

ФОРМА 1. ДАННЫЕ О ПРОЕКТЕ

1.1.1. Название проекта:

"Джозефсоновские переходы $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ в качестве когерентных ТГц генераторов"

1.1.2. Название проекта на английском языке:

$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ Intrinsic Josephson junctions as coherent THz emitters (KL 930/13-2)

1.2.1. Вид конкурса:

ННИО_a - Совместный конкурс с ННИО: инициативные

1.2.2. Область знания:

02 - ФИЗИКА И АСТРОНОМИЯ

1.3.1. Научная дисциплина - основной код:

02-410 Вакуумная и плазменная электроника, СВЧ-электроника

1.3.2. Научная дисциплина - дополнительные коды:

02-205 Нано- и микроструктуры

02-210 Низкие температуры и сверхпроводимость

1.4. Ключевые слова:

ТГц генератор, массивы джозефсоновских переходов, сверхпроводниковый интегральный приемник, спектральные характеристики, криогенная наноэлектроника

1.5. Аннотация:

Фундаментальной научной проблемой терагерцовой (ТГц) электроники является разработка новых типов генераторов и детекторов и создание на их основе практических устройств с уникальным набором параметров. В настоящее время существует целый ряд фундаментальных задач в радиоастрономии, экологии, лабораторной спектроскопии, медицинской диагностике, а также в системах контроля и специальной связи, для решения которых необходимо создание новых типов генераторов электромагнитного излучения в диапазоне частот от 0,3 до 10 ТГц. Такие генераторы должны обладать достаточно большой мощностью (порядка 10 мВт и выше), широким диапазоном непрерывной перестройки частоты, стабильностью и высоким спектральным качеством. Для решения этой фундаментальной проблемы предлагается использовать сразу несколько новых подходов, предложенных и уже апробированных участниками совместных исследований. В качестве ТГц генераторов будут использоваться естественные кристаллические структуры на основе массивов джозефсоновских переходов (МДП) в слоях высокотемпературного сверхпроводника $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ (BSCCO), впервые исследованных в этом качестве участниками проекта из Германии. Для реализации предельных параметров таких генераторов будет проведена интеграция отдельных ТГц элементов в единую микросхему, изготовленную современными методами нанотехнологии; такой подход был предложен и апробирован российскими участниками проекта для схем с использованием низкотемпературных сверхпроводников. Для детального исследования спектров излучения созданных в ходе выполнения проекта BSCCO генераторов будет использован уникальный интегральный сверхпроводниковый приемник со спектральным разрешением лучше 1 МГц. Полетный вариант такого приемника, разработанного российскими участниками в ходе предыдущих проектов, был успешно использован для исследования атмосферы Земли с борта высотного аэростата.

Перечислим три взаимосвязанные задачи данного проекта, направленного на разработку, исследование свойств и оптимизацию конструкции принципиально новых генераторов ТГц излучения. Первой задачей является исследование механизмов генерации в массивах джозефсоновских переходов для создания устройств с контролируемыми и воспроизводимыми параметрами, обеспечивающими требуемую комбинацию мощности, диапазона перестройки частоты и ширины линии излучения. Наличие уже апробированной программы для моделирования процессов в 3D массивах джозефсоновских переходов с учетом тепловых эффектов позволит проводить оперативное сравнение результатов эксперимента с расчетом. Второй задачей является исследование возможности создания матрицы из нескольких МДП для существенного увеличения мощности излучения, а также для уменьшения ширины линии излучения. Третьей задачей является демонстрация возможных практических приложений ТГц генераторов на основе МДП для задач спектроскопии и систем получения ТГц изображений. Ученые из Тюбингенского университета (Германия) имеют большой опыт в разработке и исследовании генераторов на основе МДП из BSCCO. Коллектив ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН разработал в последние годы целый ряд приемных устройств ТГц диапазона с уникальным набором параметров. Учитывая, что коллеги из Германии уже ведут проект DFG № KL 930/13-2, объединение усилий наших групп позволит провести разработку и измерение новых типов BSCCO генераторов, оптимизировать их конструкцию и режимы работы для целого ряда практических приложений.

- 1.6. Количество ученых - основных исполнителей:
10 (6 молодых)
- 1.7. Сроки выполнения:
2017-2019
- 1.8. Запрашиваемый объем финансирования на 2017 год (в руб.):
2700000

Участники проекта

	Фамилия, имя, отчество	Дата рождения	Ученая степень
1.	Артанов Антон Аркадьевич	05.10.1992	
2.	Дмитриев Павел Николаевич	20.11.1968	к.ф.-м-н.
3.	Калашников Константин Владимирович	15.05.1988	к.ф.-м-н.
4.	Кинев Николай Вадимович	07.06.1986	к.ф.-м-н.
5.	Киселев Олег Сергеевич	06.08.1984	к.ф.-м-н.
6.	Кошелец Валерий Павлович	14.02.1950	д.ф.-м-н.
7.	Парамонов Максим Евгеньевич	29.04.1990	
8.	Рудаков Кирилл Игоревич	17.05.1992	
9.	Филиппенко Людмила Викторовна	10.05.1964	к.ф.-м-н.
10.	Фоминский Михаил Юрьевич	05.02.1976	к.ф.-м-н.

ФОРМА 35. СОДЕРЖАНИЕ ИНИЦИАТИВНОГО ПРОЕКТА

35.1.1. Название проекта (единое для обеих сторон, на русском языке):

"Джозефсоновские переходы $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ в качестве когерентных ТГц генераторов"

35.1.2. Название проекта (единое для обеих сторон, на английском языке):

$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ Intrinsic Josephson junctions as coherent THz emitters

35.2. Фундаментальная научная проблема, на решение которой направлен проект:

Фундаментальной научной проблемой, на решение которой направлен проект, является разработка, исследование свойств и оптимизация конструкции принципиально новых генераторов терагерцового электромагнитного излучения на основе естественных массивов джозефсоновских переходов, образованных кристаллической структурой высокотемпературного сверхпроводника $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ (BSCCO). Конечной целью данного цикла исследований является создание сверхпроводниковых структур, изготовленных методами нанотехнологий и предназначенных для генерации и приема излучения в терагерцовом диапазоне, интеграция отдельных структур в единое устройство с уникальным набором параметров. В настоящее время существует целый ряд фундаментальных задач в радиоастрономии, экологии, лабораторной спектроскопии, медицинской диагностике, а также в системах контроля и специальной связи, для решения которых необходимо создание новых типов генераторов электромагнитного излучения в диапазоне частот от 0,3 до 10 ТГц. Такие генераторы должны обладать достаточно большой мощностью (порядка 10 мВт и выше), широким диапазоном непрерывной перестройки частоты, стабильностью и высоким спектральным качеством. Основной задачей проекта, выполняемого совместно с коллегами из Тюбингенского Университета (г. Тюбинген, Германия) при участии группы проф. Ванга (NIMS, Цукуба, Япония и RISE, Нанкин, Китай) является создание и исследование структур МДП на основе BSCCO.

35.3. Конкретная фундаментальная задача в рамках проблемы, на решение которой направлен проект:

Конкретной фундаментальной задачей данного проекта является комплексное исследование генераторов терагерцового электромагнитного излучения на основе естественных массивов джозефсоновских переходов (МДП), образованных кристаллической структурой высокотемпературного сверхпроводника $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ (BSCCO). Несмотря на многочисленные публикации о рекордных параметрах генераторов на основе BSCCO, как правило, эти параметры реализуются только для лучших образцов, которые практически невозможно повторить. До сих пор не решена задача реализации предельных параметров в одном устройстве; не существует адекватной модели для полного физического описания процессов, происходящих в таких системах при генерации ТГц излучения. Все эти проблемы становятся особенно заметными при создании матриц таких структур, которые необходимы для достижения требуемых значений мощности ТГц излучения; эти исследования до сих пор находятся в зачаточном состоянии. Для расширения диапазона спектральных исследований будет изучена возможность повышения частоты сверхпроводникового интегрального приемника и создания генераторов гетеродина с рабочими частотами выше 1 ТГц. Ниже подробно описаны три взаимосвязанные задачи данного проекта, который будет выполняться при тесном сотрудничестве российской и немецкой научных групп (группа университета г. Тюбинген, Германия и нашей команды из ИПЭ им В.А. Котельникова РАН).

Первой задачей является улучшение нашего понимания механизма генерации ТГц излучения в массивах джозефсоновских переходов для создания устройств с контролируемыми и воспроизводимыми параметрами, обеспечивающими требуемую комбинацию мощности, диапазона перестройки частоты и ширины линии излучения. Разрабатываемые модели (помимо физики эффекта Джозефсона) должны включать учет тепловых эффектов, а также эффектов взаимодействия с электромагнитным окружением (подложка, антенные структуры и т.д.). Группа проф. R. Kleiner разработала уникальную программу для расчета процессов в 3D массивах джозефсоновских переходов с различной геометрией; в этой программе решаются уравнения синус-Гордона при учете влияния тепла и электромагнитного окружения на процессы ТГц генерации. Наличие этой уже апробированной программы вычислений позволит проводить оперативное сравнение результатов эксперимента с расчетом. В рамках этой задачи будут исследована возможность управления параметрами генерации *in situ*. Одним из примеров реализации такого управления являются трехтерминальные устройства, предложенные авторами данной заявки. Еще одной возможностью (хотя и слишком сложной для практических устройств) является использование лазерного луча для воздействия на массив переходов. Использование должным образом ориентированных магнитных полей является третьей возможностью управления процессами генерации.

Второй задачей является исследование возможности использования нескольких МДП для существенного увеличения мощности излучения, а также для уменьшения ширины линии излучения. Лучшие одиночные МДП имеют выходную мощность ниже 30 мкВт, и это значение вряд ли может быть увеличено даже на порядок. Увеличение числа переходов в стеке до величин порядка 10000 осложнит и без того серьезную проблему перегрева (несмотря на специально разработанные и уже апробированные методики охлаждения). Кроме того, увеличение количества переходов в структуре повышает ее импеданс, что приводит к проблемам согласования МДП с внешней системой. Если же увеличивать боковые размеры МДП, то возникнут проблемы с однородностью монокристалла, кроме того, требуемый ток питания будет находиться в диапазоне единиц ампера; этот ток, протекая через находящуюся в несверхпроводящем состоянии область «горячего пятна», может просто расплавить образец. Поэтому единственной возможностью существенного увеличения генерируемой мощности является создание матриц из нескольких МДП, работающих синхронно. В литературе описаны два случая синхронизации нескольких МДП, однако прямых измерений ширины линии не проводилось, нет сообщений и о дальнейшем развитии этих результатов. В наших работах не наблюдалось фазовой синхронизации двух рядом расположенных МДП Z-типа, у которых не было общего базового электрода из BSCCO кристалла. В заявке предлагается продолжить эти исследования с использованием матриц МДП, изготовленных на общем базовом электроде из BSCCO кристалла. Толщина этого электрода должна быть достаточно малой, чтобы обеспечивать охлаждение МДП, но в тоже время достаточной для обеспечения взаимодействия с помощью поверхностных токов. Еще одним возможным вариантом является использование МДП структур, расположенных между двумя электродами из золота (GBG-структуры) в конфигурации с общим нижним электродом из золота для обеспечения гальванической связи.

Третьей задачей, которая не может быть реализована в полной мере без решения двух предыдущих задач, является демонстрация возможных практических приложений ТГц генераторов на основе BSCCO МДП для задач спектроскопии и систем получения ТГц изображений. Важной частью этого цикла работ будет дальнейшее развитие принципов построения интегральных сверхпроводниковых приемных систем, предложенных авторами данной заявки. Этот подход будет развиваться, в том числе, и с использованием устройств на основе ниобиевой технологии. Подробный план работ по каждой из задач представлен в разделе 35.5.

35.4. Предлагаемые методы и подходы к решению поставленных задач:

Предлагаемый проект органически соединяет компетенции и технические возможности участвующих в проекте коллективов, возглавляемых R. Kleiner (г. Тюбинген, Германия) и В.П. Кошельцом (ИРЭ им В.А. Котельникова РАН), при участии группы Н.В. Wang (NIMS, г. Цукуба, Япония и RISE, г. Нанкин, Китай). Большинство массивов джозефсоновских переходов на основе BSCCO кристаллов будет изготовлено в группе Ванга в Нанкине или Цукубе. Некоторые МДП будут дополнительно обработаны в Тюбингене с использованием методов электронной литографии и FIB травления. Исследуемые структуры будут изготовлены как в виде традиционных МДП на основании из BSCCO кристалла (меза-структуры), так и в виде МДП, включенных между электродами из золота (GBG структуры).

Тестирование и измерение электрических характеристик образцов будет проводиться во всех группах проекта, исследования МДП с помощью низкотемпературного лазерного микроскопа (LTSLM) будут проводиться в Тюбингене, а измерения спектров излучения МДП будут выполнены в Москве с помощью интегрального приемника, разработанного в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. В нашей группе также будут проведены спектроскопические исследования различных газов и исследования возможности фазовой синхронизации МДП.

Экспериментальные исследования будут проводиться параллельно с численными расчетами; наибольшим опытом в этой области обладает группа из Германии, которая уже имеет серьезные наработки в области математического моделирования генерации из BSCCO структур. Такие вычисления будут производиться при помощи программ расчёта на персональном компьютере, а также будут задействованы кластерные системы (многопроцессорные высокопроизводительные машины).

