

КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

Сверхпроводниковые генераторы терагерцового диапазона*

Ф.В. Хан, Л.В. Филиппенко, А.Б. Ермаков, М.Е. Парамонов,
М.Ю. Фоминский, Н.В. Кинев, В.П. Кошелец, С.А. Никитов

Практические устройства на основе элементов сверхпроводниковой электроники благодаря квантовой природе, уникальному набору параметров и криогенным рабочим температурам существенно превосходят системы, в основе работы которых лежат другие физические принципы. Рабочая частота сверхчувствительных приёмных устройств терагерцового (ТГц) диапазона достигла 1 ТГц, а их шумовая температура ограничена только квантовым пределом. Одним из наиболее перспективных направлений является разработка сверхпроводниковых генераторов ТГц-диапазона для интегральных приёмных систем. Такое приложение нестационарного эффекта Джозефсона представляется весьма естественным, однако множество разработок и исследований в десятках ведущих лабораторий мира долго не приводили к созданию генератора с требуемыми параметрами.

Ключевые слова: джозефсоновский генератор ТГц-диапазона; высококачественные туннельные переходы на основе ниобия; интегральный генератор гетеродина; ширина линии излучения; режим частотной и фазовой стабилизации

PACS numbers: 07.57. – с, 74.81.Fa, 85.25.Cp

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2024.12.039864>

Содержание

1. Введение (621).
 2. Джозефсоновские генераторы терагерцового диапазона (622).
 - 2.1. Генераторы на основе массивов джозефсоновских переходов.
 - 2.2. Распределённые джозефсоновские туннельные переходы.
 - 2.3. Генераторы на основе высокотемпературных сверхпроводников.
 3. Интегральный генератор гетеродина на основе распределённых джозефсоновских туннельных переходов (625).
 - 3.1. Разработка и основные характеристики сверхпроводникового генератора гетеродина.
 - 3.2. Генератор ТГц-излучения в свободное пространство.
 4. Генератор на основе цепочки джозефсоновских переходов в копланарной линии (629).
 - 4.1. Конструкция и основные характеристики генератора.
 - 4.2. Измерение спектров излучения и режимы стабилизации частоты.
 5. Заключение (632).
- Список литературы (633).

1. Введение

Сверхпроводниковая электроника позволяет создавать устройства с уникальной функциональностью по сравне-

нию с традиционными подходами, что подтверждается мировым опытом. В основе таких устройств, как правило, лежат квантовые эффекты, обеспечивающие высокие рабочие частоты и предельную эффективность, а в совокупности с криогенными температурами позволяющие реализовать низкие шумы, ограниченные лишь квантовыми значениями [1–5]. Главным стимулом бурного развития сверхпроводниковой электроники в последние годы является возможность создания приборов с рекордными параметрами, востребованных в различных областях науки и техники и работающих в широком частотном диапазоне, от долей герца до рентгена. Сверхпроводниковые квантовые интерференционные приборы (СКВИДы) (SQUID — Superconducting Quantum Interference Device) позволяют измерять магнитные поля на уровне 10^{-6} кванта магнитного потока Φ_0 [4, 5], а сверхпроводниковые однофотонные детекторы (Superconducting Single-Photon Detector — SSPD) [6–8] дают возможность регистрировать одиночные фотоны с длиной волны менее 10 мкм. На основе СКВИДов созданы устройства для детектирования и обработки слабых сигналов, в том числе сверхпроводниковые параметрические усилители с шумовой температурой ниже физической [9–11], а также одноквантовые цифровые устройства (Rapid Single Flux Quantum — RSFQ) [12, 13] для интерфейсных сверхпроводниковых схем, обеспечивающих связь с квантовыми битами (кубитами) и управление квантовыми системами при сверхнизких температурах [14, 15].

Одним из наиболее успешно развивающихся направлений сверхпроводниковой электроники является разра-

Ф.В. Хан^(а), Л.В. Филиппенко^(б), А.Б. Ермаков^(с),
М.Е. Парамонов^(д), М.Ю. Фоминский^(е), Н.В. Кинев^(ф),
В.П. Кошелец^(г), С.А. Никитов^(h)
Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
ул. Моховая 11, корп. 7, 125009 Москва, Российская Федерация
E-mail: ^(а) khanfv@hitech.cplire.ru, ^(б) lyudmila@hitech.cplire.ru,
^(с) ermakov@hitech.cplire.ru, ^(д) paramonov@hitech.cplire.ru,
^(е) demiurge@hitech.cplire.ru, ^(ф) nikolay@hitech.cplire.ru,
^(г) valery@hitech.cplire.ru, ^(h) nikitov@hitech.cplire.ru

Статья поступила 9 декабря 2024 г.

* Обзор написан на основе доклада, представленного на Научной сессии Общего собрания Отделения физических наук Российской академии наук 9 декабря 2024 г. (см. УФН 195 (6) 584 (2025)).

ботка сверхчувствительных приёмных устройств терагерцового (ТГц) диапазона; их рабочая частота f достигла 1,2 ТГц, а шумовая температура ограничена только квантовым пределом либо фотонными шумами. Для измерения спектрального состава принимаемого излучения требуются гетеродинные приёмники с разрешением $\Delta f/f$ лучше 10^{-6} . В гетеродинном приёмнике входящий слабый входной сигнал преобразуется (переносится) на более низкую промежуточную частоту (ПЧ) без потери фазы. Смесители на основе туннельных переходов сверхпроводник – изолятор – сверхпроводник (СИС) [16–19] являются наиболее чувствительными входными устройствами в гетеродинных приёмниках; их шумовая температура в двухполосном режиме (DSB — Dual Side Band) ограничена квантовой величиной $hf/(2k_B)$ [20], где h и k_B — постоянные Планка и Больцмана соответственно. Обзор разработок гетеродинных сверхпроводниковых приёмных систем, в том числе производимых в России, представлен в недавней статье в *УФН* [21].

Использование нескольких гетеродинных приёмников позволяет создавать интерферометрические системы с высоким угловым разрешением, определяемым расстоянием между приёмными антеннами. Именно на этом принципе построен самый большой радиоастрономический проект нашего времени — многоэлементный интерферометр Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) [22] и создана программа Event Horizon Telescope (ЕНТ) [23], объединяющая в единую сеть десятки радиотелескопов по всему миру. Предельно высокое угловое разрешение позволило впервые в истории получить "изображения" сверхмассивной чёрной дыры в центре галактики М 87 [24, 25]. Ещё более высокое угловое разрешение будет реализовано в проекте российского космического агентства "Миллиметр" по созданию радиоинтерферометра космос – Земля с базой до 1,5 млн км [26, 27].

Космическая обсерватория "Миллиметр" будет проводить исследования Вселенной также и в режиме одиночного телескопа; отметим, что измерения не будут ограничены поглощением атмосферы Земли в терагерцовом диапазоне частот. Это особенно ценно для наблюдения важнейшей для возникновения жизни молекулы воды в различных космических объектах (протозвёздных облаках, протопланетных дисках и кометах) и выявления закономерностей эволюции воды в космосе. Такие измерения позволят приблизиться к ответу на один из ключевых вопросов современной астрофизики об условиях, необходимых для возникновения жизни. Следует отметить, что СИС-приёмники уже успешно работали на борту космических обсерваторий; например, в космической программе Herschel Space Observatory [28, 29].

Генератор гетеродина для приёмников терагерцового диапазона должен обеспечивать непрерывную перестройку частоты во всём диапазоне работы СИС-смесителя, достаточную мощность для его накачки, высокое спектральное качество (СК) и низкие фазовые шумы. Кроме того, в особенности для космических приложений, очень важны массогабаритные характеристики и энергопотребление такого генератора гетеродина. В настоящее время в большинстве СИС-приёмников в качестве гетеродина используется сложная система умножителей и усилителей мощности [30, 31], позволяющая получать мощность до 2 мВт на частоте 1 ТГц при 5 % эффективности [30]. При этом гетеродины ТГц-диапа-

зона, пригодные для работы в составе космических телескопов, могут быть изготовлены только в нескольких научных центрах; одним из них является NASA Jet Propulsion Laboratory (California Institute of Technology) [32]. Поэтому принципиально важным для реализации космической программы "Миллиметр" является разработка альтернативных вариантов гетеродина, одним из наиболее перспективных здесь представляется сверхпроводниковый генератор ТГц-диапазона.

Работы по созданию и исследованию генераторов субтерагерцового диапазона на основе сверхпроводниковых переходов ведутся со времени открытия эффекта Джозефсона, такое приложение нестационарного эффекта Джозефсона представляется весьма естественным. Любой джозефсоновский контакт является генератором, частота которого определяется средней величиной напряжения на нём. Обычно для удобства задания требуемого напряжения используются переходы с безгистерезисной вольт-амперной характеристикой (ВАХ). Однако параметры одиночного перехода не позволяют получить достаточно мощное и узкополосное излучение, поэтому использовались цепочки и массивы, содержащие десятки и сотни джозефсоновских переходов [33, 34]; краткий обзор генераторов этого типа будет представлен в разделе 2.1.

До последнего времени реализовать в одном устройстве как терагерцовую генерацию с возможностью перестройки частоты в широком диапазоне, так и узкую линию излучения, необходимую для практического использования таких устройств удалось [21, 35, 36] только для систем на основе распределённых джозефсоновских туннельных переходов (РДТП). В разделе 2.2 будет дан обзор ранних работ по созданию РДТП-генераторов [37–41] на основе традиционных сверхпроводников, а в разделе 2.3 — генераторов на основе естественных массивов ВТСП джозефсоновских переходов [42–47]. В разделе 3 представлены результаты разработки и исследования интегрального генератора гетеродина на основе РДТП, проведённых в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН в последние годы, а в разделе 4 описан новый тип сверхпроводникового генератора на основе одномерного массива джозефсоновских переходов в копланарной линии.

2. Джозефсоновские генераторы терагерцового диапазона

2.1. Генераторы на основе массивов джозефсоновских переходов

В литературе [33, 34, 48–51] описываются различные варианты сверхпроводниковых генераторов на основе массивов джозефсоновских переходов, отличающиеся топологией, типом шунтирования, диапазоном рабочих частот. Переходы могут быть расположены в двумерном массиве [51]; такая топология структуры позволяет уместить на одном чипе большее количество переходов, что при условии их синхронизации позволит добиться большей мощности генерации. Если в массиве M горизонтальных рядов и N — вертикальных, то мощность будет пропорциональна $\sim MN$, а линия генерации $\sim 1/MN$. Если же массив одномерный, то мощность генерации, при условии синхронизации N переходов и высоком коэффициенте согласования с внешней нагрузкой, будет пропорциональна N . В случае, когда массив и нагрузка сильно рассогласованы, мощность, согласно

модели [33], увеличивается пропорционально N^2 . Следует отметить, что для создания генератора гетеродина в сверхпроводниковом приёмнике второй вариант не подходит, так как выходная характеристика мощности от частоты будет сильно изрезана и не обеспечит требуемый уровень мощности накачки смесителя на всех частотах, что приведёт к повышению шумовой температуры приёмника. Кроме того, в таком случае окажется невозможна непрерывная перестройка частоты генерации.

