

УДК 537.86+621.37+52-76

ТЕРАГЕРЦЕВЫЙ СПЕКТРОМЕТР ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ НА ОСНОВЕ КВАНТОВЫХ КАСКАДНЫХ ЛАЗЕРОВ

В. Л. Вакс, Е. Г. Домрачева, Ю. П. Корнеева, Л. С. Ревин, И. В. Третьяков,
В. А. Анфертьев, М. Б. Черняева*

Институт физики микроструктур РАН, г. Нижний Новгород, Россия

Рассмотрена возможность реализации спектрометра терагерцевого частотного диапазона с использованием источников излучения на основе квантовых каскадных лазеров и приёмной системы на основе болометров на горячих электронах. Проведены прецизионные измерения амплитудных и фазовых шумов квантовых каскадных лазеров этого частотного диапазона. Описаны системы стабилизации частоты квантовых каскадных лазеров. Приведены блок-схемы терагерцевых спектрометров высокого разрешения.

ВВЕДЕНИЕ

Сложный состав многокомпонентных газовых смесей с предельно низкими концентрациями их компонент (например, выдыхаемый воздух, «запахи» биологических тканей, смеси в высокотехнологичных производствах и так далее) обуславливает жёсткие требования к характеристикам спектроскопической аппаратуры прямого обнаружения микропримесей в таких смесях: чувствительность на уровне нескольких частей на миллиард (parts per billion, ppb), высокая разрешающая способность, ограниченная лишь эффектом Доплера [1], стабильность частоты источника излучения не хуже $10^{-8} \div 10^{-10}$. Кроме того, прибор, предназначенный для работы в реальных условиях, должен обладать высоким быстродействием и быть простым в эксплуатации [2, 3].

На сегодняшний день всем перечисленным требованиям удовлетворяет метод спектроскопии высокого разрешения на нестационарных эффектах — свободно затухающей поляризации и быстрого прохождения по частоте. Он обеспечивает наилучшую (близкую к теоретическому пределу) чувствительность. Кроме высоких чувствительности и спектрального разрешения, такие приборы характеризуются малым временем измерения (порядка $1 \div 2$ с), что позволяет проводить анализ в режиме реального времени.

Эффект свободно затухающей поляризации заключается в переходном поглощении, возникающем вследствие резонансного взаимодействия излучения с двухуровневой системой, причём время этого взаимодействия меньше времени релаксации, и переходном излучении, возникающем, когда частота излучения выходит из резонанса, в течение времени, меньшего времени релаксации. Таким образом, ввод частоты излучения в резонанс и вывод из резонанса с частотой молекулярного перехода приводят к чередованию процессов наведения и распада макроскопической поляризации. Сигнал, обусловленный распадом наведённой свободной поляризации, содержащий информацию о временах релаксации и молекулярной концентрации, детектируется и анализируется. Созданные к настоящему времени спектрометры, в которых используется этот эффект, превратились в целый класс приборов с весьма интересной и перспективной областью применений с тех пор, как была опубликована пионерская работа [4], в которой был впервые описан спектрометр на эффекте свободно затухающей поляризации (или когерентного спонтанного излучения). Наиболее распространённой являлась конструкция спектрометра на эффекте

* vax@ipmras.ru

свободно затухающей поляризации Эккерса и Флайгера [5], которая служила основой для дальнейших модификаций. Это был первый микроволновый фурье-спектрометр (диапазона $4 \div 8$ ГГц с максимальной шириной полосы приёма 50 МГц), который обеспечивал высокие чувствительность и разрешающую способность [5, 6]. В его состав входили четыре ключа на рпн-диодах. Фурье-спектрометр, реализованный на основе этой конструкции, обладает рядом очевидных достоинств, а быстродействующие диодные переключатели, с помощью которых сигналы источника излучения на свободно затухающей поляризации разделяются во времени, обеспечивают затухание (подавление) на уровне 80 дБ с временем переключения 1 нс и позволяют управлять относительно высокими мощностями. Однако возможности подавления сигнала с ростом частоты существенно уменьшаются, и, следовательно, технические решения, положенные в основу рассматриваемого спектрометра, не могут быть использованы для его реализации в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн [5].

Другим эффектом, используемым в переходных экспериментах, является быстрое прохождение частоты через линию молекулярного резонанса в течение времени, меньшего времени релаксации [7]. Работа [8] была одной из первых, где сообщалось об экспериментальной реализации быстрого прохождения в его современном режиме. В ней также обсуждалась реконструкция формы линии поглощения по сигналу детектора.

