

**ИССЛЕДОВАНИЕ И СРАВНЕНИЕ ЛАБОРАТОРНЫХ ИСТОЧНИКОВ
ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ:
НА ОСНОВЕ ЛАМПЫ ОБРАТНОЙ ВОЛНЫ,
ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО УМНОЖИТЕЛЯ СВЕРХВЫСОКИХ ЧАСТОТ
С ВЫСОКИМ НОМЕРОМ ГАРМОНИКИ
И РАСПРЕДЕЛЕННОГО ДЖОЗЕФСОНОВСКОГО ПЕРЕХОДА**

© 2021 г. Н. В. Кинев^а, *, В. П. Кошелец^а

^аИнститут радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
ул. Моховая, 11, стр.7, Москва, 125009 Российская Федерация

*E-mail: nickolay@hitech.cplire.ru

Поступила в редакцию 21.08.2020 г.

После доработки 21.08.2020 г.

Принята к публикации 30.09.2020 г.

Проведен сравнительный анализ трех различных лабораторных источников терагерцового (ТГц) диапазона, излучающих в открытое пространство и основанных на разных принципах работы: на основе лампы обратной волны с умножителем частоты, на основе умножителя СВЧ с высоким номером гармоник на полупроводниковых сверхрешетках (СР), а также разработанного сравнительно недавно генератора на основе распределенного джозефсоновского перехода (РДП). Проведено качественное и количественное сравнение источников по массогабаритным и амплитудно-частотным характеристикам (АЧХ), мощности излучения, а также по сложности настройки и работы с устройствами в лабораторных условиях.

DOI: 10.31857/S0033849421030116

ВВЕДЕНИЕ

В современной науке и технике наблюдается большой интерес к приборам и методам исследований в терагерцовом (ТГц) диапазоне частот – от 0.1 до 10 ТГц: разрабатываются новые устройства и находят дополнительные области применения уже созданные ранее источники и детекторы (см., например, обзор [1]). Растущий интерес к этой области обуславливает конкуренцию в разработке различных ТГц-источников для конкретных применений в научной, промышленной и социально-экономической сферах. Такие задачи, как построение ТГц-изображений, спектроскопия во временной и частотной области, гетеродинное детектирование слабых сигналов, ТГц-микроскопия, находят все больше применений в биологии и медицине, в системах безопасности и экологическом мониторинге, в астрономических исследованиях. Так, например, в составе высокочувствительных приемных систем на радиотелекоммуникациях и обсерваториях наземного и космического базирования используются компактные ТГц-источники на основе квантово-каскадных лазеров, фотосмесителей, умножителей на диодах Шоттки и сверхрешетках, при этом используются умно-

жители сигналов как с низким (до 5), так и с высоким (более 30) номером гармоник.

В России на сегодняшний день имеется несколько научных групп, активно занимающиеся разработками и исследованиями таких источников. В данной работе мы провели сравнительный анализ трех лабораторных источников ТГц-диапазона, имеющих в распоряжении коллектива авторов работы. Первый источник основан на лампе обратной волны (ЛОВ) [2–4] с умножителем до гармоник с номером 3...5, второй источник основан на умножении входного СВЧ-сигнала в структуре, выполненной из полупроводниковых квантовых сверхрешеток (СР) GaAs/AlAs [5–7] до высокого номера гармоники (более 30), третий источник разработан в нашей группе и основан на распределенном джозефсоновском переходе (РДП) типа “сверхпроводник–изолятор–сверхпроводник” (СИС), согласованном с передающей щелевой антенной [8–13]. Идея использования РДП в качестве генератора СВЧ- и ТГц-диапазона появилась довольно давно в работе [14], затем данная идея была реализована в нашей группе в практической миссии по исследованию атмосферы Земли [15, 16], где генератор на основе РДП был интегри-

рован на одной микросхеме с СИС-смесителем и являлся гетеродином для сверхпроводникового приемника, работающего в диапазоне 500...650 ГГц. Недавно нами был разработан источник на основе РДП, излучающий в открытое пространство посредством двойной щелевой антенны, расположенной на одной микросхеме с генератором. Частотные характеристики различных конструкций передающей антенны исследованы и представлены в работах [8, 9]. Для фазовой синхронизации излучения в интегральную микросхему был дополнительно встроены гармонический смеситель, работающий в цепи обратной связи с РДП совместно с системой фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) [10, 11], а спектральные характеристики излучения были исследованы в работах [10–12]. Исследование рабочего диапазона выходных частот, определяемого преимущественно характеристиками передающей антенны и её согласованием по импедансу с РДП, для одной из конструкций антенны проведено в работе [13].

Частотный диапазон выходного излучения и исследования устройств составил от 480 до 700 ГГц, что относится к нижней границе ТГц-диапазона, при этом все устройства, исследованные в данной работе, являются источниками непрерывного (не импульсного) излучения. Одной из ключевых целей данной работы является сравнение характеристик разработанного в нашей группе сравнительно недавно генератора на основе РДП с наиболее традиционными и хорошо известными типами ТГц-генераторов. Подобный сравнительный анализ дает качественное представление об источниках, основанных на разных принципах работы, в контексте возможности их применения в тех или иных задачах.

1. ОБЩИЙ СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ИСТОЧНИКОВ¹

1.1. Источник на основе лампы обратной волны

Лампы обратной волны являются наиболее традиционными представителями источников ТГц-диапазона. Генерация в таких приборах основана на взаимодействии электронного пучка с электромагнитной волной [1–4], при этом приборы обладают большой массой из-за необходимости использования сильного постоянного магнита и высоковольтного источника питания. Для исследований в данной работе был использован лабораторный источник на основе ЛОВ, разработанный специалистами Института физики микроструктур РАН (Нижний Новгород). Источник является комплексным устройством (рис. 1), состоящим из высоковольтного источника питания, ЛОВ с вы-



Рис. 1. Источник ТГц-излучения на основе ЛОВ: 1 – блок ЛОВ, 2 – выходной умножитель частоты 120...160 ГГц, 3 – блок питания для вспомогательной электроники.

