

Итоговый отчёт по проекту РФФИ 14-02-91335 ННИО_а
«Когерентные ТГц генераторы на основе джозефсоновских переходов
 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ »

(Руководитель – В.П. Кошелец, ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН;
совместно с Тюбингенским Университетом, г. Тюбинген, Германия)

Аннотация, публикуемая на сайте Фонда (не более 1 стр.; описать содержание фактически проделанной работы и полученные результаты за весь период работы по Проекту)

Был исследован новый перспективный тип ТГц генераторов на основе многослойной структуры BiSrCaCuO с прямоугольной геометрией в виде «мезы». При пропускании достаточно высоких токов через структуры BiSrCaCuO «горячее пятно» (область с температурой выше критической температуры сверхпроводника) в массиве джозефсоновских переходов существует одновременно с областями, находящимися в сверхпроводящем состоянии, – «холодными» областями. В «холодных» областях возникают геометрические резонансы, синхронизирующие джозефсоновские токи и дающие мощное и стабильное ТГц излучение. В рамках проекта было исследовано взаимодействие «горячего пятна» и стоячих электромагнитных волн в образцах генераторов различной ширины. Также были изготовлены образцы новых конфигураций: с дополнительными под- и надслоем, выполненными из золота gold-BSCCO-gold (GBG-конфигурация), и «сендвич» (SWS-конфигурация), получаемая путём наклеивания на верхний слой золота у образца первой конфигурации дополнительной подложки MgO . Полученные результаты демонстрируют возможность контролировать образование «горячего пятна» и образование стоячих волн в режиме больших токов. Показано, что «горячее пятно» играет роль в формировании геометрии края структуры, являющейся «холодной» частью генератора. При фиксированном токе смещения и рабочей температуре для новой конфигурации SWS (по сравнению с «классической» и GBG-конфигураций) получено значительное увеличение напряжения на переходе и, соответственно, частоты генерации. Наивысшая рабочая частота излучения составила 1,05 ТГц при температуре порядка 20 К, реализована ширина перестройки частоты в 700 ГГц для одного образца генератора.

С целью оптимизации тепловых свойств генераторов на основе была разработана численная модель, описывающая динамику массива из джозефсоновских переходов на ТГц частотах. В рамках модели показано, что при наличии пространственного градиента у параметров перехода – критического тока и сопротивления – ширина линии генерации уменьшается с ростом температуры, что хорошо согласуется с проведёнными ранее экспериментальными наблюдениями. Оптимальные диапазон температур в расчётной модели составил 30-40 К, наилучшая рассчитанная ширина линии составила 25 МГц.

Продемонстрирована возможность частотной и фазовой стабилизации генератора на основе BSCCO с помощью системы ФАПЧ и сверхпроводникового интегрального приёмника, направляющего сигнал генератора на пониженной частоте в петлю обратной связи. В результате были достигнуты фазовая и частотная стабилизации генератора в нескольких его рабочих точках, но не в своём рабочем диапазоне. Проведён эксперимент по регистрации линий поглощения лабораторных газов с использованием BSCCO-генератора в качестве активного источника, продемонстрирована возможность применения генератора для спектроскопии газовых смесей.

Объявленные ранее цели Проекта

На 2014 год были объявлены следующие цели:

- 1 Исследование взаимодействия «горячего пятна», ТГц излучения и геометрических резонансов в прямоугольной меза-структуре (п. 1.1 общего плана Заявки)
- 2 Исследование максимальной частоты ТГц излучения f_{\max} как функции ширины структуры (п. 1.2 общего плана Заявки)
- 3 Разработка и оптимизация антенн, соединительных и согласующих структур между антенной и генератором (п. 2.1 общего плана Заявки)

На 2015 год были объявлены следующие цели:

- 1 Оптимизация тепловых свойств генератора (п. 1.3 общего плана Заявки)
- 2 Исследование массивов джозефсоновских переходов с высокой выходной мощностью (п. 2.2 общего плана Заявки)

На 2016 год были объявлены следующие цели:

- 1 Исследование возможностей фазовой синхронизации излучения (данный пункт работ был добавлен по результатам 2015 года)
- 2 Спектроскопия при помощи массива джозефсоновских переходов в структурах $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ (пункт 2.3 общего плана Заявки)

Полученные в ходе выполнения Проекта важнейшие результаты

Результаты 2014 года

Исследование взаимодействия «горячего пятна», ТГц излучения и геометрических резонансов в прямоугольной меза-структуре. Исследование максимальной частоты ТГц излучения генератора

Измерения, проведенные в рамках проекта, позволяют лучше понять механизм образования «горячего пятна» и образования стоячих волн в генераторе на основе массиве из джозефсоновских переходов. При образовании «горячего пятна» в генераторах прямоугольной формы, расположенных в непосредственной близости с детектором, установлено, что критический ток детектора исчезает при прохождении фронта «горячего пятна». Это соответствует уже существующей интерпретации «горячего пятна», наблюдаемой ранее при помощи низкотемпературного сканирующего лазерного микроскопа, однако это трудно объяснить в предположении, что область «горячего пятна» находится в сверхпроводящем состоянии. Полученные результаты указывают на возможность контролировать образование «горячего пятна» и образование стоячих волн в режиме больших токов. Однако, до сих пор имеется проблема во воспроизводимости характеристик различных генераторов при их изготовлении. В частности, не все изготовленные образцы излучают, а для тех образцов, которые излучают, пока что невозможно предсказать диапазон излучения. Образование «горячего пятна» возникает вследствие некоторого тонкого баланса между рассеиваемой мощностью и потоками тепла (их притоками и утечками из системы) через электрические контакты и тонкоплёночные слои структуры. Следовательно, тепловые свойства различны не только для различных образцов генератора, но также сильно зависят от экспериментальной установки. Следует отметить, что до сих пор отсутствуют точные теории и модели для описания образования

«зародышей» (ядер) «горячего пятна», модели для ТГц излучения таких генераторов, а также взаимодействия «горячего пятна» с излучением.

Полученные результаты показали, что «горячее пятно» играет роль в формировании геометрии края структуры, являющейся «холодной» частью генератора. Ширина перехода между горячей и холодной областью составляет порядка 20-30 мкм. Эта длина много меньше, чем характерная длина волны возбуждаемых мод стоячих волн (порядка 100 мкм). Следовательно, изменение в проводимости между холодной и горячей частью кажется достаточной для того, чтобы привести к отражению электромагнитной волны от границы «горячего пятна». Можно также полагать, что при наличии стоячей волны холодная часть «мезы» испытывают дополнительный нагрев в антиузлах, что даёт вклад в тепловой баланс всей структуры. Это, в свою очередь, может вызывать обратную связь в положении «горячего пятна» и может привести к некоторому пространству «само-выравнивания» положения «горячего пятна» относительно волны. Также могут присутствовать дополнительные механизмы взаимодействия между горячим пятном и ТГц волнами. Например, «горячая часть» мезы может действовать как дополнительный шунт, помогающий синхронизации переходов в массиве. Кроме того, неравновесные процессы а границе «горячего пятна» также могут давать вклад в синхронизацию.

Сверхпроводниковый интегральный приёмник для измерения спектральных характеристик, разработанный в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН и имеющийся в распоряжении российских учёных, обладает полосой рабочих частот 400 - 750 ГГц. Спектральные измерения характеристик генератора на частотах выше 750 ГГц проводились при помощи **Установки 1** иностранными коллегами в сотрудничестве с российскими в г. Тюбинген (см. раздел. «Методы и подходы, использованные в ходе выполнения проекта»). Было проведено исследование максимально реализуемой частоты генерации «мезы». Внешний вид «классической» конфигурации генератора и схема 4-точечного подключения к блокам смещения и измерения изображены на **рис. 1**. Два исследуемых в данной работе образца имели немного иные конфигурации. Первая конфигурация представляет собой образец BSCCO, контактирующий со слоем золота с обеих сторон («gold-BSCCO-gold» или GBG-структура). Вторая конфигурация получается из первой приклеиванием на верхний слой золота дополнительной подложки MgO для обеспечения дополнительного теплоотвода (см. **Рис. 2**). Результаты исследования частотного диапазона генераторов различных конфигураций в зависимости от рабочей температуры T_b и напряжения V сведены на **рисунке 3**. Обе структуры демонстрируют одинаковый типа зависимости, а именно: частота излучения постепенно растёт с уменьшением T_b . GBG-конфигурация продемонстрировала излучение при температурах ниже 65 K, в то время как излучение SWS-конфигурации было зарегистрировано в диапазоне от 20 до 80 K, что говорит о возможности работы при температуре жидкого азота. Для SWS-конфигурации при фиксированной температуре 20 K диапазон рабочих частот (0,76-1,05 ТГц) оказался значительно выше, чем для GBG (0,62-0,82 ТГц). Впервые было получено излучение генератора на частоте выше 1 ТГц. Для всего диапазона рабочих температур SWS проявляется гораздо более широкий диапазон рабочих частот (0,34-1,05 ТГц), чем GBG (0,43-0,82 ТГц). Следует отметить, что излучение SWS при температурах выше 50 K наблюдалось в режиме «малых токов». Спектр излучения при самой высокой достигнутой частоте – 1,05 ТГц – показан во вставке на **рис. 3 а**, рабочая точка соответствует режиму «низких токов».

Таким образом, при фиксированном токе смещения и рабочей температуре для новой конфигурации SWS (по сравнению с классической GBG) получено значительное увеличение напряжения на переходе и, соответственно, частоты генерации. Наивысшая

рабочая частота излучения составила 1,05 ТГц при температуре порядка 20 К, реализована ширина перестройки частоты в 700 ГГц для одного образца генератора.

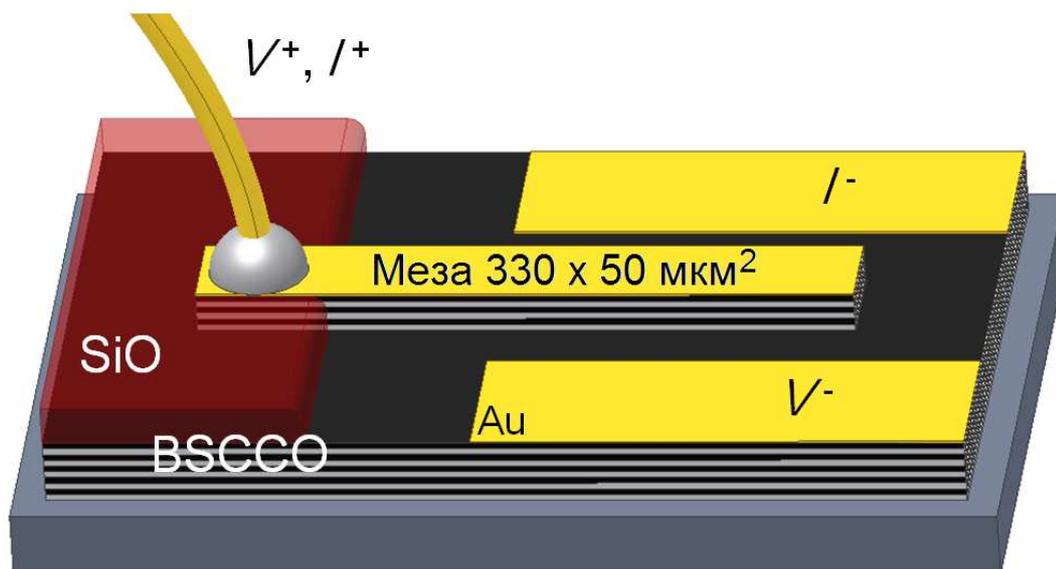


Рис. 1. Схематичное изображение генератора на основе меза-структуры из монокристалла $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ (BSCCO), выращенного на подложке из кремния, а также 4-точечная схема подключения к источнику задания тока (I^+ , I^-) и измерения напряжения (V^+ , V^-). Контактные площадки выполнены из золота.

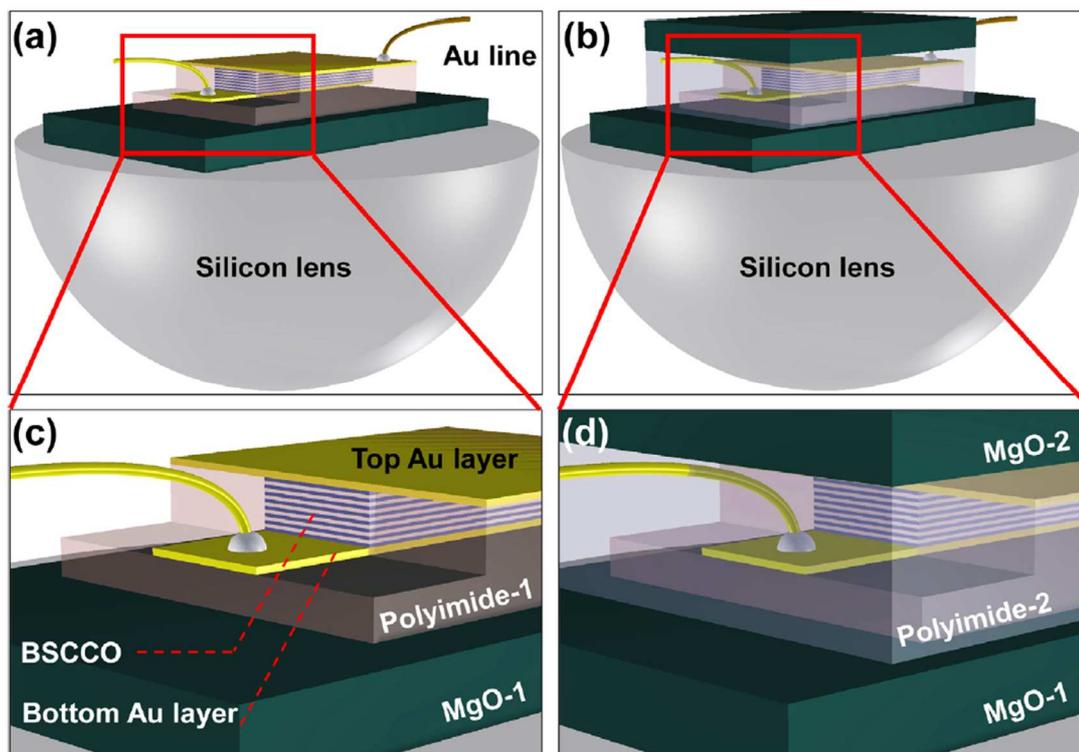


Рис. 2. Схематичный вид конфигураций генератора: (a) GBG и (b) SWS, установленных на кремниевую линзу. (c) и (d) – выноска крупным планом.