Переходы в массиве могут быть расположены либо на расстоянии, много меньшем длины волны λ , друг от друга, либо на $\lambda/2$. Во втором случае оказывается проще достичь синхронизации между переходами в массиве, так как каждый переход располагается в пучности электромагнитного поля волны. Однако перестройка частоты генерации в широких пределах в такой геометрии оказывается невозможной. Если же переходы расположены на малом расстоянии друг от друга, то геометрические резонансы возникают на частотах, определяемых длиной всего массива. При уменьшении коэффициента отражения от краёв массива становится возможным добиться уменьшения коэффициента стоячей волны, что позволит более плавно перестраивать частоту генерации.

Ниже приведены результаты исследования одномерных и двумерных массивов джозефсоновских переходов, проведённые различными научными группами. Так, в работе [51] описываются результаты измерений двумерного массива, состоящего из $N = 1968$ джозефсоновских переходов, расположенных на расстоянии, равном половине длины волны, соответствующей частоте 240 ГГц. Максимальная мощность генерации составила более 160 мкВт; этой мощности уже достаточно для применения не только on-chip, но и для излучения в открытое пространство. В работе [52] также исследовался двумерный массив туннельных джозефсоновских переходов, однако в данном случае массив располагался над сверхпроводящим экраном. Авторам удалось добиться мощности до 0,4 мкВт на массиве, состоящем из 3 рядов, по 131 переходу в каждом. Эффективность преобразования входной мощности в излучение составила около 30 %; ширина линии и спектр генерации в работах не измерялись.

В работе [53] приводятся результаты исследования массива, состоящего из 9996 переходов Nb/NbSi/Nb; рабочие частоты лежат в диапазоне от 139 до 343 ГГц с возможностью непрерывной перестройки частоты. Синхронизации переходов удастся достичь благодаря возбуждению мод в подложке. Ширина линии генерации в лучших точках менее 1 МГц. В работе [54] исследовался массив из 11 переходов, находящихся на расстоянии $\lambda/2$ друг от друга и шунтированных тонкоплёночным резистором. Мощность, пришедшая к нагрузке от массива, по оценке авторов составила 10 мкВт на частоте 625 ГГц. Ширина линии генерации в этой точке была определена по спектру на промежуточной частоте; её величина составила 8 МГц. Также авторам удалось получить сигнал от массива на частотах выше щелевой частоты ниобия (700 ГГц). Однако область генерации оказалась ограничена отдельными точками по частоте.

Работы по созданию терагерцовых генераторов на основе массивов сосредоточенных джозефсоновских переходов ведутся многими научными группами и сейчас. Основная цель исследований — увеличение мощности генерации, расширение рабочей полосы и обеспечение синхронизации между переходами в массиве.

2.2. Распределённые джозефсоновские туннельные переходы

Распределённый джозефсоновский туннельный переход является одним из наиболее изученных типов джозефсоновских генераторов; он представляет собой длинный туннельный СИС-переход с перекрывающейся геометрией [1–3, 37–41, 55–58]. Длина перехода L больше его ширины W и во много раз превышает джозефсоновскую глубину проникновения магнитного поля λ_J . Принцип работы генератора на основе РДТП состоит следующем: через переход задаётся постоянный ток смещения I_{bias} и прикладывается внешнее магнитное поле (параллельное плоскости перехода), которое регулируется током I_{CL} через линию управления.

Магнитное поле способствует проникновению квантов магнитного потока внутрь перехода на одном из краёв контакта, изменяя джозефсоновскую фазу $\varphi(x)$ и образуя вихрь, содержащий квант магнитного потока Φ_0 . Ток смещения заставляет этот квант двигаться, создавая однонаправленный поток джозефсоновских вихрей в переходе. Каждый вихрь (флаксон) имеет длину $2\lambda_J$ вдоль плоскости перехода и $2\lambda_L$ в направлении, перпендикулярном плоскости перехода, где λ_L — лондоновская глубина проникновения поля в переход (типичное значение λ_L для плёнок ниобия составляет 90 нм). Двигаясь под действием силы Лоренца, флаксоны отталкиваются друг от друга и образуют цепочку вихрей, которая при больших магнитных полях становится достаточно жёсткой [55, 56]. При пересечении противоположного края перехода движущимся флаксоном возникает всплеск напряжения, интеграл которого по времени равен величине "вышедшего" кванта магнитного потока:

$$\int V dt = \Phi_0 = 2 \text{ мВ} \times 1 \text{ пс}. \quad (1)$$

Частота излучаемого сигнала связана с напряжением на РДТП-переходе V_{DC} фундаментальным соотношением Джозефсона $f = (2\pi/\Phi_0)V_{DC}$; таким образом, при напряжении на переходе 1 мВ частота излучения составит 483,6 ГГц. Скорость и плотность флаксоновой цепочки можно регулировать изменением величины тока смещения I_{bias} и тока через линию управления магнитным полем I_{CL} , соответственно можно управлять мощностью и частотой электромагнитного излучения.

Традиционно теоретическое описание работы РДТП проводилось в рамках феноменологического уравнения синус–Гордона [38, 57, 58]; эта модель позволяет качественно описать топологические возбуждения (солитоны)

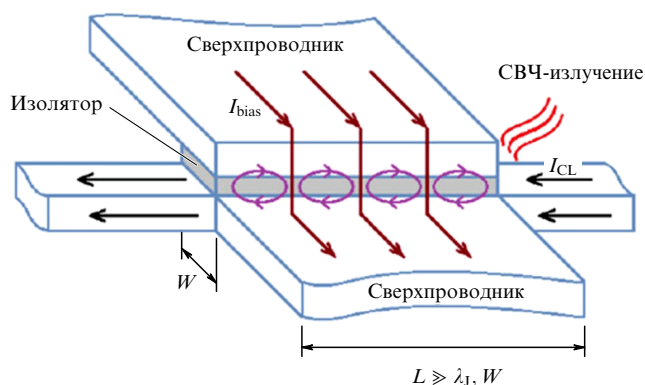


Рис. 1. Схематическое изображение генератора на основе РДТП.

ны) в джозефсоновских контактах, однако она не даёт количественную связь между туннельными токами и электромагнитным излучением в распределённом переходе и не учитывает энергетическую щель сверхпроводников. Для точного описания процессов генерации в РДТП была построена микроскопическая модель [59, 60], основанная на теории микроскопического квантового туннелирования. Такая модель позволяет количественно описать особенности реальных структур как в случае симметричных переходов $\text{Nb}-\text{AlO}_x-\text{Nb}$ [59], так и для асимметричных структур $\text{Nb}-\text{AlN}-\text{NbN}$ [60]. Расчётные результаты этих моделей, включая особенности вольт-амперных характеристик, хорошо согласуются с экспериментальными результатами [59, 60].

В ранних работах излучение из РДТП наблюдалось на частотах порядка 10 ГГц [57, 61, 62] при работе на ступенях нулевого поля (zero-field steps) в переходах $\text{Nb}-\text{NbO}_x-\text{Pb}(\text{InAu})$; измеряемая мощность составляла 1–10 пВт, а ширина линии излучения была в диапазоне от 0,1 до 50 МГц. В дальнейшем частота излучения возросла до нескольких десятков гигагерц, для измерения использовались интегральные сверхпроводниковые детекторы; в работе [63] этим методом была дана оценка мощности излучения 100 пВт на частоте 75 ГГц. Затем был опубликован цикл работ [37–40] по разработке генератора на потоке вихрей в переходе с электродами из PbIn/Au в магнитном поле (Flux-flow type Josephson oscillator). С помощью интегрального сверхпроводникового детектора была оценена мощность порядка 1 мкВт в частотном диапазоне от 100 до 400 ГГц. В работах Чалмерского университета [64, 65] на частотах порядка 300 ГГц удалось измерить комбинированную ширину линии излучения двух РДТП-генераторов, сигналы которых подавались на интегральный СИС-смеситель. Данная величина составила 2,1 МГц, оцененная по накачке СИС-смесителя приходящая мощность одного РДТП-генератора была 430 нВт на частоте 320 ГГц. Интегральная схема изготавливалась стандартными методами микроэлектроники на основе трёхслойной структуры $\text{Nb}-\text{NbO}_x-\text{PbBi}$.

2.3. Генераторы на основе высокотемпературных сверхпроводников

Ещё одной возможностью создания генераторов ТГц-диапазона является использование структур на основе слоистых высокотемпературных сверхпроводников. В соединении $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+d}$ (BSCCO) сверхпроводимость с критической температурой T_c порядка 90 К обеспечивается слоями CuO_2 толщиной 0,3 нм, которые разделены барьерными слоями SrO и BiO суммарной толщиной 1,5 нм, формирующими джозефсоновскую слабую связь. Таким образом, монокристалл толщиной 1 мкм образует стопку из примерно 670 естественных джозефсоновских переходов с максимально возможной плотностью упаковки. Структуру, "вырезанную" из такого монокристалла методами технологий нанометрового масштаба, в литературе принято называть мезой (mesa). Первой статьёй о наблюдении генерации на СВЧ (порядка 10 ГГц) из слоистой структуры монокристалла на основе BSCCO-мезы считается работа [42]. Но лишь после статьи 2007 года в журнале *Science* [43] с экспериментальным наблюдением излучения на частотах до 600 ГГц начался настоящий бум по разработке генераторов на основе BSCCO. Ежегодно выходило в свет не-

сколько сотен публикаций, затрагивающих как теоретические исследования механизмов, происходящих внутри сложной многопараметрической системы генератора, так и экспериментальные исследования излучающих, тепловых и резонансных свойств этих структур.

Было показано, что свойства ТГц-излучения чрезвычайно сильно зависят от концентрации носителей заряда, изменяющейся за счёт допирования или дедопирования путём инжекции тока. Были проведены эксперименты по детальному исследованию ТГц-излучения из естественных массивов джозефсоновских переходов для изучения связи частоты излучения с различными модами резонатора. Чрезвычайно важным для получения излучения на частотах порядка 1 ТГц и выше является хороший теплоотвод от меза-структуры [44–47]. Были разработаны методы получения BSCCO-массивов джозефсоновских переходов, встроенных между золотыми электродами, — так называемые структуры Gold-BSCCO-Gold (GBG). Важную роль в процессе генерации из меза-структур играет "горячее пятно"; изменение в проводимости между холодной и горячей частью мезы приводит к отражению электромагнитной волны от границы "горячего пятна", которое может действовать как дополнительный шунт, помогающий синхронизации переходов в массиве. Измеренная частота генерации лежит в диапазоне 0,2–2,4 ТГц; для лучших меза-генераторов была достигнута мощность излучения порядка десятков мкВт [44–47]. Следует отметить, что измерение излучения проводилось, как правило, с помощью полупроводниковых болометров (на основе Si либо Ge) и невысоким спектральным разрешением порядка 1 ГГц.