ходной частотой диапазона 120...160 ГГц, системой ФАПЧ выходного сигнала ЛОВ и умножителя на основе полупроводниковой СР с волноводом. Волновод в составе умножителя спроектирован таким образом, чтобы обеспечивать наилучшую работу на 4-й гармонике сигнала ЛОВ благодаря фильтрации частот ниже ~350...400 ГГц, а вывод излучения в открытое пространство производится с помощью рупорной антенны. Масса всей системы источника составляет 17,4 кг, габариты функциональной части источника (без персонального компьютера) – порядка 500 × 300 × 280 мм (здесь и далее – Д × Ш × В), а потребляемая мощность от сети ~220 В не превышает 0,25 кВт. Рабочий диапазон выходных частот составляет 480...640 ГГц (4-я гармоника ЛОВ), шаг перестройки частоты равняется 10 кГц, мощность на выходе рупорной антенны согласно спецификации на прибор – не менее 0,2 мкВт. Выходное излучение имеет достаточно узкую диаграмму направленности благодаря рупорной антенне на выходе умножителя, при этом для передачи сигнала на большие расстояния может дополнительно использоваться собирающая линза. Следует отметить, что прибор является достаточно тяжелым и громоздким. В лабораторных условиях при использовании в качестве внешнего ТГц-источника размеры прибора не доставляют существенных неудобств, однако встраивание источника в корпус совместно с другими устройствами либо его интеграция в комплексную миниатюрную установку представляется невозможным. Управление частотой выходного сигнала производится при помощи персонального компьютера (ПК) оператора – как правило, ноутбука, при этом программное обеспечение позволяет осуществлять

¹ В данном разделе описаны характеристики конкретных устройств, имеющих в распоряжении группы в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

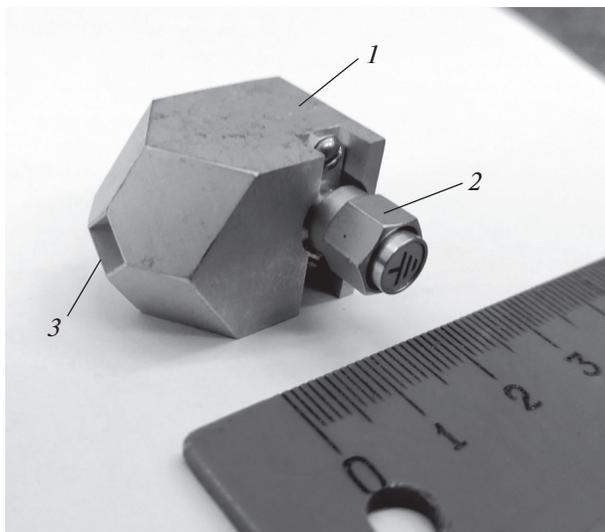


Рис. 2. Умножитель СВЧ на основе СР: 1 – корпус умножителя, 2 – входной коаксиальный разъем СВЧ стандарта SMA, 3 – выходная рупорная антенна ромбовидного сечения.

автоматическую перестройку частоты во времени с заданным шагом.

1.2. Источник на основе умножителя СВЧ-сигнала

Умножители СВЧ на основе полупроводниковых СР получили широкое распространение за последние два десятилетия в силу простоты эксплуатации и относительной миниатюрности [1, 5–7]. Основным их недостатком является то, что для эффективной работы на частотах выше 1 ТГц, чему соответствуют высокие номера гармоник (выше 50), требуется умножители сигнала на частотах около 100 ГГц, которые до сих пор не являются коммерчески доступными. Для исследований в данной работе был использован образец умножителя на основе GaAs/AlAs, изготовленный на базе ФТИ им. А.Ф. Иоффе и ННГУ им. Н.И. Лобачевского (рис. 2). Умножитель оснащен выходной рупорной антенной ромбовидного сечения, для задания входного сигнала используется коаксиальный СВЧ-кабель. Размеры умножителя порядка $30 \times 20 \times 20$ мм и масса порядка 50 г пренебрежимо малы по сравнению с габаритами и массой базового источника СВЧ-сигнала. Таким образом, при использовании умножителя в качестве внешнего ТГц-источника в лабораторных условиях фактические массогабаритные характеристики устройства определяются исключительно характеристиками исходного источника СВЧ, при этом только коаксиальный СВЧ-кабель, эффективно работающий до 30 ГГц, соизмерим (либо превышает) по массе с образцом умножителя. Для примера отметим, что

широко перестраиваемый коммерчески доступный лабораторный генератор СВЧ-сигналов частотой от 250 кГц до 40 ГГц производства “Keysight Technologies” (США) имеет массу 20.3 кг и размеры $500 \times 420 \times 180$ мм. Если в решаемой задаче не требуется широкая перестройка частоты, то может быть использован одночастотный относительно миниатюрный источник массой от одного до нескольких килограммов. Умножитель является пассивным устройством, поэтому конечная потребляемая мощность системы полностью определяется потребляемой мощностью базового источника, которая для описанного выше промышленного прибора равняется примерно 0.3 кВт и может составлять от нескольких ватт до 1 кВт.

При подаче на вход сверхрешетки сигнала частотой f на ее выходе и, соответственно, на входе волновода имеется сигнал в виде “гребенки” на целых гармониках $2f, 3f, \dots, 30f, 31f$ и т.д. При этом волновод фильтрует сигнал на частотах ниже $\sim 350 \dots 400$ ГГц, таким образом, на рупорную антенну поступает и затем выводится в открытое пространство сигнал только на тех гармониках, частота которых выше 400 ГГц. Конструкция СР позволяет регулировать напряжение смещения на структуре, которое определяет эффективность преобразования на четных и нечетных гармониках, что дает возможность усиливать требуемую гармонику. Если для применения необходим одночастотный сигнал, а не “гребенка” гармоник, то следует использовать дополнительные узкополосные фильтры. Предельное верхнее значение входной частоты определяется параметрами входной линии СВЧ и может быть ограничено емкостью ввода. Так, например, образец умножителя на выходе ЛОВ (см. раздел 1.1) пропускает входную частоту до 160 ГГц, а образец с коаксиальным входом обладает предельным значением входной частоты 24 ГГц. При этом для достижения наилучшей выходной мощности на желаемой частоте ТГц-диапазона оптимальным является диапазон частот $20 \dots 24$ ГГц, а оптимальная мощность входного сигнала составляет 10...15 дБм и зависит от выбранной входной частоты. Таким образом, поскольку умножитель является пассивным устройством, простота (сложность) работы с ним фактически определяется простотой (сложностью) работы с базовым источником, при этом выбор источника определяется решаемой задачей. Если в задаче требуется широкая полоса перестройки частоты в ТГц-диапазоне с маленьким шагом и возможность подстройки выходной мощности, то необходим многофункциональный коммерческий источник СВЧ со встроенным дисплеем; если же в решаемой задаче достаточно одной либо нескольких заданных выходных частот фиксированной мощности, разумным представляется использование более миниатюрного и специализированного источника СВЧ. Благодаря

компактным размерам умножитель может быть легко встроен в общий корпус с другими устройствами с целью его интеграции в комплексную миниатюрную установку, в отличие от источника на основе ЛОВ.