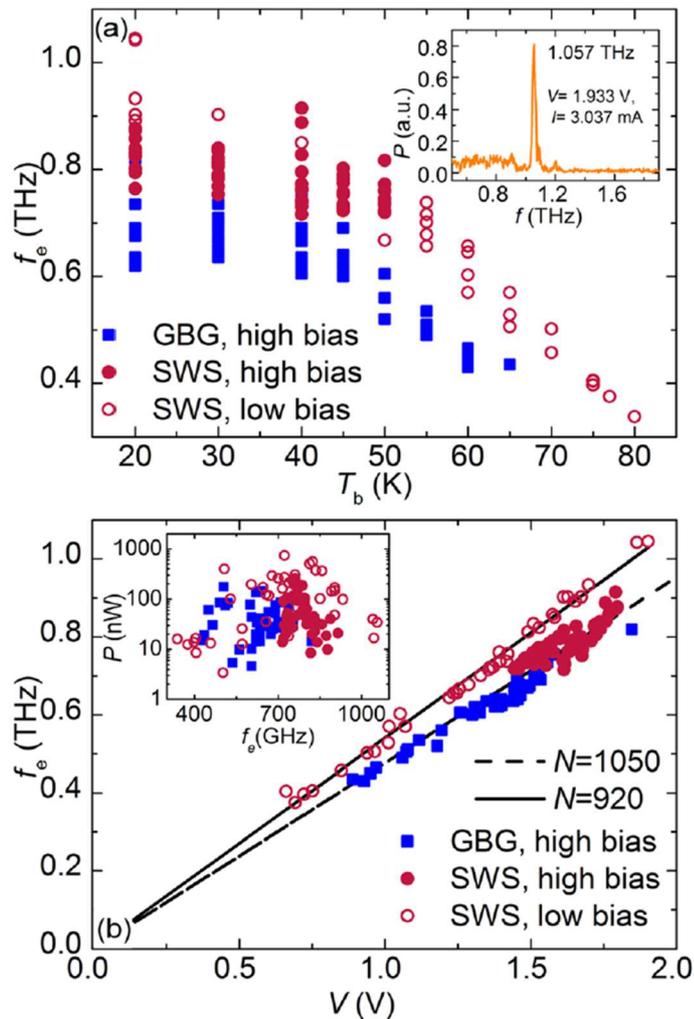


Рис. 3. Частота излучения в зависимости от (а) рабочей температуры и (б) напряжения на генераторе. Линии на графике (б) соответствуют частоте $f_e = 2eN/hV$, где $N=1050$ (пунктирная линия) и $N=920$ (сплошная линия). Вставка на графике (а) показывает спектр ТГц излучения при температуре 20 К и токе смещения 3,037 мА. Вставка на графике (б) показывает излучаемую мощность для всех измеренных температур и рабочих точек.

Исследование спектральных характеристик генератора с высоким спектральным разрешением при помощи сверхпроводникового интегрального приёмника (СИП)

Для измерения линий генерации со спектральным разрешением лучше 0,5 МГц были апробированы две схемы расположения генератора и СИП друг относительно друга. В первом случае мезаструктура располагалась в криостате СИП в непосредственной близости со смесительным блоком интегрального приемника (**рис. 4 а**), во втором случае генератор и приемник были разнесены в независимые криостаты, при этом излучение из одной криогенной установки в другую направлялось через квазиоптические окна из Мулар (**рис. 4 б**). Первый случай более прост конструктивно и эксплуатационно, однако, расположение устройства с рабочей температурой порядка 50 К в одной криогенной установке с СИП, работающим при температурах порядка 4,5 К, несмотря на наличие нескольких тепловых экранов из Gortex приводит к перегреву существенному ухудшению рабочих характеристик гетеродина на основе распределённого джозефсоновского перехода и уменьшает область рабочих частот. На **рис. 5** приведены ВАХ СИС-смесителя при различной мощности накачки от BSCCO-генератора. Вычисленное значение

максимальной мощности накачки из формулы и формы ВАХ (рис. 5) оказалось равным порядка $1,2 \text{ мкВт}$. При этом уровень накачки СИС-смесителя превышал «щелевой» скачок тока $I_{pump}^{max} > \Delta I_g \approx 150 \text{ мкА}$. При таких мощностях накачки смеситель работает в режиме насыщения, который не является оптимальным режимом работы СИП (оптимальный режим – $I_{pump} \approx 0,2 \cdot \Delta I_g$). Для понижения мощности накачки между генератором и приемником был установлен поглотитель из одного - нескольких слоев наждачной бумаги, мощность поглощения настраивалась количеством слоев поглотителя. Таким образом, разработанная антенно-линзовая система (СВЧ-антенна согласованная с эллиптической линзой) позволила достигнуть выходной мощности генератора более 1 мкВт . Ширина спектральной линии в наилучших точках составила порядка 20 МГц (рис. 6).

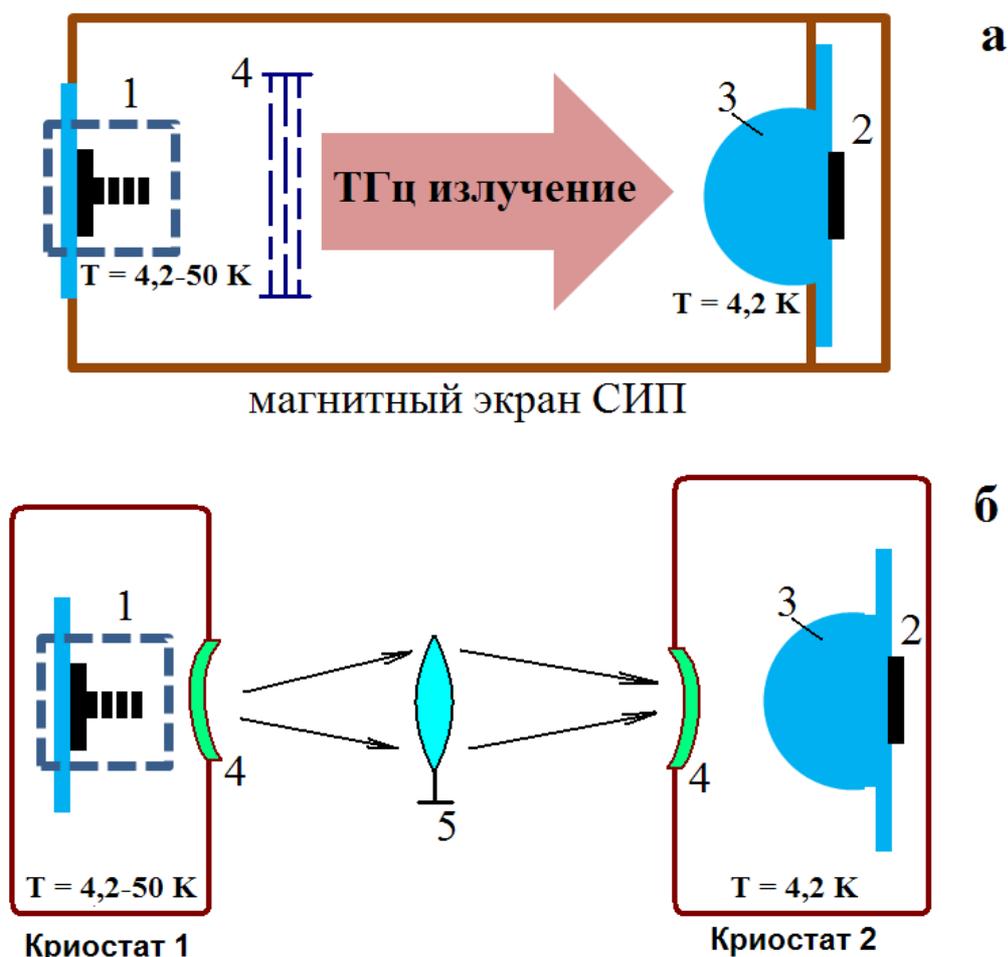


Рис.4. Схемы установок для исследования спектральных характеристик генератора (1) при помощи СИП (2), установленного на кремниевую линзу (3):

а – расположение генератора и приемника в едином криостате, между устройствами стоит установлено несколько (от одного до трех) тепловых ИК-фильтров (4) из Gortex;

б – расположение генератора и приемника в различных криостатах с выходным/входным окнами (4), для улучшения диаграммы направленности использована собирающая линза (5).

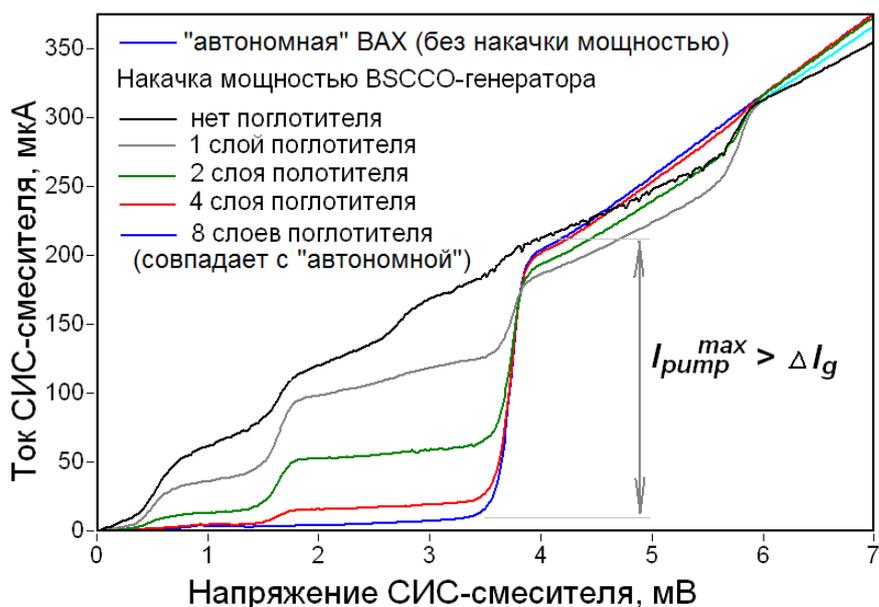


Рис. 5. ВАХ СИС-смесителя интегрального приемника без накачки мощность генератора (синяя кривая) и с накачкой мощностью с различным количеством слоев поглотителя между приемником и генератором. Частота генератора $f \approx 500$ ГГц.

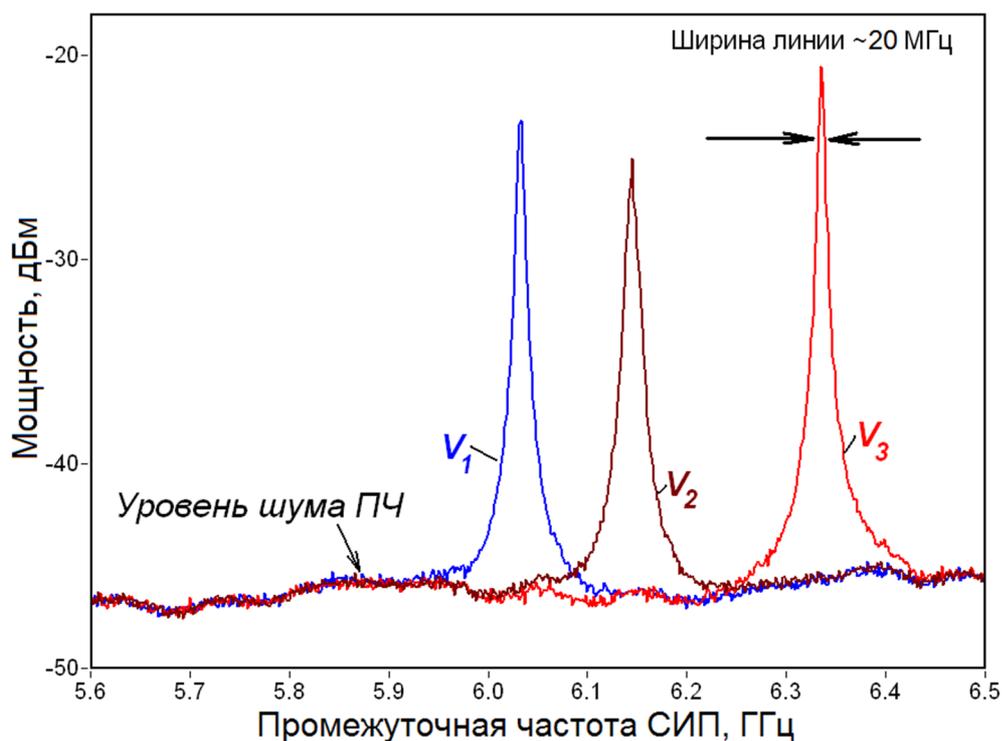


Рис. 6. Спектральные линии излучения генератора, измеренные при близких значениях напряжения рабочей точки V_i в пределах диапазона промежуточных частот (ПЧ) интегрального приемника. Центр графиков $f_{ПЧ} = 6$ ГГц соответствует частоте генератора $f_0 = 584$ ГГц, рабочая температура 35 К.

Результаты 2015 года

Оптимизация тепловых свойств генератора

С целью оптимизации тепловых свойств генератора на основе меза-структуры $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ (далее BSCCO) была разработана численная модель, описывающая динамику массива из джозефсоновских переходов, которым физически является меза-структура BSCCO. Более подробно модель описана в разделе «Методы и подходы». Главной мотивацией таких расчётов является первый шаг к описанию электродинамики системы из массива джозефсоновских переходов на ТГц частотах в режиме «больших» токов, когда в системе присутствуют одновременно область сверхпроводимости и «горячее пятно». Структура при образовании «горячего пятна» в построенной модели представлена двумя параллельными массивами из сосредоточенных джозефсоновских переходов при температурах T_1 и T_2 и дополнительного шунтирующего сопротивления при температуре T_2 , включенного параллельно массивам. В модели учтены уравнения тепловой диффузии, все элементы контактируют с держателем при температуре T_b . Получены рассчитанные вольт-амперные характеристики меза-структуры, проведён расчёт ширины линии генерации df как функции от температуры T_b . В рамках модели показано, что при наличии пространственного градиента у параметров перехода – критического тока и сопротивления – ширина линии df уменьшается с ростом T_b , что отлично согласуется с экспериментальными наблюдениями, проведёнными ранее.