Впервые прямые измерения спектров излучения BSCCO меза-структур были проведены нами [44] с помощью сверхпроводникового интегрального спектрометра [21, 35, 36]. Показано, что наилучшими спектральными характеристиками BSCCO генератор обладает в режиме "высоких токов" (high-bias), при наличии "горячего пятна". Типичные значения ширины линии BSCCO-генератора, измеренной в режиме "больших токов", составляли 10–100 МГц (рис. 2а);

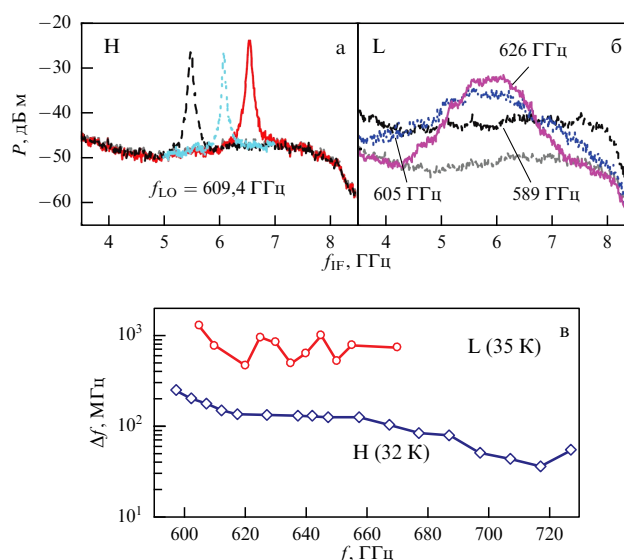


Рис. 2. Спектры излучения генератора на основе BSCCO меза-структур в режиме (а) высоких и (б) низких токов смещения; (в) зависимость ширины линии излучения от частоты [44].

форма спектральной линии с высокой степенью точности является лоренцевой. В режиме "низких токов" (low-bias) структура излучает мощный широкополосный шум; ширина излучения составляет порядка 1 ГГц (рис. 2б). В диапазоне от 450 до 740 ГГц измерены спектральные характеристики излучения ВТСП мезоструктур при температурах от 4,2 до 55 К (рис. 2в), получена минимальная ширина линии излучения 7 МГц и мощность 1–2 мВт.

3. Интегральный генератор гетеродина на основе распределённых джозефсоновских туннельных переходов

Традиционно в качестве гетеродина в приёмниках ТГц и субТГц диапазона используется внешний источник, выбор которых на настоящий момент достаточно ограничен и лишь незначительно увеличился за последние двадцать лет. Лампы обратной волны (ЛОВ), обладающие сравнительно высокой мощностью и покрывающие диапазон от 70 ГГц до 1,5 ТГц, являются громоздкими, им требуется для работы высоковольтный источник питания и сильные магнитные поля порядка 1 Тл. Кроме того, ЛОВ вышли из массового производства более трёх десятилетий назад, и они не являются коммерчески доступными из-за сложности технологии. Популярность на сегодняшний день набирают источники на основе квантово-каскадных лазеров, однако их рабочий диапазон начинается только от 1,5 ТГц, причём полоса перестройки составляет, как правило, не более 1 % [66, 67]. Более широкополосными являются фотосмесители, работающие на разностной частоте двух лазеров; их рабочий диапазон простирается до 2 ТГц, однако мощность достаточно низкая, а эффективность преобразования падает экспоненциально с ростом частоты [68, 69]. Широко и успешно используются умножители частоты на основе диодов Шоттки [30, 31], однако, подобно фотосмесителям, их эффективность значительно падает на частотах выше 1 ТГц. При этом главная проблема заключается в коммерческой недоступности в России умножителей ТГц-диапазона и усилителей мощности на частоты порядка 100 ГГц для накачки таких умножителей. Всё вышесказанное обуславливает необходимость создания альтернативных вариантов генераторов ТГц-диапазона, одним из наиболее разработанных является сверхпроводниковый генератор ТГц-диапазона на основе РДТП [21, 35, 36].

3.1. Разработка и основные характеристики сверхпроводникового генератора гетеродина

Для работы в составе интегрального приёмника требуется обеспечить возможность перестройки частоты в широком диапазоне и мощность, достаточную для эффективной накачки СИС-смесителя [21, 35, 36]. Кроме того, для большинства практических приложений нужно обеспечить высокое спектральное разрешение лучше 10^{-6} ; для этого требуется фазовая синхронизация сверхпроводникового генератора гетеродина (СГГ) к стабильному опорному синтезатору. Для исследования сверхпроводникового генератора гетеродина были разработаны интегральные структуры, содержащие также СИС-детектор терагерцового излучения [33, 37, 65, 70–72]. Фотография одного из вариантов интегральной структуры показана на рис. 3.

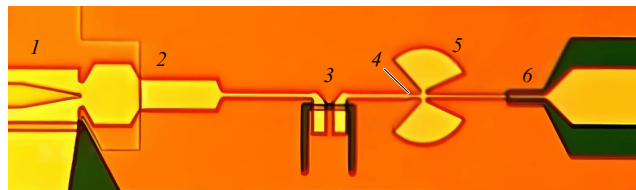


Рис. 3. Фотография интегральной структуры для исследования излучения генератора на основе РДТП. Цифрами обозначены: 1 — генератор (показан только небольшой фрагмент перехода с сужением); 2 — трёхступенчатый трансформатор импеданса; 3 — развязка по постоянному току; 4 — СИС-переход с индуктивной секцией для отстройки ёмкости СИС-перехода в рабочем диапазоне частот; 5 — радиальные замыкатели; 6 — выходная копланарная линия [72].

Были проведены исследования интегральных схем, изготовленных на основе туннельных структур Nb–AlO_x–Nb и Nb–AlN–NbN. Технология изготовления сверхпроводниковых интегральных структур на основе высококачественных туннельных переходов была разработана и оптимизирована в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН [73–75]. Эта технология была апробирована при изготовлении малошумящих приёмных устройств ТГц-диапазона для радиоастрономии и интегральных приёмников для мониторинга атмосферы и лабораторных применений [21, 75]. Для изготовления структур использовалось оборудование, входящее в состав УНУ "Крио-интеграл", — "Технологический и измерительный комплекс для изготовления сверхпроводниковых наносистем на основе новых материалов" [76]; данный комплекс является уникальным и, по сути, единственным в РФ, где возможно изготовление высококачественных туннельных переходов на основе ниобия.

Воздействие излучения терагерцового генератора регистрировалось по изменению вольт-амперной характеристики (ВАХ) сверхпроводникового детектора; таким образом возможно не только зафиксировать излучение, но и оценить мощность сигнала в рамках модели Такера–Фелдмана [16]. Следует отметить, что СИС-переход с толщиной барьера порядка 1 нм имеет высокую удельную ёмкость $C_{уд}$ (примерно $0,08$ пФ мкм^{–2}); это приводит к существенному шунтированию нелинейного сопротивления перехода $R_{RF}(V)$ на высокой частоте. Паразитная ёмкость может быть "отстроена" на рабочей частоте путём подключения небольшой индуктивности, образуемой, как правило, отрезком микрополосковой линии длиной в несколько микрометров. Индуктивность не должна шунтировать переход по постоянному току; для подсоединения индуктивности только по высокой частоте служит "блокировочная" ёмкость, которая может быть реализована с помощью широкополосных радиальных замыкателей (см. рис. 3).

Семейство ВАХ РДТП-генератора на основе структуры Nb–Al/AlO_x–Nb, измеренных при различных магнитных полях, представлено на рис. 4. Цветовой шкалой в каждой рабочей точке на ВАХ генератора показаны измеренные значения квазичастичного тока накачки интегрального СИС-смесителя (рис. 5). Под воздействием приходящего СВЧ-излучения от РДТП-генератора на ВАХ СИС-смесителя по обе стороны от щелевой особенности на напряжении V_g возникают квазичастичные ступени, отстоящие от V_g на кратную величину hf/e , соответствующую энергии кванта приходящих фотонов [16].

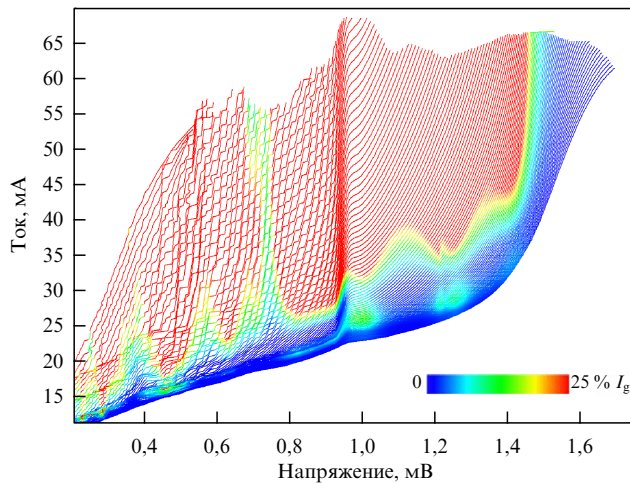


Рис. 4. Семейства ВАХ РДТП на основе структур Nb–Al/AIO_x–Nb, измеренных при различных значениях магнитного поля. Цветовая палитра показывает уровень увеличения постоянного тока (принимающего СВЧ-сигнал) от СИС-смесителя, индуцированного излучением РДТП-генератора (в процентах от скачка его квазичастичного тока на щели I_g).

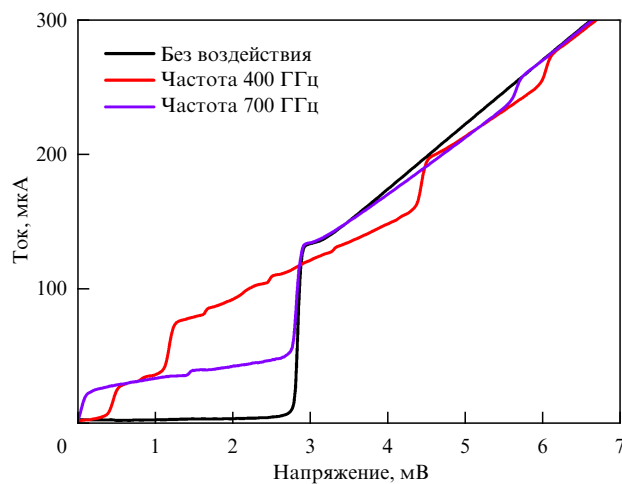


Рис. 5. ВАХ туннельного перехода Nb–Al/AIO_x–Nb площадью 1,4 мкм²; чёрной кривой на рисунке показана автономная ВАХ, а цветными — ВАХ при воздействии СВЧ-сигнала РДТП-генератора на частотах 400 и 700 ГГц.

Туннелирование квазичастиц под действием внешнего СВЧ-излучения в англоязычной литературе называется photon assisted tunneling. Величина тока измеряется при постоянном напряжении смещения СИС-смесителя чуть ниже V_g и нормируется на величину скачка тока на щели I_g . Области красного цвета на ВАХ генератора соответствуют параметрам, при которых рост квазичастичного тока СИС-смесителя превышает 25 % скачка его тока при щелевом напряжении. Этот уровень немного выше оптимального для работы смесителя. На рисунке 6 показана зависимость тока накачки СИС-смесителя от частоты РДТП-генератора, демонстрирующая широкий частотный диапазон работы как генератора на основе РДТП, так и согласующих структур [77].