1.3. Источник на основе распределенного джозефсоновского перехода

Третьим источником ТГц-диапазона, исследуемым в данной работе, является сверхпроводниковый источник на основе РДП с использованием СИС-структур $Nb/AlO_x/Nb$ с предельной частотой джозефсоновской генерации около 700 ГГц, определяемой фундаментальными свойствами сверхпроводящих берегов перехода и линий передачи на основе ниобия. Принцип работы и важнейшие характеристики были детально описаны [8–13], однако вопросы эргономичности источника с точки зрения практических приложений ранее не обсуждались. Базовый криогенный модуль генератора включает интегральную микросхему с генератором, антенной и гармоническим смесителем (ГС), установленную на полуэллиптической кремниевую линзу, а также массивный магнитный экран для экранирования РДП от внешних наводок, имеет размеры $120 \times 45 \times 60$ мм и массу около 0.4 кг (рис. 3). Генератор работает при температуре жидкого гелия 4.2 К и традиционно устанавливается в заливной криостат. Преимуществом такого источника является возможность установки криогенного модуля в общую криогенную систему решаемой задачи, в таком случае массогабаритные характеристики модуля практически не играют роли в общей системе. Недостатком же применения в задачах при комнатной температуре является необходимость независимого охлаждения базового модуля генератора, для чего требуется достаточно массивная криогенная система. Так, например, полная масса снаряженного криостата производства “Infrared Lab.” (США) с объемом для жидкого гелия около 4 л, обеспечивающим 8–12 ч непрерывной работы, составляет 21.6 кг (без жидких гелия и азота), а размеры $300 \times 300 \times 500$ мм (рис. 4). Внешняя оснастка криостата – усилители СВЧ при комнатной температуре, система ФАПЧ, а также разводка кабелей СВЧ – находятся с обратной стороны криостата и не видны на фотографии. Указанные характеристики уже включают в себя СВЧ-усилители выходных сигналов на промежуточной частоте (ПЧ) до 8 ГГц, фильтры для снижения шумов по постоянному току и на СВЧ, систему ФАПЧ, а также всю электрическую и СВЧ-разводку, но не включают источники питания для всех перечисленных элементов и вспомогательное оборудование. Вместо заливного криостата для охлаждения системы до

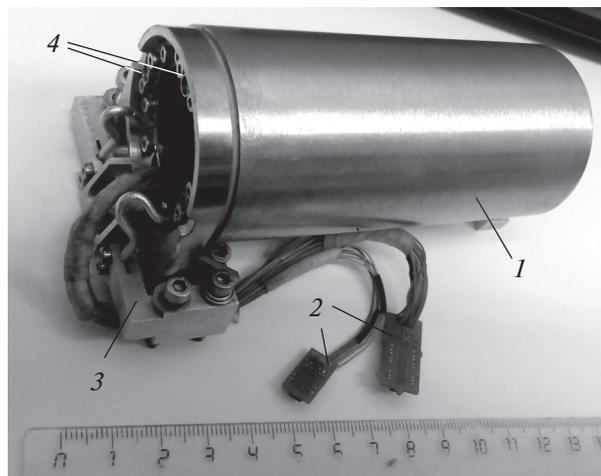


Рис. 3. Криогенный модуль ТГц-генератора на основе РДП: 1 – магнитный экран, 2 – разъемы для управления элементами микросхемы по постоянному току, 3 – алюминиевые теплоотводы для обеспечения охлаждения конструкции до 4.2 К; 4 – входные и выходные коаксиальные разъемы СВЧ.

рабочей температуры может быть использована криогенная система замкнутого цикла на основе высокопроизводительного рефрижератора. Для питания активных элементов – усилителей ПЧ и системы ФАПЧ – дополнительно требуется маломощный источник напряжения до 6 В с суммарной силой тока до 1 А, система ФАПЧ требует опорного сигнала частотой 400 МГц, а система обратной связи также требует опорного перестраиваемого сигнала СВЧ в диапазоне 19...21 МГц. Для управления ключевыми элементами микросхемы – РДП и гармоническим смесителем – требуется три независимых маломощных источника тока (до 200, до 100 и до 10 мА) с желательной работой от автономных батарей без использования сети ~220 В для минимизации уровня шумов, а также ПК для удобного и оперативного управления всеми элементами системы. Для визуального контроля фазовой стабилизации выходного излучения традиционно используется анализатор спектра до 1 ГГц, который при необходимости может быть заменен контролем лишь мощности выходного сигнала смесителя при помощи фазового детектора. Таким образом, масса всего перечисленного вспомогательного оборудования в зависимости от исполнения и решаемой задачи может составлять от 10 до 30 кг дополнительно к массе криогенной установки. Так, например, все вспомогательное оборудование может быть интегрировано в единый блок, масса которого около 20 кг и размеры $380 \times 480 \times 140$ мм с управлением от компактного ноутбука (рис. 5), но можно использовать несколько внешних многофункциональных



Рис. 4. Заливной криостат для работы при температуре 4.2 К с установленным внутри криогенным модулем ТГц-источника: 1 – корпус криостата, 2 – горловина для заливки жидкого азота, 3 – горловина для заливки жидкого гелия, 4 – коммутационные коробки для управления всеми функциональными элементами системы по постоянному току, 5 – высоковакуумный клапан для откачки внутреннего объема криостата до давления порядка 10^{-6} мБар (при температуре 4.2 К), 6 – выходное окно с ИК-фильтрами из материалов MuIag и Goge-tech, имеющие высокую прозрачность в ТГц-диапазоне.

устройств с независимым управлением и полноценный высокопроизводительный ПК.

Общая потребляемая мощность также значительно зависит от исполнения: при использовании заливного криостата потребляемая мощность определяется лишь потребляемой мощностью вспомогательного оборудования и обычно составляет до 1 кВт, если же использовать криогенный рефрижератор в составе системы замкнутого цикла, то требуется дополнительная мощность порядка нескольких киловатт для работы компрессора.

При описанных конструкционных сложностях при работе с данным источником его неоспоримым преимуществом является ширина полосы перестройки частоты, составляющая до 70% от центральной частоты для одного экспериментального

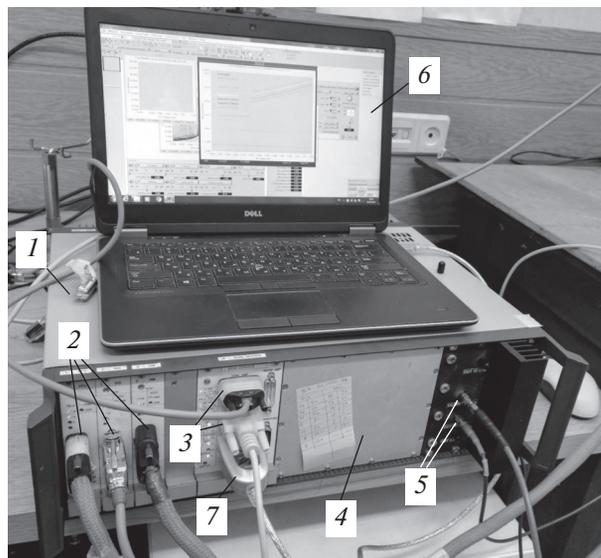


Рис. 5. Интегральный блок для управления системой ТГц-источника на основе РДП: 1 – корпус блока, 2 – разъемы для управления (смещения) элементами микросхемы по постоянному току, 3 – разъемы для управления внешними вспомогательными элементами (системы ФАПЧ, усилителей СВЧ), 4 – батарейный блок для автономного управления элементами с низкими шумами без использования сети ~220 В, 5 – опорные генераторы СВЧ (19...21 ГГц и 400 МГц), 6 – ПК оператора (ноутбук) для полного управления блоком, 7 – разъем стандарта RS-232 для подключения к ПК через универсальный порт.