В ранее проведённых экспериментах было установлено, что максимальная мощность излучения достигается при некоторых промежуточных значениях рабочей температуры образца в диапазоне 30-40 К. Кроме того, ширина линии излучения df уменьшается с ростом температуры. Оба этих факта подтверждены в рамках построенной расчётной модели в случае наличия градиента критического тока и сопротивления в структуре. Такой градиент при эксперименте в реальной структуре предположительно может возникать вследствие наклонных краёв структуры. В рамках построенной модели было показано, что наличие такого градиента в параметрах образца генератора при низких температурах T_b сильнее приводит к ухудшению частотно-фазовой синхронизации излучения переходов, чем при высоких T_b . С другой стороны, тепловые флуктуации, также ухудшающие синхронизацию излучения, возрастают с ростом температуры T_b . Эти два эффекта уравнивают друг друга, приводя к тому, что максимальная мощность излучения системы достигается при некоторой промежуточной температуре $T_b \sim 30-40$ К, а ширина линии df растёт при удалении от этого максимума. В частности, построенная модель количественно демонстрирует уменьшение ширины линии df с ростом температуры T_b в диапазоне между 10 К и 40 К.

Основные результаты построенной модели – вольт-амперные характеристики, зависимости температурного диапазона в структуре от тока, а также локальное распределение плотности тока – показаны на **рис. 7,8,9**. Для вычислений выбрано общее число переходов в меза-структуре $N=700$, сегментов $M=20$, количество переходов в сегменте $G=N/M=35$ и параметр МакКамбера $\beta_{c0}=4000$ (при этом $G \beta_{c0}=1,4 \cdot 10^5$). Расчёты проведены для диапазона температур от 10 К до 70 К.

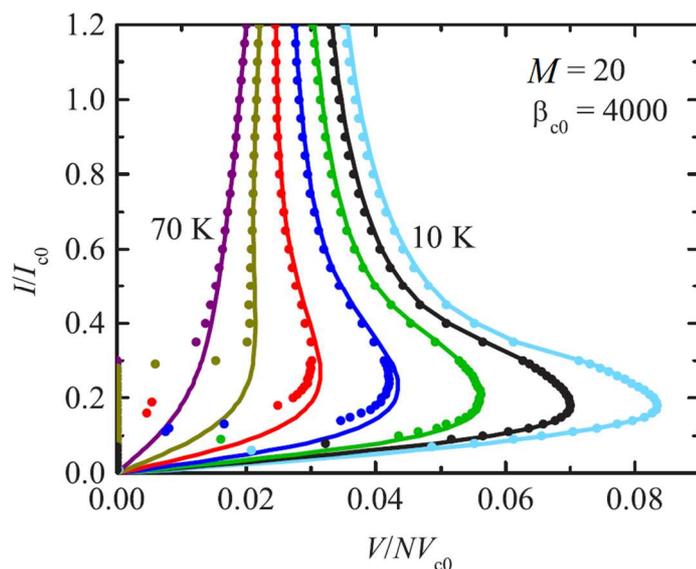


Рис.7. Вольт-амперные характеристики BSCCO-структуры с учётом только резистивных токов вдоль оси z – сплошные линии; полный расчёт, включающий Джозефсоновский ток, токи смещения и токи в плоскости переходов – точки.

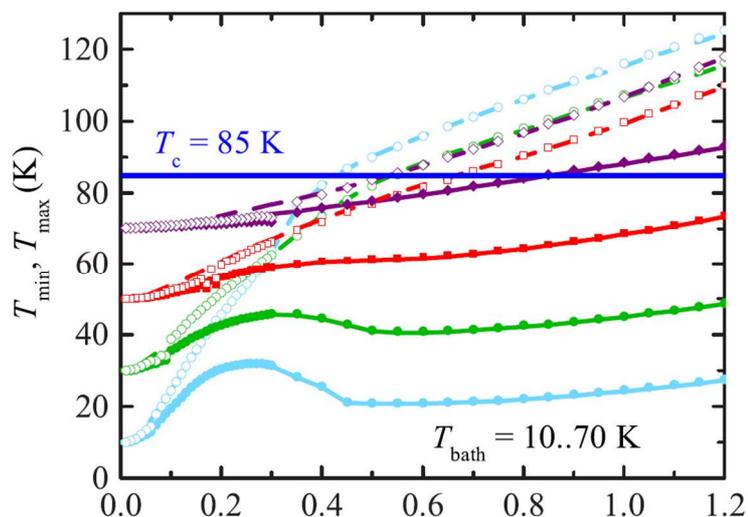


Рис.8. Зависимость максимальной и минимальной температуры в BSCCO-структуре в зависимости от нормированного тока смещения. Линии - сплошные для T_{\min} , пунктирные для T_{\max} – расчёт в первом приближении; точки - сплошные для T_{\min} , выколотые для T_{\max} – полный расчёт.

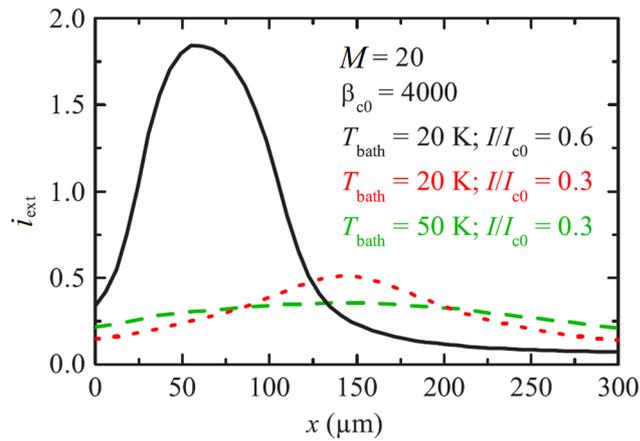


Рис.9. Локальное распределение плотности тока по длине BSCCO-структуры при различных температурах T_b и I/I_{c0} .

Ключевые результаты оптимизации тепловых свойств генератора – рассчитанные зависимости ширины линии и нормированной (безразмерной) мощности u^2 от температуры – представлены на **рис. 10,11**. Для значения $f_{c0}=7,5$ ТГц (нормировочный параметр) нормированная ширина линии составила порядка $5 \cdot 10^{-5}$ ($2,5 \cdot 10^{-5}$) при расчёте для количества сегментов $M=10$ ($M=100$ соответственно); это соответствует ширине линии в 370 МГц (180 МГц). Поскольку для расчёта брался большое значение параметра $\Gamma_0 J/N$, неудивительно, что рассчитанные значения ширины линии оказались выше, чем измеренные экспериментально. Был проведён расчёт для $M=N=700$ (т.е. случай «количество сегментов = количество переходов») с более реальным значением $\Gamma_0=10^{-5}$, получено значение ширины линии 25 МГц. Эта величина порядка минимальной измеренной в эксперименте. Важнейшим результатом расчёта является то, что модель подтвердила наличие некоторой оптимальной рабочей температуры (в нашем расчёте оптимальная температура составила $T_b=30-40$ К), при которой достигается наиболее узкая линия генерации и наибольшая мощность излучения генератора. Этот результат хорошо согласуется с проведёнными ранее экспериментами.

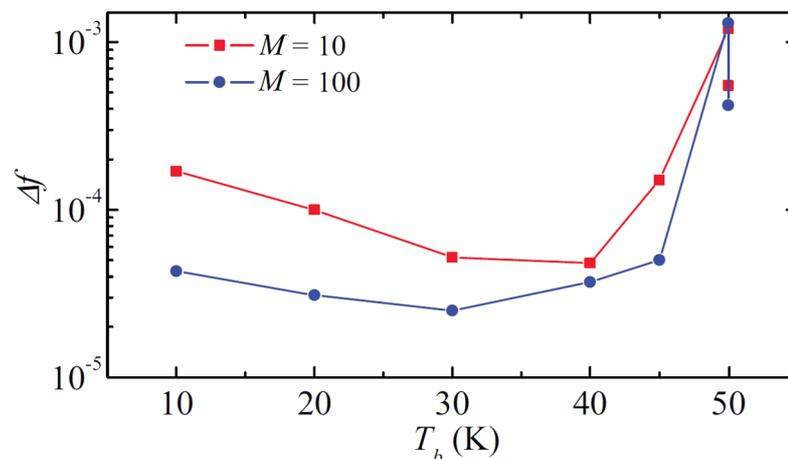


Рис.10. Зависимость ширины линии генерации Δf от температуры T_b . Расчёты проведены для количества сегментов $M=10$ и $M=100$. Отдельно стоящие точки при $T_b=50$ К рассчитаны для режима "малых" токов.

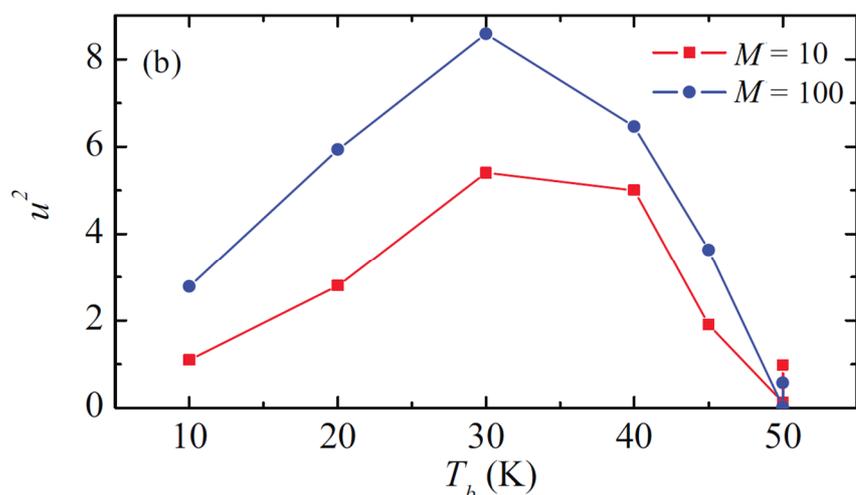


Рис.11. Зависимость мощности излучения генератора от температуры T_b . Расчёты проведены для количества сегментов $M=10$ и $M=100$. Отдельно стоящие точки при $T_b=50$ К рассчитаны для режима "малых" токов.

Исследование массивов джозефсоновских переходов с высокой выходной мощностью

Были исследованы электродинамические, тепловые свойства и характеристики ТГц излучения двух близко расположенных BSCCO-структур. Такая конфигурация в общем виде потенциально может быть расширена и на большее количество структур, работающих совместно для достижения высокой мощности. Для измерения характеристик и исследования образования и локализации «горячего пятна» были использованы установка для измерения мощности (на основе интерферометра и кремниевого болометра) и низкотемпературный сканирующий лазерный микроскоп (LTSLM). Установки подробнее описаны в разделе «**Методы и подходы**». Изначально был взят образец меза-структуры на основе BSCCO размером 330×60 мкм² и толщиной 0,7 мкм (что соответствует количеству переходов порядка $N = 480$). После проведения его исследований он был «разрезан» на две равные части методом травления фокусированным ионным пучком (метод описан в разделе «**Методы и подходы**»), при этом две структуры имеют одни и те же электроды. Затем был разрезан верхний электрод, так что получившиеся структуры управлялись независимо. Во всех трёх конфигурациях наблюдалось образование «горячего пятна». Независимо от того, что образец был разделён на два, в системе образовалось единое «горячее пятно», которое, в зависимости от рабочей точки структур на вольт-амперных характеристиках, было либо локализовано в одном из образцов, либо проникало в оба образца с центром в области разреза. Ни в одной из конфигураций не удалось достичь синхронизированного излучения двух структур, что свидетельствует о необходимости дополнительных синхронизирующих элементов или специальной формы общей подложки («базового кристалла») для работы двух параллельных структур в качестве генератора.

На **рисунке 12 а** приведены ВАХ двух параллельно включенных образцов BSCCO-структуры (после первого «разреза»): чёрная кривая для режима «малых» токов, красная кривая для участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением, синяя кривая – режим «больших» токов с положительным дифференциальным сопротивлением, при $T_b=42$ К, диапазон напряжений 0,45-0,7 В; для сравнения с образцом до технологического

«разреза» травлением показаны кривые ВАХ тёмно-зелёная и оранжевая. Вставка на рис. 12 а показывает полный участок ВАХ. Можно заметить, что после «разреза» прогиб резистивного участка ВАХ между 10 и 25 мА стал более крутым. Кроме того, на ВАХ появился участок с положительным дифференциальным сопротивлением выше 25 мА, который отсутствовал в изначальном образце. Другим интересным моментом является появление нового гистерезисного участка при токах от 38 до 45 мА. Излучаемая мощность образцов после травления показаны на рис. 12 в,д (от тока и напряжения смещения соответственно) в сравнении с мощностью образца до травления (рис.126 б,г). Как и до травления, образец продемонстрировал ТГц излучение для обоих режимов – «малых» токов и при образовании «горячего пятна», на частотах между 506 ГГц и 596 ГГц. Кроме того, появился новый пик излучения между 30 и 40 мА на частоте около 550 ГГц, который отсутствовал ранее. Возможно, это связано с появлением на ВАХ качественного другого участка с положительным дифференциальным сопротивлением. Как будет показано далее, на этом участке ВАХ одна из меза-структур находится при температуре выше критической T_c , в то время как другая остаётся в сверхпроводящем состоянии и имеет неоднородное распределением температуры значительно выше T_b . Все рассчитанные частоты подчиняются соотношению Джозефсона $f_e = V / N\Phi_0$ в пределах погрешности измерений, при $N \approx 481$.