Следует упомянуть, что работа РДТП зависит от режимов движения джозефсоновских вихрей (флаконов) внутри перехода. При напряжениях $V < V_g/3$ (где V_g — щелевое напряжение) возникает резонансный режим с

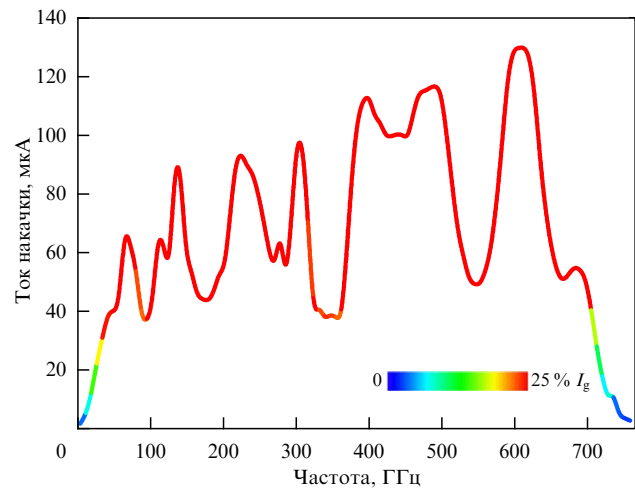


Рис. 6. Экспериментальная зависимость максимального тока накачки СИС-смесителя, измеренного при напряжении 2,5 мВ, в зависимости от частоты РДТП (цветом показан уровень накачки в процентах от скачка его квазичастичного тока на щели I_g).

малым параметром затухания электромагнитной волны в переходе α , формирующий стоячие волны с модами

$$f_m = m \frac{\pi c_{sw}}{L}, \quad (2)$$

m — номер моды, c_{sw} — скорость Свайхарта, L — длина перехода. Это приводит к возникновению резонансных ступеней Фиске на ВАХ при напряжениях:

$$V_m = m \frac{hc_{sw}}{4eL}, \quad (3)$$

где h — постоянная Планка, e — заряд электрона; такие ступени затрудняют плавную перестройку частоты генератора из-за отсутствия рабочих точек между ступенями (см. рис. 4). При $V \approx V_g/3$ проявляется эффект джозефсоновской самонакачки (Josephson Self Coupling — JSC), вызванный поглощением излучения квазичастицами [78]. В результате увеличивается амплитуда квазичастичного тока при напряжениях

$$V_{JSC} = \frac{V_g}{2n+1} \quad (4)$$

(эффект наиболее выражен при $n = 1$, $V_{JSC} = V_g/3$) и растёт коэффициент затухания α . При $\alpha L/\lambda_J > 1$ ступени Фиске исчезают и РДТП переходит в режим вязкого течения вихрей. В данном режиме дифференциальное сопротивление меняется монотонно, что позволяет плавно настраивать частоту генератора в широком диапазоне. На рисунке 4 резонансные структуры (ступени Фиске) и область перехода в режим JSC (уплотнения в районе напряжения примерно 0,95 мВ) визуализируют указанные эффекты.

Возможность регулировки мощности РДТП-генератора иллюстрирует рис. 7, на котором показаны ВАХ СИС-смесителя, измеренные при изменении тока через генератор I_{bias} при поддержании постоянной частоты генерации путём подстройки тока через линию управления магнитным полем I_{CL} ; эта подстройка выполнялась автоматизированной системой IRTECON (Integrated Receiver TEst and CONtrol) [79]. На вставке к рисунку

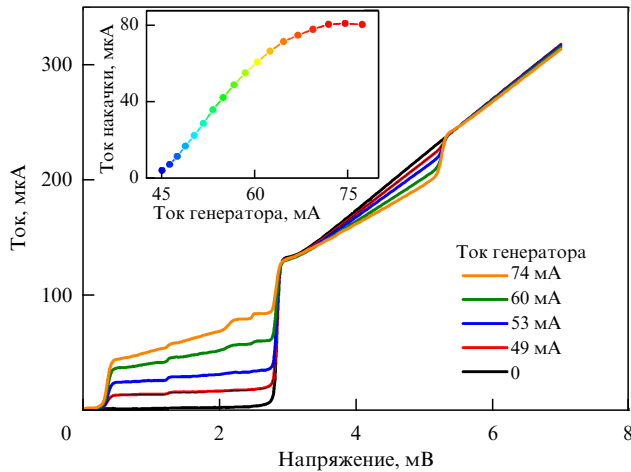


Рис. 7. Семейство ВАХ СИС-перехода при различной мощности приходящего СВЧ-излучения от тока РДТП-генератора на частоте 600 ГГц [72]. На вставке: зависимость тока накачки СИС-смесителя от величины тока смещения РДТП.

показана зависимость тока накачки при напряжении 2,5 мВ от тока через генератор I_{bias} .

Применение СИС-перехода в качестве смесителя позволяет измерить спектр излучения интегрального генератора гетеродина [65, 71], при этом СИС-переход используется как гармонический смеситель (ГС) с высоким номером гармоники [80]. Сигнал от опорного синтезатора $f_{\text{синт}}$ частотой порядка 20 ГГц подаётся на СИС-переход, в котором n -я гармоника сигнала синтезатора смешивается с сигналом СГГ частотой $f_{\text{СГГ}}$. Разностный сигнал гигагерцовой частоты $f_{\text{ПЧ}}$

$$f_{\text{ПЧ}} = \pm(f_{\text{СГГ}} - n f_{\text{синт}}) \quad (5)$$

усиливается криогенным НЕМТ усилителем (шумовая температура приблизительно 5 К, усиление 30 дБ), выводится из криостата и после дополнительного усиления сигнал разветвляется на спектроанализатор для записи спектров и на систему фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) с дополнительным частотным детектором. Частотный детектор с полосой регулирования порядка 10 кГц стабилизирует частоту, убирая низкочастотные наводки и дрейфы температуры (рис. 8). На рисунке синим цветом показана автономная линия излучения, ширина линии 1 МГц, отношение сигнал/шум = 45 дБ. При использовании системы ФАПЧ приходящий сигнал сравнивается с опорным сигналом 400 МГц от синтезатора, сигнал фазовой ошибки подаётся на РДТП для стабилизации его частоты. Результат показан на рис. 8 (красная кривая); отношение сигнала в центральном пике к полной мощности составляет 97,5 %.

Величина относительных фазовых шумов СГГ в режиме ФАПЧ в зависимости от отстройки от центральной частоты представлена на рис. 9 [72]. Эти шумы измерены относительно опорного синтезатора; для вычисления абсолютных (полных) фазовых шумов необходимо добавить шумы опорного синтезатора, умноженные на квадрат номера гармоники (в данном случае $n = 20$); величина абсолютных фазовых шумов представлена на рисунке красной кривой.

Для большинства практических приложений необходима непрерывная перестройка частоты сверхпроводни-

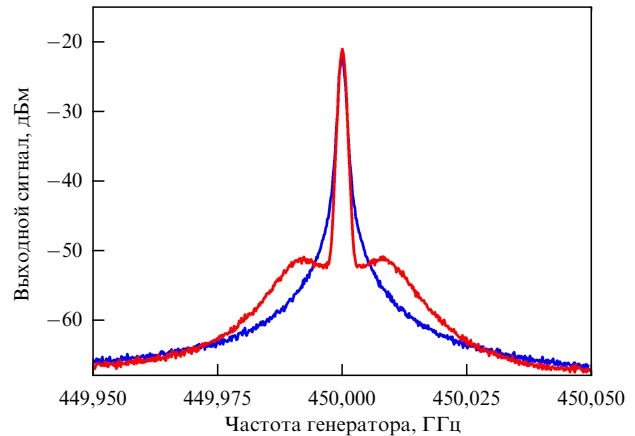


Рис. 8. Спектр излучения СГГ на частоте 450 ГГц, измеренный с помощью гармонического смесителя в режиме частотной стабилизации (синяя кривая) и в режиме фазовой стабилизации (красная кривая), при разрешении спектроанализатора (Resolution Band-Width) RBW = 1 МГц [72].

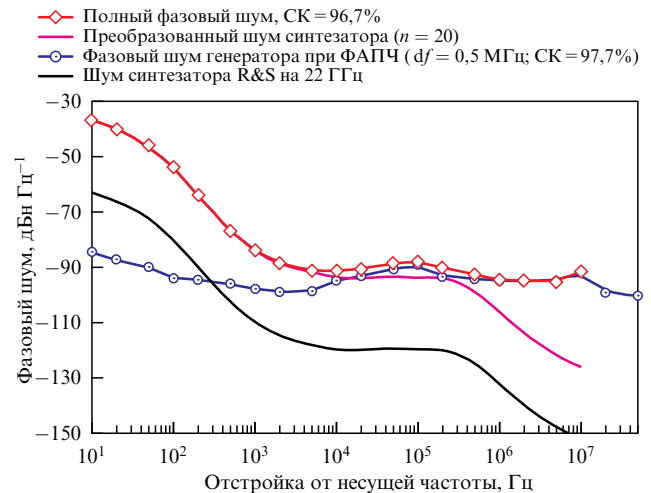


Рис. 9. Фазовый шум РДТП-генератора на частоте 450 ГГц в зависимости от величины отстройки от несущей частоты (синие круги). Чёрная сплошная кривая — фазовый шум опорного синтезатора на основной частоте 22,48 ГГц, фиолетовая сплошная кривая — на 20-й гармонике, красные ромбы — полный (абсолютный) фазовый шум РДТП-генератора в режиме ФАПЧ с учётом вклада шумов синтезатора [72].

кового генератора при произвольном токе смещения. Такое требование естественным образом выполняется в режиме вязкого течения вихрей, в то время как при работе в резонансном режиме стабильная генерация возможна только на ступенях Фиске, расстояние между которыми по частоте составляет десятки ГГц. Для решения данной проблемы был предложен метод введения в конструкцию РДТП дополнительных поглощающих слоёв из молибдена для увеличения параметра затухания α [81]. Это способствует диссипации отражённой электромагнитной волны внутри перехода и сглаживанию резонансной ступенчатой структуры на ВАХ.

На рисунке 10 представлено прямое сравнение зависимостей дифференциального сопротивления R_d от напряжения на РДТП для традиционной (синим) и модернизированной (красным) конструкции генератора. На вставке показана структурная схема модернизирован-

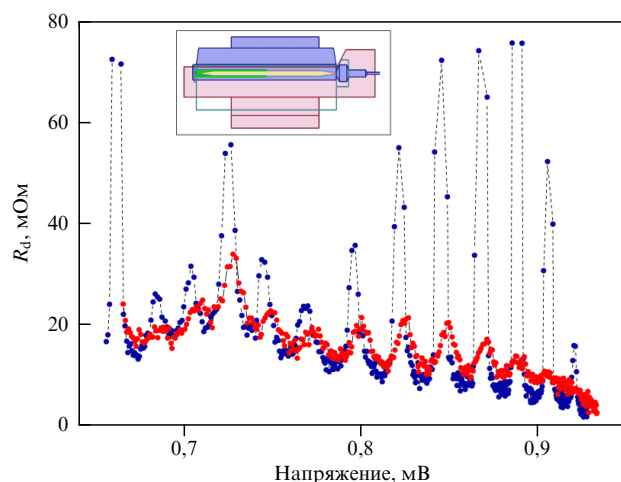


Рис. 10. Зависимости дифференциального сопротивления для традиционного РДТП-генератора (показаны синим цветом) и генератора с поглощающими резисторами (красным цветом).