образца, а также отсутствие необходимости перепроектировать всю систему для работы в другом диапазоне частот: достаточно поменять интегральную микросхему с генератором и антенной. В работах [11, 12] разработаны и исследованы образцы с рабочим диапазоном частот 250...420 и 400...720 ГГц, что составляет ширину полосы перестройки 50 и 57% от центральной частоты соответственно. Диапазон перестройки может быть расширен путем более тщательного проектирования топологии двойной щелевой антенны и согласующих структур, а также путем использования антенны другого типа, например, логопериодической. Другим преимуществом является возможность встраивания модуля в общую криогенную систему для решения задач при низких температурах, например, при исследовании низкотемпературных свойств материалов, в ТГц-микроскопии.

2. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Исследование спектральных характеристик излучения источников в открытое пространство проводилось при помощи ТГц-спектрометра на основе приемника с высоким спектральным разреше-

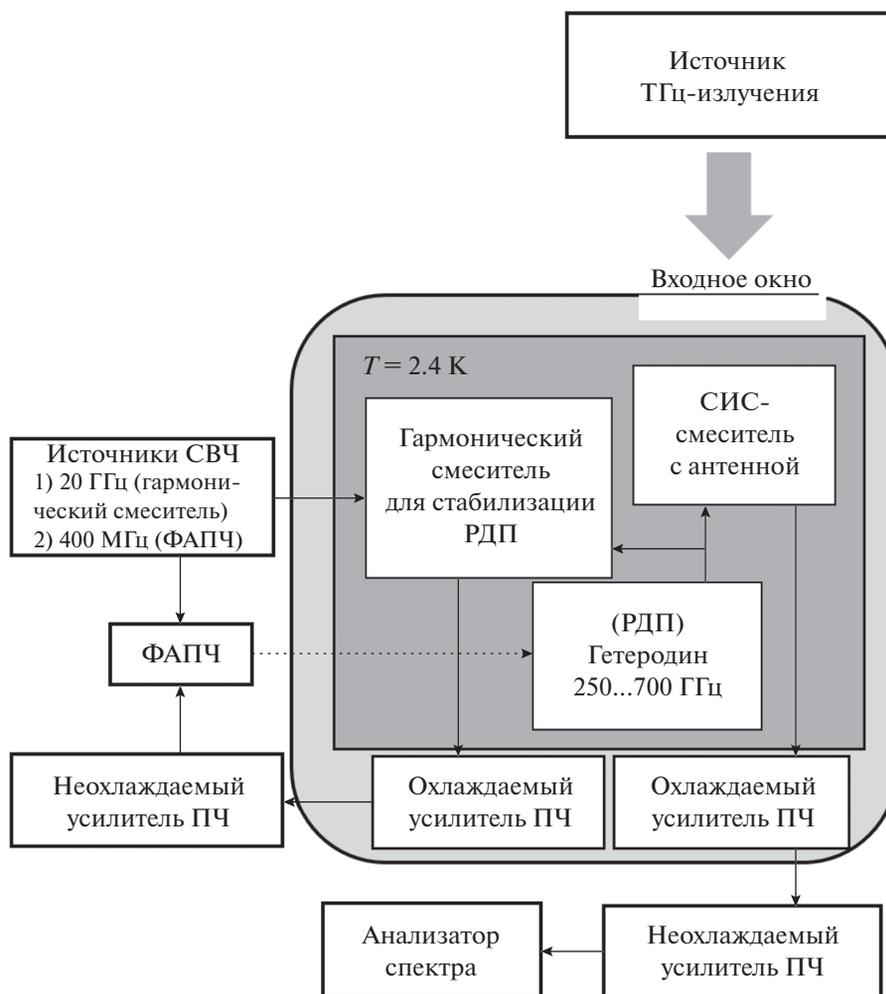


Рис. 6. Блок-схема экспериментальной установки для исследования спектральных характеристик внешнего источника ТГц-излучения.

нием. Принципиальная схема экспериментальной установки представлена на рис. 6, где в качестве источника использованы три различных прибора, исследованных в данной работе, а устройством для регистрации спектра является анализатор спектра. Детектор в составе ТГц-спектрометра является комплексным сверхпроводниковым устройством на основе интегральной микросхемы (подробнее см., например, [15–17]). Спектральное разрешение спектрометра на основе СИС-смесителя определяется спектральными характеристиками как гетеродина на основе РДП, так и опорного источника СВЧ, используемого для фазовой стабилизации гетеродина, и составляет порядка 40 кГц. Спектральное разрешение выходного анализатора спектра зависит от ширины полосы анализа и составляет до 1 Гц в наименьшей полосе, что заведомо превосходит разрешение спектрометра. Сигнал на выходе СИС-смесителя является кон-

волюцией (сверткой) двух сигналов – генератора гетеродина на основе РДП, стабилизированного с помощью системы ФАПЧ, и исследуемого источника. Рабочий диапазон спектрометра составляет 480...700 ГГц, при этом точное значение спектрального разрешения зависит от конкретной частоты приема, потому как спектральные характеристики РДП и номер используемой гармоники опорного источника СВЧ различны в каждой рабочей точке. Характерное значение номера используемой гармоники 20 ГГц составляет от 25 до 35. Следует также отметить, что при исследовании характеристик источника на основе РДП гетеродином приемника является также генератор на основе РДП, т.е. в работе установки участвуют одновременно два РДП, стабилизированных с помощью независимых систем ФАПЧ и отстоящих друг от друга по рабочей частоте на ширину полосы ПЧ (около 6 ГГц).