Проект объединяет работы по двум приоритетным направлениям науки и техники: создание и исследование принципиально новых элементов сверхпроводниковой СВЧ-электроники и разработка уникальных устройств для генерации сигналов терагерцового диапазона. В ходе предыдущих проектов РФФИ участниками проекта из России был предложен и экспериментально апробирован принципиально новый подход, основанный на интеграции отдельных сверхпроводниковых элементов с предельными параметрами в единое устройство, изготовленное методами микроэлектроники на одной микросхеме. На базе этого подхода был разработан прототип интегрального спектрометра с шумовой температурой, близкой к квантовому пределу hf/k , использованный для международного проекта ТЕЛИС по мониторингу атмосферы Земли с борта высотного аэростата (шумовая температура приемника порядка 150 К в частотном диапазоне 450 – 650 ГГц и частотное разрешение лучше 2 МГц). Эти подходы, методы и технологии послужат основой дальнейших разработок и исследования, предлагаемых в данном проекте.

Одним из ключевых моментов данного проекта является наличие надежной технологии изготовления сверхпроводниковых туннельных переходов для детектирования ТГц излучения. В ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН успешно функционирует технологический комплекс по изготовлению сверхпроводниковых структур на основе высококачественных туннельных переходов Nb-AIO_x-Nb и Nb-AlN-NbN микронных размеров. Эта технология была создана для изготовления схем интегрального спектрометра терагерцового диапазона и будет использована при выполнении данного проекта. Принципиальным является тот факт, что в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН уже создана уникальная технология изготовления сверхпроводниковых интегральных микросхем, что позволяет провести основные этапы исследования генератора в России без закупки оборудования и технологий за рубежом. Для исследования ТГц генератора на основе BSCCO структур будет использована уже имеющаяся в ИРЭ автоматизированная система измерения, которая существенно модернизирована для проведения таких измерений.

35.5. Согласованный с зарубежными партнерами детальный план научных исследований, включающий план конкретных научных работ, выполняемых российскими участниками проекта (по годам), план конкретных научных работ, выполняемых зарубежными участниками проекта (по годам), обоснование целесообразности выполнения работы именно с этим зарубежным партнером:

План работ по проекту направлен на решение трех научных задач, представленных в разделе 35.3; нумерация пунктов плана ведется в соответствие с номерами задач (например, 2.1 означает первый раздел задачи 2). Следует отметить, что в большинстве случаев исследования в Москве и Тюбингене будут дополнять друг друга, что обусловлено имеющимся оборудованием и компетенциями участников. Например, образцы генераторов ТГц излучения будут предварительно тестироваться в Германии, наиболее перспективные из них будут изучены с помощью низкотемпературного лазерного микроскопа, а затем будет проведено всесторонне исследование их спектральных характеристик в ТГц диапазоне с помощью интегрального приемника в Москве. Такой сдвиг по времени не приведет к задержке измерений в Москве, поскольку DFG проект в Тюбингене уже начался, и первые образцы для совместных измерений в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН будут подготовлены к апрелю 2017 года.

План работ российских участников:

1.1 Исследование ТГц свойств МДП структур, оптимизация диапазона перестройки частоты, мощности и ширины линии генерации (2017 год).

По результатам предварительных исследований немецких коллег будет отобрано несколько МДП прямоугольной формы, наиболее перспективных для проведения спектральных измерений в России. Измерения в Москве будут проводиться с помощью интегрального приемника, созданного российскими учеными, со спектральным разрешением лучше 1 МГц. Эта величина на 3 порядка величины меньше частотного разрешения лучших Фурье-спектрометров (единицы ГГц), используемых при проведении предварительных исследований в Германии. Измерения будут проводиться как для традиционных МДП, выполненных в виде меза-структур, так и для GBG структур с электродами из пленки золота. Будет изучено влияние параметров МДП, определяющих диапазон перестройки частоты генерации, мощности и ширины линии генерации в зависимости от рабочей частоты и температуры МДП структуры. Исследуемые генераторы будут располагаться в отдельном криостате с возможностью независимого регулирования температуры устройства от 4.2 до 90 К.

1.2 Оптимизация параметров МДП структур в качестве генераторов ТГц диапазона (2018 год).

Важным аспектом этого исследования является выбор оптимальной толщины МДП структуры. Первоначально толщина структуры составляла порядка 1 мкм (приблизительно 700 джозефсоновских переходов в МДП). Улучшенные методы охлаждения позволили увеличить толщину до 3 мкм. Однако для структур большой толщины наиболее сильное излучение происходит только на одной из внутренних ветвей вольт-амперной характеристике (ВАХ), где часть джозефсоновских переходов находятся в сверхпроводящем состоянии с нулевым напряжением и при отсутствии «горячего пятна» в МДП. Предположительно, при задании тока смещения, при котором рабочая точка МДП находится на этой конкретной ветви, реализуется оптимальное согласование импеданса с окружающей электромагнитной системой. Для изучения этих эффектов будут исследованы МДП разной толщины, измерения ширины линии излучения на внутренних ветвях ВАХ пока не проводилось ни в одной лаборатории мира.

1.3 Разработка элементов интегрального приемника с рабочей частотой выше 1 ТГц, исследование многотерминальных МДП в широком интервале температур (2019 год).

Будут разработаны и исследованы генераторы гетеродина для интегральных приемных систем с рабочими частотами порядка и выше 1 ТГц; измерены их спектральные характеристики, исследованы методы их частотной и фазовой стабилизации. Будет проведен цикл исследований спектров излучения в ТГц диапазоне из наиболее перспективных многотерминальных МДП структур, предварительно протестированных коллегами из Германии. В дополнение к предложенной ранее трехтерминальной схеме, когда токи смещения задаются с левой и правой сторон МДП (вывод осуществляется через базовый электрод), будут также исследованы МДП структуры дополнительным электродом посередине. В результате выполнения проекта с помощью интегрального приемника будут измерены спектральные характеристики многотерминального генератора на основе МДП с частотным разрешением лучше 1 МГц, найдены оптимальные параметры для работы генератора на основе МДП в терагерцовом диапазоне.

2.1. Измерение спектров излучения многоэлементных матриц на основе МДП структур (2017 – 2018 годы)

Будут исследованы матрицы из нескольких МДП (как на основе традиционных меза-структур, так и на основе GBG-структуры с общим нижним электродом из золота). Ожидается, что использование матриц МДП не только увеличит выходную мощность, но позволит существенно уменьшить ширину линии излучения. Для измерений спектров излучения в Москве с частотным разрешением лучше 1 МГц будут отобраны матрицы на основе МДП (по результатам предварительных исследований в Тюбингене, см. пункты плана 2.3 и 2.4). Будут измерены зависимости ширины линии и мощности от параметров структуры в матрицах различных типов.

2.2. Исследование эффектов синхронизации отдельных МДП-структур в матрице (2019 год).

Для исследования эффектов синхронизации вначале будут исследованы спектры излучения отдельных МДП структур в матрице, а затем измерены спектры при одновременном подключении сначала двух, а затем и большего количества МДП. Будет исследована зависимость ширины линии генерации от количества взаимодействующих МДП структур в матрице, что позволит определить, работают ли отдельные структуры когерентно, или их мощности просто складываются, но фазы колебаний не синхронизированы. В первом случае будут изучены условия и режимы синхронизации, определены области частот, где возможна синхронная работа МДП структур в матрице.

3.1. Оптимизация методов шумовой спектроскопии с использованием интегрального приемника (2018 год).

Будет проведено экспериментальное исследование взаимодействия молекулярного газа с фазо-диффузионным (ФД) полем и когерентным сигналом. Ранее нами показано, что при определенных условиях воздействие шумового сигнала на молекулярный газ аналогично воздействию когерентного сигнала. Линия шумового генератора хорошо аппроксимируется лоренцевым профилем, то есть может быть описана моделью ФД поля. Будут найдены режимы и условия, при которых ТГц генератор на основе МДП структур обеспечивает достаточно высокую выходную мощность (более 10 мкВт) и линию излучения шириной более 100 МГц. Будет изучено взаимодействие ФД сигнала с газом, которое приводит к наведению макроскопической поляризации в

квантовой системе, по величине сравнимой с поляризацией в случае когерентного поля. Эти исследования открывают возможность создания новых методов спектроскопии поглощения на основе квазишумовых источников излучения в микроволновом и ТГц диапазонах частот.

3.2. Разработка сверхпроводникового генератора для ТГц микроскопии (2019 год).

Прогресс в развитии тонкопленочных устройств ТГц диапазона мотивирует разработку новых методов диагностики и контроля, которые позволяют определять свойства пленок и элементов в ТГц диапазоне с микронным пространственным разрешением. Одним из таких приборов является низкотемпературный ТГц микроскоп ближнего поля, в котором сигнал от генератора излучается миниатюрной антенной, установленной на кантилевере (металлизированной мембране микронных размеров). Сверхпроводниковый ТГц генератор может быть установлен в непосредственной близости от кантилевера, что существенно упрощает конструкцию прибора. Будет разработана конструкция ТГц генератора на основе ниобиевых переходов, исследована возможность использования в ТГц микроскопии генераторов на основе разрабатываемых в проекте МДП структур.

План работ зарубежных участников:

Коллеги из Германии уже начали работу по проекту DFG (№ KL 930/13-2), зарубежными участниками будут выполнены работы, в которых они имеют большой опыт и научный задел (см. ниже). Кроме того, они будут принимать участие в совместных измерениях, описанных в пунктах работ российских участников проекта, а также в обсуждении полученных результатов и подготовке совместных публикаций.

1.4. Разработка и апробация модели для расчета процессов в 3D массивах джозефсоновских переходов различной геометрии с учетом тепловых эффектов (2017 год).

В результате выполнения проекта будет построена модель для полного описания процессов в естественных массивах джозефсоновских переходов, образованных кристаллической структурой BSCCO, при генерации ТГц излучения. Будет разработана уникальная программа для расчета процессов в 3D массивах джозефсоновских переходов с различной геометрией, в которой будут учитываться как эффект Джозефсона, так и тепловые эффекты, а также влияние электромагнитного окружения. В рамках модели может быть рассчитана мощность и ширина линии ТГц излучения. Наличие адекватной модели позволит создавать генераторы ТГц излучения контролируемые и воспроизводимые параметрами, обеспечивающими комбинацию мощности не менее 30 мкВт, диапазона перестройки частоты не менее 200 ГГц и ширины линии излучения порядка 10 МГц.

1.5. Исследование способов управления *in situ* характеристиками генераторов ТГц излучения на основе двухэлектродных МДП структур (2018 год).

Детальное исследование процессов генерации ТГц излучения с помощью криогенного сканирующего лазерного микроскопа (low temperature scanning laser microscope – LTSLM) при одновременном измерении интегральной мощности излучения и

сопоставлении эксперимента с результатами расчета позволит определить оптимальные значения токов смещения и других внешних параметров. Измерения будут проводиться в различных магнитных полях, что позволит определить оптимальные условия для получения ТГц излучения с максимальной мощностью (направление и значения магнитного поля для получения оптимальных конфигураций мод резонатора). Предварительные измерения показали, что для магнитных полей, ориентированных параллельно длинной стороне МДП, мощность излучения может увеличиваться в три раза. Расчеты немецких коллег показывают, что такая конфигурация поля способствует возбуждению резонансных мод резонатора, в которых высокочастотные токи остаются постоянными вдоль длинной стороны структуры и осциллируют вдоль короткой стороны. Все это обеспечит возможность оперативной постройки параметров генерации. Помимо прямоугольных структур весьма интересно исследовать также другие геометрические формы, в частности круглых дисков, что позволит проверить и сравнить с расчетом влияние приложенного магнитного поля.

1.6. Разработка и исследование трех и многоэлектродных структур (2019 год).

Будут созданы многоэлектродные структуры с возможностью управления *in situ* характеристиками генераторов ТГц излучения на основе МДП. В результате будет детально исследована предложенная ранее участниками проекта трехтерминальная схема подключения МДП. В этой схеме токи смещения задаются с левой и правой сторон МДП, а их вывод осуществляется через базовый электрод. Будут исследованы МДП структуры с дополнительным электродом посередине, а также конфигурации, в которых этот дополнительный электрод разделен на две части. Правильное смещение может способствовать образованию мод резонатора, в которых колебания происходят только вдоль короткой стороны. Учитывая, что в данной конфигурации количество параметров слишком велико для "полной характеристики", исследование будет выполнено только для некоторых наиболее интересных значений приложенного поля и степени асимметрии системы.

2.3. Разработка методов получения многоэлементных матриц на основе МДП структур, исследование их основных характеристик (2017 – 2018 годы).

Будут созданы и оптимизированы методы получения матриц из нескольких МДП, изготовленных в виде меза-структур на общем базовом электроде из BSCCO кристалла, а также в виде GBG-структур с общим нижним электродом из золота для обеспечения гальванической связи. Ожидается, что использование матрицы из нескольких МДП позволит существенно увеличить мощность излучения свыше 100 мкВт. Исследования начнутся с одной МДП структуры в многотерминальной конфигурации с помощью LTSLM и других методик, описанных в пунктах 1.5 и 1.6. После всесторонней характеристики структура будет разрезана на несколько частей, соединенных общим электродом. После этого получившая матрица будет исследована еще раз при различных токах смещения отдельных частей. Мы не ожидаем увеличения мощности такой матрицы, однако описанный выше подход позволит изучить механизмы взаимодействия отдельных частей и определить оптимальные токи для отдельных элементов матрицы.