Реализация этого метода в терагерцевом ($0,1 \div 10$ ТГц) частотном диапазоне позволяет соединить достоинства метода нестационарной спектроскопии и преимущества спектроскопического анализа в этом диапазоне по сравнению с другими частотными диапазонами [9].

Среди источников когерентного излучения терагерцевого частотного диапазона, которые могут быть использованы в спектрометрах, можно отметить такие уникальные генераторы, как лампы обратной волны (ЛОВ), полупроводниковые генераторы с умножителями частоты на диодах Шоттки и на полупроводниковых сверхрешётках, транзисторы, лазеры на свободных электронах, молекулярные лазеры и квантовые каскадные лазеры (ККЛ).

Чтобы, однако, перекрыть частотный диапазон от 100 до 1 200 ГГц, требуется семь разных ЛОВ. Это создаёт определённые трудности, если необходимы измерения во всём указанном диапазоне. Кроме того, в России практически прекращено производство этих генераторов.

Лазеры на свободных электронах — это мощные источники терагерцевого излучения, которые, однако, представляют собой масштабные, дорогостоящие установки, вряд ли пригодные для массовых приложений.

Газовые лазеры также могут работать на частотах терагерцевого диапазона, но и они являются в целом громоздкими, характеризуются большим энергопотреблением, работают на фиксированных частотах, которые не всегда совпадают с частотами исследуемых линий поглощения.

Альтернативным вариантом является использование генераторов гармоник и твердотельных электронных приборов. Мощность излучения, генерируемого на высоких частотах твердотельными электронными приборами, такими как транзисторы и генераторы Ганна с умножителями частоты, снижается с ростом частоты, и даже для лучших приборов достижимая мощность излучения, генерируемого на частотах выше 1 ТГц, обычно существенно ниже милливаттного уровня, необходимого для эффективного взаимодействия излучения с молекулярным ансамблем.

В диапазоне частот $1 \div 5$ ТГц появились новые возможности для спектроскопии высокого разрешения в связи с разработкой и созданием семейства твердотельных терагерцевых источников когерентного излучения на основе ККЛ [10]. Эти источники привлекают своей компактностью и высокой квантовой эффективностью. Терагерцевые ККЛ работают на межподзонных переходах, причём частота перехода может меняться во всём диапазоне от 1,2 до 4,8 ТГц. Мощность выходного излучения при криогенных температурах составляет обычно десятки милливатт, но в литературе сообщалось о мощностях выше 248 и 138 мВт в импульсном и непрерывном режимах

соответственно на частоте 4,4 ТГц для 10 К. Возможность управления частотой ККЛ в сочетании с высокой мощностью выходного излучения делает терагерцевые ККЛ привлекательными для спектроскопических приложений. Максимальная рабочая температура T для таких лазеров в настоящее время приближается к 200 К: температура $T = 178$ К достигнута в структурах, выращенных в университете Лидса [11], $T = 186$ К при пиковой мощности генерации 5 мВт в лазерах резонансно-фононного дизайна — группой из США [12] и $T = 199,5$ К в импульсном режиме (длительность импульса 300 нс, частота повторения импульсов 300 Гц) — совместной группой из Канады, США и Германии [13, 14]. Недавно группа из Технического университета Дельфта (Нидерланды) впервые реализовала на основе ККЛ гетеродин на частоте 2,8 ТГц со смесителем на горячих электронах, при этом чувствительность приёмника в 8 раз превышала квантовый шум на этой частоте [15].

В инфракрасном диапазоне ККЛ достаточно широко используются в качестве источника излучения для спектрометров, работающих в режиме быстрого прохождения частоты [16–18].

Одним из направлений развития терагерцевой спектроскопии высокого разрешения является использование источников излучения на разностной гармонике двух инфракрасных ККЛ. Метод генерации разностной частоты терагерцевого частотного диапазона двух независимо перестраиваемых квантовых каскадных лазеров среднего инфракрасного диапазона (длина волны 4,8 мкм), работающих при комнатной температуре, разработан группой Манье Разеги (Эванстон, Иллинойс, США) [19]. Особенностью данного источника является то, что он выполнен в единой монолитной мультисекционной структуре, применён трёхсекционный гребенчато-волноводный лазерный дизайн с двумя дискретными решётчатыми секциями с распределённой обратной связью и секцией с распределённым брэгговским отражателем, используемыми для независимой перестройки по длине волны излучения инфракрасных ККЛ. Тем самым обеспечивается перестройка частоты терагерцевого излучения. Разработанный терагерцевый источник имеет широкий диапазон перестройки частоты 2,6÷4,2 ТГц при комнатной температуре и мощность излучения 0,1 мВт (от 26 мкВт на частоте 2,6 ТГц до 105 мкВт на 3,64 ТГц). Использование такого широкодиапазонного источника терагерцевого излучения вместе с детектором на квантовых полупроводниковых свёрхрешётках [20] позволит реализовать компактный терагерцевый спектрометр высокого разрешения, работающий при комнатной температуре.