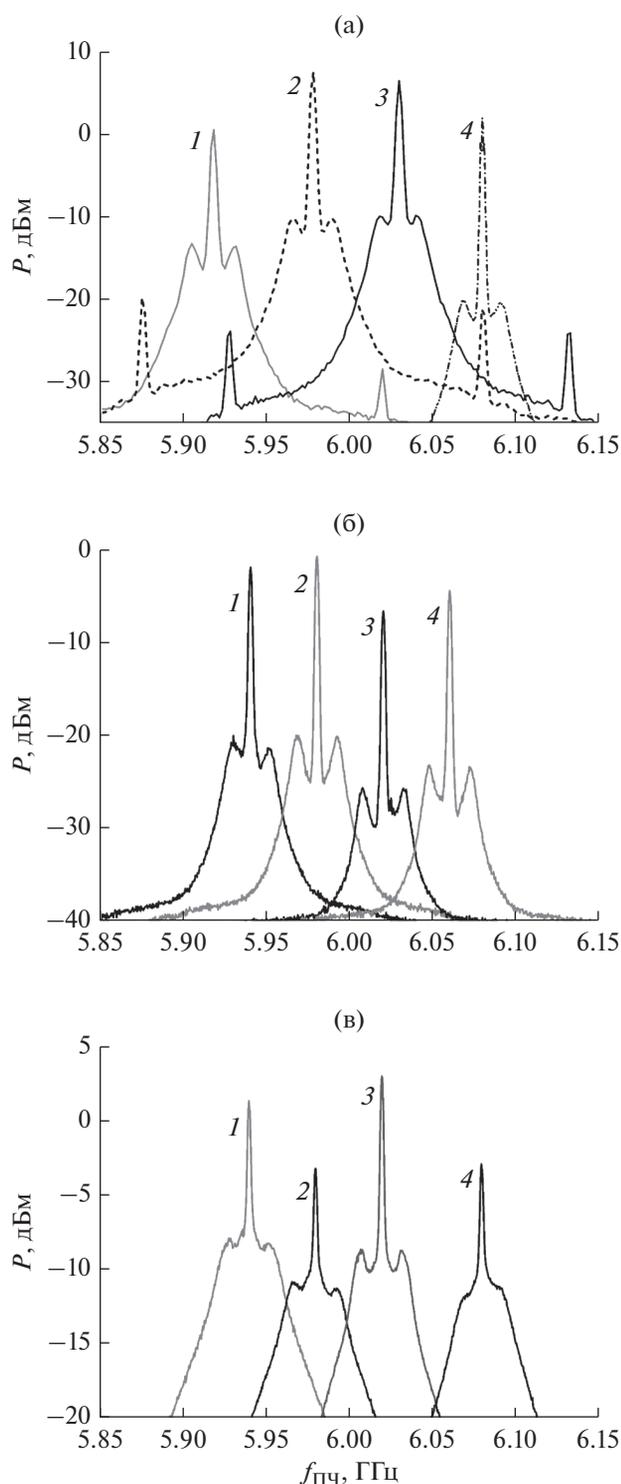


Рис. 7. Серия АЧХ источников ТГц-излучения: а – на основе ЛОВ на частотах 480 (1), 500 (2), 550 (3) и 600 ГГц (4) (все кривые АЧХ измерены для сигнала 4-й гармоники ЛОВ); б – на основе умножителя СВЧ на частотах около 600 ГГц для гармоники $m = 25$ (1), 30 (2), 50 (3), 60 (4); в – на основе РДП с передающей антенной на частотах 500 (1), 550 (2), 600 (3) и 650 ГГц (4).

На рис. 7 представлены результаты измерения АЧХ исследуемых источников, зарегистрированные анализатором спектра производства “Keysight Technologies”. Выходной диапазон спектрометра (полоса ПЧ) составляет 4...8 ГГц, измерения проводили в области центра полосы ПЧ 6 ГГц. Все спектры на рис. 7 зарегистрированы при широкой полосе обзора анализатора спектра (несколько гигагерц) и спектральном разрешении 1.8 МГц для наглядного представления формы регистрируемого сигнала, и показаны в полосе анализа шириной 300 МГц. Поскольку регистрируемый сигнал является конволюцией сигналов гетеродина в составе спектрометра и исследуемого источника, то в случае, когда ширина спектральной линии исследуемого источника значительно меньше ширины линии сигнала гетеродина, форма АЧХ регистрируемого сигнала фактически повторяет форму АЧХ гетеродина. Именно такой случай наблюдается на рис. 7а и 7б, поскольку ширина спектральных линий 4-й гармоники ЛОВ и высоких гармоник умножителя СВЧ с номерами от 25 до 60 приблизительно на один-два порядка меньше ширины линии гетеродина на основе РДП в режиме фазовой стабилизации. Имеется также особенность в боковых пиках высотой порядка 10 дБ, отстоящих выше и ниже от несущей частоты примерно на 100 МГц (см. рис. 7а). Вероятнее всего, это вызвано паразитным просачиванием мощных опорных сигналов в СВЧ-тракте. Принципиальное отличие в форме сигнала наблюдается на рис. 7в, поскольку регистрируемый спектр является сверткой сигналов двух РДП с близкой формой АЧХ. Интересно, что характерная ширина автономной линии излучения двух РДП разная при одинаковых (близких) частотах, поскольку РДП в составе исследуемого источника выполнен на основе трехслойной структуры Nb/AlO_x/Nb, в то время как генератор гетеродина выполнен на основе структуры Nb/AlN/NbN. Принципиальное различие этих структур состоит в разной величине суммарной энергетической щели туннельных переходов (около 2.8 мВ для Nb/AlO_x/Nb и около 3.6 мВ для Nb/AlN/NbN). В обеих структурах имеется эффект самонакачки [18–20], благодаря которому дифференциальное сопротивление R_d и, следовательно, ширина линии генерации в автономном режиме (без ФАПЧ) возрастает при приближении к “граничной” частоте f_b и резко падает в узкой области возле f_b . Значение f_b определяется энергетической щелью структуры и равняется частоте, соответствующей трети “щелевого” напряжения перехода, которая составляет около 450 ГГц для Nb/AlO_x/Nb с резким ростом R_d на частотах 455...490 ГГц и около 600 ГГц для Nb/AlN/NbN с резким ростом R_d на

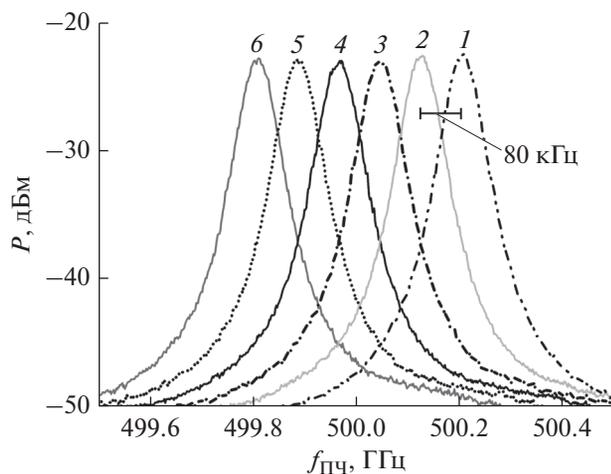


Рис. 8. Серия АЧХ источников ТГц-излучения на основе ЛОВ на частотах около 600 ГГц с шагом 80 кГц: 600000.00 (1), 600000.08 (2), 600000.16 (3), 600000.24 (4), 600000.32 (5) и 600000.40 МГц (6).

частотах 605...630 ГГц. Именно по этой причине наблюдаются различия в форме сигналов конволюции спектров двух РДП при разных частотах (кривые 1...4 на рис. 7в). Ширина зарегистрированных спектральных линий генерации всех исследованных источников с режимом ФАПЧ с учетом конволюции с сигналом гетеродина составила порядка 40...50 кГц, что и является спектральным разрешением спектрометра с гетеродином на основе РДП. При этом ширина спектральной линии источника на основе РДП в режиме ФАПЧ составляет величину порядка 50 кГц и более, поскольку именно характеристиками РДП как гетеродина определяется спектральное разрешение прибора, в то время как фактическая спектральная ширина АЧХ источников на основе ЛОВ и умножителя СВЧ составляет величину на один-два порядка меньше.