2.4. Исследование многоэлементных матриц на основе МДП структур, выбор наилучших для дальнейших измерений линии в Москве (2018 – 2019 годы).

Исследования в этом пункте явятся естественным продолжением работ предыдущего пункта 2.3. С использованием приобретенного опыта будут сконструированы и изготовлены матрицы большого числа МДП структур, с выходной мощностью более 100 мкВт и с возможностью перестройки частоты в широком

диапазоне. Будет проведено исследование их основных характеристик, отобраны наиболее перспективные структуры для спектральных измерений с помощью сверхпроводникового интегрального приемника в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

3.3. Разработка и апробация методов спектроскопии газов с использованием ТГц генераторов на основе МДП структур (2018 год).

Измерение линий поглощения различных газов и газовых смесей (NH_3 , H_2O и ряд других) при помощи ТГц сверхпроводникового интегрального спектрометра методом «просветки» газовой ячейки с исследуемым газом сигналом генератора, в качестве приемника будут использованы широкополосные болометры. Будет проведена демонстрация возможностей практического применения таких генераторов для спектрального анализа газовых смесей, разработаны компактные лабораторные системы, позволяющие проводить измерения линий поглощения в ТГц диапазоне.

3.4. Апробация практических приложений ТГц генераторов на основе МДП структур, включая системы получения изображений (2019 год)

Будет изучен и апробирован ряд возможных практических приложений результатов данного проекта. В их число входит интегральный приемник с системами стабилизации частоты, выполненный полностью на основе высокотемпературных сверхпроводников и работающий на частотах выше 1 ТГц, уже упомянутая выше ТГц спектроскопия газов, а также визуализация изображений в ТГц диапазоне. Еще одним возможным направлением является создание генератора, работающего при температуре жидкого азота, с выходной мощностью, существенно превосходящей уже достигнутый уровень в 1 мкВт.

Для проведения совместных измерений, а также детального анализа результатов работы по проекту на 2017-2019 годы запланированы визиты российских ученых в Германию и немецких коллег в Россию.

Обоснование целесообразности выполнения работы именно с этим зарубежным партнером

Выполнение данного проекта совместно с коллективом Тюбингенского Университета (г. Тюбинген, Германия) представляется весьма естественным и целесообразным. Немецкие коллеги имеют многолетний успешный опыт разработки и изготовления генераторов на основе ВТСП-кристаллов $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$. Участники из ИРЭ им В.А. Котельникова РАН уже несколько лет ведут совместные работы с коллегами из Германии, Китая и Японии в области исследования новых перспективных ТГц генераторов. По результатам этих работ опубликовано уже более совместных 10 статей в ведущих физических журналах. Учитывая, что в Тюбингенском Университете уже идет проект « **$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ Intrinsic Josephson junctions as coherent THz emitters**» (номер проекта: **KL 930/13-2**; сроки выполнения **30.08.2016-01.09.2019**), представляется весьма целесообразным провести совместные разработки и исследования таких генераторов для новых астрономических миссий и других практических применений (таких как медицина и системы безопасности).

3.5.6. Ожидаемые по окончании проекта научные результаты (развернутое описание с оценкой степени оригинальности; форма изложения должна дать возможность провести экспертизу результатов):

В результате выполнения проекта будет построена модель для полного описания процессов в естественных массивах джозефсоновских переходов, образованных кристаллической структурой BSCCO, при генерации ТГц излучения. Будет разработана уникальная программа для расчета процессов в 3D массивах джозефсоновских переходов с различной геометрией; в которой будут учитываться как эффект Джозефсона, так и тепловые эффекты, а также влияние электромагнитного окружения. Наличие адекватной модели позволит создавать генераторы ТГц излучения с контролируруемыми и воспроизводимыми параметрами, обеспечивающими комбинацию мощности не менее 30 мкВт, диапазона перестройки частоты не менее 200 ГГц и ширины линии излучения порядка 10 МГц.

Детальное исследование процессов генерации ТГц излучения с помощью криогенного сканирующего лазерного микроскопа (low temperature scanning laser microscope – LTSLM) при одновременном измерении интегральной мощности излучения и сопоставлении эксперимента с результатами расчета позволит определить оптимальные значения токов смещения и других внешних параметров. Измерения будут проводиться в различных магнитных полях, что позволит определить оптимальные условия для получения ТГц излучения с максимальной мощностью (направление и значения магнитного поля для получения оптимальных конфигураций мод резонатора). Все это обеспечит возможность оперативной подстройки параметров генерации.

Будут созданы также многоэлектродные структуры с возможностью управления *in situ* характеристиками генераторов ТГц излучения на основе МДП. В результате выполнения проекта с помощью интегрального приемника будут измерены спектральные характеристики генератора на основе МДП с частотным разрешением лучше 1 МГц, найдены оптимальные параметры для работы генератора на основе МДП в терагерцовом диапазоне.

Созданы и исследованы матрицы из нескольких МДП для существенного увеличения мощности излучения и уменьшения ширины линии; ожидается получение выходной мощности выше 100 мкВт. Будут исследованы матрицы МДП, изготовленные на общем базовом электроде из BSCCO кристалла, а также МДП структуры, расположенные между двумя электродами из золота (GBG-структуры) в конфигурации с общим нижним электродом из золота для обеспечения гальванической связи.

Созданы и продемонстрированы генераторы ТГц излучения на основе BSCCO МДП для задач спектроскопии газов в субТГц диапазоне и систем получения ТГц изображений. Разработана конструкция и исследованы свойства сверхпроводникового генератора гетеродина для ТГц сканирующего микроскопа. Реализация этих возможностей открывает перспективы практического использования BSCCO-генераторов для медицинской диагностики и создании систем безопасности.

Будут оптимизированы методы измерения спектров генераторов ТГц излучения на основе МДП структур. Отобраны лучшие генераторы на основе многоэлектродных МДП структур, а также матриц из нескольких МДП структур, проведены детальные измерения спектров их излучения.

Будут разработаны и исследованы генераторы гетеродина для интегральных приемных систем с рабочими частотами порядка и выше 1 ТГц; измерены их спектральные характеристики, исследованы методы их частотной и фазовой стабилизации.

3.5.7. Современное состояние исследований по заявленной научной проблеме, сравнение ожидаемых результатов с мировым уровнем:

Сверхпроводниковая электроника является одной из наиболее бурно развивающихся областей современной науки и техники. При этом исследования в данной области ведутся в мире широким фронтом: здесь имеются как работы, направленные на создание единичных приборов с уникальными параметрами для специальных применений, так и работы по широкому коммерческому использованию достижений сверхпроводниковой электроники. Повышенный интерес к сверхпроводниковой электронике обусловлен как интересной физикой процессов, так и возможностью создания целого ряда приборов с рекордными параметрами. Это объясняется как чрезвычайно высокой нелинейностью сверхпроводниковых элементов, так и их предельно низкими собственными шумами, обусловленными природой элементов и криогенной рабочей температурой. Одним из наиболее успешно развиваемых направлений является разработка генераторов терагерцового диапазона на основе высокотемпературных сверхпроводниковых слоистых меза-структур. В Японии, Германии, США и Китае имеется несколько групп, достигших заметных результатов в разработке и исследованиях BSCCO-генераторов. Одной из таких групп являются коллеги авторов проекта из Тюбингенского Университета (г. Тюбинген, Германия).

Первая выдающая работа в данном направлении была сделана в 1992 г., когда немецкими участниками проекта впервые было установлено, что структура из монокристалла $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ ведет себя как массив последовательных джозефсоновских контактов за счёт слабой связи между сверхпроводящими би-слоями CuO [R.Kleiner, F.Steinmeyer et. al. *Intrinsic Josephson Effects in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ Single Crystals*. // *Phys. Rev. Lett.*, 68, No 15. 1992; R. Kleiner, P.Müller, et. al. "Dynamic behaviour of Josephson-coupled layered structures" // *Phys. Rev. B* 50, 3942 1994]. В 2007 году появилась пионерская работа в журнале *Science*, в которой впервые было зарегистрировано мощное излучения ТГц диапазона [L. Ozyuzer, A.E. Koshelev et. al. *Emission of Coherent THz Radiation from Superconductors*. // *Science* 318, 1291. 2007]. С тех пор разработка и исследование таких структур велись очень бурными темпами: за 5 лет было выпущено более 2000 экспериментальных и теоретических работ в ведущих мировых научных журналах, см. обзор с участием наших коллег [U. Welp, K. Kadowaki, and R. Kleiner, "Superconducting emitters of THz radiation," *Nat. Photonics* 7, 702 2013]. В частности, проводились исследования распределения температуры вдоль образца генератора, в результате было установлено образование «горячих пятен». Температура такой локальной области превышает критическую температуру T_c , таким образом, в разных рабочих точках генератора разное количество из общего числа переходов в структуре находится в сверхпроводящем состоянии и участвует в генерации. Такие исследование активно проводились участниками проекта из Германии при помощи методов LTSLM и LTSEM [H. B. Wang, S. Guénon, R. Kleiner et. al. *Hot Spots and Waves in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ Intrinsic Josephson Junction Stacks - a Study by Low Temperature Scanning Laser Microscopy*. // *Phys. Rev. Lett.* 102, 017006. 2009]. В других работах был произведен математический анализ распределения температуры и проведены теоретические расчёты [A. Yurgens. *Temperature distribution in a large $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ mesa* // *Phys. Rev. B*, 83, 184501. 2011]. Проводились также исследования возникновения резонансных мод в BSCCO-генераторах вследствие геометрии структуры и отражения электромагнитных волн от краев [Manabu Tsujimoto, Kazuhiro Yamaki et. al. *Geometrical Resonance Conditions for THz Radiation from the Intrinsic Josephson Junctions in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$* // *Phys. Rev. Lett.* 105, 037005. 2010].

В настоящее время как минимум 10 групп в мире (включая авторов проекта и зарубежных участников) занимаются активными исследованиями в данном направлении: **участники проекта под руководством R. Kleiner**, Тюбинген, Германия; группа H.B. Wang, Нанкинский Университет, Китай и NIMS, Цукуба, Япония; группа K. Kadowaki, Цукуба, Япония; группа U. Welp и A. E. Koshelev, лаборатория Argonne National Labs, США; группа R.A. Klemm, Университет Флорида, Ордандо, США; группа V. Krasnov, Стокгольм, Швеция; группа P. Müller, университет Эрлангена, Германия; группа L. Ozyuzer, Измирский Университет, Турция; группа K. Kakeya и M. Suzuki, Университет Киото, Япония, а также наша **группа под руководством В.П. Кошельца**, Москва, Россия. За последние годы был получен целый ряд уникальных результатов. Было зарегистрировано излучение из BSCCO структур на частотах выше 1 ТГц [M. Ji, et al, *Appl. Phys. Lett.*, 105, 122602, 2014; T. Kashiwagi, et al, *Appl. Phys. Lett.*, 106, 092601, 2015; T. Kashiwagi, et al, *Appl. Phys. Lett.*, 107, 082601, 2015]. Благодаря возможности варьировать размер «горячего пятна» был реализован диапазон перестройки частоты более 700 ГГц [M. Ji, et al, *Appl. Phys. Lett.*, 105, 122602, 2014]. Была достигнута мощность излучения более 10 мкВт [D.Y. An, et al, *Appl. Phys. Lett.*, 102, 092601, 2013; S. Sekimoto, et al, *Appl. Phys. Lett.*, 102, 022602, 2013; T. Kashiwagi, et al, *Appl. Phys. Lett.*, 107, 082601, 2015]; более того в системе из нескольких меза структур была зарегистрирована рекордная мощность 0.61 мВт [S. Sekimoto, et al, *Appl. Phys. Lett.*, 102, 022602].

Однако, до сих пор работы в данном направлении пока не дошли до практического применения BSCCO-генераторов в реальных приборах. Причиной этого является отсутствие полного понимания всех физических механизмов, участвующих в генерации и синхронизации излучения огромного множества джозефсоновских переходов, а также дефицит результатов по исследованию спектральных характеристик генератора с мегагерцовым разрешением. Кроме того, до сих пор не были определены условия частотной и фазовой стабилизации излучения BSCCO-генераторов при помощи систем фазовой автоподстройки частоты, что является одним из определяющих факторов возможности практического использования этих устройств. Предполагается, что в рамках данного проекта эти задачи будут решены, а разработанные генераторы на основе МДП структур найдут широкое применение в ряде областей, включая спектроскопию, медицинскую диагностику и системы безопасности.

3.5.8. Имеющийся у коллектива научный задел по предлагаемому проекту, полученные ранее результаты (с оценкой степени оригинальности), разработанные методы (с оценкой степени новизны) - у российских участников проекта и у зарубежных участников проекта:

Наиболее значимым научным заделом являются впервые в мире успешно проведенные совместно с зарубежными участниками проекта измерения спектральных характеристик образца BSCCO-генератора с высокой точностью (разрешение лучше 0,1 МГц) при помощи сверхпроводникового интегрального спектрометра (см. рис. 1). Измерения проводились в Москве в Институте радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН российскими участниками проекта совместно с зарубежными коллегами из Тюбингенского университета (г. Тюбинген, Германия):

[Mengyue Li, Jie Yuan, **Nickolay Kinev**, **Valery P. Koshelets**, **Boris Gross**, **Reinhold Kleiner**, Huabing Wang et.al. Linewidth dependence of coherent terahertz emission from $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ intrinsic Josephson junction stacks in the hot-spot regime. // *Phys. Rev. B*, 86, 060505(R), 2012].