ного РДТП-генератора с поглощающими слоями на неизлучающем конце генератора, отмеченными зелёным цветом. Хорошо видно, что график зависимости $R_d(V)$ для РДТП с поглощающими резисторами стал более гладким, без резких скачков. Величина R_d в области напряжений 0,6–0,9 мВ изменяется не более чем на 10 мОм, что примерно соответствует 10 МГц изменению ширины линии спектра излучения генератора. Ширина линии генерации лежала в диапазоне 4–12 МГц, что позволило реализовать режим ФАПЧ во всём частотном диапазоне при оптимальной для накачки СИС мощности РДТП [81].

Генератор на основе РДТП был успешно применён в качестве источника гетеродина в составе уникального прибора — сверхпроводникового интегрального приёмника (СИП), до сих пор не имеющего аналогов в мире по компактности реализации ключевых элементов и достигнутым параметрам [21, 81–86]. Концепция СИП была впервые предложена в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН и заключается в том, что основные элементы супергетеродинного приёмника: опорный генератор на основе РДТП и приёмный элемент на основе СИС-перехода — интегрированы на одной микросхеме размером 4×4 мм. Приёмный СИС-детектор, в свою очередь, интегрирован в двойную дипольную либо щелевую антенну, а для частотной и фазовой стабилизации РДТП на микро-

схеме СИП спроектирован дополнительный гармонический СИС смеситель в цепи обратной связи. Комплексный инструмент СИП диапазона 480–700 ГГц, включая оптическую и механическую части, был разработан совместно с учёными Института космических исследований Нидерландов в рамках проекта TeraHertz Limb Sounder (TELIS) по исследованию газовых составляющих атмосферы Земли и совершил несколько успешных научных запусков на борту высотного аэростата [35, 84–86]. Благодаря возможности широкой перестройки рабочей частоты РДТП и высокой интеграции элементов на одной микросхеме удалось при помощи одного приёмника исследовать огромное количество соединений в атмосфере, имеющих спектральные линии поглощения и излучения в ТГц-области: ClO, BrO, O₃, HCl, HOCl, H₂O и её изотопов, NO₂, NO, N₂O, HNO₃, CH₃Cl, HCN и многих др.

3.2. Генератор ТГц-излучения в свободное пространство

После того как генератор на основе РДТП был не только разработан и всесторонне исследован, но и экспериментально апробирован с системой ФАПЧ в составе интегрального субТГц приёмника, успешно испытанного в ходе научных запусков на высотном аэростате, — весьма естественным образом возникла идея создания источника на основе РДТП, излучающего в свободное пространство.

Было разработано несколько конструкций генератора на основе РДТП, излучающих в открытое пространство в разных частотных диапазонах: 250–450 ГГц, 320–550 ГГц и 400–700 ГГц, — суммарно перекрывающих полосу частот от 250 до 700 ГГц. Ключевая идея концепции состоит в том, чтобы, во-первых, вывести излучение генератора из области перехода в открытое пространство при помощи передающей щелевой антенны, во-вторых, обеспечить механизм обратной связи для частотной и фазовой стабилизации при помощи гармонического смесителя и системы ФАПЧ. На рисунке 11 представлена общая концепция криогенной части источника, а на рис. 12 — частотные характеристики трёх конструкций с центральной частотой 350 ГГц, 450 ГГц и 550 ГГц [87–91]. Следует отметить, что ширина полосы перестройки источника порядка 30–50 % в данной концепции определяется рабочей полосой антенны, которая значительно уже, чем полоса перестройки образца РДТП, составляющая до 100 % (от 200 до 700 ГГц).

Для успешной работы системы ФАПЧ достаточно накачать гармонический смеситель сравнительно не-

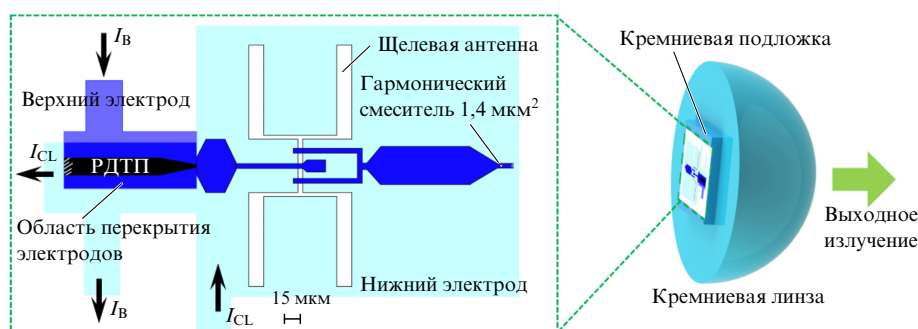


Рис. 11. Схема конструкции источника излучения в открытое пространство на основе РДТП для центральной частоты 450 ГГц: слева — центральная часть интегральной микросхемы, справа — схема установки на кремниевую линзу.

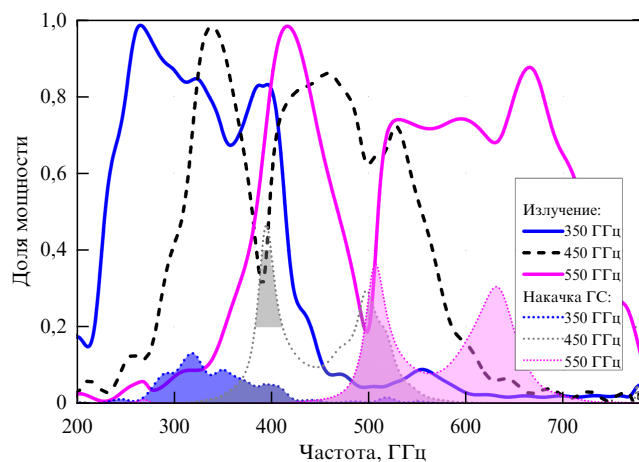


Рис. 12. Результаты численного моделирования трёх интегральных конструкций источника: показана доля мощности, излучаемой в свободное пространство (кривые без закрашивания нижней области), и доля мощности накачки ГС (кривые с закрашиванием нижней области) от общей выходной мощности РДТП.

большой мощностью (не более 10–15 % от скачка туннельного тока на ВАХ смесителя) [72], поэтому конструкции интегральной схемы генератора спроектированы так, чтобы более 70 % выходной мощности РДТП поступало на передающую антенну и выводилось в свободное пространство и не более 20–30 % мощности отводилось на гармонический смеситель в цепь обратной связи (рис. 12). РДТП может быть изготовлен на основе структур Nb–AlO_x–Nb либо Nb–AlN–NbN; выбор материалов электродов трёхслойной структуры влияет на частотные диапазоны резонансного режима (ступени Фиске) и режима вязкого потока вихрей, и, следовательно, на характерную ширину линии генерации в различных частотных диапазонах. Криогенный модуль с генератором устанавливается в криостат с рабочей температурой 4,2 К.

Исследование выходных характеристик генератора проводилось широким набором различных методов. Спектральная линия той малой части сигнала РДТП, которая поступила на гармонический смеситель, измерялась на промежуточной частоте в полосе 0–800 МГц аналогично методу, описанному в разделе 3.1; ширина линии составляла от сотен кГц до нескольких МГц без фазовой автоподстройки (в автономном режиме). Одной из ключевых характеристик разработанного источника является спектральная линия сигнала, излучаемого в открытое пространство; этот сигнал регистрировался сверхпроводниковым интегральным приёмником в его рабочей полосе 480–700 ГГц, гетеродин которого изготовлен из такого же РДТП, что и исследуемый источник. Зарегистрированные спектральные характеристики сигнала в открытом пространстве отличаются от характеристик излучения в петле обратной связи лишь на поправку спектральной характеристики гетеродина приёмника (свёртки сигналов) [87, 88]. Отсюда следует, что терагерцовый тракт от генератора до свободного пространства, состоящий из микрополосковой линии, щелевой антенны и линзы, не вносит дополнительных шумов и искажений в излучаемый спектр.

Полоса перестройки источника исследовалась при помощи широкополосного полупроводникового крио-

генного болометра на основе кремния с рабочей температурой 4,2 К и чувствительностью по мощности, эквивалентной шуму (МЭШ), на уровне $1,3 \times 10^{-13}$ Вт Гц^{-1/2} [89, 90]. Результаты исследования полосы перестройки для трёх экспериментальных конструкций генератора, спроектированных для работы в трёх частотных диапазонах, оказались достаточно близкими к численным расчётам (см. рис. 12). Таким образом, было продемонстрировано, что созданная расчётная модель позволяет спроектировать схему источника на основе РДТП с широкой перестройкой под любую целевую частоту до 700 ГГц путём настройки лишь топологии антенны и согласующего тракта без изменения конструкции самого РДТП и квазиоптического тракта.

Измерение абсолютного значения мощности сигнала, излучаемого в открытое пространство, проводилось исходя из экспериментально известной ВАХ гармонического смесителя в петле обратной связи под воздействием излучения. Используя модель Тьена–Гордона и методы из работ [16, 92] и измеренную ВАХ СИС-перехода под воздействием накачки внешним сигналом, можно получить значение мощности РДТП на данной частоте. Далее из найденного значения мощности накачки гармонического смесителя и полученного ранее соотношения мощностей накачки и излучения производится оценка мощности излучения в открытое пространство. Описанным методом было получено значение мощности от порядка 0,5 мкВт на частотах 600–700 ГГц до 2–3 мкВт на частотах 320–380 ГГц [91].

Разработанный источник, помимо своих уникальных свойств по ширине перестройки и возможностям интегрирования в криогенную систему, позволил впервые провести прямые экспериментальные наблюдения гармоник джозефсоновской генерации [93, 94]. Существование высших гармоник ($N = 2$ и выше) было предсказано и численно описано [95, 96] несколько десятилетий назад в период пика теоретических работ по эффекту Джозефсона. Имелись лишь косвенные экспериментальные подтверждения наличия гармоник генерации по наблюдению особенностей на ВАХ [97] либо по результатам умножения частоты внешнего сигнала в режиме гармонического смесителя [98]. Однако, ввиду крайне низкой мощности излучения высших гармоник и практического отсутствия доступных субТГц приёмников вплоть до 1990-х гг., прямых экспериментальных наблюдений не проводилось. В работах [93, 94] был использован разработанный нами генератор излучения в свободное пространство и широкополосный ТГц фурье-спектрометр на основе двухлучевого интерферометра Майкельсона с криогенным болометрическим детектором, на котором достаточно чётко было продемонстрировано наличие второй и, в некоторых случаях, третьей гармоник излучения в открытом пространстве. В работах [91, 99] была наглядно продемонстрирована возможность практического применения РДТП в качестве активного источника для терагерцовой спектроскопии газов.

4. Генератор на основе цепочки джозефсоновских переходов в копланарной линии

Интерес к исследованию массивов джозефсоновских переходов обусловлен тем, что использование массивов может иметь ряд преимуществ по сравнению с РДТП. В

частности, в РДТП точная форма ВАХ меняется от термоциклирования к термоциклированию [35, 36], поэтому предварительная настройка гетеродина даже при применении автоматизированной системы требует некоторого времени (порядка 1 мин). Для массивов джозефсоновских переходов такого ограничения не предвидится. В то же время процесс изготовления больших массивов джозефсоновских переходов существенно более сложный, так как для синхронной работы всех переходов требуется малый разброс параметров переходов в рамках одного чипа. Ниже приведены результаты исследований массивов джозефсоновских переходов, проведённые авторами в последнее время.

