063912, 2007].

Измерены фазовые шумы для ДДП, синхронизованного с помощью полупроводниковой и разрабатываемой систем ФАПЧ, показано преимущество последней в диапазоне 300 кГц - 20 МГц отстроек от несущей. Указаны преимущества системы ФАПЧ на основе КГФД над аналогами, обсуждаются также и ее недостатки.

Глава 4 посвящена исследованию способов наблюдения и оценки качества синхронизации в системе ФАПЧ на основе КГФД, а также изучению влияния параметров КГФД и режимов его работы на величину выходного сигнала КГДФ.

В начале главы обсуждается недостаток системы ФАПЧ на основе КГФД, связанный со сложностью наблюдения факта синхронизации криогенного

генератора и оценки ее качества. Рассмотрена возможность использования дополнительного гармонического СИС-смесителя для наблюдения за спектром генерации ДДП, обсуждены недостатки этого метода. Предложен метод обнаружения факта синхронизации ДДП, который заключается в измерении низкочастотного отклика КГФД при малом нарушении равенства $f_{\text{ДДП}} = n f_{\text{синт}}$.

Проведено численное моделирование такого отклика при малой отстройке генератора от точки синхронизации, изучена зависимость амплитуды отклика от коэффициента усиления в петле обратной связи. Экспериментально показано, что низкочастотный отклик КГФД при малой отстройке генератора от точки синхронизации составляет около 20 мкВ и позволяет оценить качество синхронизации без непосредственного наблюдения за спектром генератора.

Проанализирована экспериментальная зависимость амплитуды низкочастотного отклика КГФД от мощности сигнала синтезатора, показана возможность оценки эффективности работы данного СИС-перехода в качестве КГФД на основе его измерений в режиме гармонического смесителя.

Проведен анализ квазичастичного и джозефсоновского режимов смещения СИС-перехода. Описан эксперимент, позволяющий исследовать выходной сигнал гармонического смесителя в зависимости от параметров приложенных сигналов как при наличии критического тока, так и при подавленном магнитным полем эффекте Джозефсона. Показано, что в джозефсоновском режиме смещения гармонический смеситель на основе СИС-перехода реализуется большая величина сигнала (на 7.5 дБ в лучшей рабочей точке), а также отношения сигнал/шум (на 4.5 дБ). Таким образом, джозефсоновский режим является более предпочтительным при использовании СИС-перехода в качестве КГФД, его использование позволяет достигнуть большего значения спектрального качества синхронизации (рис. 5).

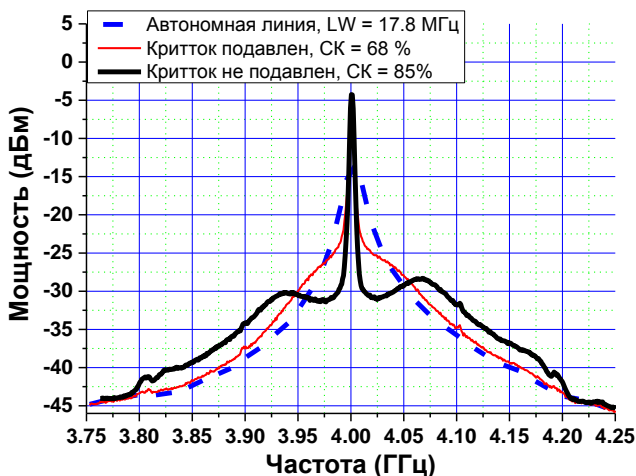


Рис. 5. Пониженные по частоте спектры излучения ДДП: автономная линия (пунктирная кривая) и синхронизированная с помощью КГФД, случаи подавленного критического тока (тонкая кривая, сигнала ошибки в петле недостаточно для эффективной синхронизации) и не подавленного критического тока (жирная кривая).

Описана экспериментальная установка типа зонд-вставка, позволяющая проводить ВЧ измерения без использования заливного криостата. С помощью этой установки была измерена максимальная выходная мощность СИС-переходов разных размеров.

Показано, что эффективность СИС-перехода в качестве КГФД практически не зависит от его размера, поскольку увеличение площади перехода ведет к росту выходной мощности перехода, но ухудшает его согласование с поглощающими эту мощность элементами. Сделан вывод о необходимости разработки и оптимизации трансформатора импеданса при подключении КГФД к контрольной линии ДДП для реализации максимально возможного сигнала обратной связи системы ФАПЧ на основе КГФД.