[B. Gross, J. Yuan, N. Kinev, V.P. Koshelets, H.B. Wang, R. Kleiner et. al. Modeling the linewidth dependence of coherent terahertz emission from intrinsic Josephson junction stacks in the hot-spot regime. // Phys. Rev. B 88, 014524. 2013.]

В результате проделанных работ было получено несколько уникальных результатов. В частности, впервые было продемонстрировано, что эффективная генерация таких меза-структур реализуется в области при высоких токах смещения на участке с отрицательным дифференциальным сопротивлением (появляющемся вследствие самонагрева образца). Изначально же считалось, что эффективной областью должен являться участок характеристики при низких токах. Кроме того, впервые была продемонстрирована лоренцева форма линии генерации, дающая многообещающий задел для построения теоретических и расчётных моделей формы и ширины линии генерации сверхпроводниковых высокотемпературных генераторов (см. рис. 2).



Рис. 1. Схема эксперимента по измерению спектра излучения BSCCO-генератора при помощи сверхпроводящего интегрального спектрометра (1 - BSCCO-генератор, 2 – микросхема приемника, 3 – линза, 4- тепловой фильтр).

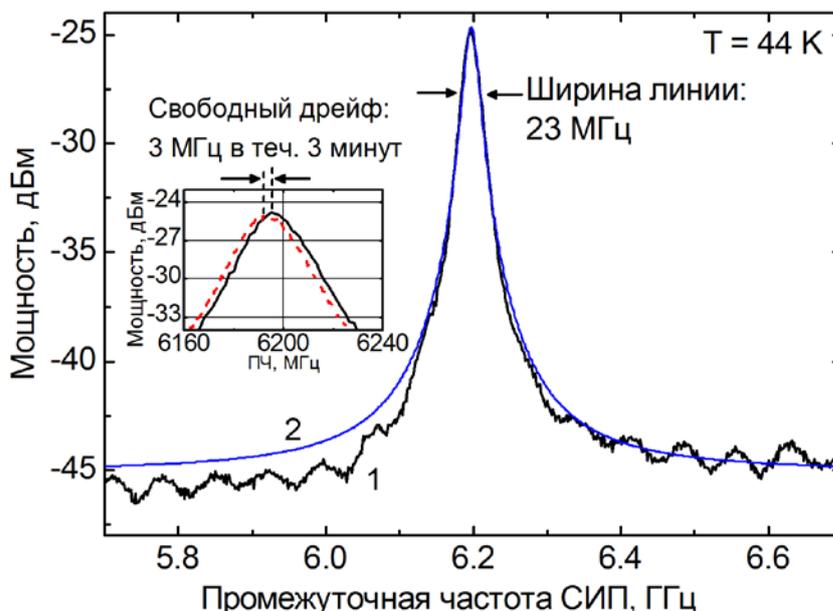


Рис. 2. Спектр излучения генератора, измеренный при помощи СИП с диапазоном промежуточных частот 4-8 ГГц (1) и кривая лоренцевой формы (2). Частота $f_0 = 611,95$ ГГц, рабочая температура 44 К, количество переходов $N \approx 570$. Измерения проводились в режиме «high-bias». Вставка слева демонстрирует смещение пика линии излучения вследствие свободного дрейфа системы.

Не менее значимым результатом является совместная работа, демонстрирующая первый шаг к созданию полностью высокотемпературного сверхпроводящего интегрального приемника, объединяющего в одном устройстве генератор на основе мезоструктуры $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ и детектор на основе бикристаллического джозефсоновского перехода $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ (см. рис 3.):

[D.Y. An, N. Kinev, B. Gross, V.P. Koshelets, R. Kleiner, H.B. Wang et.al. Terahertz emission and detection both based on high- T_c superconductors: Towards an integrated receiver. // *Appl. Phys. Lett.*, 102, 092601. 2013].

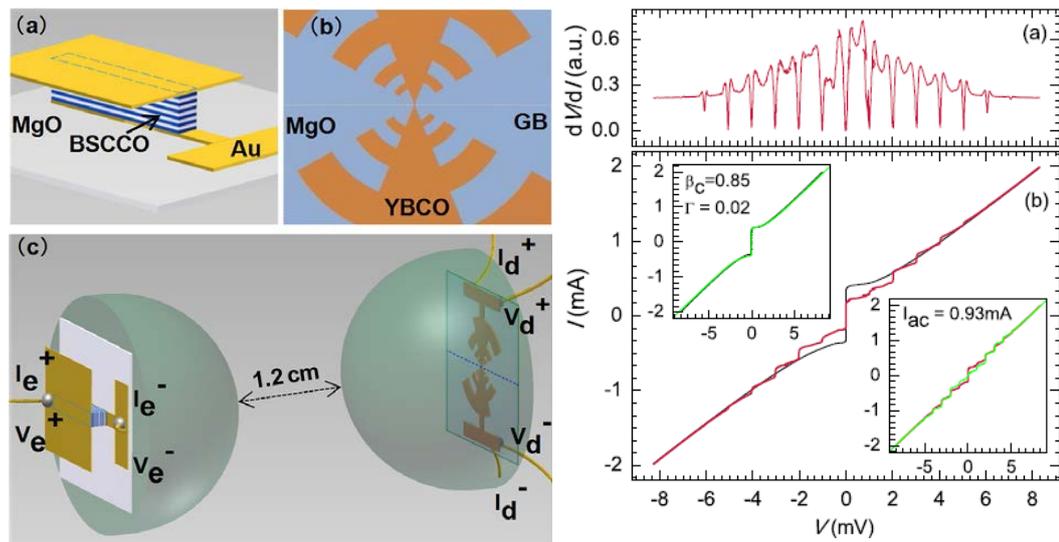


Рис. 3. Слева схема эксперимента, в котором излучение GBG МДП генератора детектировалось YBCO grain boundary переходом. Справа характеристики ТГц детектора: а) дифференциальное сопротивление при ТГц облучении на частоте примерно 500 ГГц; в) ВАХи детектора (автономная и при ТГц облучении)

Еще одним важнейшим результатом явилось первое измерение излучения из МДП на частоте выше 1 ТГц [M. Ji, B. Gross, F. Rudau, N. Kinev, V.P. Koshelets, D. Koelle, R. Kleiner, et al, "Bi₂Sr₂CaCu₂O₈ intrinsic Josephson junction stacks with improved cooling: Coherent emission above 1 THz", *Applied Physics Letters* **105**, 122602 (2014)] - рис 4, а также демонстрация компактного генератора на основе МДП структур, работающего при температуре жидкого азота [L.Y. Hao, F. Rudau, R. Wieland, N. Kinev, V.P. Koshelets, D. Koelle, R. Kleiner, et al, A Compact Superconducting Terahertz Source Operating in Liquid Nitrogen, *Phys. Rev. Applied*, 3, 024006, (2015)] - рис. 5.

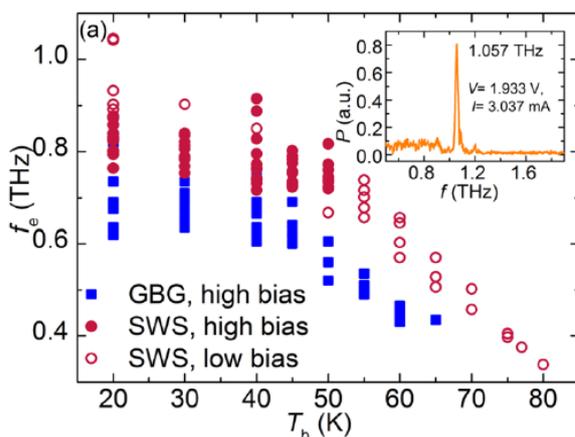


Рис. 4. Зависимости частоты излучения при различных температурах для двух типов структур: «стандартной» GBG, где МДП включен между двумя электродами из золота на подложке из MgO, и структуры SWS, в которой охлаждение улучшено за счет второй подложки MgO, размещенной сверху структуры. Вставка показывает спектр излучения SWS структуры при температуре 20 К и токе 3.04 мА.

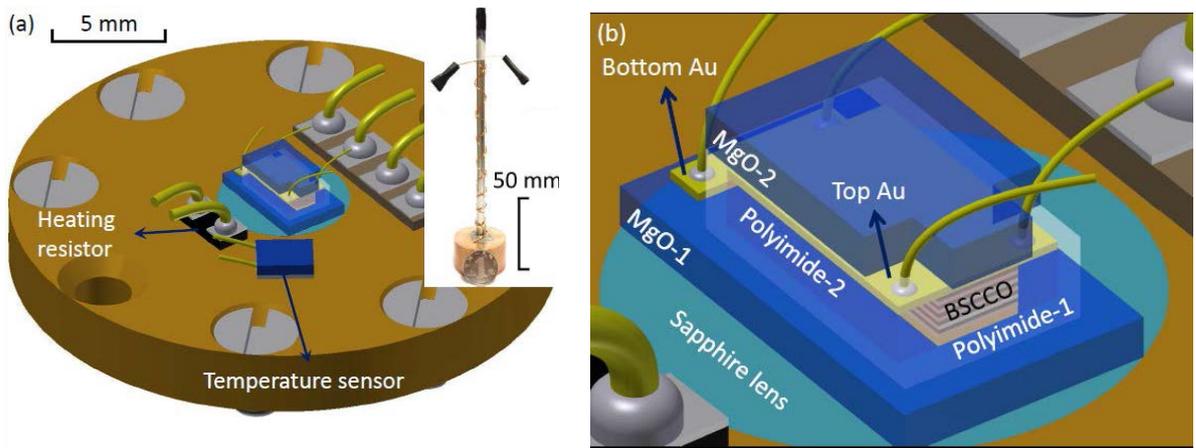


Рис. 5. Схематическое изображение ТГц генератора, работающего при температуре жидкого азота, фото генератора с выходным волноводом показано на вставка к левой части рисунка.

Было показано, что положением «горячего пятна» можно управлять как в многоэлектродной конфигурации, так и при подаче фокусированного лазерного излучения [X.J. Zhou, F. Rudau, R. Wieland, B. Gross, N. Kinev, J V.P. Koshelets, D. Koelle, R. Kleiner, et al, “Tuning the Terahertz Emission Power of an Intrinsic Josephson-Junction Stack with a Focused Laser Beam”, *Phys. Rev. Applied*, vol.3, 044012, (2015)] – см. рис. 6. Изменяя соотношение токов слева и справа (при сохранении постоянного суммарного тока) было возможно сдвигать «горячее пятно» слева направо – рис. 6, правая часть.

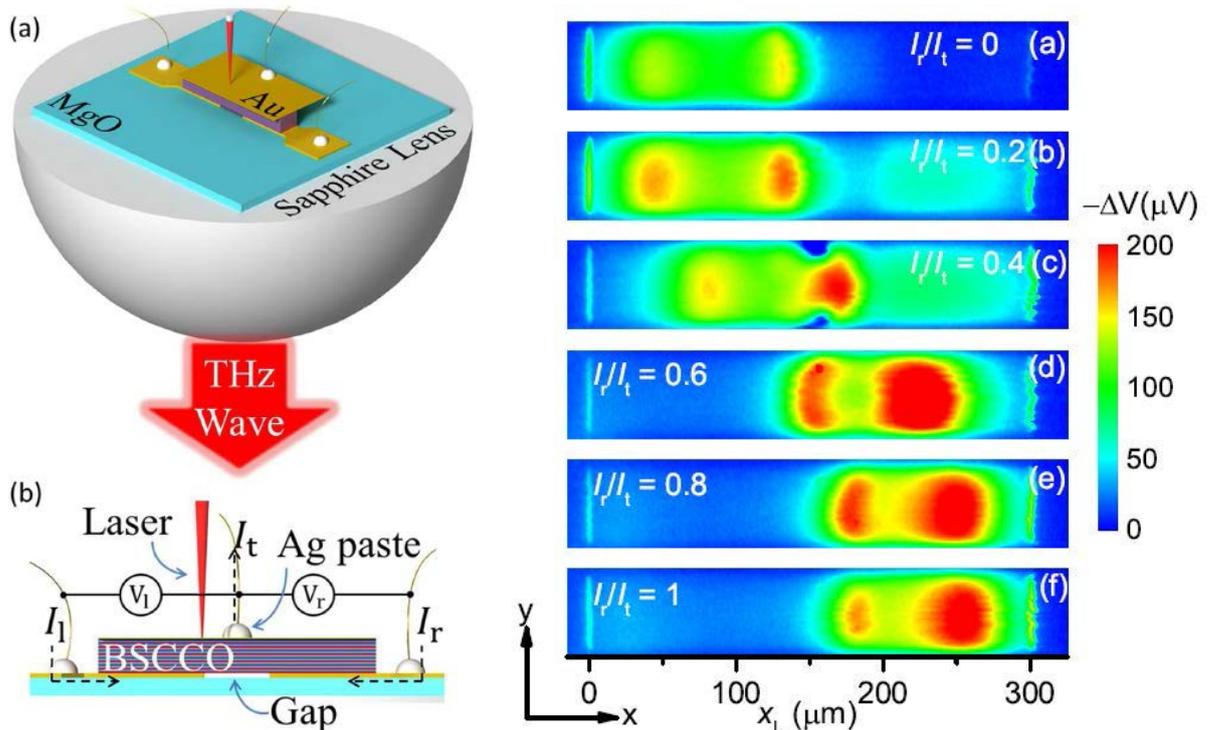


Рис. 6. Схематическое изображение трехэлектродного ТГц генератора, смонтированного на сапфировой линзе. Для проведения LTSLM измерений лазерный луч фокусируется на верхнем электроде из золота. На правом графике показано, что изменяя соотношение токов слева и справа (при сохранении постоянного суммарного тока) можно сдвигать «горячее пятно» слева направо.