На рис. 8 представлена серия АЧХ источника на основе ЛОВ, измеренная с помощью спектрометра в более узкой полосе шириной 1 МГц со спектральным разрешением 1 кГц, с шагом перестройки выходной частоты источника 80 кГц. Сигнал регистрировался с использованием дополнительного каскада понижения частоты на основе полупроводникового смесителя и опорного сигнала 6 ГГц, так что диапазон ПЧ в эксперименте с источником на основе ЛОВ составил 0...1 ГГц с центром на частоте 500 МГц. Видно, что вершины кривых 1...6 отстоят друг от друга в точности на шаг перестройки частоты источника 80 кГц, притом каждая из них легко различима как отличная от других кривая, это свидетельствует, что спектральное разрешение спектрометра порядка

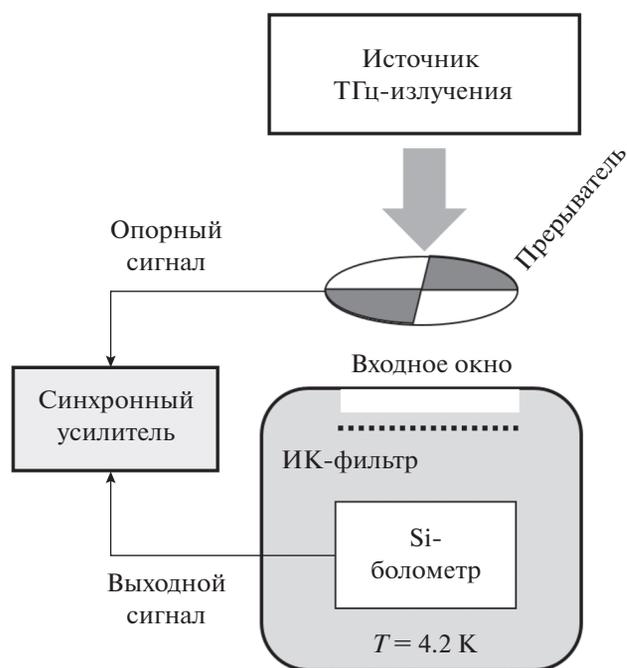


Рис. 9. Блок-схема экспериментальной установки для исследования интегральной излучаемой мощности внешнего источника ТГц-излучения.

десятков килогерц. Таким образом, можно утверждать, что все три источника потенциально могут быть использованы в задачах, где ширина линии генерации в стабилизированном режиме порядка 50 кГц является достаточной. Если же требуется АЧХ источника с характерной шириной в пике порядка единиц килогерц и ниже, то источник на основе РДП не подходит для таких задач, а характеристики источников на основе ЛОВ и выходных гармоник умножителя СВЧ требуют более тщательного исследования.

3. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОЩНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ

Исследование мощности в некалиброванном режиме проводили с помощью высокочувствительного широкополосного полупроводникового болометра на основе кремния. Данный прибор производства "Infrared Lab." является коммерчески доступным и представляет собой охлаждаемый до 4.2 К образец болометра, установленный в заливной криостат (рис. 9), где в качестве источника использованы приборы, исследованные в данной работе, а устройством для регистрации выходного сигнала являлся синхронный детектор. Оптимальная частота оптического прерывателя, зависящая от быстродействия болометра, которая ниже по сравнению, на-

пример, с быстродействием сверхпроводниковых детекторов, была выбрана равной 170 Гц. Постоянная времени интегрирования синхронного усилителя выбрана 900 мс. Такой набор параметров оказался оптимальным по длительности проведения эксперимента и уровню флуктуаций регистрируемого сигнала, который при выбранных параметрах был пренебрежимо малым по сравнению с полезным сигналом. Главная техническая сложность при регистрации данным болометром сигнала в ТГц диапазоне частот заключается в его высокой чувствительности к ИК-сигналу, который в текущей конфигурации является шумовым. Для его минимизации на входе болометра внутри криостата установлен кварцевый ИК-фильтр, хорошо пропускающий ТГц-сигнал. Поскольку калиброванное измерение мощности с помощью данной экспериментальной установки достаточно сложно (вольт-ваттная характеристика болометра специфицирована для ИК-излучения и неизвестна для ТГц-диапазона частот, а регистрируемый синхронным детектором сигнал зависит от слишком большого числа факторов), проведенные измерения представляют интерес в контексте сравнительного исследования детектируемой мощности различных источников (без рассмотрения геометрии пучков), а также исследования частотной зависимости выходной мощности для отдельно взятого источника.

Результаты измерения мощности выходного сигнала при изменении рабочей точки во времени в ручном режиме для источников на основе умножителя СВЧ и РДП представлены на рис. 10. Горизонтальные участки на обоих рисунках соответствуют неизменной рабочей точке источников, т.е. генерации сигнала в неизменном режиме, а вертикальные участки соответствуют моментам мгновенного перестроения рабочей точки. Фоновый сигнал ИК при выбранном режиме измерений и внешних условиях в помещении лаборатории составляет порядка 2 мВ и достаточно стабилен (участок 1 на рис. 10а), при этом полезный сигнал составляет порядка 20 мВ для источника на основе умножителя (участки 2, 4, 5) и порядка 50...100 мВ для источника на основе РДП. Вставка на рис. 10а демонстрирует уровень флуктуаций регистрируемого сигнала порядка 0.1 мВ, который определяются целым набором флуктуаций в системе: фоновые флуктуации ИК-сигнала в пространстве лаборатории, флуктуации мощности базового источника СВЧ, флуктуации рабочей точки болометра, флуктуации частоты оптического прерывателя (около 170 Гц) и, соответственно, опорного сигнала для синхронного усилителя, равно как электромагнитные флуктуации в помещении на низкой частоте (около 50 Гц) и в сети ~220 В питания элементов системы. Все или часть перечислен-

ных факторов в той или иной степени влияют (могут влиять) на стабильность регистрируемого сигнала, при этом уровень флуктуаций составил величину, пренебрежимо малую по отношению к полезному сигналу. Вставка на рис. 10б демонстрирует более высокий уровень флуктуаций (порядка 0.5 мВ), а участки 3 и 4 характеризуются нестабильностью рабочей точки на ВАХ РДП. Поскольку система измерений для различных источников полностью идентична, можно утверждать, что повышенный уровень флуктуаций сигнала для источника на основе РДП связан исключительно с системой самого источника, а именно с нестабильностью рабочей точки на ВАХ перехода при незадействованной системе ФАПЧ. Интересно отметить также достаточно медленные процессы установления рабочей точки вследствие тепловой релаксации на участках 1, 2 (см. рис. 10б) после переключения рабочей точки с сильно изменившимся джоулевым тепловыделением в переходе.