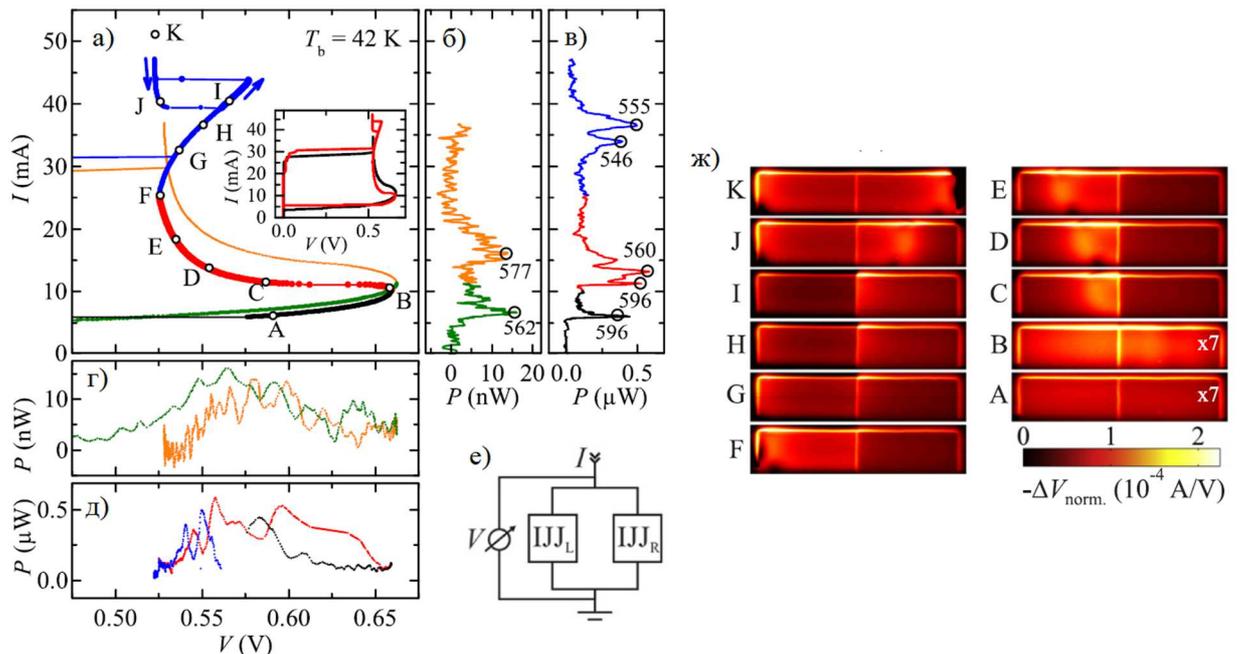


Рис. 12. Сравнение характеристик образца до и после «разреза» методом травления фокусированным ионным пучком при $T_b=42$ K: (а) вольт-амперные характеристики; ТГц излучение в зависимости от тока (б),(в) и напряжения (г),(д). Графики (б),(г) – для образца до «разреза», (в),(д) – после «разреза». На (е) представлена эквивалентная электрическая схема системы после травления. На (ж) показаны LTSLM-образы, полученные при помощи сканирующего лазерного микроскопа, в рабочих точках А-К, обозначенных на ВАХ (а). Для удобства восприятия амплитуда для образов в точках А,В умножена на 7.

Предел разрешения интерферометра для измерения ширины линии составляет порядка 15 ГГц, при этом возможно измерение одновременно лишь одной линии излучения

в пределах диапазона разрешения. Следовательно, при помощи интерферометра невозможно различить, излучают ли две меза-структуры линии на одной частоте, излучают ли они линии на двух близкорасположенных частотах или излучает только одна структура. Для того, чтобы понять это, были проведены дополнительные спектральные измерения излучения образцов при помощи сверхпроводникового интегрального приёмника (СИП), разработанного в ходе предыдущих проектов РФФИ (установка описана в разделе **«Методы и подходы»**). Для всех проведённых измерений линий излучения образца после «разреза» наблюдались две линии генерации для обоих режимов – «малых» и «больших» токов. Расстояние по частоте между двумя линиями составляло от нескольких десятков МГц до нескольких ГГц. При этом ширина линий излучения варьировалась в режиме «малых» токов между 162 и 568 МГц, в режиме «больших» токов - между 43 и 271 МГц. Таким образом, наименьшее значение ширины линии Δf при наличии горячего пятна в данном эксперименте получилось соизмеримым с измеренными в проведённых ранее экспериментах со стандартной конфигурацией (одиночная BSCCO-структура). Следовательно, две структуры излучали некогерентно, частоты излучения различались несмотря на то, что они имели общие (распределённые) сверхпроводящие электроды.

Далее представлены экспериментальные результаты, полученные для образца после второго технологического «разреза» ионным травлением (эквивалентная схема представлена в разделе **«Методы и подходы»** на **рис. 21 г**). Токи, пропускаемые через левый и правый образцы, I_L и I_R , могут задаваться независимо, так что напряжения на двух генераторах можно устанавливать произвольными. При этом образцы по-прежнему связаны термически из-за их пространственной близости, поэтому вполне возможно наличие взаимодействия и синхронизации джозефсоновских токов через электромагнитную связь.

На **рис. 13 а** приведены ВАХ правой структуры при различных токах через левую структуру, которая при этом всегда находилась в резистивном состоянии, за исключением случая $I_L=0$, которому соответствует внешняя (синяя) кривая ВАХ. При увеличении I_L напряжение на правой структуре V_R уменьшается при фиксированном I_R вследствие излучения тепла левой структурой и дополнительного нагрева правой структуры. Естественно, что тот же эффект проявляется и в левой структуре по отношению к правой. Излучаемая мощность показана на **рис. 13 б,в** в зависимости от I_R и на **рис. 13 г,д** в зависимости от V_R . Для оранжевой и зелёной кривых ВАХ ток I_L был выбран таким образом, чтобы мощность излучения была максимальна при выбранной температуре T_b . Характеристики излучения для $I_L=0$ повторяют поведение классической конфигурации с одной структурой. При увеличении I_L обе структуры дают вклад в суммарное излучение: на **рис. 13 в,д** показаны кривые для $I_L=3$ мА (зелёная) и 7,4 мА (оранжевая).

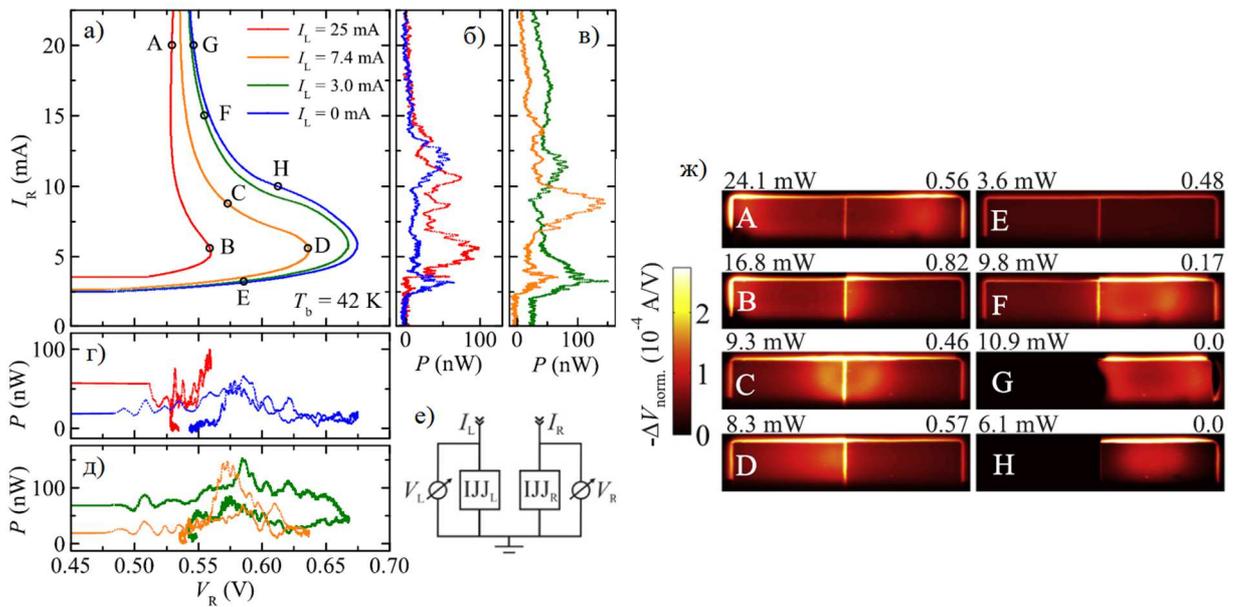


Рис. 13. (а) ВАХ правой структуры при фиксированных токах через левую структуру I_L . Соответствующие сигналы излучения в зависимости от тока показаны на (б),(в), от напряжения – на (г),(д). На графике (е) представлена эквивалентная схема. На (ж) показаны LTSLM-образы, полученные при помощи сканирующего лазерного микроскопа, в рабочих точках А-Н, обозначенных на ВАХ (а). Значениями над LTSLM-образами слева обозначены значения суммарной входной мощности ($P_{\text{dc}} = I_L V_L + I_R V_R$), справа – соотношение токов $I_L / (I_L + I_R)$.

Для случая $I_L = 3$ mA характеристики очень похожи на характеристики для одиночной структуры. Однако, левая структура даёт вклад в общую мощность излучения, который порядка 25 нВт при $I_R = 0$. Интересен тот факт, что такое же значение мощности получено при «больших» токах I_R порядка 25 mA, когда температура правой структуры значительно выше T_c и, следовательно, правая структура не даёт вклада в излучение. Для промежуточных значений токов I_R , особенно в режиме «малых» токов, обе структуры дают вклад в суммарное излучение, при этом на выходе имеется широкая линия генерации мощностью порядка 150 нВт. При разрешении Фурье-спектрометра в 15 ГГц в режиме «малых» токов было получено излучение шириной 562 ГГц, такая же линия получена независимо для каждой структуры при отсутствии смещения в другую.

Для случая $I_L = 7,4$ mA, т.е. в режиме «больших» токов в левой структуре, при образовании «горячего пятна», снова имеется один пик в мощности $P(I_R)$ в режиме «малых» токов для правой структуры, который соизмерим для случая $I_L = 0$. При $I_R = 8,8$ mA и $V_R \approx 0,57$ В возникает мощный пик излучения, который, в отношении I_R , кажется не связанным с пиками при более низких значениях I_L . Следует отметить, что положение пика по напряжению V_R примерно такое же, как для пика в режиме «больших» токов для $I_L = 0$. Как будет показано ниже, при таких параметрах рабочей точки образуется «горячее пятно», которое проникает в обе структуры и центр которого расположен в месте «разреза» между ними. Такое положение может быть наиболее благоприятно для излучения.

Наконец, для $I_L = 25$ mA (рис. 13 б,г) кривые излучения резко отличаются от случая $I_L = 0$, система демонстрирует серию пиков излучения в зависимости от I_R в диапазоне от 5 до 15 mA. В данном случае рабочий диапазон по напряжению и температуре образца

значительно отличается от всех остальных ветвей, что частично объясняет такое поведение.

Для более точного исследования ширины линии генерации двух независимо управляемых структур также были проведены измерения при помощи СИП. Оказалось, что наименьшая ширина линии излучения порядка 25 МГц достигается при температуре $T_b=40\text{K}$, когда образец смещён в рабочую точку на участке с отрицательным дифференциальным сопротивлением, как получалось и для образцов с классической конфигурацией. В такой конфигурации возможность синхронизации излучения двух близко расположенных структур выглядит потенциально наиболее вероятной. Мы подстраивали напряжения через структуры в таком режиме, наблюдая спектр излучения, с целью достичь синхронизированного излучения. На **рис. 14** приведены типичные спектральные характеристики, полученные в такой конфигурации. Синей кривой показаны два пика излучения, каждый из которых возникает из разных (левой и правой) структур. Каждый пик двигается на экране спектроанализатора в режиме реального времени при изменении напряжения на соответствующей структуре. На красной кривой два пика практически накладываются друг на друга и затем сливаются в один пик на чёрной кривой. Ширина линии при этом остаётся практически одинаковой (порядка 80 МГц) для синей и чёрной кривых. Суммарная амплитуда пиков синей кривой более чем на 10% выше, чем амплитуда чёрной. Это свидетельствует о том, что разделённые структуры не излучают синхронизированно в такой конфигурации, для синхронизации требуется дополнительный механизм. К сожалению, образец был разрушен в процессе измерений, так что провести исследования при более высоких рабочих температурах T_b не удалось. Таким образом, можно утверждать, что для изученной конфигурации задача получения синхронизированного излучения является как минимум непростой и не решается «спонтанным» образом.

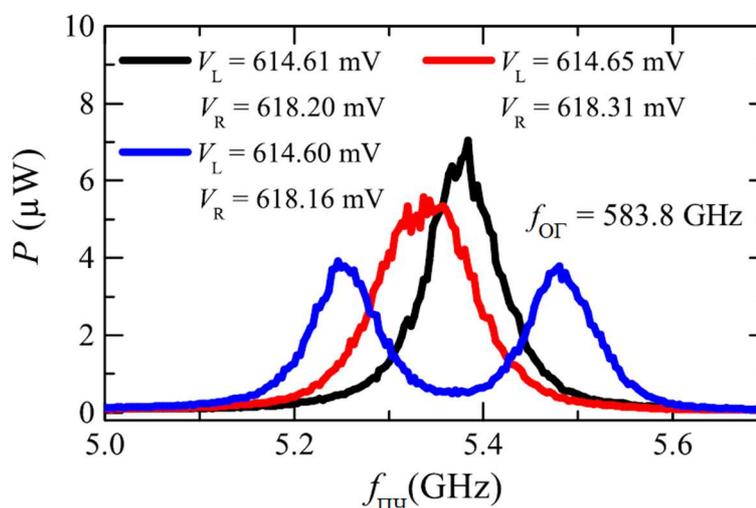


Рис. 14. Спектры излучения двух BSCCO-структур, измеренные при помощи СИП, опорный генератор (на основе распределённого джозефсоновского перехода) которого установлен на частоту $f_{\text{ОР}}=583,8$ ГГц.

Результаты 2016 года

Исследование возможностей фазовой синхронизации излучения

Возможность частотной и фазовой стабилизации частоты генерации осциллятора является важным преимуществом, особенно для применений в качестве гетеродина в супергетеродинных приемниках. Для исследования этой возможности для генераторов на основе BSCCO-структур была выполнена серия экспериментов, где генератор был стабилизирован с помощью сверхпроводящего интегрального приемника.