Обсуждается возможность дальнейшего повышения эффективности системы ФАПЧ за счет создания низкочастотных криогенных усилителей, которые могут быть интегрированы на одну микросхему с ДДП и КГФД.

В заключении перечислены основные результаты диссертации:

1. Предложена идея функционального объединения гармонического смесителя и фазового детектора в одном элементе криогенной электроники на основе туннельного СИС-перехода – криогенном гармоническом фазового детекторе.

2. Теоретически и экспериментально изучен гармонический смеситель на основе туннельного СИС-перехода. Создана экспериментальная установка типа «зонд-вставка», позволяющая измерять мощностные характеристики образцов КГФД без использования заливного криостата. Максимальный выходной сигнал для перехода площадью 3.2 мкм^2 составил около -75 дБм .

3. Исследованы квазичастичный и джозефсоновский режимы работы ГС на основе СИС-перехода; обнаружено, что последний является более предпочтительным при работе ГС в качестве КГФД. Показано, что при использовании джозефсоновского режима в лучшей рабочей точке отношение сигнал/шум возрастает на 4.5 дБ по сравнению с квазичастичным.

4. Построена математическая модель системы фазовой автоподстройки, которая позволяет получить зависимость ширины полосы синхронизации от задержки в петле обратной связи, зависимость низкочастотного отклика фазового детектора от отстройки генератора от точки синхронизации; предложен метод обнаружения факта синхронизации. Оценена необходимая величина выходного сигнала фазового детектора для оптимальной синхронизации ДДП.

5. Экспериментально реализована система ФАПЧ на основе КГФД, в которой все ее элементы расположены в непосредственной близости с криогенным генератором. Данная система обладает шириной полосы синхронизации около 70 МГц и по сравнению с традиционной полупроводниковой системой ФАПЧ позволяет синхронизовать в 7 раз более широкие линии излучения ДДП с тем же спектральным качеством (процентом синхронизованной мощности излучения).

Результаты диссертации отражены в следующих публикациях:

- [A1]. **К.В. Калашников**, А.В. Худченко, «Теоретическое описание гармонического смесителя на туннельном переходе сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник», *Нелинейный мир*, №2, т. 8, с. 121-123, 2010.
- [A2]. **К.В. Калашников**, А.В. Худченко, А.М. Барышев, В.П. Кошелец, «Гармонический смеситель на туннельном переходе сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник», *Радиотехника и электроника*, т. 56, № 6, с. 751-759, 2011.
- [A3]. **К.В. Калашников**, А.В. Худченко, В.П. Кошелец «Криогенный гармонический фазовый детектор», *Нелинейный мир*, № 2, т. 10., с. 125-126, 2012.
- [A4]. **К.В. Калашников**, А.В. Худченко, В.П. Кошелец, Криогенный фазовый детектор, *Известия РАН. Серия физическая* т. 77, № 1, с.33, 2013
- [A5]. **К.В. Калашников**, В.П. Кошелец «Исследование и оптимизация криогенного гармонического фазового детектора», *Нелинейный мир*, №2, т. 12. с. 13-15, 2014.
- [A6]. **Konstantin V. Kalashnikov**, Andrey V. Khudchenko, and Valery P. Koshelets Harmonic phase detector for phase locking of cryogenic terahertz oscillators, *Applied Physics Letters* v. 103, p. 102601, 2013.
- [A7]. **К.В. Калашников**, А.В. Худченко «Теоретическое описание гармонического смесителя на туннельном переходе сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник» *Труды 52-й научной конференции МФТИ «Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук»: Физическая и квантовая электроника*, т.2, стр. 122-125, 2009.
- [A8]. **Konstantin V. Kalashnikov**, Andrey V. Khudchenko, Pavel N. Dmitriev, Valery P. Koshelets, and Andrey M. Baryshev, “Phase-locking of Flux-Flow Oscillator by Harmonic Mixer based on SIS junction”, *21th International Symposium on Space Terahertz Technology, Oxford, Great Britain, 23-25 March 2010*, pp 464-467 (2010).