В результате проведенного некалиброванного исследования мощности сигнала ТГц-источников на наборе различных выходных частот были получены следующие значения: для источника на основе ЛОВ — характерные значения 10...50 мВ, максимальное значение 57.8 мВ; для источника на основе умножителя СВЧ — характерные значения 10...20 мВ, максимальное значение около 28 мВ; для источника на основе РДП — характерные значения от 20 до 100 мВ в зависимости от конструкции экспериментального образца, которые спроектированы для работы в разных частотных диапазонах между 200 и 700 ГГц, а максимальное значение составило около 150 мВ для образца с перестройкой частоты в диапазоне 400...570 ГГц. Важно отметить, что регистрируемый сигнал в данном эксперименте в значительной степени зависит как от геометрии излучаемого пучка, так и от диаграммы направленности болометра, которые в данной работе не исследовались.

Таким образом, наибольшую зарегистрированную мощность ТГц-сигнала продемонстрировал источник на основе РДП, а наименьшую — источник на основе умножителя СВЧ. Кроме того, данный эксперимент не различает гармонический состав ТГц-сигнала, а интегрирует всю мощность принимаемого излучения, при этом максимум излучения для источников на основе ЛОВ и РДП приходится на основную гармонику, а сигнал на выходе умножителя представляет собой “гребенку” частот выше 350 ГГц с шагом порядка 20 ГГц (см. разд. 1), так что мощность сигнала на отдельно взятой частоте неизвестна.

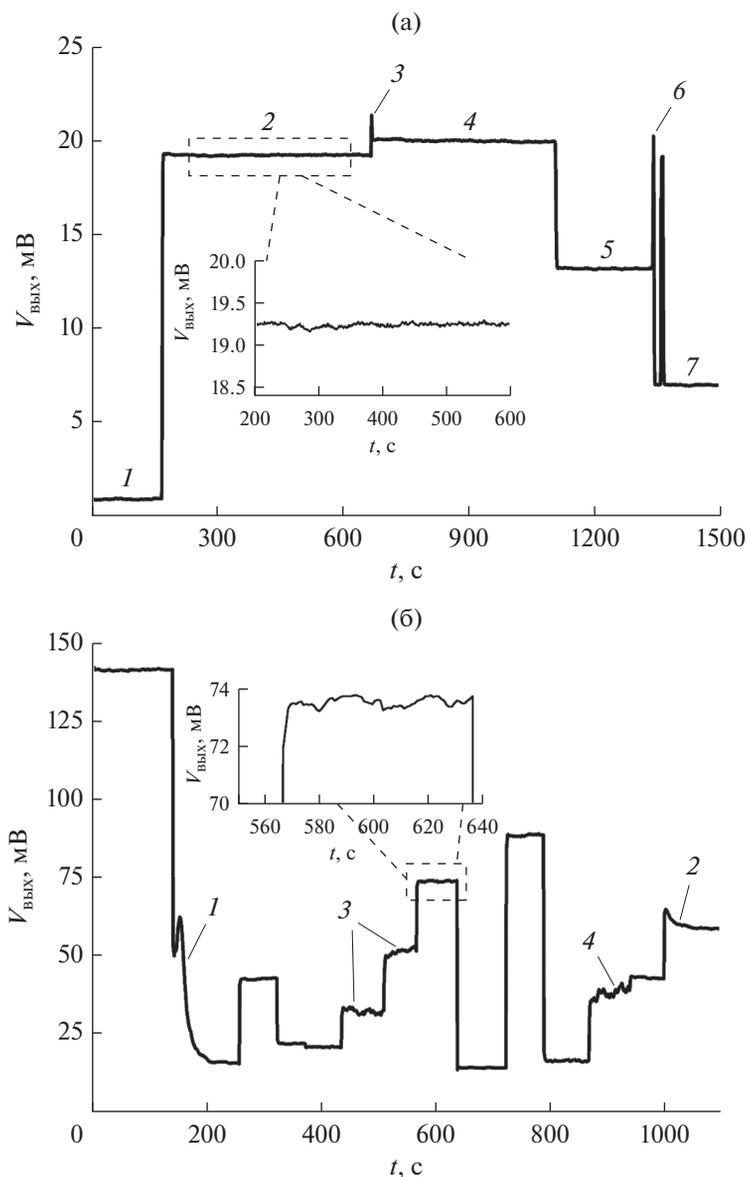


Рис. 10. Зависимость сигнала на выходе болометра от времени при облучении ТГц-сигналом источников на основе: (а) умножителя СВЧ и (б) РДП без системы стабилизации; а) 1 – источник выключен; 2, 4, 5, 7 – различная выходная мощность умножителя, 3 и 6 – “всплески”, процесс перестроения мощности умножителя в ручном режиме; б) 1 и 2 – переходные процессы установления рабочей точки вследствие тепловой релаксации, 3 и 4 – нестабильные рабочие точки. На вставках – увеличенный масштаб.

4. ИТОГИ СРАВНИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты комплексного сравнительного исследования трех источников по всем проанализированным выше характеристикам представлены в табл. 1.

Таким образом, из трех исследованных ТГц-источников в конкретном исполнении наиболее простым в эксплуатации, но при этом наиболее маломощным, является умножитель СВЧ на основе сверхрешеток GaAs/AlAs. Основным его

преимуществом является компактность и, следовательно, возможность интеграции в единый блок (модуль) с другими устройствами. Основными недостатками является низкая выходная мощность и “гребенка” частот на выходе, не позволяющая использовать его в задачах, требующих одночастотного генератора без гармонического состава. Для достижения более высокого уровня мощности требуются коммерчески недоступные усилители СВЧ-сигналов, до 100 ГГц. Наиболее сложным технически и в эксплуатационном смысле является источник на основе распре-

Таблица 1. Сравнительные характеристики трех источников, выполненных на разной основе

Параметры	Источник на основе		
	ЛОВ	умножителя СВЧ	РДП
Габариты базового модуля (блока) Д×Ш×В, мм	500 × 360 × 280	30 × 20 × 20	120 × 45 × 60
Масса базового модуля (блока), кг	17.4	0.05	0.4
Дополнительные необходимые компоненты	Персональный компьютер/ноутбук	Базовый генератор СВЧ мощностью не менее 10 дБм	Криогенная система; комплексная система питания и управления; источники и усилители СВЧ
Потребляемая мощность, кВт	Менее 0.25	обычно не более 0.3 (определяется потребляемой мощностью базового генератора)	обычно не более 1 (определяется потребляемой мощностью дополнительных компонентов)
Рабочая температура, К	293	293, допускается охлаждение до 4.2	4.2
Возможность интеграции в компактный блок с другими устройствами	Нет	Да	Да, при условии общей криогенной системы
Диапазон выходных частот, ГГц	480...640	от 350	200...750
Ширина линии в режиме фазовой стабилизации, кГц	< 40	< 40	~40
Характерная выходная мощность в диапазоне до 700 ГГц, отн.ед.	10...50	10...20	20...100
Максимальная зарегистрированная мощность, мВ	57.8	28	150
Прочие особенности	Частота ЛОВ 120...160 ГГц, умножитель на выходе ЛОВ; управление с ПК	Пассивное устройство; “гребенка” частот на выходе; массогабаритные характеристики определяются базовым генератором	Управление стабилизацией сигнала в ручном режиме с ПК; массогабаритные характеристики определяются дополнительными компонентами