На протяжении последних лет в ИРЭ им В.А. Котельникова РАН была разработана технология изготовления высококачественных туннельных переходов Nb-AlO_x-Nb микронных размеров, которые являются основными элементами большинства устройств и схем низкотемпературной сверхпроводниковой электроники. На этой основе была разработана технология изготовления многослойных микросхем и создан ряд сверхчувствительных приемных устройств диапазона 100–1000 ГГц. Была проведена оптимизация технологии изготовления субмикронных туннельных переходов Nb/AlO_x/Nb с плотностью тока до 20 кА/см². Такие переходы выдерживают многократные термоциклирования без изменения своих характеристик.

Разработан целый ряд новых технологических процессов и методик изготовления сверхпроводниковых туннельных переходов с рекордными параметрами. Переходы с высокой плотностью тока J_c позволяют повысить рабочую частоту СИС-приемников и расширить их полосу. Однако, существует предел повышения прозрачности барьера для СИС-переходов на основе окиси алюминия. Это предел составляет величину порядка 10–15 кА/см², при дальнейшем увеличении плотности тока наступает резкая деградация качества переходов. Для того, чтобы преодолеть это ограничение была разработана технология изготовления туннельных СИС-переходов Nb/Al-AlN/Nb с экстремально высокой прозрачностью туннельного барьера путем нитридации поверхности Al в плазменном RF-разряде (J_c до 100 кА/см²) с приемлемыми значениями R_j/R_n.

Оптимизирована технология получения сверхпроводниковых интегральных микросхем на основе пленок ниобия и нитрида ниобия. С помощью этой технологии изготовлены схемы для исследования ширины линии сверхпроводникового генератора гетеродина (СГГ), микросхемы интегрального спектрометра субмм волн, ряд других уникальных элементов и схем. В последние годы коллективом проекта из ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН был проведен целый комплекс исследований и разработок в области создания сверхчувствительных приемных устройств с уникальными параметрами.

Сверхпроводниковый генератор гетеродина и криогенный фазовый детектор. Создан и исследован сверхпроводниковый генератор гетеродина (СГГ) на основе распределенных туннельных джозефсоновских переходов, оптимизирована его конструкция. Впервые реализована непрерывная перестройка частоты сверхпроводникового генератора в диапазоне 250 – 750 ГГц и фазовая стабилизация частоты СГГ, получено спектральное качество более 70% во всем частотном диапазоне перестройки СГГ. Экспериментально продемонстрирована возможность получения фазовых шумов порядка –90 dBc при отстройке от несущей частоты более 100 кГц. Эти результаты до сих не повторены ни в одной лаборатории мира. Для эффективной синхронизации сверхпроводникового генератора гетеродина в составе интегрального спектрометра субТГц диапазона предложена и апробирована концепция криогенной системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), ключевым элементом которой является новый элемент сверхпроводниковой электроники – криогенный фазовый детектор. За счет компактности и малых задержек петли достигнута ширина полосы синхронизации системы около 70 МГц (рис. 7). Реализованная система ФАПЧ позволяет синхронизировать более 90% мощности излучение генератора с шириной линии 12 МГц, что в 7 раз больше, чем полупроводниковая система ФАПЧ [Applied Physics Letters (2013, 2014), Известия РАН (2013), Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics (2013), Proceedings of the International Symposium on Space Terahertz Technology (2014); Chapter in the book “THz and Security Applications”, Springer (2014), Superconductor Science and Technology (2014), патент РФ, IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology (2015)].

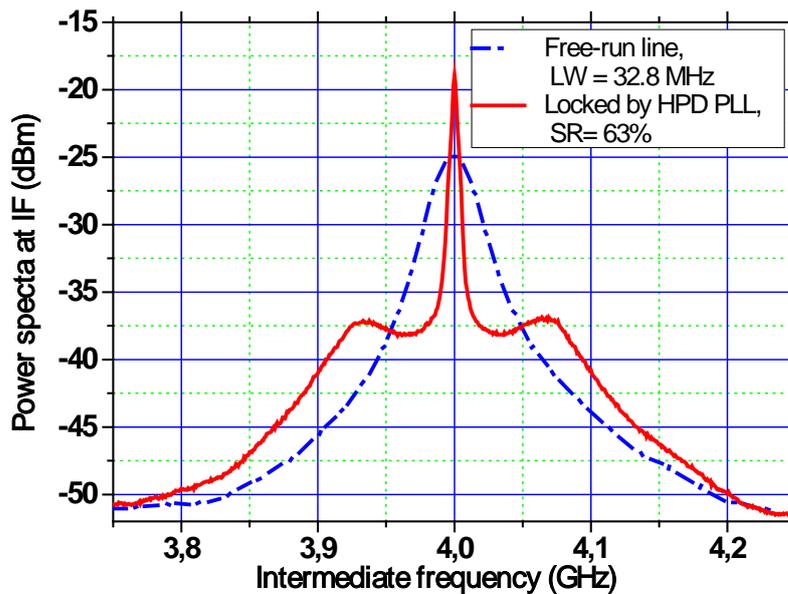


Рис. 7. Преобразованные вниз по частоте спектры СГГ в режиме частотной стабилизации (пунктир) и фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) при использовании КГФД в составе системы ФАПЧ (сплошная кривая). КГФД позволяет синхронизировать свыше 63% мощности СГГ при начальной ширине линии генерации порядка 33 МГц.

Сверхпроводниковый интегральный приемник и его применения. Одним из основных достижений коллектива проекта является разработанная и апробированная ее участниками концепция сверхпроводникового интегрального приемника (СИП) ТГц диапазона. Основным элементом приемника является интегральная микросхема (рис.8), которая включает в себя СИС-смеситель с планарной сверхпроводниковой приемной антенной, сверхпроводниковый генератор гетеродина (СГГ) и гармонический смеситель для фазовой синхронизации частоты гетеродина. Для бортового интегрального приемника реализован частотный диапазон 450 – 650 ГГц, шумовая температура менее 120 К (DSB), полоса ПЧ 4 – 8 ГГц, спектральное разрешение лучше 1 МГц. В 2014 году на полигоне в Канаде совместно с Институтом космических исследований Голландии и Немецким аэрокосмическим центром был проведен четвертый успешный запуск бортового интегрального спектрометра. Инструмент продемонстрировал возможность работы в экстремальных условиях (температура минус 90С) и позволил собрать большое количество научной информации, подтверждающей высокое спектральное разрешение и чувствительность прибора. В ходе полетов на высотном аэростате были измерены спектры различных газовых составляющих, в том числе СlO и BrO, ответственных за разрушение озонового слоя Земли, изучено их распределение в диапазоне высот 12 – 36 км во время восхода солнца; измерены спектры изотопов различных веществ (H₂O, HCl, и т.д.) – рис. 9.

Полученные данные позволяют построить график распределения концентрации всех вещество от высоты с точностью, не хуже 10%. При том общее время измерений данных спектров составило порядка 10 секунд. Для достижения той же точности измерений с использованием полупроводниковых приемников того же частотного диапазона, шумовая температура которых не ниже 1800 К, потребовалось бы на порядки больше времени. Другим важным преимуществом СИП является возможность быстрой перестройки его приемной частоты в широком диапазоне – от 450 до 650 ГГц, что позволяет производить измерений большого количества атмосферных газов практически одновременно. Процесс обработки данных, полученных во время полета инструмента, продолжается, равно как и послеполетные исследования инструмента, которые позволяют увеличить точность получаемых данных. Однако уже сейчас продемонстрирована возможность измерения концентрации некоторых газов при помощи СИП на уровне нескольких частиц на миллиард (1 ppt). Разработан и испытан лабораторный вариант интегрального

спектрометра диапазона 400 – 700 ГГц для спектрального анализа газовой смеси. Высокое спектральное разрешение прибора и предельная чувствительность позволяют однозначно измерять сверхмалые концентрации вещества по их «запаху» и создавать приборы для неинвазивной медицинской диагностики и систем безопасности [Superconductor Science and Technology (2013); ЖТФ (2013), IEEE Transactions on Applied Superconductivity (2013, 2015), Proceedings of the International Symposium on Space Terahertz Technology (2013, 2014, 2015), Applied Physics Letters (2014), Chapter in the book “THz and Security Applications”, Springer Serie: Nanoscience and Technology (2014), Radio Physics and Quantum Electronics (2014), IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology (2015), патент РФ].

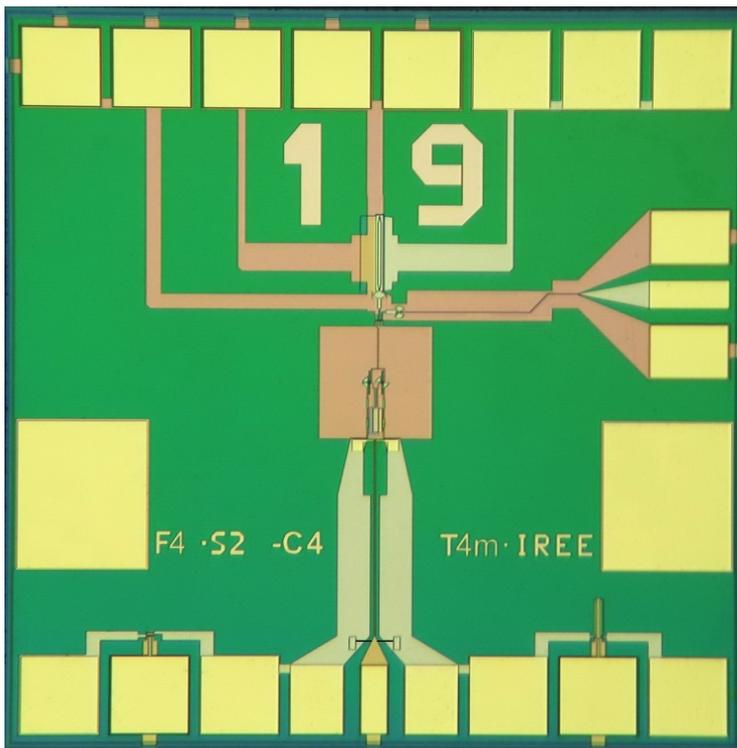


Рис. 8. Фото микросхемы интегрального приемника, разработанного и изготовленного в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН на основе структуры Nb-AlN-NbN.

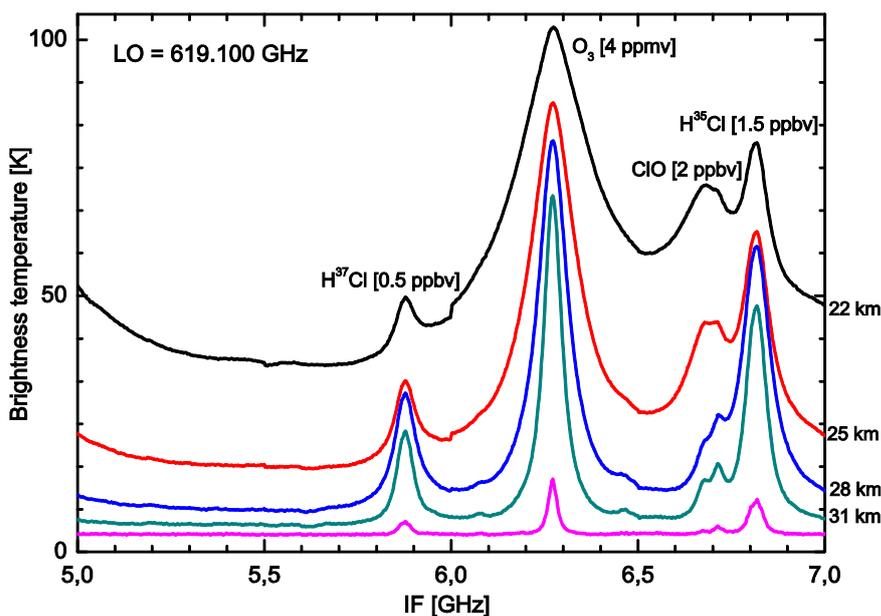


Рис. 9. Спектры двух изотопов HCl, озона и ClO; частота гетеродина (СГГ) = 619.1 ГГц. На рисунке представлены спектры, измеренные на высотах от 22 до 31 км; самый нижний спектр получен при повороте телескопа вверх, 6° от вертикали. Цифрами указаны соответствующие концентрации измеряемых газов.