4.1. Конструкция и основные характеристики генератора

Изображение одного из исследуемых образцов с генератором на основе массива из 350 джозефсоновских переходов показано на рис. 13а. Массив представляет собой копланарную линию, в центральный электрод которой встроены переходы. Предлагаемая топология, насколько нам известно, рассматривается в литературе впервые. Мы считаем, что выбор именно такой топологии массива позволил добиться синхронизации между переходами и эффективной генерации в широкой полосе частот. Кроме того, использование копланарной линии позволяет уменьшить потери в электродах (по сравнению с микрополосковой конструкцией и РДТП) при работе на частотах, близких к щелевой, в особенности для переходов с высокой плотностью тока. Подробное теоретическое описание синхронизации в массиве, а также связанных с ней особенностей генерации является предметом дальнейшего исследования.

Мощность излучения массива определяется по величине тока накачки детектора в виде одиночного СИС-перехода малой площади ($1 - 1,5 \text{ мкм}^2$). Для обеспечения независимого подключения детектора и генератора по постоянному току между ними предусмотрен разрыв, выполненный в виде щелевой антенны. Для согласования импедансов детектора и разрыва между ними поставлен трансформатор импеданса. Импедансы массива и антенны примерно одинаковы, поэтому необходимость в дополнительной схеме согласования отсутствует. Линия питания массива по постоянному току спроектирована так, чтобы ограничить уход излучения в рабочем диапазоне (от 300 до 700 ГГц).

Каждый переход шунтирован тонкоплёночным резистором из молибдена, который при температуре эксперимента (4–5 К) находится в нормальном состоянии (рис. 13б). Сопротивление шунта подбирались таким образом, чтобы получить параметр Маккамбера β_C отдельного перехода менее 0,5 и обеспечить безгистерезисный ход ВАХ. ВАХ одного шунтированного перехода Nb–Al/AlN–NbN показана на рис. 14 сплошным серым цветом. На ВАХ имеется ряд особенностей, связанных с возбуждением LC-резонансов, где C — ёмкость перехода, а L — индуктивность, которая складывается из геометрической индуктивности шунта и нелинейной индуктивности перехода. Для теоретического описания ВАХ использовалась RLCSJ-модель [32], где учитывается не только ёмкость СИС-перехода и сопротивление шунта, но и его геометрическая индуктивность (см. штриховую кривую на рис. 14). Теоретическая и экспериментальная кривые практически совпадают при параметрах

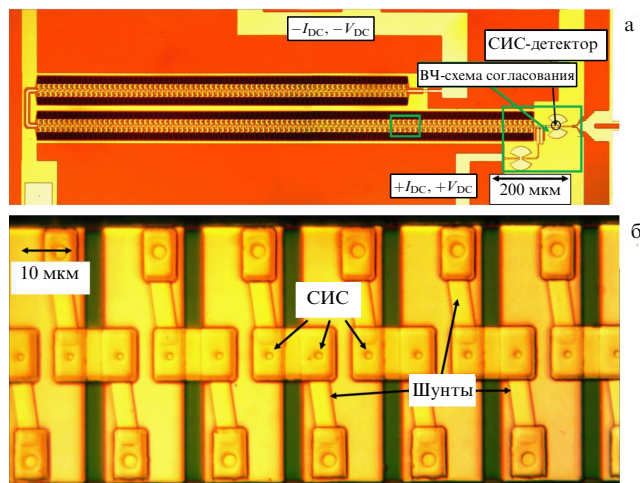


Рис. 13. (а) Изображение чипа с массивом из 350 джозефсоновских переходов. (б) Увеличенное изображение переходов в массиве.

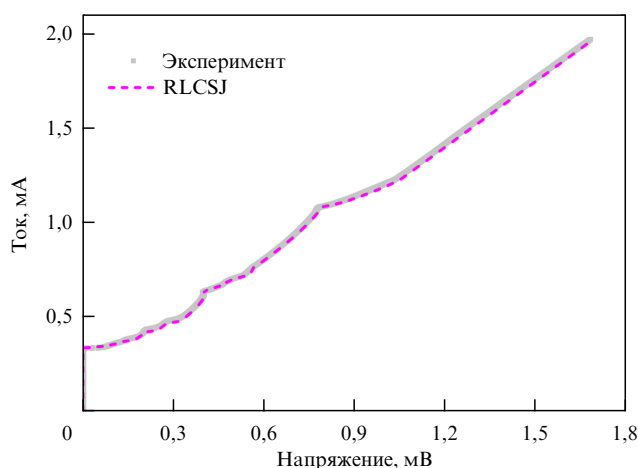


Рис. 14. ВАХ одного перехода, шунтированного тонкоплёночным резистором. Экспериментальная ВАХ (серые точки) и теоретическая зависимость, полученная с использованием RLCSJ-модели (штриховая линия).

рах $R_{\text{ш}} = 0,87 \text{ Ом}$, $L_{\text{ш}} = 1,75 \text{ пГн}$, $C = 338 \text{ фФ}$, $I_c = 0,333 \text{ мА}$, где $R_{\text{ш}}$ и $L_{\text{ш}}$ — сопротивление и геометрическая индуктивность шунта, I_c — критический ток через переход.

ВАХ массива из 350 переходов Nb–Al/AlN–NbN приведена на рис. 15. Особенности, характерные для ВАХ одного шунтированного перехода, размыты, по-видимому, из-за небольшого разброса в параметрах отдельных переходов, составляющих массив. Дополнительные особенности, возникающие на ВАХ массива, обусловлены геометрическими резонансами на всей длине структуры. Характерное расстояние между ступенями $\sim 17 \text{ ГГц}$, что находится в качественном соответствии с частотным интервалом между резонансами в копланарной линии длиной 3,5 мм. Также на ВАХ присутствуют участки с небольшим гистерезисом; их положение изменяется с изменением параметров переходов; так, при увеличении температуры участки с гистерезисом сдвигаются в область меньших напряжений. Возможно, в дальнейшем данный эффект получится использовать как дополнительный инструмент для управления динамикой массива и подстройки рабочей области. Цветом

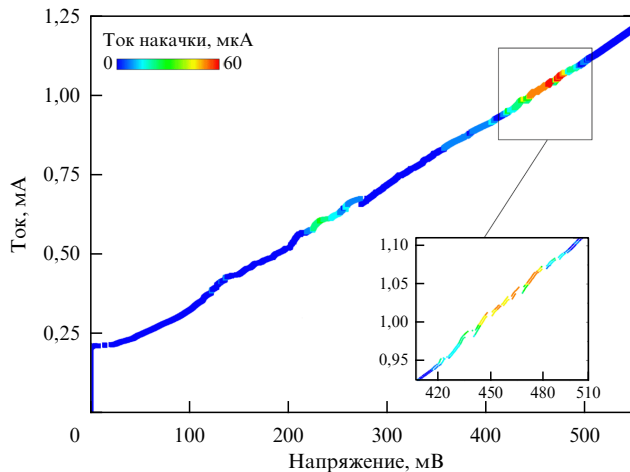


Рис. 15. ВАХ массива из 350 шунтированных джозефсоновских переходов Nb–Al/AlN–NbN площадью 2,8 мкм². Плотность туннельного тока ~ 13 кА см⁻². Цветом показана величина тока накачки СИС-детектора.

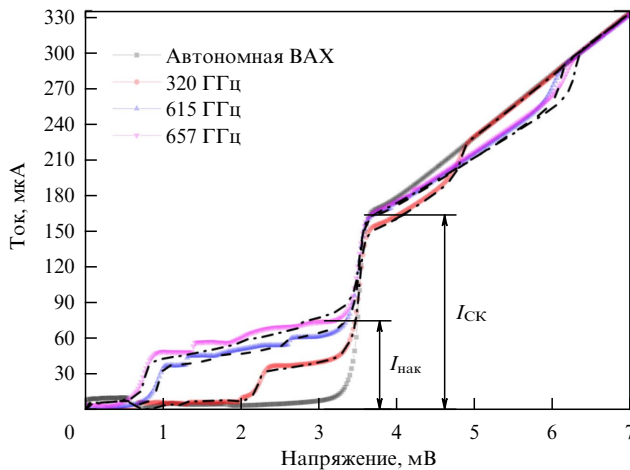


Рис. 16. Семейство ВАХ СИС-детектора под действием излучения от массива. Серыми точками показана ВАХ без накачки, а цветными линиями — накаченные ВАХ и на соответствующих частотах. Чёрными штрихпунктирными кривыми показаны расчётные ВАХ и, полученные по формулам из модели Такера – Фелдмана [16].

на рис. 15 показана величина тока накачки СИС-детектора при напряжении 3 мВ.

На рисунке 16 показана ВАХ СИС-детектора; при воздействии сигнала с массива на ВАХ детектора возникают квазичастичные ступени тока при характерных напряжениях $V_{\text{gap}} - hf/e$, где V_{gap} — величина щелевого напряжения, f — частота детектируемого сигнала. Критический ток частично подавлен внешним магнитным полем. Особенности вблизи 1,3 мВ, 2,6 мВ и 3,9 мВ — ступени Шапиро, возникшие на ВАХ из-за неполного подавления I_c . Чёрными прерывистыми кривыми поверх экспериментальных данных показаны накаченные ВАХ, рассчитанные по формулам из модели Такера – Фелдмана [16]. Небольшие расхождения между модельными и экспериментальными ВАХ вызваны рассогласованием импеданса СИС-детектора и внешней по отношению к нему цепи [100]. По положению ступеней Шапиро была верифицирована частота генерации РДТП в рабочих точках.

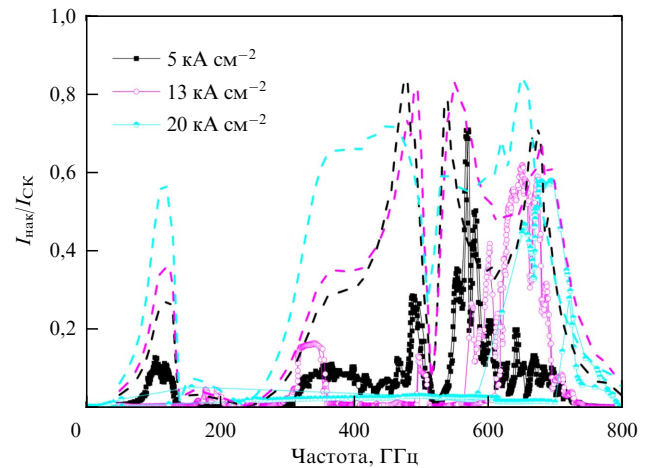


Рис. 17. Зависимость тока накачки от частоты в образцах с различными плотностями туннельного тока. Экспериментальные данные показаны соответствующими маркерами, штриховыми кривыми показаны рассчитанные в Ansys HFSS коэффициенты S_{21} для схемы согласования между массивом и СИС-детектором.

На рисунке 17 показана зависимость тока накачки от частоты для образцов с $N = 350$ переходами с плотностями туннельного тока 5, 13 и 20 кА см⁻². Всего было изготовлено 4 серии экспериментальных образцов. Образцы в каждой серии отличаются друг от друга количеством переходов в массиве и их площадью. Сопроотивление шунта в каждой серии подбиралось таким образом, чтобы параметр Маккамбера β_c был менее 0,5, для обеспечения безгистерезисного хода ВАХ массива.