ленного джозефсоновского перехода, но при этом он продемонстрировал наибольшую регистрируемую мощность и наибольшую ширину полосы перестройки рабочей частоты, и не имеет “богатого” гармонического состава. Технические требования работы с таким источником включают в себя не только наличие криогенной установки 4.2 К, но и низкие шумы в питании основных элементов микросхемы, а также малошумящие усилители СВЧ, до 1 ГГц. Еще одним его преимуществом является возможность интеграции в единую криогенную систему составного устройства, что может быть полезно, например, при исследовании свойств материалов при низких температурах. Компромиссом по детектируемой мощности и эргономике между маломощным источником на основе умножителя СВЧ и технически сложным источником на основе РДП является источник на основе ЛОВ с умножителем. Он достаточно удобен в лабораторных применениях, в которых не важен вес и размер устройства, при этом обладает достаточной мощностью для многих задач в ТГц-диапазоне частот. Как и источник на основе умножителя СВЧ, он имеет “ребенку” частот на выходе, однако расстояние между соседними частотами составляет 120...160 ГГц (в отличие от 10...24 ГГц для СВЧ-умножителя), что в большинстве случаев не создает технических проблем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе проведен комплексный сравнительный анализ трех лабораторных источников ТГц-диапазона, основанных на разных принципах: на основе лампы обратной волны с умножителем на выходе, на основе умножителя СВЧ на полупроводниковых сверхрешетках с высоким номером гармоники, а также на основе сверхпроводникового распределенного джозефсоновского перехода. В качестве исследуемых устройств использованы экспериментальные образцы, находящиеся в распоряжении коллектива авторов ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. Исследование характеристик ТГц-источников является оригинальным и не повторяет результаты из других работ.

Исследование АЧХ источников проведено с использованием ТГц-спектрометра на основе сверхпроводникового интегрального приемника со спектральным разрешением около 40 кГц. Мощность излучения исследовали с помощью широкополосного охлаждаемого болометра на основе кремния. Ширина линии излучения всех источников на рабочих частотах диапазона 500...600 ГГц в режиме фазовой стабилизации составила менее 100 кГц. Наибольшая регистрируемая мощность была до-

стигнута источником на основе РДП, а наилучшую эргономичность работы при комнатной температуре продемонстрировал умножитель СВЧ с высоким номером гармоник на основе СР.

Каждый из исследованных источников имеет характерные особенности и занимает некоторую нишу в современных разработках и исследованиях ТГц-диапазона, при этом, как правило, эти ниши не пересекаются. Все три источника успешно применяются в настоящее время на частотах до 700 ГГц. Данная работа может быть полезна не только с точки зрения многостороннего обзора характеристик различных источников ТГц-диапазона и их сравнительного анализа, но также с точки зрения методики экспериментального исследования характеристик генераторов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы работы выражают благодарность В.Л. Ваксу, Е.Г. Домрачевой, В.А. Анфертьеву (Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород), Д.Г. Павельеву (ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород), А.М. Барышеву (Астрономический институт Каптейн, Гронинген), К.И. Рудакову, Л.В. Филиппенко, В.В. Ханину, Н.А. Хвальковскому, И.Н. Дюжинову, О.Ю. Волкову (ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Москва) за предоставленные экспериментальные образцы и оборудование для исследований, а также плодотворное обсуждение результатов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания и при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-52-80023). Источник на основе РДП разработан за счет Российского научного фонда (проект № 17-79-20343) и изготовлен с использованием Уникальной научной установки ИРЭ РАН (УНУ № 352529).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Dhillon S.S., Vitiello M.S., Linfield E.H. et al.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2017. V. 50. № 4. P. 043001.
2. *Lewen F., Gendriesch R., Pak I. et al.* // Rev. Sci. Instrum. 1998. V. 69. № 1. P. 32.
3. *Dobroiu A., Yamashita M., Ohshima Y.N. et al.* // Appl. Opt. 2004. V. 43. № 30. P. 5637.
4. *Gorshunov B., Volkov A., Spektor I. et al.* // Int. J. Infrared Milli. Waves. 2005. V. 26. № 9. P. 1217.
5. *Klappenberger F., Renk K.F., Renk P. et al.* // Appl. Phys. Lett. 2004. V. 84. № 19. P. 3924.
6. *Endres C.P., Lewen F., Giesen T.F. et al.* // Rev. Sci. Instrum. 2007. V. 78. № 4. P. 043106.
7. *Павельев Д.Г., Кошуринов Ю.И., Иванов А.С. и др.* // ФТП. 2012. Т. 46. № 1. С. 125.

8. *Кинев Н.В., Рудаков К.И., Барышев А.М. и др.* // ФТТ. 2018. Т. 60. № 11. С. 2132.
9. *Kinev N.V., Rudakov K.I., Baryshev A.M. et al.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2018. V. 1124. P. 071001.
10. *Kinev N.V., Rudakov K.I., Filippenko L.V. et al.* // EPJ Web Conf. 2018. V. 195. P. 02003.
11. *Kinev N.V., Rudakov K.I., Filippenko L.V. et al.* // J. Appl. Phys. 2019. V. 125. № 15. P. 151603.
12. *Кинев Н.В., Рудаков К.И., Филиппенко Л.В. и др.* // РЭ. 2019. Т. 64. № 10. С. 970.
13. *Kinev N.V., Rudakov K.I., Filippenko L.V. et al.* // IEEE Trans. 2019. V. TST-9. № 6. P. 557.
14. *Nagatsuma T., Enpuku K., Irie F., Yoshida K.* // J. App. Phys. 1983. V. 54. № 6. P. 3302.
15. *Lange G., Boersma D., Dercksen J. et al.* // Supercond. Sci. Technol. 2010. V. 23. № 4. P. 045016.
16. *Koshelets V.P., Dmitriev P.N., Faley M.I. et al.* // IEEE Trans. 2015. V. TST-5. № 4. P. 687.
17. *Kiselev O., Birk M., Ermakov A. et al.* // IEEE Trans. 2011. V. AS-21. № 3. P. 612.
18. *Koshelets V.P., Shitov S.V., Shchukin A.V. et al.* // Phys. Rev. B. 1997. V. 56. № 9. P. 5572.
19. *Pankratov A.L., Sobolev A.S., Koshelets V.P., Mygind J.* // Phys. Rev. B. 2007. V. 75. № 18. P. 184516.
20. *Гулевич Д.Р., Дмитриев П.Н., Кошелец В.П., Ку-смарцев Ф.В.* // Наносистемы: физика, химия, математика. 2013. Т. 4. № 4. С. 507.