Зарубежные соучастники из Университета Тюбингена являются одними из авторов зарождения данной области исследования и стоят у истоков огромной части результатов работ, проводимых в данном направлении во всём мире. Им принадлежит авторство классических работ по открытию возможностей использования многослойных ВТСП-структур в качестве ТГц генераторов:

[R. Kleiner, F. Steinmeyer, G. Kunkel, P. Müller, Phys. Rev. Lett. **68**, 2394. 1992]

[R. Kleiner, P. Müller, H. Kohlstedt, N.F. Pedersen, S. Sakai, Phys. Rev. B **50**, 3942 1994]

[D. Koelle, R. Kleiner, F. Ludwig, E. Dantsker, John Clarke, Rev. Mod. Phys. **71**, 631 1999]

[R. Kleiner, Science **318**, 1254. 2007]

[U. Welp, K. Kadowaki, and R. Kleiner, Nat. Photonics **7**, 702 2013]

Таким образом, у зарубежных участников проекта имеется большой опыт в изготовлении и исследовании генераторов на основе меза-структур $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ [H.B. Wang, S. Guenon, R. Kleiner et.al. *Coherent Terahertz Emission of Intrinsic Josephson Junction Stacks in the Hot Spot Regime*. // Phys. Rev. Lett., **105**, 057002. 2010]. В частности, ими было проведено исследование распределения температуры вдоль образца меза-структуры в рабочем режиме при помощи лазерной микроскопии, в результате было обнаружено наличие так называемого «горячего пятна» [H.B. Wang, S. Guenon, R. Kleiner et. al. *Hot Spots and Waves in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ Intrinsic Josephson Junction Stacks: A Study by Low Temperature Scanning Laser Microscopy* // Phys. Rev. Lett. **102**, 017006. 2009], а также взаимодействие областей «горячего пятна» с резонансными модами, вызванными геометрией структур [S. Guenon, M. Grunzweig, R. Kleiner et. al. *Interaction of hot spots and terahertz waves in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ intrinsic Josephson junction stacks of various geometry*. // Phys. Rev. B, **82**, 214506. 2010]. В работе [B. Gross, S. Guénon, R. Kleiner et.al. *Hot-spot formation in stacks of intrinsic Josephson junctions in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$* . // Phys. Rev. B **86**, 094524. 2012.] были предложены объяснения механизмов образования «горячего пятна» и некоторое моделирование. Зарубежные участники проекта имеют большой и уникальный опыт в разработке, создании и исследовании электрических и электродинамических свойств при помощи технологий низкотемпературной сканирующей электронной микроскопии, а также низкотемпературной сканирующей лазерной микроскопии.

Одним из первых важных шагов исследования генераторов было применение технологии сканирующей лазерной микроскопии к меза-структурам с длиной порядка 330 мкм, которые содержали порядка 670 переходов. Измерения проводились в Тюбингене, Германия; их результаты представлены на рис. 10. Следующим шагом было детектирование ТГц излучения генераторов. Экспериментальная установка была разработана и сконструирована в Тюбингене (Германия) и установлена в г. Цукуба (Япония) и состояла из болометра на основе Si, Фурье-спектрометра, фильтров и параболических зеркал. Было обнаружено, что наиболее мощное ТГц излучение наблюдается при таких значениях тока, при которых появлялись стоячие волны (изображение по-прежнему контролировалось при помощи LTSLM); результаты приведены на рис. 11.

Следующей важной задачей было показать, что «горячее пятно», наблюдаемое при помощи сканирующего лазерного микроскопа, является областью с температурой, выше критической ($T_{\text{hot-spot}} > T_c$), что стоячие волны, которые видны на LTSLM-изображениях, возникают из электромагнитных волн, и проанализировать геометрию структуры, что позволило бы управлять возникновением и положением «горячего пятна» и стоячих волн. Такая работа была проделана, результаты показаны на рисунке 12. Было

найдено хорошее согласование эксперимента и теории, что подтвердило правильность интерпретации изображений, полученных методами сканирующей лазерной микроскопии. Когда ток пропусклся через левый/правый край меза-структуры, «горячее пятно» формировалось справа/слева структуры, и стоячая волна появлялась слева/справа структуры. Для симметричного пропускания тока через структуру горячее пятно появлялось в центре, при этом стоячие волны не возникали. Также было показано, что «горячее пятно» движется непрерывно с изменением соотношения токов смещения, пропускаемых через края структуры (см. рис. 12).

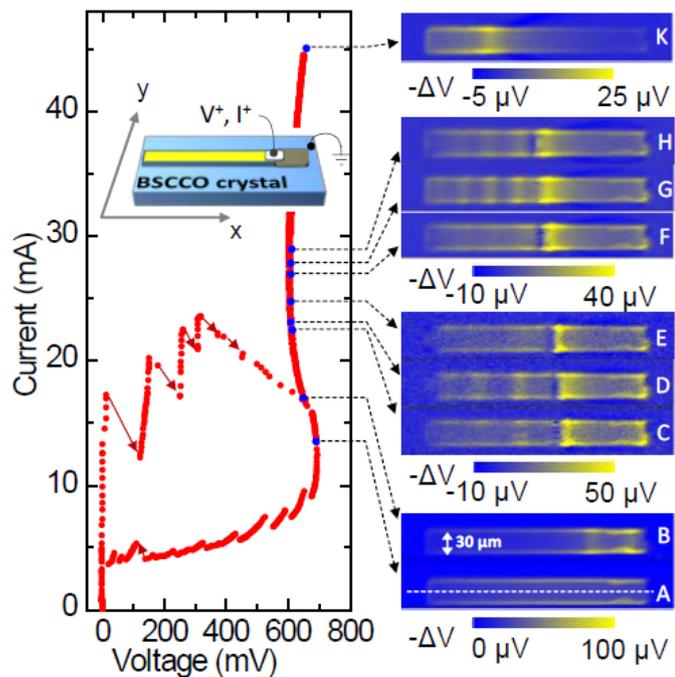


Рис. 10. Вольт-амперные характеристики (слева) и LTSLM-изображения (справа) меза-структуры размером $330 \times 30 \text{ мкм}^2$, состоящей из ~ 670 переходов

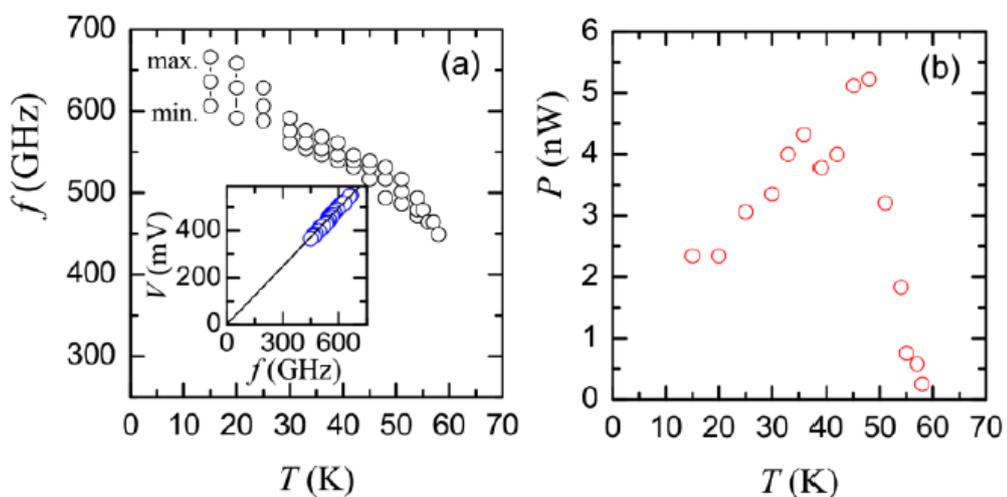


Рис. 11. Частота излучения (a) и мощность излучения (b) меза-структуры размером $300 \times 50 \text{ мкм}^2$, состоящей из ~ 400 переходов. Вставка на (a): напряжение vs. частота излучения. Сплошная линия соответствует соотношению Джозефсона (линейная связь частоты и напряжения).

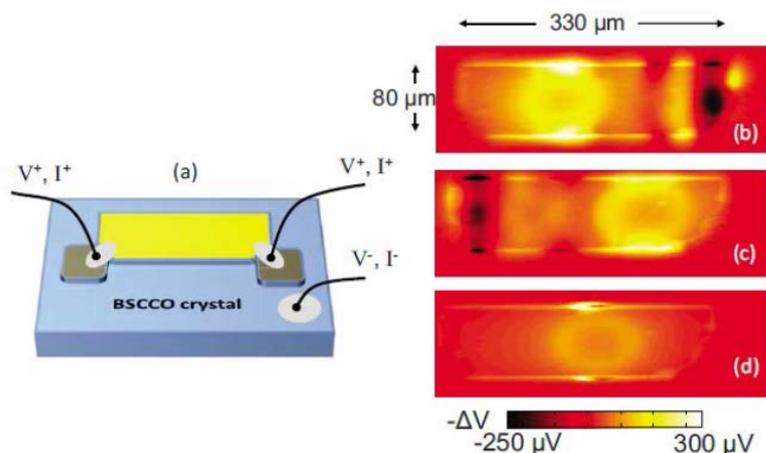


Рис. 12. Управление положением «горячего пятна» и появления стоячих электромагнитных волн при помощи пропускания тока смещения I^+ (a) через разные стороны структуры: (b) ток пропускается слева, (c) ток пропускается справа, (d) ток пропускается симметрично слева и справа.

Топология меза-структуры (т.е. массива джозефсоновских переходов, сформированных при помощи травления поверхности монокристалла) имеет недостаток: все соединения между разными переходами или между переходами и антенной приходится делать при помощи нормальных проводников. Поэтому была поставлена задача разработать полностью сверхпроводниковые структуры. Такая задача может быть реализована при помощи технологии так называемого «двустороннего травления», предложенного впервые иностранным коллегой Н.В. Wang. Образец монокристалла BSCCO помещается на подложку и травится сверху, затем образец верхней частью устанавливается на другую подложку, первая подложка снимается, и нижняя часть (бывшее «дно структуры», которая на новой подложке является верхом) снова травится. Такая технология была реализована на практике и позволила получать одномерные и двумерные структуры из массивов переходов, интегрированных с антенной. Технология была применена к меза-структурам большого размера для получения высоких мощностей ТГц излучения. Структура генератора и процесс изготовления схематично показаны на рисунке 13. Такие генераторы качественно ведут себя аналогично классических меза-структурам как по распределению температуры, так и в смысле характеристик излучения.

Дальнейшие исследования спектральных характеристик полученных генераторов с высокой точностью проведены коллегами из Германии совместно с российскими авторами проекта под руководством В.П. Кошельца на базе оборудования ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН и описаны в начале текущего раздела заявки (3.5.8). Результаты совместной работы опубликованы в ведущих мировых журналах: **Physical Review B** (в том числе в разделе **Rapid Communications**), **Applied Physics Letters**, **Phys. Rev. Applied**, **Superconductor Science and Technology** а также представлены на ведущих международных и российских конференциях в области сверхпроводниковой электроники и терагерцовой техники: International Superconductive Electronics Conference (**ISEC**), European Conference on Applied Superconductivity (**EUCAS**), Applied Superconductivity Conference (**ASC**), International Symposium on Terahertz Science and Technology (**ISSTT**), Infrared, Millimeter Wave, and Terahertz Technologies (**IMMTT**), Международный симпозиум «Нанопизика и наноэлектроника» (Нижний Новгород), Национальная конференция по прикладной сверхпроводимости (Москва). Полные данные о совместных журнальных публикациях приведены в следующем разделе.

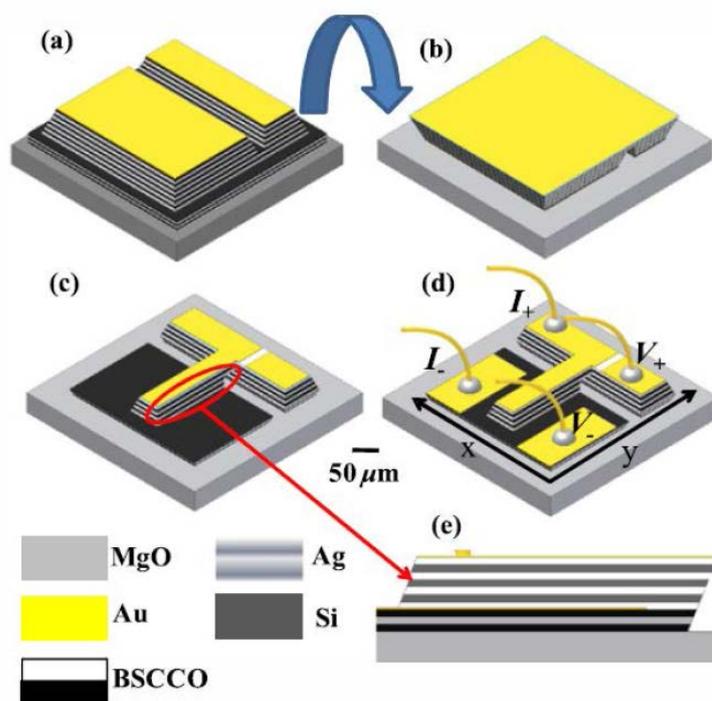


Рис. 13. Реализация ТГц генератора из массива джозефсоновских переходов на основе полностью сверхпроводниковых структур, полученных методом «двустороннего травления».

3.5.9. Список основных совместных публикаций российских и зарубежных участников проекта, наиболее близко относящихся к предлагаемому проекту (на языке оригинала публикации):

Российские и немецкие ученые имеют богатый опыт создания сверхпроводниковых генераторов и приемных систем терагерцового диапазона, а также в области разработки интегральных систем на основе BSCCO-генераторов из высокотемпературных сверхпроводников. За последние пять лет участниками проекта подготовлено более 100 публикаций и докладов на ведущих международных конференциях. Ниже приведен список основных совместных публикаций российских и немецких участников по теме проекта:

1. Mengyue Li, Jie Yuan, **Nickolay Kinev**, Jun Li, **Boris Gross**, Stefan Guenon, Akira Ishii, Kazuto Hirata, Takeshi Hatano, Dieter Koelle, **Reinhold Kleiner**, **Valery P. Koshelets**, Huabing Wang, Peiheng Wu, «Linewidth dependence of coherent terahertz emission from $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ intrinsic Josephson junction stacks in the hot-spot regime», Phys. Rev. B 86, 060505(R), 2012.