Исследование проводилось в ИПЭ им. В.А. Котельникова РАН в Москве. При выполнении работ СИП был использован как супергетеродинный терагерцовый приемник. Терагерцовое излучение BSCCO-структуры (установленной в отдельном криостате) через оптическую систему с фокусирующей тefлоновой линзой поступал на вход СИП, где происходило понижение частоты сигнала в полосу ПЧ СИП (4 – 8 ГГц). Часть сигнала ПЧ поступала на анализатор спектра, где можно было наблюдать спектр генерации BSCCO-структуры. Гетеродин СИП был стабилизирован отдельной системой фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). Далее происходило следующее понижение частоты генератора в полосу 10 – 800 МГц таким образом, чтобы центральная частота линии генерации BSCCO-структуры была на 400 МГц. Этот сигнал затем подавался на полупроводниковую систему ФАПЧ (идентичную системе, используемой для стабилизации гетеродина СИП), где происходило его сравнение с сигналом опорного осциллятора частотой 400 МГц. Сигнал коррекции ошибки с выхода системы ФАПЧ подавался на линию управления напряжением генератора (см. рис. 15).

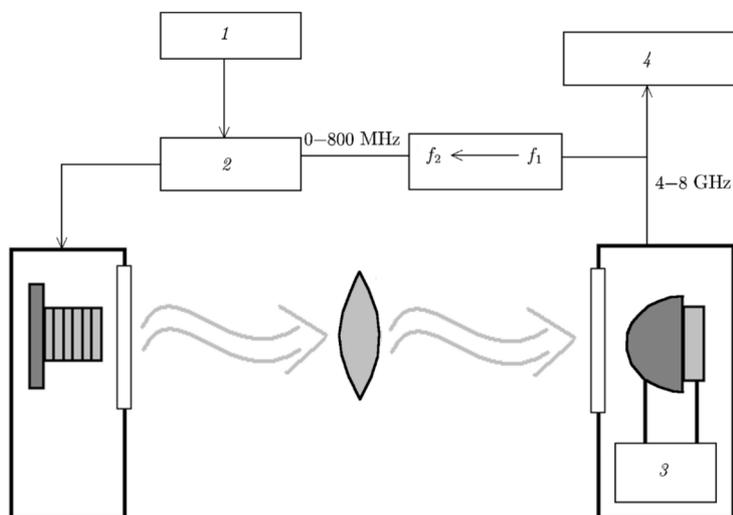


Рис. 15. Установка для частотной и фазовой стабилизации линии излучения генератора на основе BSCCO. Опорный осциллятор частотой 400 МГц (1), система ФАПЧ (2), система ФАПЧ СИП (3), анализатор спектра (4)

В результате были достигнуты фазовая и частотная стабилизации генератора в нескольких его рабочих точках. На рис. 16 представлены спектры излучения BSCCO-структуры без стабилизации и с фазовой стабилизацией. Частота генерации 557 ГГц, ширина линии 13,5 МГц, температура образца 35 К. Спектральное качество фазово-стабилизированной линии, изображенной на рис. 16, составило около 10 %, что является

относительно хорошим результатом при условии столь широкой линии. Спектр сигнала был измерен с помощью спектроанализатора. На рис. 17 спектр фазово-стабилизированной линии излучения СТГ представлен с предельным спектральным разрешением спектроанализатора 1 Гц, отношение уровня сигнала к шуму составил около 57 дБ.

Таким образом, была продемонстрирована возможность частотной и фазовой стабилизации генератора на основе BSCCO с помощью СИП. Стоит отметить, что удалось добиться стабилизации линии только на нескольких частотах генерации. При этом для успешного применения данного типа генератора в качестве гетеродина необходимо иметь возможность стабилизировать его частоту во всем диапазоне его перестройки. Поэтому работы по исследованию условий стабилизации генератора на основе BSCCO планируется продолжить.

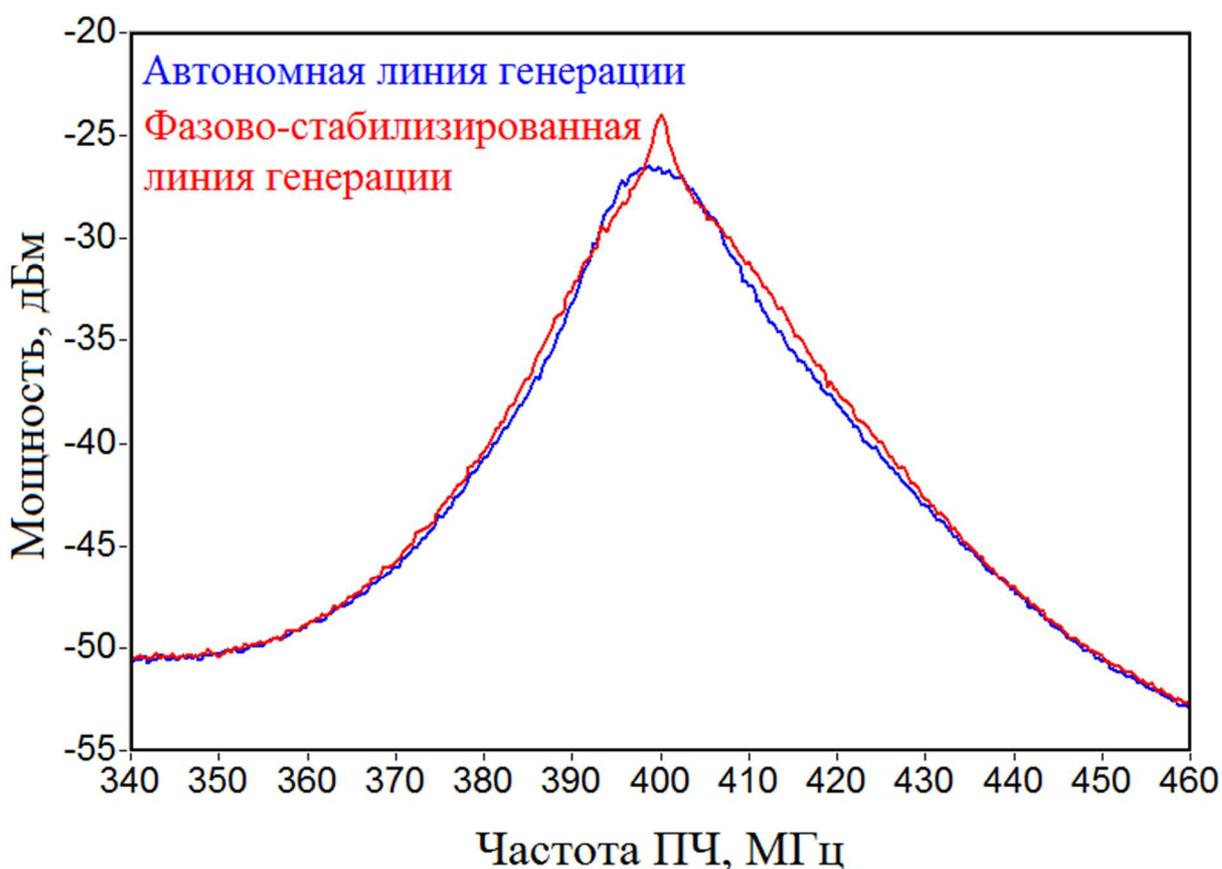


Рис. 16. Пониженный по частоте спектр генератора на основе BSCCO-структуры без стабилизации (синяя кривая) и с фазовой стабилизацией (красная кривая). Частота генерации 557 ГГц, температура образца – около 35 К. Спектральное разрешение анализатора спектра 1,8 МГц. Ширина линии излучения – около 13,5 МГц.

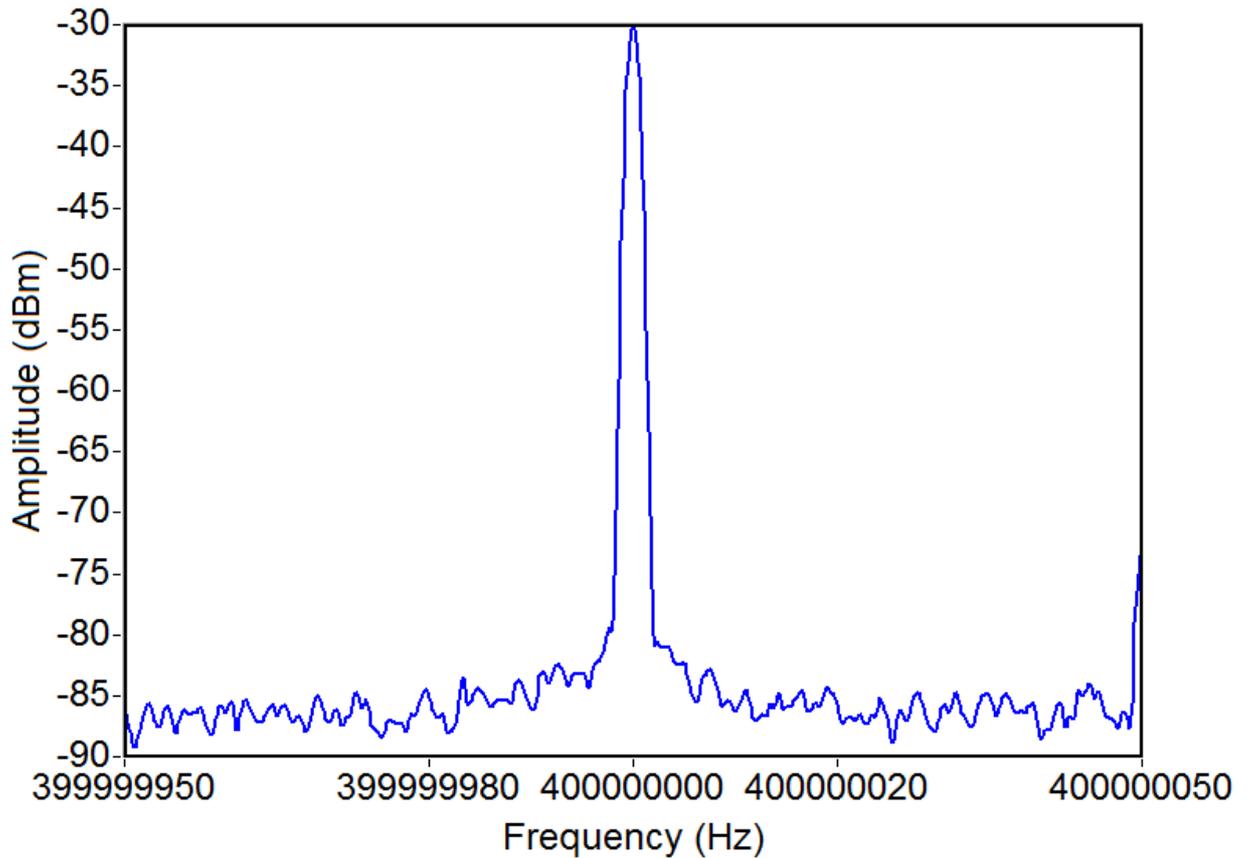


Рис. 17. Спектр фазово-стабилизированного генератора на основе BSCCO-структуры. Частота генерации 557 ГГц, температура образца – около 35 К. Спектральное разрешение спектроанализатора 1 Гц. Уровень сигнала к шуму около 57 дБ.

Спектроскопия при помощи массива джозефсоновских переходов в структурах $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$

При помощи сверхпроводникового интегрального приемника и BSCCO-генератора был проведен эксперимент по измерению линий поглощения аммиака (NH_3) и воды при различном давлении газов. Схема такой установки принципиально отличается от приведенной на рис. 4 б тем, что вместо линзы между оптическими окнами криостатов располагалась газовая ячейка длиной около 50 см с исследуемым газом. Ячейка была соединена с откачным стендом, что дает возможность контролировать давление внутри ячейки. Запись линий поглощения производилась при помощи спектроанализатора методом «сканирования» спектральной линией BSCCO-генератора области ПЧ интегрального приемника, настроенного на исследуемую частоту. При этом область сканирования составляет $f_0 \pm 3$ ГГц, где f_0 – частота исследуемой линии поглощения газа (~572,5 ГГц для NH_3 и 556,9 ГГц для H_2O), 3 ГГц – полуширина исследуемого диапазона ПЧ. Результаты измерения представлены на рис. 18 а, б. Эксперимент успешно продемонстрировал возможность измерения линий поглощения газов при помощи ВТСП-генератора. Таким образом, генератор может быть использован в приборах для изучения спектрального анализа газовых смесей (например, в медицине или системах безопасности). Следует отметить, однако, что принципиальная возможность измерения

линий поглощения газов определяется чувствительностью и спектральными характеристиками СИП, а в качестве «сканирующего» сигнала может быть использован любой (как узкополосный, так и широкополосный) сигнал достаточной, но не слишком большой мощности на исследуемой частоте.