В серии с плотностью туннельного тока переходов 5 кА см⁻² ширина рабочей полосы обусловлена характеристикой передачи схемы согласования (см. соответствующие кривые на рис. 17). Расчёт схемы согласования был проведён в программе численного трёхмерного моделирования Ansys HFSS. Метод моделирования сверхпроводниковых структур в программе Ansys HFSS подробно описан в [101]. Провал на частотах вблизи 500 ГГц, наблюдаемый как в расчётах, так и в эксперименте, обусловлен оттоком мощности в линию подключения массива по постоянному току. В образцах с большей плотностью туннельного тока полоса генерации оказалась существенно уже. Для серии с плотностью туннельного тока 20 кА см⁻² β_c оказалось равно 2,3, из-за чего на ВАХ наблюдался сильный гистерезис, а синхронизации удалось добиться только в узком диапазоне.

На рисунке 18 показана зависимость тока накачки от частоты для образцов с $N = 100, 200$ и 350 переходами Nb–Al/AIO_x–Nb, плотностью туннельного тока ~ 5 кА см⁻² и площадью 2,8 мкм². С увеличением количества переходов в массиве максимальная мощность генерации возрастает быстрее чем N . Изрезанность зависимостей, скорее всего, связана с возникновением стоячих волн в линии и захватом частоты в соответствующих рабочих точках. В образце с 350 переходами изрезанность выражена наиболее ярко из-за большей генерируемой мощности и, соответственно, большей эффективности захвата частоты. Для устранения данного эффекта проектируются образцы с согласованной нагрузкой на неизлучающем конце массива.

На рисунке 19 показаны частотные зависимости тока накачки детектора для образцов с массивами из 350 пе-

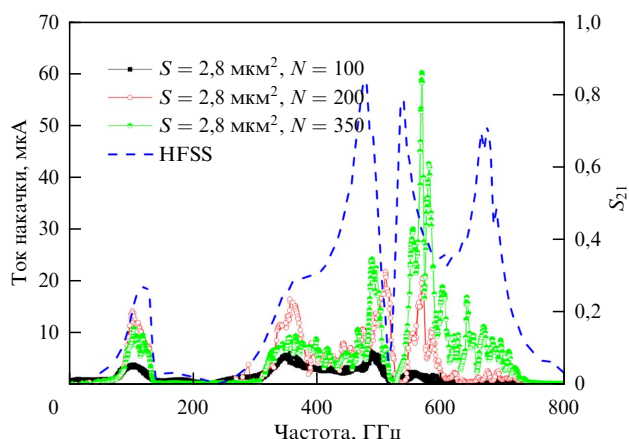


Рис. 18. Зависимости тока накачки от частоты в образцах со 100, 200 и 350 переходами Nb–Al/AlO_x–Nb площадью 2,8 мкм² и плотностью туннельного тока 5 кА см⁻². Штриховой линией показана рассчитанная в Ansys HFSS зависимость коэффициента S_{21} схемы согласования массива и СИС-детектора от частоты.

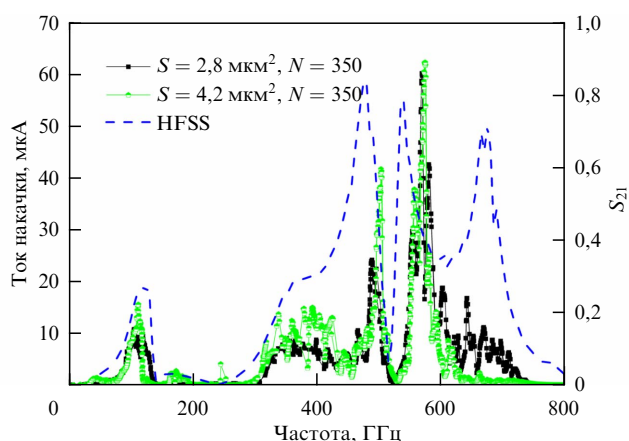


Рис. 19. Зависимости тока накачки от частоты в образцах с 350 переходами Nb–Al/AlO_x–Nb с плотностью туннельного тока 5 кА см⁻² и площадью 2,8 мкм² и 4,2 мкм². Штриховой линией показана рассчитанная в Ansys HFSS зависимость коэффициента S_{21} схемы согласования массива и СИС-детектора от частоты.

переходов площадью 2,8 мкм² и 4,2 мкм². Максимальная рабочая частота массива с переходами большей площади оказалась несколько ниже, скорее всего, из-за большей паразитной ёмкости переходов. Мощность генерации в среднем больше в массиве с переходами большей площади, однако пиковая мощность оказалась практически одинакова для сравниваемых образцов.

4.2. Измерение спектров излучения и режимы стабилизации частоты

Предложенная топология массивов сосредоточенных джозефсоновских переходов позволила создать управляемый перестраиваемый генератор терагерцового диапазона с мощностью, достаточной для применений оп-чип в качестве генератора гетеродина в сверхпроводниковом интегральном приёмнике. Как уже отмечалось, для спектроскопических применений СИП необходимо, чтобы разрешение приёмника по частоте было лучше чем 10⁻⁶. Для этого частоту и фазу излучения генератора гетеродина необходимо стабилизировать при помощи внешней системы ФАПЧ.

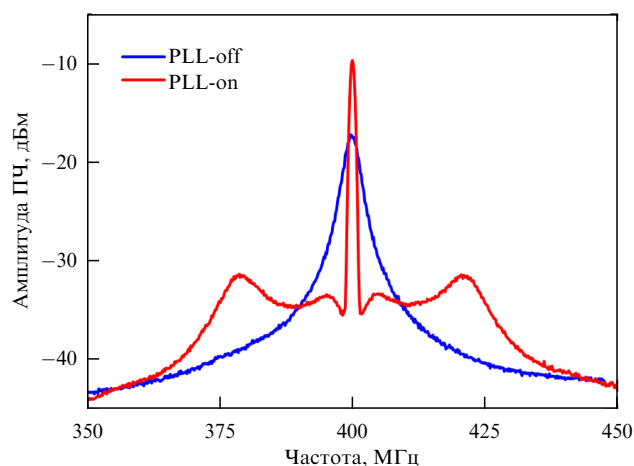


Рис. 20. Спектр сигнала на частоте 650 ГГц; синяя кривая — автономная линия генерации. Ширина линии генерации около 3 МГц, отношение сигнал/шум 26 дБ. Красная кривая — спектр с включённой системой ФАПЧ. Спектральное качество ~ 87 %.

Для частотной стабилизации массива применяется та же схема, что и для ФАПЧ РДТП. Исследуемый образец помещается в заливной гелиевый криостат. На СИС-детекторе происходит смешение излучения от массива с гармониками сигнала от синтезатора, настроенного на частоту около 18 ГГц. В данном случае СИС-детектор выполняет роль гармонического смесителя. Сигнал на разностной частоте выводится из криостата на вход спектроанализатора и вход ФАПЧ. За счёт обратной связи напряжение на массиве подстраивается в зависимости от разности сигнала ПЧ и опорного сигнала ФАПЧ. Таким образом удастся достичь как частотной, так и фазовой стабилизации. Более подробное описание работы системы ФАПЧ можно найти, например, в [102]. Были проведены предварительные измерения линии массива из 350 переходов площадью 2,8 мкм² и плотностью туннельного тока 13 кА см⁻². Спектр излучения на частоте 650 ГГц показан на рис. 20. Естественная ширина линии генерации в данной точке составила 3 МГц при отношении сигнал/шум 26 дБ.

Экспериментально продемонстрирована возможность реализации фазовой автоподстройки частоты сверхпроводникового генератора на основе массива джозефсоновских переходов от внешнего источника. Насколько известно авторам работы, данный эффект для массивов описан в литературе впервые. При этом спектральное качество генератора в режиме ФАПЧ уже в первых экспериментах достигло 87 %.

5. Заключение

Сверхпроводниковые генераторы, изученные в работе, обладают широкой рабочей полосой с возможностью перестройки частоты генерации при помощи изменения напряжения. Генераторы на основе РДТП изучаются уже несколько лет, их конструкция и параметры были оптимизированы; был создан и апробирован сверхпроводниковый интегральный приёмник, в котором в качестве генератора гетеродина использовался РДТП. Продemonстрировано, что в генераторе на основе РДТП при добавлении слоёв нормального металла можно подавить ступени Фiske без существенного ухудшения спек-

рального качества сигнала. Кроме того, показана возможность генерации излучения РДТП в открытое пространство.

Предложена новая топология генератора на основе массива последовательно соединённых джозефсоновских переходов, в которой массив встроен в центральный электрод копланарной линии. В данной топологии удалось добиться синхронизации между переходами и эффективной генерации на частотах от 100 до 700 ГГц с ограничением, вызванным характеристикой пропускания схемы согласования. Уже в первых экспериментах реализована ширина линии генерации в лучших точках порядка 1 МГц. Впервые продемонстрирована возможность реализации режима ФАПЧ для генератора на массиве джозефсоновских переходов. В дальнейших исследованиях будет проведено более подробное измерение спектров генерации массивов и сравнение ширины линии генерации с теоретическими моделями. Также планируется создание массивов с большим числом переходов и схемами согласования с более плоскими характеристиками.

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-15-2024-538). Разработка генераторов ТГц-диапазона и технологии их изготовления выполнена за счёт гранта Российского научного фонда № 23-79-00019, <https://rscf.ru/project/23-79-00019/>.