2. D.Y. An, J. Yuan, **N. Kinev**, M.Y. Li, Y. Huang, M. Ji, H. Zhang, Z.L. Sun, L. Kang, B.B. Jin, J. Chen, J. Li, **B. Gross**, A. Ishii, K. Hirata, T. Hatano, **V.P. Koshelets**, D. Koelle, **R. Kleiner**, H.B. Wang, W.W. Xu, and P.H. Wu. «Terahertz emission and detection both based on high-Tc superconductors: Towards an integrated receiver», Applied Physics Letters 102, 092601. 2013.

3. **B. Gross**, J. Yuan, D.Y. An, M.Y. Li, **N. Kinev**, X.J. Zhou, M. Ji, Y. Huang, T. Hatano, R.G. Mints, **V.P. Koshelets**, P.H. Wu, H.B. Wang, D. Koelle, and **R. Kleiner**, "Modeling the linewidth dependence of coherent terahertz emission from intrinsic Josephson junction stacks in the hot-spot regime". Phys. Rev. B 88, 014524. 2013.

4. **M. Paramonov**, **M. Yu. Fominsky**, **V. P. Koshelets**, B. Neumeier, D. Koelle, **R. Kleiner**, and E. Goldobin, «Radiation power and linewidth of a semiuxon-based Josephson oscillator», Applied Physics Letters, **104**, 062603 (2014)

5. M. Ji, J. Yuan, B. Gross, **F. Rudau**, D.Y. An, M.Y. Li, X.J. Zhou, Y. Huang, H. C. Sun, Q. Zhu, J. Li, **N. Kinev**, T. Hatano, **V.P. Koshelets**, D. Koelle, **R. Kleiner**, W.W. Xu, B.B. Jin, H.B. Wang, and P.H. Wu, Bi₂Sr₂CaCu₂O₈ intrinsic Josephson junction stacks with improved cooling: Coherent emission above 1 THz, *Applied Physics Letters* **105**, 122602 (2014); doi: 10.1063/1.4896684.

6. L.Y. Hao, M. Ji, J. Yuan, D.Y. An, M.Y. Li, X.J. Zhou, Y. Huang, H.C. Sun, Q. Zhu, **F. Rudau**, **R. Wieland**, **N. Kinev**, J. Li, W.W. Xu, B.B. Jin, J. Chen, T. Hatano, V.P. Koshelets, D. Koelle, **R. Kleiner**, H.B. Wang, and P.H. Wu, A Compact Superconducting Terahertz Source Operating in Liquid Nitrogen, *Phys. Rev. Applied*, **3**, 024006, 7 pages (2015) – Published 19 Feb, 2015

7. B Gross, **F Rudau**, **N Kinev**, M Tsujimoto, J Yuan, Y Huang, M Ji, X J Zhou, D Y An, A Ishii, P H Wu, T Hatano, D Koelle, H B Wang, **V P Koshelets and R Kleiner**, “Electrothermal behavior and terahertz emission properties of a planar array of two Bi₂Sr₂CaCu₂O_{8+δ} intrinsic Josephson junction stacks”, *Superconductor Science and Technology* **28**, 055004 (10p), 2015; doi:10.1088/0953-2048/28/5/055004

8. **F. Rudau**, M. Tsujimoto, B. Gross, T.E. Judd, **R. Wieland**, E. Goldobin, **N. Kinev**, J. Yuan, Y. Huang, M. Ji, X.J. Zhou, D.Y. An, A. Ishii, R.G. Mints, P.H. Wu, T. Hatano, H.B. Wang, V.P. Koshelets, D. Koelle, and R. Kleiner, “Thermal and electromagnetic properties of Bi₂Sr₂CaCu₂O₈ intrinsic Josephson junction stacks studied via one-dimensional coupled sine-Gordon equations”, *Phys. Rev. B* **91**, 104513; DOI: 10.1103/PhysRevB.91.104513, (2015).

9. X.J. Zhou, J. Yuan, H. Wu, Z.S. Gao, M. Ji, D.Y. An, Y. Huang, **F. Rudau**, **R. Wieland**, B. Gross, **N. Kinev**, J. Li, A. Ishii, T. Hatano, **V.P. Koshelets**, D. Koelle, **R. Kleiner**, H.B. Wang, and P. H. Wu, “Tuning the Terahertz Emission Power of an Intrinsic Josephson-Junction Stack with a Focused Laser Beam”, *Phys. Rev. Applied*, vol.3, issue4, Article number 044012, 6 pages April (2015)

10. **F. Rudau**, **R. Wieland**, J. Langer, X.J. Zhou, Y. Huang, **N. Kinev**, J. Yuan, M. Ji, A. Ishii, P.H. Wu, T. Hatano, **V.P. Koshelets**, H.B. Wang, D. Koelle, and **R. Kleiner**, «3D simulations of the electrothermal and THz emission properties of Bi₂Sr₂CaCu₂O₈ intrinsic Josephson junction stacks», *Phys. Rev. Applied*, vol. 5, Article number 044017 (2016).

Публикации российских участников, близко связанные с тематикой проекта (публикации с участием немецких участников включены в предыдущий раздел):

R1. V.P. Koshelets, S.V. Shitov, “Integrated Superconducting Receivers”, *Superconductor Science and Technology*, **vol 13**, pp. R53-R69, (2000)

R2. Gert de Lange, Manfred Birk, Dick Boersma, Johannes Dercksen, Pavel Dmitriev, Andrey B. Ermakov, Lyudmila V. Filippenko, Hans Golstein, Ruud W.M. Hoogeveen, Leo de Jong, Andrey V. Khudchenko, Nickolay V. Kinev, Oleg S. Kiselev, Bart van Kuik, Arno de Lange, Joris van Rantwijk, Alexander S. Sobolev, Mikhail Yu. Torgashin, Ed de Vries, Pavel A. Yagoubov, and Valery P. Koshelets, “Development and Characterization of the Superconducting Integrated Receiver Channel of the TELIS Atmospheric Sounder”, *Supercond. Sci. Technol.* vol. 23, No 4, 045016 (8pp), (2010).

R3. R. Monaco, J. Mygind, and V. P. Koshelets, «Long Josephson tunnel junctions with doubly connected electrodes», *Phys. Rev. B*, **81**, 094514 (13 pages), DOI: 10.1103/PhysRevB.85.094514, 2012.

R4. Н.В. Кинев, В.П. Кошелец, "Процессы тепловыделения в криогенной системе и их влияние на функционирование сверхпроводникового интегрального приемника", *ЖТФ*, том 83, стр 123-131, вып. 3. (2013).

R5. Roberto Monaco, Valery P. Koshelets, Anna Mukhortova, and Jesper Mygind, “Self-field effects in window-type Josephson tunnel junction”, *Supercond. Sci. Technol.* **26** (2013) 055021 (13 pages); doi:10.1088/0953-2048/26/5/055021 (2013)

- R6. Konstantin V. Kalashnikov, Andrey V. Khudchenko, and Valery P. Koshelets, "Harmonic Phase Detector for Phase Locking of Cryogenic Terahertz Oscillator", *Appl. Phys. Lett.* 103, 102601 (2013); DOI: 10.1063/1.4819064.
- R7. S. Butz, P. Jung, L. V. Filippenko, V. P. Koshelets and A. V. Ustinov, "Protecting SQUID metamaterials against stray magnetic field", *Supercond. Sci. Technol.* **26**, 094003; [doi:10.1088/0953-2048/26/9/094003](https://doi.org/10.1088/0953-2048/26/9/094003) (2013).
- R8. S. Butz, P. Jung, L.V. Filippenko, V.P. Koshelets, and A.V. Ustinov, "A one-dimensional tunable magnetic metamaterial", *Optics Express*, Vol. 21, Issue 19, pp.22540-22548; DOI:10.1364/OE.21.022540, (2013).
- R9. A. Vidiborskiy, V. P. Koshelets, L. V. Filippenko, S. V. Shitov, and A. V. Ustinov, "Ultra-compact tunable split-ring resonators", *Applied Physics Letters*, 103, 162602 (2013).
- R10. Н.В. Кинев и В.П. Кошелец, «Электрические контакты для сверхпроводникового интегрального приемника», Патент РФ № 2511669; зарегистрирован в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 07.02.2014.
- R11. В.П. Кошелец, Л.Ф. Филиппенко, П.Н. Дмитриев «Перестраиваемый криогенный генератор гетеродина субтерагерцового диапазона на основе распределенного туннельного перехода для интегральных приемных систем», Патент РФ № 2522711, зарегистрирован в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 21 мая 2014 года.
- R12. M. Paramonov, M. Yu. Fominsky, V. P. Koshelets, B. Neumeier, D. Koelle, R. Kleiner, and E. Goldobin, «Radiation power and linewidth of a semiuxon-based Josephson oscillator», *Applied Physics Letters*, **104**, 062603 (2014); DOI: 10.1063/1.4864320;
- R13. Philipp Jung, Susanne Butz, Michael Marthaler, Mikhail V. Fistul, Juha Leppäkangas, Valery P. Koshelets, Alexey V. Ustinov, «A multi-stable switchable metamaterial»; *Nature Communications* **5**, Article number: 3730 (2014); doi:10.1038/ncomms4730; Impact Factor of 10.015
- R14. N. V. Kinev, L. V. Filippenko, M. Y. Li, J. Yuan, H. B. Wang, and V. P. Koshelets, "Spectral properties of a terahertz oscillator based on the $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ mesastructure", *Radiophysics and Quantum Electronics*, Vol. 56, No. 8–9, January, pp. 582-590, 2014 (Russian Original Vol. 56, Nos. 8–9, pp. 647-656, August–September, 2013)
- R15. Valery P. Koshelets, "Subterahertz sound excitation and detection by Long Josephson Junction", *Supercond. Sci. Technol.* 27 (2014) 065010 (7pp); doi:10.1088/0953-2048/27/6/065010; (2014).
- R16. V.P. Koshelets, P.N. Dmitriev, M.I. Faley, L.V. Filippenko, K.V. Kalashnikov, N.V. Kinev, O.S. Kiselev, A.A. Artanov, K.I. Rudakov, A. de Lange, G. de Lange, V.L. Vaks, M.Y. Li, H.B. Wang, "Superconducting Integrated Terahertz Spectrometers", *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, vol. 5, pp 687- 694, (July 2015)
- R17. Andrey Khudchenko, Andrey M. Baryshev, Kirill Rudakov, Valery Koshelets, Pavel Dmitriev, Ronald Hesper, Leo de Jong, "High Gap Nb-AlN-NbN SIS Junctions for Frequency Band 790-950 GHz", *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, vol. 6, No 1, pp. 127-132; (2016)
- R18. Alexander S. Averkin, Alexander P. Zhuravel, Philipp Jung, Natalia Maleeva, Valery P. Koshelets, Lyudmila V. Filippenko, Alexandre Karpov, and Alexey V. Ustinov, "Imaging coherent response of superconducting metasurface", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol 26, No 3, Article#: 1800403, (2016).
- R19. К.И. Рудаков, М.Е. Парамонов, П.Н. Дмитриев, А.М. Барышев, А.В. Худченко, В.П. Кошелец, «Определение высокочастотных параметров сверхпроводниковых планарных структур», *Радиотехника и электроника*, том 61, № 12, стр. 1220-1224 (2016).

R20. К.В. Калашников, А.А. Артанов, Л.В. Филиппенко, В.П. Кошелец, Исследование режимов смешения туннельных сверхпроводниковых структур, *Физика твердого тела*, том 58, вып. 11, стр. 2117 - 2120 (2016)

R21. К.И. Рудаков, П.Н. Дмитриев, А.М. Барышев, А.В. Худченко, В.П. Кошелец, «Сверхпроводниковые приемные структуры диапазона 700 - 950 ГГц для радиоастрономии», *Известия вузов. Радиофизика*, Том LIX, № 08–09, стр. 793-797, 2016

Публикации немецких участников по теме проекта (публикации с участием российских участников включены в раздел совместных публикаций)

1. U. Welp, K. Kadowaki, and R. Kleiner, "Superconducting emitters of THz radiation," *Nat. Photonics* **7**, 702 (2013) (Review article).

2. T. M. Benseman, A. E. Koshelev, V. Vlasko-Vlasov, Y. Hao, W.-K. Kwok, U. Welp, C. Keiser, B. Gross, M. Lange, D. Kölle, R. Kleiner, H. Minami, C. Watanabe, and K. Kadowaki, "Current Filamentation in Large $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ Mesa Devices Observed via Luminescent and Scanning Laser Thermal Microscopy", *Phys. Rev. Appl.* **3**, 044017 (2015).