- [A9]. A.V. Khudchenko, **K.V. Kalashnikov**, V.P. Koshelets, P.N. Dmitriev, “Terahertz Flux-Flow Oscillator Phase-locked by Harmonic Mixer Based on SIS Junction”, *представлено на Международном Симпозиуме «Терагерцовое излучение: генерация и применение» (THz-Nsk-2010), г. Новосибирск, Россия, 26 июля -1 августа 2010.*
- [A10]. **K.V. Калашников**, А.В. Худченко, В.П. Кошелец, «Фазовая стабилизация криогенного перестраиваемого генератора», *представлено на 2-ой Международной научной конференции «Прикладная сверхпроводимость - 2011», Москва, 4 марта 2011.*
- [A11]. В.П. Кошелец, П.Н. Дмитриев, А.Б. Ермаков, **K.V. Калашников**, О.С. Киселев, Н.В. Кинев, Ю.С. Токпанов, М.Ю. Торгашин, Л.В. Филиппенко, А.В. Худченко, В.Л. Вакс, С.И. Приползин, «Сверхпроводниковые интегральные приемники ТГц диапазона: разработка и применения», *Труды XV международного симпозиума «Нанозфизика и наноэлектроника», 14-18 марта 2011 г., Нижний Новгород, стр. 11-14*
- [A12]. **K.V. Калашников**, А.В. Худченко, В.П. Кошелец «Фазовая синхронизация криогенного перестраиваемого генератора с помощью гармонического смесителя», *Труды 54-й научной конференции МФТИ «Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук»: Часть V. Физическая и квантовая электроника. Том 2., с. 85-87. — М.: МФТИ, 2011.*
- [A13]. В.П. Кошелец, А.Б. Ермаков, **K.V. Калашников**, О.С. Киселев, Н.В. Кинев, А.А. Мухортова, Ю.С. Токпанов, М.Ю. Торгашин, Л.В. Филиппенко, «Сверхпроводниковые интегральные приемника терагерцового диапазона» *доклад на 1-ой Национальной конференции по прикладной сверхпроводимости (НКПС-1), 6-8 декабря 2011, Москва.*
- [A14]. В.П. Кошелец, П.Н. Дмитриев, А.Б. Ермаков, **K.V. Калашников**, О.С. Киселев, Н.В. Кинев, Ю.С. Токпанов, М.Ю. Торгашин, Л.В. Филиппенко, А.В. Худченко, В.Л. Вакс, С.И. Приползин, «Сверхпроводниковые интегральные приемники

ТГц диапазона: разработка и применения», *представлено на XV Международном симпозиуме «Нанофизика и нанoeлектроника», 14-18 марта 2011, Нижний Новгород, Россия.*

- [A15]. **К.В. Калашников**, А.В. Худченко, В.П. Кошелец, «Криогенный фазовый детектор», *Труды XVI международного симпозиума «Нанофизика и нанoeлектроника», 12-16 марта 2012 г., Нижний Новгород.*
- [A16]. **Konstantin V. Kalashnikov**, Andrey V. Khudchenko, and Valery P. Koshelets “High-Harmonic Phase Detector based on SIS junction” 13th International Workshop "Cryogenic Nanodevices", Bjorkliden, Kiruna, Sweden, March 17-24, 2013
- [A17]. **К.В. Калашников**, В.П. Кошелец «Исследование и оптимизация криогенного гармонического фазового детектора», *Труды XVIII международного симпозиума «Нанофизика и нанoeлектроника», 10-14 марта 2014 г., Нижний Новгород.*
- [A18]. **Konstantin V. Kalashnikov**, Andrey V. Khudchenko, and Valery P. Koshelets “Development of Phase Lock Loop based on Harmonic Phase Detector”, *24th International Symposium on Space Terahertz Technology, Moscow, 26-30 April 2014.*
- [A19]. А.В. Худченко, В.П. Кошелец, **К.В. Калашников**, “Cryogenic Phase-locking System Based on SIS Tunnel Junction”; - *Chapter in the book “Nanoscience Frontiers - Fundamentals of Superconducting Electronics”, Springer Serie: Nanoscience and Technology, p. 297-313, August 2011).*
- [A20]. А.В. Худченко, **К.В. Калашников**, В.П. Кошелец. «Система стабилизации частоты криогенного генератора». Патент на изобретение №2450435, приоритет изобретения 1.03.2011.