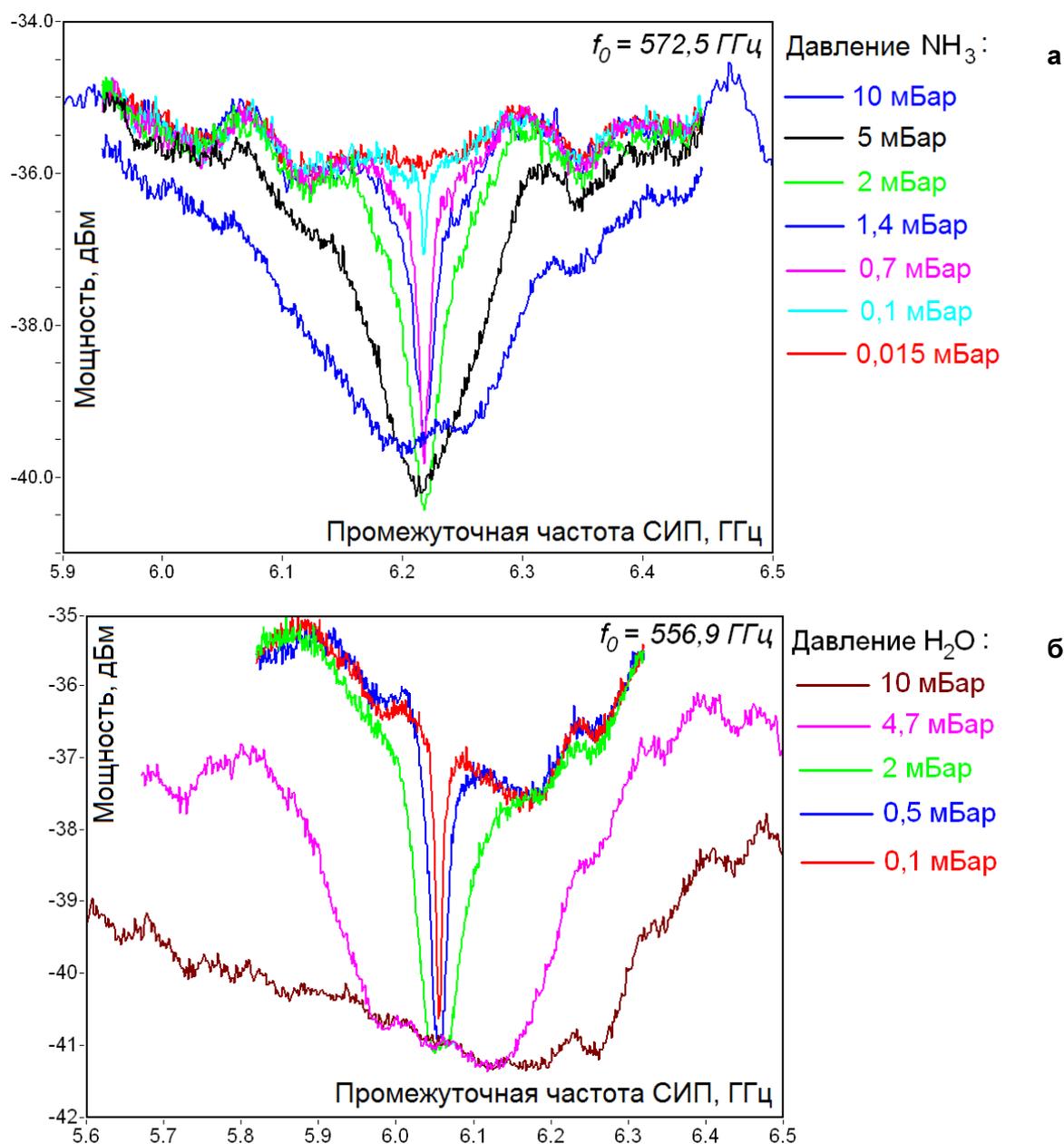


Рис. 18. Спектры поглощения газов, измеренные при помощи BSCCO-генератора и сверхпроводникового интегрального приемника, при различном давлении:
 а – аммиака NH₃, центральная частота поглощения 572,5 ГГц;
 б – воды на частоте поглощения 556,9 ГГц.

Сопоставление полученных результатов с мировым уровнем

Большинство из проведённых исследований являются инновационными. Работы по созданию и исследованию ТГц генераторов на основе массивов из двух близко расположенных меза-структур BSCCO являются пионерскими. Такая конфигурация была

получена методом травления фокусированным ионным пучком. До сих пор уникальными являются эксперименты по измерению ширины спектральной линии излучения генераторов на основе ВТСП меза-структур с точностью, превышающей спектральное разрешение Фурье-спектрометров, которое составляет порядка 10 ГГц. В данном проекте проведены измерения с разрешением лучше 0,2 МГц при помощи сверхпроводникового интегрального приёмника, разработанного в ходе предыдущих проектов РФФИ. Ни одной группой в мире, кроме авторов проекта, не проводились спектральные измерения с такой точностью. Уникальным является результат по фазовой синхронизации излучения BSCCO-генератора, неизвестны работы с аналогичными попытками и результатами.

Работы по созданию и исследованию генераторов на основе массива джозефсоновских переходов в сверхпроводниковых купратах $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ проводятся несколькими группами в мире: в Японии, в Германии, в Китае, в США. Тем не менее, авторы данного проекта и зарубежные коллеги из Германии являются первопроходцами в данной области. Некоторые характеристики, полученные впервые в мире, были достигнуты коллективом исполнителей при тесном сотрудничестве с учёными из Германии (Университет г. Тюбинген) и Японии (Национальный институт материаловедения, г. Цукуба). Полученные результаты, безусловно, являются результатами мирового уровня.

Методы и подходы, использованные в ходе выполнения Проекта (описать, уделив особое внимание степени оригинальности и новизны)

Установка 1. Установка для измерения мощности ТГц излучения генератора на основе BiSrCaCuO при помощи Si болометра. Схема установки изображена на рис. 19. Установка представляет собой интерферометр на основе зеркал, образец исследуемого генератора и детектор на основе болометра из кремния. Образец генератора размещён в вакууме на холодной поверхности криостата с потоком жидкого гелия. Окно на основе полиэтилена является прозрачным только в ТГц диапазоне, в котором проводится исследование. Выходное излучение модулируется обтюратором частотой 13 Гц и попадает на параболическое зеркало (расположенное перпендикулярно, 50 мм в диаметре, фокусное расстояние 100 мм), после чего направляется в два плоских зеркала, разделённых щелью, которые делят излучение на два пучка практически одинаковой интенсивности. Разность фаз в пучках определяется движением одного из этих зеркал. Через второе параболическое зеркало излучение направляется в болометр. На входе детектора стоит фильтр, пропускающий частоты ниже 1 ТГц. Установка может быть использована в двух различных режимах. В первом режиме излучаемая мощность «мезы» записывается для различных токов смещения. В данном случае зеркала расположены в нейтральной (симметричной) позиции, т.е. разность фаз отсутствует. Во втором режиме измеряется функция автокорреляции (измеряемая мощность vs положение зеркала), которая рассчитывается при помощи спектрометра на основе быстрого преобразования Фурье. Значения, представленные в результатах, основаны на детектируемой мощности, потери между окном криостата и зеркалами не учитывались. Телесный угол установки, определяющийся апертурой входного окна болометра, составляет 0,04 с. Частотное разрешение такой установки, зависящее от максимального хода зеркал, составило 10-15 ГГц. Установка является уникальной, несмотря на наличие некоторого количества аналогов в мире, установки такого типа собираются научными группами в единичном экземпляре.

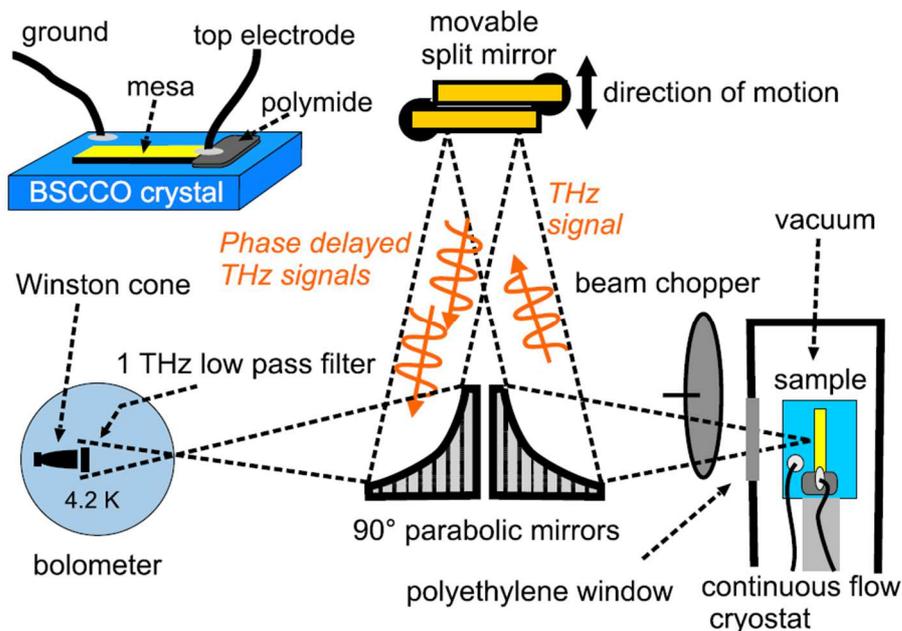


Рис.19. Принципиальная схема для измерения мощности ТГц излучения исследуемого генератора при помощи НЕВ

Установка 2. Установка для спектральных измерений ТГц излучения генератора на основе BiSrCaCuO при помощи сверхпроводникового интегрального приёмника (общая схема на рис. 4). Данный эксперимент был проведён в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН при помощи уникального прибора – сверхпроводникового интегрального приёмника (СИП), разработанного российскими учёными в ходе предыдущих проектов РФФИ. Принципиальная схема и принцип работы сверхпроводникового интегрального приемника описаны, например, в работе [V.P. Koshelets, S.V. Shitov, A.B. Ermakov, O.V. Koryukin, L.V. Filippenko, A. V. Khudchenko, M. Yu. Torgashin, P. Yagoubov, R. Hoogeveen, O.M. Pylypenko. *Superconducting Integrated Receiver for TELIS. // IEEE Trans. on Appl. Supercond., vol. 15, pp. 960-963, 2005*]. Данная установка была собрана для экспериментального исследования ВТСП-генераторов на основе мезоструктуры при помощи СИП. Образец генератора размещается на задней поверхности эллиптической кремниевой линзы, оптимизированной для совместной работа с антенной, интегрированной с генератором. Исследование генератора проводилось в режиме задания тока смещения через структуру. Для максимального снижения внешних флуктуаций в системе задания тока и измерения напряжения использован блок с аккумуляторными батареями, обладающими низким уровнем собственных шумов, что позволяет избежать технических низкочастотных шумов, например, сетевых наводок с частотой 50 Гц. Спектральные линии излучения генератора регистрируются при помощи СИП и выводятся на экран спектроанализатора в диапазоне ПЧ 4-8 ГГц, при помощи которого возможно усреднение сигнала, считывание его компьютером и проведение других необходимых цифровых операций для анализа и обработки спектров. Установка СИП для спектроскопии в диапазоне 450-700 ГГц на сегодняшний день является уникальной и не имеет аналогов в мире.

Установка 3. Установка для исследования распределения температуры вдоль образца меза-структуры. Измерение пространственного распределения температуры по поверхности образца проводилось при помощи установки на основе низкотемпературного сканирующего лазерного микроскопа (англ. LTSLM - *Low Temperature Scanning Laser Microscopy*). Принципиальная схема установки показана на **рис. 20**. Лазерный пучок локально нагревает образец на несколько градусов. Пучок диодного лазера направляется на сканирующий элемент и фокусируется на поверхности образца, размер лазерного пятна 1-2 мкм. Чтобы обеспечить нагрузочную кривую для стабильной операции, образец меза-структуры, покрытый золотом, смещается при помощи источника тока и переменного сопротивления, включённого параллельно образцу. Локальный нагрев лазером на несколько градусов, который создаётся на площади поверхности в несколько мкм² и в глубину порядка половины толщины структуры, вызывает отклик в напряжении dV, величина которого и отображается на результирующем LTSLM-изображении. С целью улучшения уровня сигнала к шуму пучок модулируется частотой 10-80 кГц, а отклик напряжения dV измеряется при помощи синхронного детектора.

Данный метод позволяет визуализировать электрическое поле и распределение тока с пространственным разрешением в несколько мкм. При помощи этого метода также можно наблюдать стоячие волны в меза-структуре. Установка также является уникальной, она разработана специально для исследования генераторов на основе меза-структур BSCCO и не является коммерчески доступной.

Установка собрана немецкими коллегами в г. Тюбинген, является уникальной и, даже при наличии аналогов у других групп исследователей, установки такого типа исчисляются единицами во всём мире.

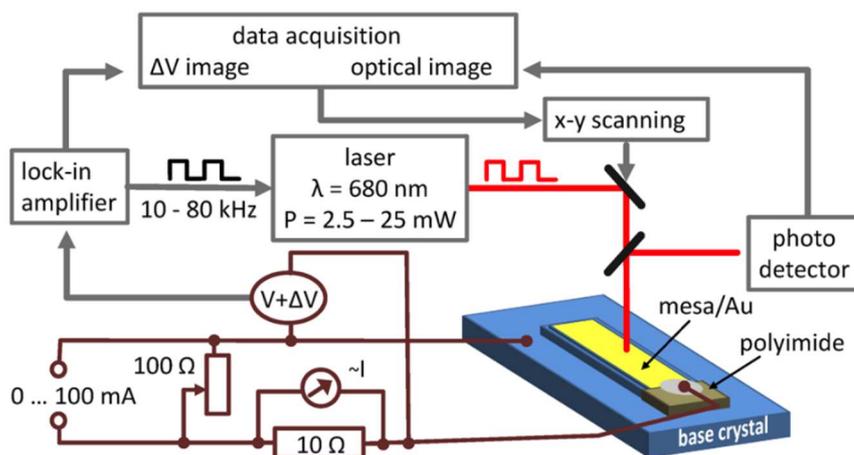


Рис. 20. Принципиальная схема установки низкотемпературного сканирующего лазерного микроскопа.

Метод изготовления двух близко расположенных BSCCO-структур на одной подложке. Для получения массива из двух близко расположенных BSCCO-структур была предложена и апробирована новая технология двустороннего изготовления, схематично изображённая на **рис. 21**. Классическая технология изготовления единичного генератора из монокристалла BSCCO описана, например, в работе [Yuan J. et al. // *Supercond. Sci. Technol.* 25, 075015. 2012]. После получения такого образца проводится дополнительная технологическая ступень. При помощи травления фокусированным ионным пучком (FIB-технология, англ. *focused ion beam*) структура «разрезается» на две примерно равные части, разделённые мостиком толщиной порядка 200 нм (см. **рис. 21 а,б**). Таким образом, обе структуры имеют общие электроды, при этом соединены параллельно. Такую физическую структуру можно рассматривать как простую структуру, подходящую для изучения свойств генерации объединённых массивов. Далее проводится ещё одна технологическая ступень: верхний электрод двух структур снова «разделяется» фокусированным ионным пучком. В результате ток в каждой структуре (условно «левой» и «правой», I_L и I_B соответственно) задаётся и протекает независимо. Электрическая схема таких структур после первой и второй технологической ступени травления при помощи FIB (т.е. генераторы с общими электродами и как независимые генераторы) показана на **рис. 21 в, г** соответственно. Применённый метод изготовления является инновационным, авторам проекты неизвестны работы с применением описанной методики. Методика изготовления разработана и впервые испытана немецкими коллегами их Тюбингенского университета совместно с коллегами из Китая и Японии.