3. X. J. Zhou, Q. Zhu, M. Ji, D. Y. An, L. Y. Hao, H. C. Sun, S. Ishida, F. Rudau, R. Wieland, J. Li, D. Koelle, H. Eisaki, Y. Yoshida, T. Hatano, R. Kleiner, H. B. Wang, and P. H. Wu, "Three-terminal stand-alone superconducting terahertz emitter", *Appl. Phys. Lett.* **107**, 122602 (2015)

4. B. Gross, S. Guénon, J. Yuan, M. Y. Li, J. Li, A. Ishii, R. G. Mints, T. Hatano, P. H. Wu, D. Koelle, H. B. Wang, and R. Kleiner, "Hot-spot formation in stacks of intrinsic Josephson junctions in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ ", *Phys. Rev. B.* 86 pp. 094524(1-8) (2012).

5. J. Yuan, M. Y. Li, J. Li, B. Gross, A. Iishi, K. Yamaura, T. Hatano, K. Hirata, E. Takayama-Muromachi, P. H. Wu, D. Koelle, R. Kleiner, and H. B. Wang, "Terahertz emission from large intrinsic Josephson junctions singled out from $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ single crystals", *Super. Sci. Tech.* **25**, 075015 (2012).

6. H. B. Wang, S. Guénon, B. Gross, J. Yuan, Z. G. Jiang, Y. Y. Zhong, M. Grunzweig, A. Iishi, P. H. Wu, T. Hatano, D. Koelle, and R. Kleiner, "Coherent Terahertz Emission of Intrinsic Josephson Junction Stacks in the Hot Spot Regime", *Phys. Rev. Lett.* **105**, 057002 (2010).

7. S. Guénon, M. Grunzweig, B. Gross, J. Yuan, Z. G. Jiang, Y. Y. Zhong, M. Y. Li., A. Iishi, P. H. Wu., T. Hatano, R. G. Mints, E. Goldobin, D. Koelle, H. B. Wang and R. Kleiner, "Interaction of hot spots and terahertz waves in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ intrinsic Josephson junction stacks of various geometry", *Phys. Rev. B*, **82**, 214506 (2010).

8. H. B. Wang, S. Guénon, J. Yuan, A. Iishi, S. Arisawa, T. Hatano, T. Yamashita, D. Koelle, and R. Kleiner, "Hot spots and waves in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ intrinsic Josephson junction stacks - a study by Low Temperature Scanning Laser Microscopy", *Phys. Rev. Lett.* **102**, 017006 (2009).

9. H. B. Wang, B. Y. Zhu, C. Gürllich, M. Ruoff, S. Kim, T. Hatano, B. R. Zhao, Z. X. Zhao, E. Goldobin, D. Koelle, and R. Kleiner, "Fast Josephson vortex ratchet made of intrinsic Josephson junctions in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ ", *Phys. Rev. B* **80**, 224507 (2009).

10. R. Kleiner, P. Müller. "Intrinsic Josephson effects in high-Tc- superconductors" // *Phys. Rev. B* **49**, 1327 (1994).

11. D. Koelle, R. Kleiner, F. Ludwig, E. Dantsker, John Clarke. "High-transition temperature superconducting quantum interference devices" // *Rev. Mod. Phys.* **71**, 631 (1999).

12. R. Kleiner, P. Müller, H. Kohlstedt, N.F. Pedersen, S. Sakai. "Dynamic behaviour of Josephson-coupled layered structures" // *Phys. Rev. B* **50**, 3942 (1994).

13. R. Kleiner, F. Steinmeyer, G. Kunkel, P. Müller. "Intrinsic Josephson Effects in $\text{Bi}_2\text{CaSr}_2\text{Cu}_2\text{O}_8$ Single Crystals". // *Phys. Rev. Lett.* **68**, 2394 (1992).

3.5.10. Список основных (не более 5) публикаций российского со-руководителя проекта в рецензируемых журналах за последние 3 года (независимо от их тематики, на языке оригинала публикации):

1. Philipp Jung, Susanne Butz, Michael Marthaler, Mikhail V. Fistul, Juha Leppäkangas, Valery P. Koshelets, Alexey V. Ustinov, «A multi-stable switchable metamaterial», *Nature Communications* **5**, Article number: 3730 (2014); doi:10.1038/ncomms4730
2. Valery P. Koshelets, "Subterahertz sound excitation and detection by Long Josephson Junction", *Supercond. Sci. Technol.* **27** (2014) 065010 (7pp); doi:10.1088/0953-2048/27/6/065010; (2014).
3. M. Ji, J. Yuan, B. Gross, F. Rudau, D.Y. An, M.Y. Li, X.J. Zhou, Y. Huang, H. C. Sun, Q. Zhu, J. Li, N. Kinev, T. Hatano, V.P. Koshelets, D. Koelle, R. Kleiner, W.W. Xu, B.B. Jin, H.B. Wang, and P.H. Wu, $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ intrinsic Josephson junction stacks with improved cooling: Coherent emission above 1 THz, *Applied Physics Letters* **105**, 122602 (2014); doi: 10.1063/1.4896684.
4. X.J. Zhou, J. Yuan, H. Wu, Z.S. Gao, M. Ji, D.Y. An, Y. Huang, F. Rudau, R. Wieland, B. Gross, N. Kinev, J. Li, A. Ishii, T. Hatano, V.P. Koshelets, D. Koelle, R. Kleiner, H.B. Wang, and P. H. Wu, "Tuning the Terahertz Emission Power of an Intrinsic Josephson-Junction Stack with a Focused Laser Beam", *Phys. Rev. Applied*, vol.3, issue4, Article number 044012, 6 pages April (2015)
5. V.P. Koshelets, P.N. Dmitriev, M.I. Faley, L.V. Filippenko, K.V. Kalashnikov, N.V. Kinev, O.S. Kiselev, A.A. Artanov, K.I. Rudakov, A. de Lange, G. de Lange, V.L. Vaks, M.Y. Li, H.B. Wang, "Superconducting Integrated Terahertz Spectrometers", *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, vol. 5, pp 687- 694, (July 2015); DOI: 10.1109/TTHZ.2015.2443500.

3.5.11. Перечень оборудования и материалов, имеющих у научных групп, необходимых для выполнения проекта - у российской научной группы и у зарубежной научной группы:

У российской и зарубежной научных групп есть всё необходимое оборудование для реализации проекта. В Германии имеется современный комплекс оборудования для изготовления образцов генераторов на основе массива джозефсоновских переходов, а также предварительного их исследования: вольт-амперные характеристики, уровень излучаемой мощности, пространственное распределение температуры по образцу. В России есть полный комплект оборудования для полноценного исследования спектральных характеристик ТГц генератора, а также для частотной и фазовой стабилизации его излучения. Конкретные технологические и экспериментальные установки и их назначение в данном проекте приведены ниже.

В ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН создан и успешно функционирует уникальный комплекс для изготовления и исследования сверхпроводниковых структур на основе переходов $\text{Nb-AIO}_x\text{-Nb}$ и Nb-AlN-NbN . В его состав входят две "чистые комнаты" класса 1000/10000 (см рис. 14) с рабочими зонами класса 100, сверхвысоковакуумные напылительные установки фирмы "Лейбольд АГ" L560-UV, Z400, а также установки совмещения и экспонирования MA150 и MJB3HP фирмы "Karl Zuss" с разрешением до 0.7 мкм. Установка для магнетронного напыления L560-UV (рис. 15) оборудована DC и RF магнетронами и пушкой для ионного травления различных материалов. Для изготовления туннельных переходов субмикронных размеров используется установка высокочастотного плазмохимического травления March Yupiter II фирмы «March Instruments Incorporated» (рис. 16) с рабочей частотой генератора 13.56 МГц; оборудована четырьмя газовыми вводами. В 2011 году была введена в эксплуатацию установка электронно-лучевой литографии «e_Line» фирмы Raith GmbH (рис. 17), а в самом начале

2014 – сверхвысоковакуумная установка магнетронного распыления кластерного типа модель KJLC CMS IN-LINE SPUTTER DEPOSITION SYSTEM фирмы Курт-Лескер. Эта установка (рис. 18) имеет две камеры для проведения напыления и окисления, оснащена системой шлюзовой загрузки, криогенным и турбомолекулярным насосами, ионным источником, а также 4 магнетронами постоянного и 2 ВЧ-магнетронами. Все это технологическое оборудование будет использовано при выполнении проекта.

Параметры системы электронно-лучевой литографии для изготовления структур субмикронных размеров e_Line фирмы Raith GmbH (Германия) позволяют получать структуры с размером до 30 нм на площади 100 x 100 мм². С помощью этой системы возможно как изготовление прецизионных фотошаблонов с субмикронными разрешениями, так и проведение прямой электронно-лучевой литографии для создания сложных многослойных интегральных структур с размерами в десятки нанометров. Отработаны режимы изготовления прецизионных фотошаблонов (размер стекла 100 x 100 мм²) с минимальным размером элементов порядка 0.5 мкм; эти шаблоны будут использованы для изготовления микросхем интегрального приемника нового поколения.

Для проведения СВЧ измерений в ИПЭ им. В.А. Котельникова РАН имеется большой набор оборудования: генераторы на ЛОВ вплоть до частоты 1.2 ТГц, а также Fourier Transform Spectrometer (FTS) с предельной частотой более 4 ТГц и разрешением порядка 1 ГГц. Для проведения исследований СГГ и СИП имеется целый набор аппаратуры диапазона 1 – 26 ГГц, включая прецизионные синтезированные генераторы сигналов и спектроанализаторы ведущих производителей (Agilent, Rohde & Swartz, и т.д.). Для проведения измерений при температурах жидкого гелия (и ниже, вплоть до 2 К) в распоряжении группы имеется ряд заливных криостатов импортного производства: Leybold-Heraeus (Германия), вакуумные криостаты от Infared Lab (США), отечественный адаптированный транспортный сосуд Дьюара с широким горлом (50 мм), а также криогенная система замкнутого цикла (предельная температура 2.5 К) фирмы «Cryomech» - рис. 19.



Рис. 14. Чистая комнаты класса 1000 с рабочими зонами класса 100 и оборудован системами вентиляции, очистки и кондиционирования воздуха и системами деионизации воды. Слева установка магнетронного напыления L-560 UV фирмы «Leybold», в центре - установка оптической фотолитографии MA-150 «Karl Suss».



Рис. 15. Сверхвысоковакуумная установка магнетронного напыления L-560 UV фирмы "Leybold". Оборудована двумя DC- магнетронами для напыления металлических слоев и одним RF- магнетроном для напыления металлических и диэлектрических слоев с рабочей частотой генератора 13.56 МГц и пушкой для ионного травления.



Рис. 16. Установка высокочастотного плазмохимического травления March Yupiter II фирмы «March Instruments Incorporated» с рабочей частотой генератора 13.56 МГц; оборудована четырьмя газовыми вводами.



Рис. 17. Установка электронно-лучевой литографии: вверху - общий вид; внизу – фото камеры литографа.



Рис. 18. Сверхвысоковакуумная установка магнетронного распыления кластерного типа модель KJLC CMS IN-LINE SPUTTER DEPOSITION SYSTEM фирмы Курт-Лескер (США), после ее запуска в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.



Рис. 19. Фотография установки для исследования сверхпроводниковых интегральных приемных структур в криогенной системе замкнутого цикла.

Немецкие участники проекта в Тюбингене имеют в распоряжении несколько чистых комнат, оборудованных системами фото- и электронной литографии, установками травления фокусированным ионным пучком (FIB), травления ионами Ag, атомно-силовой микроскоп (AFM), сканирующий электронный микроскоп (SEM), рентген-дифрактометр и др. Оборудование приспособлено для изготовления как единичного массива (до 10^4 переходов), так и комплексных схем из множества массивов. Имеются приборы для

возбуждения и регистрации возбуждения ТГц резонансных мод в таких структурах, проявляющихся в равноотстоящих ступенях напряжения на вольт-амперных характеристиках.

Для исследования электрических и электродинамических свойств микроструктур в Тюбингене также имеется также установка низкотемпературной сканирующей лазерной микроскопии (LTSLM), и, при необходимости, есть возможность задействовать низкотемпературный сканирующий электронный микроскоп (LTSEM), а также установки для транспортных и шумовых измерений при температурах от 300 мК до 100 К в магнитных полях от единиц нТ до 12 Т.

3.5.12. Сведения о зарубежном со-руководителе проекта (на английском языке; для конкурсов по странам СНГ – на русском) - полное имя, год рождения, место работы, должность, область научных интересов (коды классификатора РФФИ), контактный телефон, e-mail:

name: Reinhold Kleiner
birth date: 16.05.1962
Institution: Tübingen University, Tübingen, German
Physikalisches Institut - Experimentalphysik II, Universität Tübingen
position: full professor
Fields of interest:

02-210 Низкие температуры и сверхпроводимость

02-205 Нано- и микроструктуры

02-410 Вакуумная и плазменная электроника, СВЧ-электроника

phone: + 49-(0)7071/29-76315
e-mail: kleiner@uni-tuebingen.de

3.5.13. Сведения о зарубежных участниках проекта (на английском языке; для конкурсов по странам СНГ – на русском) - полное имя, год рождения, место работы, должность:

name: Fabian Rudau
birth date: 20.09.1988
Institution: Tübingen University, Tübingen, Germany
Physikalisches Institut - Experimentalphysik II, Universität Tübingen
position: PhD student

name: Raphael Wieland
birth date: 30.08.1987
Institution: Tübingen University, Tübingen, Germany
Physikalisches Institut - Experimentalphysik II, Universität Tübingen
position: PhD student

name: Olcay Kizilaslan
birth date: 01.01.1987
Institution: Tübingen University, Tübingen, Germany
Physikalisches Institut - Experimentalphysik II, Universität Tübingen
position: post doc