Список литературы

1. Tinkham M *Introduction to Superconductivity* (New York: McGraw-Hill Book Co., 1975); Пер. на русск. яз.: Тинкхам М *Введение в сверхпроводимость* (М.: Атомиздат, 1980)
2. Barone A, Paternó G *Physics and Applications of the Josephson Effect* (New York: John Wiley and Sons, 1982); Пер. на русск. яз.: Бароне А, Патерно Дж *Эффект Джозефсона. Физика и применения* (М.: Мир, 1984)
3. Likharev K K *Dynamics of Josephson Junctions and Circuits* (New York: Gordon and Breach Sci. Publ., 1986)
4. Clarke J, Braginski A I (Eds) *The SQUID Handbook: Applications of SQUIDs and SQUID Systems* (Hoboken, NJ: Wiley-VCH, 2006) <https://doi.org/10.1002/9783527609956>
5. Weinstock H (Ed.) *SQUID Sensors: Fundamentals, Fabrication and Applications* (NATO Science Ser. E, Vol. 329) (Dordrecht: Springer, 2012) <https://doi.org/10.1007/978-94-011-5674-5>
6. Semenov A D, Gol'tsman G N, Korneev A A *Physica C* **351** 349 (2001)
7. Gol'tsman G N et al. *Appl. Phys. Lett.* **79** 705 (2001)
8. Pernice W H P et al. *Nat. Commun.* **3** 1325 (2012)
9. Macklin C et al. *Science* **350** 307 (2015)
10. White T C et al. *Appl. Phys. Lett.* **106** 242601 (2015)
11. Aumentado J *IEEE Microwave Mag.* **21** (8) 45 (2020)
12. Likharev K K, Semenov V K *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **1** (1) 3 (1991)
13. Bairamkulov R, De Micheli G *IEEE Circuits Syst. Mag.* **24** (2) 16 (2024)
14. Rey-de-Castro R C et al. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **11** 1014 (2001)
15. Кленов Н В и др. *Физика низких температур* **43** 991 (2017); Klenov N V et al. *Low Temp. Phys.* **43** 789 (2017)
16. Tucker J R, Feldman M J *Rev. Mod. Phys.* **57** 1055 (1985)
17. Zmuidzinas J, Richards P L *Proc. IEEE* **92** 1597 (2004)
18. Tucker J *IEEE J. Quantum Electron.* **15** 1234 (1979)
19. Richards P L et al. *Appl. Phys. Lett.* **34** 345 (1979)
20. Kerr A R, Feldman M J, Pan S-K, in *Proc. of the Eighth Intern. Symp. on Space Terahertz Technology, Cambridge, MA, 25–27 March, 1997* (Eds R Blundell, E Tong) (Cambridge: Harvard Univ., 1997) p. 101
21. Филиппенко Л В и др. *УФН* **194** 1207 (2024); Filippenko L V et al. *Phys. Usp.* **67** 1139 (2024)
22. ALMA Observatory, <https://www.almaobservatory.org/en/about-alma/>
23. The Event Horizon Telescope, <https://eventhorizontelescope.org/>
24. Press Release (April 10, 2019): Astronomers Capture First Image of a Black Hole. The Event Horizon Telescope, <https://eventhorizontelescope.org/press-release-april-10-2019-astronomers-capture-first-image-black-hole>
25. Akiyama K et al. (The Event Horizon Telescope Collab.) *Astron. Astrophys.* **681** A79 (2024)
26. Millimetron Space Observatory, <http://millimetron.ru/index.php/en/>
27. Новиков И Д и др. *УФН* **191** 404 (2021); Novikov I D et al. *Phys. Usp.* **64** 386 (2021)
28. Herschel Space Observatory, <https://www.herschel.caltech.edu/>
29. de Graauw Th et al. *Astron. Astrophys.* **518** L6 (2010)
30. Siles J V et al. *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.* **8** 596 (2018)
31. Siles J V et al. *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.* **14** 607 (2024)
32. NASA Jet Propulsion Laboratory. California Institute of Technology, <https://www.jpl.nasa.gov/>
33. Jain A K et al. *Phys. Rep.* **109** 309 (1984)
34. Darula M, Doderer T, Beuven S *Supercond. Sci. Technol.* **12** R1 (1999)
35. Koshelets V P et al., in *Fundamentals of Superconducting Nanoelectronics* (NanoScience and Technology, Ed. A Sidorenko) (Berlin: Springer, 2011) p. 263, https://doi.org/10.1007/978-3-642-20158-5_10
36. Dmitriev P N, Filippenko L V, Koshelets V P, in *Josephson Junctions. History, Devices, and Applications* (Eds E L Wolf et al.) (New York: Jenny Stanford Publ., 2017) p. 185
37. Nagatsuma T et al. *J. Appl. Phys.* **54** 3302 (1983)
38. Nagatsuma T et al. *J. Appl. Phys.* **56** 3284 (1984)
39. Nagatsuma T et al. *J. Appl. Phys.* **58** 441 (1985)
40. Qin J, Enpuku K, Yoshida K *J. Appl. Phys.* **63** 1130 (1988)
41. Koshelets V P et al. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **15** 960 (2005)
42. Kleiner R et al. *Phys. Rev. Lett.* **68** 2394 (1992)
43. Ozyuzer L et al. *Science* **318** 5854 1291 (2007)
44. Li M et al. *Phys. Rev. B* **86** 060505 (2012)
45. Welp U, Kadowaki K, Kleiner R *Nature Photon.* **7** 702 (2013)
46. Kakeya I, Wang H *Supercond. Sci. Technol.* **29** 073001 (2016)
47. Kleiner R, Wang H *J. Appl. Phys.* **126** 171101 (2019)
48. Wengler M J, Guan B, Track E K *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **43** 984 (1995)
49. Song F et al. *Appl. Phys. Lett.* **95** 172501 (2009)
50. Han S et al. *Appl. Phys. Lett.* **64** 1424 (1994)
51. Booi P A A, Benz S P *Appl. Phys. Lett.* **68** 3799 (1996)
52. Cawthorne A B et al. *Phys. Rev. B* **60** 7575 (1999)
53. Galin M A et al. *Supercond. Sci. Technol.* **34** 075005 (2021)
54. Kawakami A, Uzawa Y, Wang Z *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **9** 4554 (1999)
55. Golubov A A, Malomed B A, Ustinov A V *Phys. Rev. B* **54** 3047 (1996)
56. Ustinov A V, Kohlstedt H, Henne P *Phys. Rev. Lett.* **77** 3617 (1996)
57. Joergensen E et al. *Phys. Rev. Lett.* **49** 1093 (1982)
58. Zhang Y M, Wu P H *J. Appl. Phys.* **68** 4703 (1990)
59. Gulevich D R, Koshelets V P, Kusmartsev F V *Phys. Rev. B* **96** 024515 (2017)
60. Gulevich D R, Filippenko L V, Koshelets V P *J. Low Temp. Phys.* **194** 312 (2019)
61. Янсон И К, Свистунов В М, Дмитриенко И М *ЖЭТФ* **48** 976 (1965); Yanson I K, Svistunov V M, Dmitrienko I M *Sov. Phys. JETP* **21** 650 (1965)
62. Cirillo M, Lloyd F L *J. Appl. Phys.* **61** 2581 (1987)
63. Cirillo M et al. *J. Appl. Phys.* **65** 2376 (1989)
64. Zhang Y M, Winkler D, Claeson T *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **3** 2520 (1993)
65. Zhang Y M, Winkler D, Claeson T *Appl. Phys. Lett.* **62** 3195 (1993)
66. Vijayraghavan K et al. *Nat. Commun.* **4** 2021 (2013)
67. Hayton D J et al. *Appl. Phys. Lett.* **103** 051115 (2013)
68. Nagatsuma T, Ito H, Ishibashi T *Laser Photon. Rev.* **3** 123 (2009)
69. Lu Q Y et al. *Appl. Phys. Lett.* **105** 201102 (2014) <https://doi.org/10.1063/1.4902245>
70. Koshelets V P et al. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **3** 2524 (1993)
71. Koshelets V P et al. *Appl. Phys. Lett.* **69** 699 (1996)
72. Дмитриев П Н и др. *Радиотехника и электроника* **66** 410 (2021); Dmitriev P N et al. *J. Commun. Technol. Electron.* **66** 473 (2021)

73. Filippenko L V et al. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **11** 816 (2001)
74. Dmitriev P N et al. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **13** 107 (2003)
75. Rudakov K I et al. *Appl. Sci.* **11** 10087 (2021)
76. Уникальная научная установка "Криоинтеграл" — "Технологический и измерительный комплекс для создания сверхпроводниковых наносистем на основе новых материалов", <http://www.cplire.ru/rus/UNU/kriointegral/kriointegral.html>; <http://ckprf.ru/usu/352529/>
77. Хан Ф В и др. *Радиотехника и электроника* **68** 1003 (2023); Khan F V et al. *J. Commun. Technol. Electron.* **68** 1219 (2023)
78. Koshelets V P et al. *Phys. Rev. B* **56** 5572 (1997)
79. Ermakov A B et al. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **11** 840 (2001)
80. Kalashnikov K V et al. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **28** 2400105 (2018)
81. Paramonov M E et al. *Appl. Sci.* **12** 8904 (2022)
82. Koshelets V P et al. *Appl. Phys. Lett.* **68** 1273 (1996)
83. Koshelets V P, Shitov S V *Supercond. Sci. Technol.* **13** R53 (2000)
84. Koshelets V P et al. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **15** 960 (2005)
85. de Lange G et al. *Supercond. Sci. Technol.* **23** 045016 (2010)
86. Koshelets V P et al. *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.* **5** 687 (2015)
87. Kinev N V et al. *J. Appl. Phys.* **125** 151603 (2019)
88. Кинев Н В и др. *Радиотехника и электроника* **64** 970 (2019); Kinev N V et al. *J. Commun. Technol. Electron.* **64** 1081 (2019)
89. Kinev N V et al. *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.* **9** 557 (2019)
90. Кинев Н В и др. *Физика твердого тела* **62** 1379 (2020); Kinev N V et al. *Phys. Solid State* **62** 1543 (2020)
91. Kinev N V et al. *Sensors* **20** 7267 (2020)
92. Hamilton C A, Shapiro S *Phys. Rev. B* **2** 4494 (1970)
93. Kinev N V et al. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **32** 1500206 (2022)
94. Кинев Н В и др. *Изв. вузов. Радиофизика* **65** 651 (2022); Kinev N V et al. *Radiophys. Quantum Electron.* **65** 593 (2023)
95. Sullivan D B et al. *J. Appl. Phys.* **41** 4865 (1970)
96. Likes R S, Falco C M *J. Appl. Phys.* **48** 5370 (1977)
97. Zimmerman J E, Silver A H *Phys. Rev. Lett.* **19** 14 (1967)
98. Kittara P, Withington S, Yassin G *J. Appl. Phys.* **101** 024508 (2007)
99. Кинев Н В и др. *Физика твердого тела* **63** 1204 (2021); Kinev N V et al. *Phys. Solid State* **63** 1414 (2021)
100. Skalare A *Int. J. Infrared Millimeter Waves* **10** 1339 (1989)
101. Хан Ф В и др. *Радиотехника и электроника* **68** 897 (2023); Khan F V et al. *J. Commun. Technol. Electron.* **68** 983 (2023)
102. Koshelets V P et al. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **9** 4133 (1999)

Superconducting terahertz generators

F.V. Khan^(a), L.V. Filippenko^(b), A.B. Ermakov^(c), M.E. Paramonov^(d), M.Yu. Fominsky^(e), N.V. Kinev^(f), V.P. Koshelets^(g), S.A. Nikitov^(h)

Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics, Russian Academy of Sciences, ul. Mokhovaya 11, korp. 7, 125009 Moscow, Russian Federation

E-mail: ^(a) khanfv@hitech.cplire.ru, ^(b) lyudmila@hitech.cplire.ru, ^(c) ermakov@hitech.cplire.ru, ^(d) paramonov@hitech.cplire.ru, ^(e) demiurge@hitech.cplire.ru, ^(f) nickolay@hitech.cplire.ru, ^(g) valery@hitech.cplire.ru, ^(h) nikitov@cplire.ru

Applied devices based on superconducting electronics, due to their quantum nature, unique set of parameters, and cryogenic operating temperatures, are significantly superior to systems based on other physical principles. The operating frequency of ultra-sensitive terahertz-range (THz) receivers has reached 1 THz, and their noise temperature is only limited by the quantum limit. One of the most promising areas is the development of superconducting THz generators for integrated receiver systems. Such an application of the non-stationary Josephson effect seems quite natural; however, many developments and studies conducted in dozens of major laboratories worldwide failed for a long time to create a generator with the required parameters.

Keywords: THz-range Josephson oscillators; high-quality niobium-based tunnel junctions; integrated local oscillators; emission line-width; frequency and phase stabilization mode

PACS numbers: **07.57.** – c, 74.81.Fa, 85.25.Cp

Bibliography — 102 references

Received 9 December 2024

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **195** (6) 621 – 634 (2025)

Physics – Uspekhi **68** (6) (2025)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2024.12.039864>

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2024.12.039864>