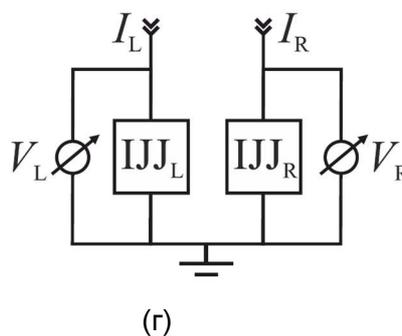
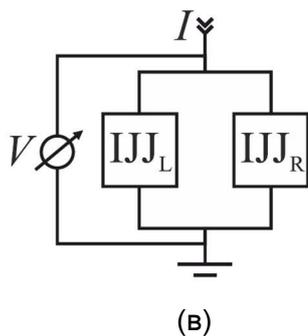
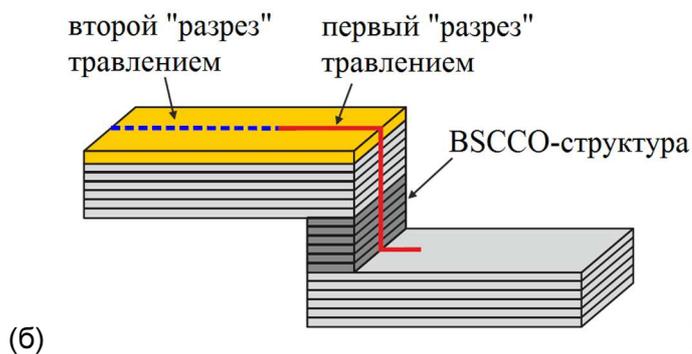
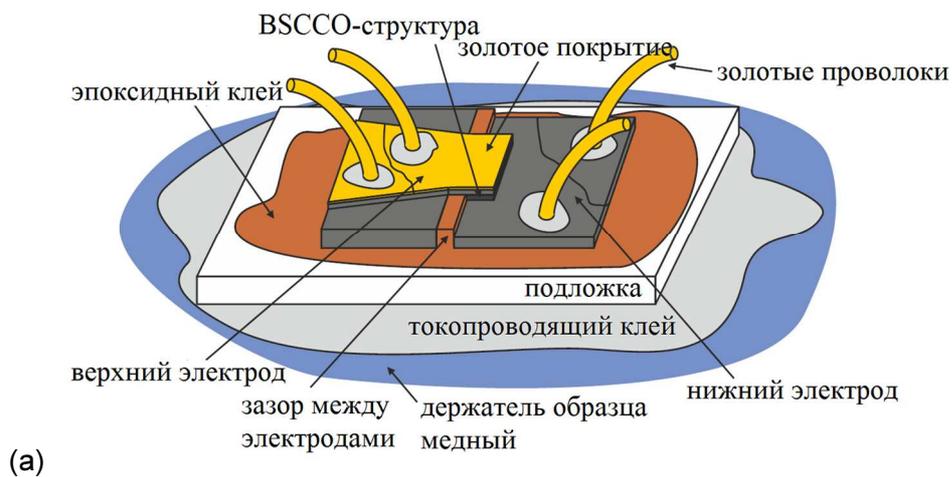


Рис.21. (а) Схема технологии двустороннего изготовления BSCCO-структуры с двумя генераторами. (б) Красная сплошная и синяя пунктирная линии в приближенном виде показывают "разрезы" методом ионного травления (FIB). Эквивалентные электрические схемы структуры (в) после первого "разреза" ионным пучком и (г) после второго "разреза".

Расчётная модель меза-структуры BSCCO для оптимизации тепловых свойств генератора.

Для оптимизации тепловых свойств генератора был рассмотрен массив, состоящий из N джозефсоновских переходов, каждый из которых описан в рамках RCSJ-модели (резистивная модель, учитывающая также ёмкостную и сверхпроводящую составляющую), при этом также рассмотрено нестационарное уравнение тепловой диффузии с учётом само-нагрева внутри массива переходов. Такие параметры, как сопротивление и критический ток, а также шум Найквеста, возникающий вследствие сопротивлений, полагаются зависящими от температуры. Электрическая мощность, производимая джозефсоновскими переходами в резистивном состоянии, обеспечивает приток тепла в уравнении тепловой диффузии для вычисления температуры массива. Весь массив переходов условно разделён пространственно на две части, для удобства расчётов одинаковые части. Таким образом, каждый переход в массиве состоит из двух частей, соединённых параллельно. Каждая часть перехода рассмотрена как параллельное соединение джозефсоновского элемента, сопротивления, ёмкости и источника шума. В модели мы пренебрегаем сопротивлением проводов, соединяющих параллельные части переходов в одной плоскости (электродов). Построенная расчётная модель является новой, авторам работы неизвестны работы, в которых учитываются одновременно сверхпроводниковые свойства структуры (в рамках RCSJ-модели) и уравнения тепловой диффузии.

Температуры двух частей перехода – «горячего пятна» и сверхпроводящей части – обозначены как T_1 и T_2 . Общий ток в системе имеет вид:

$$I = \frac{2\pi(C_{1,n} + C_{2,n})}{\Phi_0} \ddot{\gamma}_n + \frac{2\pi}{\Phi_0} \left[\frac{1}{R_{1,n}(T_1)} + \frac{1}{R_{2,n}(T_2)} \right] \dot{\gamma}_n + [I_{c1,n}(T_1) + I_{c2,n}(T_2)] \sin(\gamma_n) + I_{N1,n}(T_1) + I_{N2,n}(T_2), \quad (1)$$

где $C_{1,n}$, $C_{2,n}$, $R_{1,n}$, $R_{2,n}$, $I_{c1,n}$ и $I_{c2,n}$ – ёмкости, сопротивления и критические токи n -го перехода, где $n=1\dots N$. Следует заметить, что сопротивления и критические токи являются температурозависимыми. Далее, если предположить, что все джозефсоновские переходы осциллируют в фазе, т.е. $\gamma_n = \gamma$, а также критический ток, ёмкость и сопротивление не зависит от n , то из выражения (1) получается

$$I = \frac{2\pi(C_1 + C_2)}{N\Phi_0} (N\ddot{\gamma}_n) + \frac{2\pi}{\Phi_0} \left[\frac{1}{NR_1(T_1)} + \frac{1}{NR_2(T_2)} \right] (N\dot{\gamma}_n) + [I_{c1}(T_1) + I_{c2}(T_2)] \sin(\gamma) + \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [I_{N1,n}(T_1) + I_{N2,n}(T_2)] \quad (2)$$

здесь $2\pi N\dot{\gamma} / \Phi_0$ есть напряжение NU через весь массив переходов.

Спектральная плотность шума положена как для белого шума:

$$S_{I,k} = 4k_B \frac{T_k}{NR_k}, \quad (3)$$

где k_B – постоянная Больцмана, $k = (1,2)$ – номер части перехода. Схема такой модели представлена на **рис. 22**.

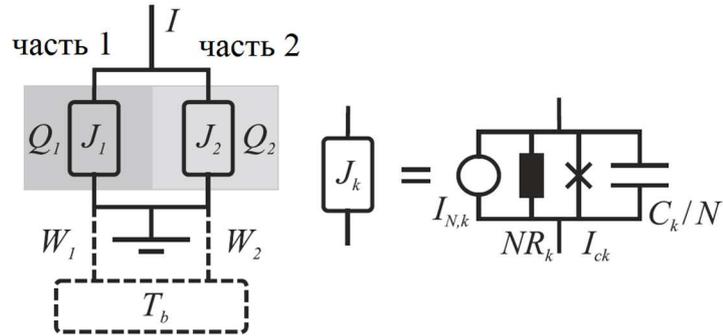


Рис. 22. Схема большого джозефсоновского перехода, разделённого пространственно на две части с температурами T_1 и T_2 . Сплошными линиями обозначен электрический контур, пунктирными линиями – тепловой контур. Перенос тепла W_1 , W_2 осуществляется только между каждой частью и держателем образца с температурой T_b , между частями теплового обмена нет. На правом рисунке $k=(1,2)$ – номер части структуры.

Далее, для повышения точности расчётной модели, весь массив разделён на M сегментов, схема такой модели представлена на **рис. 23**. При соответствующей нормировке токов на I_{c0} , сопротивлений на R_0 и ёмкостей на C , выражение (2) для тока принимает вид:

$$i = \beta_c [c_1 + c_2] \ddot{\gamma}_m + \left[\frac{1}{r_1(T_1)} + \frac{1}{r_2(T_2)} \right] \dot{\gamma}_m + [i_{c1,m}(T_1) + i_{c2,m}(T_1)] \sin(\gamma_m) + i_{N1,m}(T_1) + i_{N2,m}(T_2) + i_{N_s}(T_2) + \frac{N}{Mr_s(T_2)} \sum_{m=1}^M \dot{\gamma}_m, \quad (4)$$

с нормировочными параметрами:

$$\begin{aligned} I_{c0} &= I_{c1}(4.2\text{ K}) + I_{c2}(4.2\text{ K}) \\ R_0 &= [R_1(4.2\text{ K})^{-1} + R_2(4.2\text{ K})^{-1}]^{-1} \\ C &= C_1 + C_2 \end{aligned} \quad (5)$$

и параметров мак-Камбера β_c , единица времени при этом равна $\tau = \Phi_0 / 2\pi I_{c0} R_0$. В выражении (4) индекс m пробегает значения $1 \dots M$.

Спектральная плотность шумовых токов $i_{Nk,m}(T_k)$ при этом даётся выражением

$$s_{i,k,m} = 4\Gamma_0 \frac{T}{4,2\text{ K}} \frac{M}{Nr_{k,m}(T_k)} \quad (6)$$

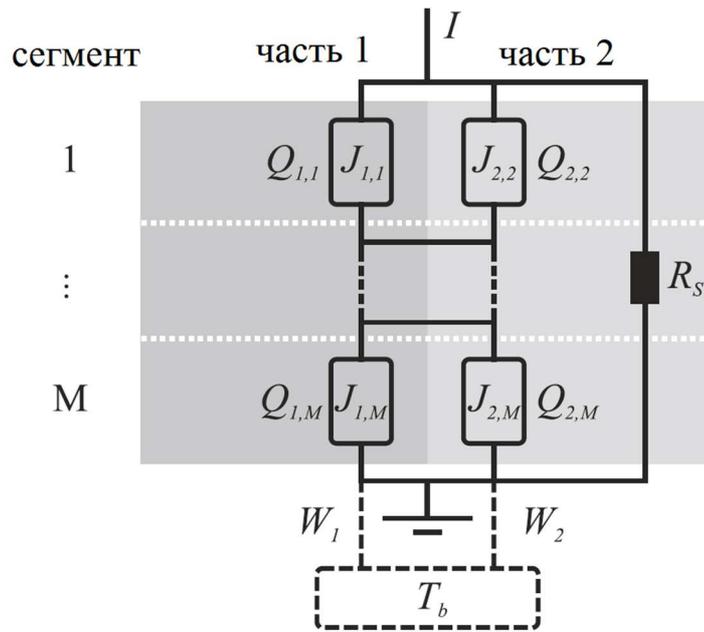


Рис. 23. Массив из джозефсоновских переходов, состоящий из M сегментов, как обобщение контура из рис. 1. Каждый сегмент структуры разделён на две части при различных температурах T_1 и T_2 . Ко всей структуре подключено шунтирующее сопротивление R_s при температуре T_2 , представляющее внутреннюю часть «горячего пятна».

Уравнения тепла для каждой части массива имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \tilde{c}_1 \dot{T}_1 &= \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \frac{\dot{\gamma}_m^2}{r_{1,m}(T_1)} - k_1(T_1 - T_b); \\ \tilde{c}_2 \dot{T}_2 &= \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \frac{\dot{\gamma}_m^2}{r_{2,m}(T_2)} + \frac{N}{r_s(T_2)} \left(\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \dot{\gamma}_m \right)^2 - k_2(T_2 - T_b) \end{aligned} \quad (7)$$

здесь \tilde{c}_1 , \tilde{c}_2 – приведённые коэффициенты теплоёмкости в единицах $[1/K]$, равные $\tilde{c}_k = 2\pi \tilde{C}_k / \Phi_0 I_{c0}$, \tilde{C}_k – обычные коэффициенты теплоёмкости на 1 переход; k_1 , k_2 – приведённые коэффициенты теплопроводности массива к держателю в единицах $[1/K]$, не зависящие от температуры и равные $k_k = K_k / N I_{c0}^2 R_0$, K_k – обычные коэффициенты теплопроводности.

Одной из ключевых целей построения модели ТГц генератора на основе BSCCO-структуры является также исследование зависимости ширины линии df от рабочей температуры T_b . Для сосредоточенного джозефсоновского перехода с сопротивлением R при фиксированной температуре T и отсутствии влияния тепловых флуктуаций на параметры перехода ширина линии генерации определяется выражением

$$\Delta f = \frac{4\pi k_B T r^2}{\Phi_0^2 R} \quad (8)$$

где r – дифференциальное сопротивление в рабочей точке. Подставляя сюда $r=R$, что является хорошим приближением для случая, когда ток через генератор выше критического тока, и перехода к безразмерной частоте (нормируя на f_{c0}), получаем

$$\Delta f = 2\Gamma_0 \frac{R}{R_0} \frac{T}{4,2K} \quad (9)$$

Следует отметить, что для больших структур типа BSCCO некорректно определять дифференциальное сопротивление r из измеренной вольт-амперной характеристики генератора, поскольку температуры холодной части T_1 и области «горячего» пятна T_2 сильно меняются от тока смещения. Поэтому для расчёта использовать значение $R=V/I$ для сопротивления в рабочей точке. Для случая, когда холодная и «горячая» область включена параллельно, следует в качестве температуры брать эффективную температуру

$$T_{eff} = R_{eff} \left[\frac{T_1}{R_1} + \frac{T_2}{R_2} + \frac{T_2 N}{R_s} \right], \quad (10)$$

где $R_{eff}=R_0 u/i$ сопротивление трёх участков структуры, включенных параллельно. Тогда для безразмерной ширины линии, пересчитанной на 4,2 К, получается выражение

$$\Delta f_0 = 2\Gamma_0 \frac{R_{eff}}{R_0} \frac{T_{eff}}{4,2K} \quad (11)$$

Вклад каждого члена коллектива в выполнение Проекта в 2016 году (указать работу, выполненную каждым членом коллектива по Проекту в 2016 году с новой строки)

Кошелец Валерий Павлович, зав.лаб. – руководство проектом, идеология экспериментов, участие в экспериментах, участие в подготовке публикаций

Артанов Антон Аркадьевич, аспирант – участие в организации экспериментов, настройка и отладка экспериментального криогенного оборудования

Дмитриев Павел Николаевич, с.н.с. – изготовление образцов сверхпроводникового интегрального приёмника

Калашников Константин Владимирович, н.с. – построение математической модели и математические расчёты

Кинёв Николай Вадимович, н.с. – организация и проведение экспериментальных исследований, участие в подготовке публикаций

Киселёв Олег Сергеевич, н.с. – участие в постановке эксперимента по измерению спектральных характеристик генератора при помощи сверхпроводникового интегрального приёмника и в подготовке публикаций

Парамонов Максим Евгеньевич, ст.-иссл. – участие в организации экспериментов, настройка и отладка экспериментального измерительного оборудования

Рудаков Кирилл Игоревич, аспирант – построение математической модели и математические расчёты

Филиппенко Людмила Викторовна, с.н.с. – изготовление образцов сверхпроводникового интегрального приёмника

Фоминский Михаил Юрьевич, н.с. – изготовление фотошаблонов методами электронно-лучевой литографии для изготовления образцов сверхпроводникового интегрального приёмника

Количество научных работ по Проекту, опубликованных в 2016 году (пункт заполняется автоматически, выводится количество заполненных 509 форм): 7

Из них в изданиях, включенных в перечень ВАК 2

Из них в изданиях, включенных в библиографическую базу данных РИНЦ 2

Из них в изданиях, включенных в международные системы цитирования (библиографические и реферативные базы научных публикаций) 2

Из них в соавторстве с зарубежными участниками 7

Количество научных работ, подготовленных в ходе выполнения Проекта и принятых к печати в 2016 году (цифрами) 1

Участие в 2016 году в научных мероприятиях по тематике Проекта (каждое мероприятие с новой строки, указать названия мероприятий и тип доклада)

10-й Международный симпозиум по эффектам в массивах джозефсоновских переходов и ТГц плазменных колебаниях в высокотемпературных сверхпроводниках (The 10-th International Symposium on Intrinsic Josephson Effects and THz Plasma Oscillations in High-Tc Superconductors):

1 устный доклад; 4 постерных доклада.

Библиографический список всех публикаций по проекту за весь период выполнения проекта, в порядке значимости: монографии, статьи в научных изданиях, тезисы докладов и материалы съездов, конференций и т.д.

1. 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. "Bi₂Sr₂CaCu₂O_{8+δ} intrinsic Josephson junction stacks with improved cooling: Coherent emission above 1 THz." **Applied Physics Letters** 105, 122602. 2014.

2. F. Rudau, M. Tsujimoto, B. Gross, T. Judd, R. Wieland, E. Goldobin, N. Kinev, J. Yuan, Y. Huang, M. Ji, X.J. Zhou, A. Iishi, 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. 2015.

3. 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. "Compact Superconducting Terahertz Source Operating in Liquid Nitrogen". **Physical Review Applied** 3, 024006. 2015.

4. B. Gross, F. Rudau, N. Kinev, M. Tsujimoto, J. Yuan, Y. Huang, M. Ji, X.J. Zhou, A. Iishi, 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». **Supercond. Sci. Technol.** vol. 28, 055004 (10pp), 2015.

5. Valery P. Koshelets, Pavel N. Dmitriev, Michael I. Faley, Lyudmila V. Filippenko, Konstantin V. Kalashnikov, Nickolay V. Kinev, Oleg S. Kiselev, Anton A. Artanov, Kirill I. Rudakov, Arno de Lange, G. de Lange, Vladimir L. Vaks, M. Y. Li, and Huabing Wan. "Superconducting Integrated Terahertz Spectrometers". **IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology**, vol.5, No.4, pp 687-694. 2015.

6. F. Rudau, R. Wieland, J. Langer, X.J. Zhou, M. Ji, N. Kinev, L.Y. Hao, Y. Huang, J. Li, P.H. Wu, T. Hatano, V.P. Koshelets, H.B. Wang, D. Koelle, and R. Kleiner. «Three-Dimensional Simulations of the Electrothermal and Terahertz Emission Properties of Bi₂Sr₂CaCu₂O_{8+δ} Intrinsic Josephson Junction Stacks» // **Phys. Rev. Applied**, vol.5, 044017, 2016.

7. E. Sobakinskaya, V.L. Vaks, N. Kinev, M. Ji, M.Y. Li, H.B. Wang and V.P. Koshelets. High-resolution terahertz spectroscopy with a noise radiation source based on high-Tc superconductors. // **J. Phys. D: Appl. Phys.** Volume 50, Number 3, 035305 (7pp). Published 19 December 2016.

8. N.V. Kinev, L.V. Filippenko, M.Y. Li, J. Yuan, H.B. Wang, V.P. Koshelets, "Spectral Properties of a Terahertz Oscillator Based on the Bi₂Sr₂CaCu₂O_{8+δ} Mesastructure". **Radiophysics and Quantum Electronics**, Volume 56, Issue 8-9, pp 582-590. 2014.

9. O. Kizilaslan, F. Rudau, R. Wieland, J.S. Hampp, X.J. Zhou, M. Ji, O. Kiselev, N. Kinev, Y. Huang, L.Y. Hao, A. Ishii, T. Hatano, V.P. Koshelets, P.H. Wu, H.B. Wang, D. Koelle, and R. Kleiner, «Tuning THz emission properties of Bi₂Sr₂CaCu₂O_{8+δ} intrinsic Josephson junction stacks by charge carrier injection». // **Supercond. Sci. Technol.** Принято к печати. 2016.

10. 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, issue 4, Article number 044012, 6 pages April (2015).

11. D. Y. An, J. Yuan, N. Kinev, M. Y. Li, Y. Huang, M. Ji, B. Gross, A. Ishii, K. Hirata, T. Hatano, V. P. Koshelets, D. Koelle, R. Kleiner, W. W. Xu, H. B. Wang, and P. H. Wu, "THz emitters and detectors both fabricated from high Tc superconductors: Towards an integrated receiver",

presented at the **2014 Applied Superconductivity Conference**, Charlotte, North Carolina, August 10 – 15, 2014.

12. D.Y. An, M. Ji, X.J. Zhou, Y. Huang, M. Yu, M.Y. Zhang, T. Hatano, N. Kinev, V.P. Koshelets, D. Koelle, R. Kleiner, J. Chen, W.W. Xu, H.B. Wang, and P.H. Wu, "A Grain Boundary Josephson Junction as a Mixer to Evaluate Terahertz Emission from Intrinsic Josephson Junctions", Abstract book of the 39th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (**IRMMW-THz 2014**), Tucson, USA, September 14-19, p 735-736, 2014.

13. M. Ji, Y. Huang, X.J. Zhou, D.Y. An, P. Wang, N. Kinev, A. Sobolev, B. Gross, T. Hatano, V.P. Koshelets, R. Kleiner, W.W. Xu, H.B. Wang, and P.H. Wu, "Continuous Wave Terahertz Radiation above 1 THz from Josephson Junction Arrays", Abstract book of the 39th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (**IRMMW-THz 2014**), Tucson, USA, September 14-19, p 742-743, 2014.

14. Ревин Л.С., Вакс В.Л., Кошелец В.П., Wang H. Взаимодействие молекулярного газа с фазо-диффузионным полем и когерентным сигналом. Сборник докладов **III Всероссийской Микроволновой конференции** (25-27 ноября 2015, г.Москва), стр. 80-83.

15. Кошелец В.П., Кинев. Н.В. Терагерцовые технологии: новый шаг вперёд. Статья в журнале, посвящённом **20-летию сотрудничества РФФИ-DFG**, стр. 20-21. 2015г.

16. F. Rudau, R. Wieland, O. Kizilaslan, J.-S. Hampp, X. Y. Zhou, M. Ji, N. Kinev, Y. Huang, J. Yuan, D. Y. An, L. Y. Hao, P. Wu, T. Hatano, A. Ishii, K. Hirata, V. P. Koshelets, H. B. Wang, D. Koelle and R. Kleiner, "Bi₂Sr₂CaCu₂O_{8+δ} intrinsic Josephson junction stacks: Coherent THz emission and electrothermal properties", presented at the 10-th International Symposium on Intrinsic Josephson Effects and THz Plasma Oscillations in High-Tc Superconductors (**THz-PLASMA 2016**), Nanjing, China, October 09- 12, 2016, Abstract Book, p. 69. (2016).

17. O.S. Kiselev, P.N. Dmitriev, L.V. Filippenko, K.V. Kalashnikov, N.V. Kinev, V.P. Koshelets and H.B. Wang, "Application of integrated terahertz circuits in lab spectroscopy" presented at the 10-th International Symposium on Intrinsic Josephson Effects and THz Plasma Oscillations in High-Tc Superconductors (**THz-PLASMA 2016**), Nanjing, China, October 09- 12, 2016, Abstract Book, p. 106. (2016).

18. O. Kizilaslan, F. Rudau, R. Wieland, J.-S. Hampp, X. Y. Zhou, M. Ji, N. Kinev, Y. Huang, J. Yuan, D. Y. An, L. Y. Hao, P. Wu, T. Hatano, A. Ishii, K. Hirata, V. P. Koshelets, H. B. Wang, D. Koelle and R. Kleiner, "THz emission from Bi-2212 single crystal whiskers", presented at the 10-th International Symposium on Intrinsic Josephson Effects and THz Plasma Oscillations in High-Tc Superconductors (**THz-PLASMA 2016**), Nanjing, China, October 09- 12, 2016, Abstract Book, p. 107. (2016).

19. F. Rudau, R. Wieland, O. Kizilaslan, J. S. Hampp, X. Y. Zhou, M. Ji, N. Kinev, Y. Huang, J. Yuan, L. Y. Hao, P. Wu, T. Hatano, A. Ishii, K. Hirata, V. P. Koshelets, H. B. Wang, D. Koelle and R. Kleiner, "Ways to tune the maximum emission power of Bi₂Sr₂CaCu₂O_{8+δ} intrinsic Josephson junction stacks", presented at the 10-th International Symposium on Intrinsic Josephson Effects and THz Plasma Oscillations in High-Tc Superconductors (**THz-PLASMA 2016**), Nanjing, China, October 09- 12, 2016, Abstract Book, p. 120. (2016).

20. V.P. Koshelets, A.A. Artanov, P.N. Dmitriev, A.B. Ermakov, L.V. Filippenko, M.Yu. Fominsky, K.V. Kalashnikov, N.V. Kinev, O.S. Kiselev, M.E. Paramonov, K.I. Rudakov, and H.B. Wang, "Sub-terahertz Integrated Oscillators and Receivers", presented at the 10-th International Symposium on Intrinsic Josephson Effects and THz Plasma Oscillations in High-Tc Superconductors (**THz-PLASMA 2016**), Nanjing, China, October 09- 12, 2016, Abstract Book, p. 58. (2016).

Библиографический список совместных публикаций (в соавторстве с зарубежным партнером по проекту) за 2016 год: монографии и статьи в научных изданиях с указанием импакт-фактора журнала по базе данных Web of Science (тезисы докладов и материалы съездов, конференций и т.д. не включать)

1. F. Rudau, R. Wieland, J. Langer, X.J. Zhou, M. Ji, N. Kinev, L.Y. Hao, Y. Huang, J. Li, P.H. Wu, T. Hatano, V.P. Koshelets, H.B. Wang, D. Koelle, and R. Kleiner. «Three-Dimensional Simulations of the Electrothermal and Terahertz Emission Properties of $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ Intrinsic Josephson Junction Stacks» // **Phys. Rev. Applied**, vol.5, 044017, 2016. Импакт-фактор: 4,061.

2. E. Sobakinskaya, V.L. Vaks, N. Kinev, M. Ji, M.Y. Li, H.B. Wang and V.P. Koshelets. High-resolution terahertz spectroscopy with a noise radiation source based on high-Tc superconductors. // **J. Phys. D: Appl. Phys.** Volume 50, Number 3, 035305 (7pp). Published 19 December 2016. Импакт-фактор: 2,772.

3. O. Kizilaslan, F. Rudau, R. Wieland, J.S. Hampp, X.J. Zhou, M. Ji, O. Kiselev, N. Kinev, Y. Huang, L.Y. Hao, A. Ishii, T. Hatano, V.P. Koshelets, P.H. Wu, H.B. Wang, D. Koelle, and R. Kleiner, «Tuning THz emission properties of $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ intrinsic Josephson junction stacks by charge carrier injection». // **Supercond. Sci. Technol.** Принято к печати. 2016. Импакт-фактор: 2,717.

Преимущества, полученные в результате международного сотрудничества (использование оборудования, наработки, доступ к уникальным объектам и условиям и т.д.)

В рамках международного сотрудничества с немецкими учёными из Университета г. Тюбинген был получен доступ к исследованию уникальных образцов ТГц генератора на основе BSCCO, изготовлением которых занимается лишь несколько групп в мире. К сожалению, в России отсутствует надёжная и воспроизводимая технология изготовления ТГц генераторов на основе меза-структур из BSCCO. Образцы были изготовлены зарубежными коллегами и любезно предоставлены для полноценного использования и экспериментального исследования российским учёным из ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. Кроме того, исследование распределения температуры вдоль образцов меза-структуры проведено на уникальной и дорогостоящей установке низкотемпературного сканирующего лазерного микроскопа, находящегося в распоряжении коллег из Германии. Таким образом, большая и важная часть работ проделана коллегами из Тюбингенского университета, сотрудничество является важным шагом на пути к разработке и изучению свойств уникальных ТГц генераторов нового поколения.