Все это характеризует ККЛ как перспективные источники инфракрасного или терагерцевого излучения для чувствительных спектрометров соответствующих диапазонов частот широкого применения (обнаружение взрывчатых веществ, поиск молекул-биомаркеров различных заболеваний и т. д.) [21, 22].

Для создания терагерцевых спектрометров высокого разрешения на основе ККЛ необходимо решить задачу управления частотой, которая включает разработку систем стабилизации и перестройки частоты и модуляции того или иного параметра излучения ККЛ.

1. ИСТОЧНИК ТЕРАГЕРЦЕВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ КВАНТОВОГО КАСКАДНОГО ЛАЗЕРА

Квантовые каскадные лазеры представляют собой униполярные полупроводниковые лазеры на межподзонных оптических переходах в полупроводниковых гетероструктурах [23]. В отличие от межзонных диодных лазеров, где происходят оптические переходы, связанные с рекомбинацией электронов и дырок, которые преодолевают запрещённую зону полупроводника, в ККЛ все переходы совершаются электронами только внутри одной подзоны [21].

На сегодняшний день разработано и создано несколько типов терагерцевых ККЛ:

— на основе chirпированных свёрхрешёток;

- на переходах из связанного состояния в континуум (bound to continuum);
- на основе резонансного взаимодействия с фононами (resonant-phonon);
- на базе гибридных «перемежающихся» структур (hybrid interlaced). Здесь под гибридом имеется в виду дизайн активной среды ККЛ, объединяющий два подхода: рабочий переход из связанного состояния в континуум и опустошение континуума посредством переходов при резонансном взаимодействии с оптическими фононами. Под «перемежающимися» структурами понимается чередование в структуре слоёв, где осуществляются переходы при взаимодействии с фотонами и фононами.

Для успешного применения ККЛ в терагерцевой спектроскопии высокого разрешения необходимо решить ряд важных задач.

1.1. Направленность излучения квантовых каскадных лазеров

Низкая направленность излучения ККЛ и неоднородный волновой фронт связаны с субволновым поперечным размером лазерной структуры. Ряд последних работ был посвящён улучшению направленности и структуры излучения терагерцевых ККЛ с помощью плазмонной антенны, внешнего резонатора, дизайна резонатора для вертикального вывода излучения, рупорной антенны и др. [24, 25]. Полученные результаты показали возможность существенного улучшения направленности, однако надёжный и простой способ получения аксиально-симметричного узкого пучка с однородным волновым фронтом до сих пор не найден. Одним из путей решения этой проблемы может стать использование интерференции излучения от продольного распределения источников в резонаторе лазера [26]. Этот путь требует разработки резонатора ККЛ с длиной, много большей длины волны ККЛ, для достижения синхронизма продольной фазовой скорости оптической моды со световой скоростью излучения.

1.2. Одномодовый режим генерации квантовых каскадных лазеров

Другой важной проблемой, препятствующей использованию ККЛ в терагерцевой спектроскопии высокого разрешения, является многомодовый режим их генерации. Селекцию продольных мод ККЛ в пределах полосы усиления предлагается осуществлять с помощью распределённой обратной связи, которая создаётся периодической решёткой на продольной грани резонатора (щелей в металлическом контакте или модуляция показателя преломления). Селекция низшей поперечной моды обеспечивается малыми поперечными размерами резонатора. Перестройка частоты ККЛ в пределах $0,05 \text{ см}^{-1}$ может осуществляться модуляцией инжекционного тока и изменением температуры (в пределах $0,1 \text{ см}^{-1}$) [27]. Небольшое увеличение диапазона перестройки (до $0,4 \text{ см}^{-1}$) возможно с использованием внешних резонаторов с подвижными зеркалами или с помощью решёток. В более широких пределах (порядка 10 см^{-1}) могут перестраиваться квантовые каскадные лазеры, основанные на нелокальных переходах, за счёт штарковского сдвига частоты перехода [28].

1.3. Исследование спектральных характеристик квантовых каскадных лазеров

Высокие токи накачки, а также высокий импеданс излучателя при низких температурах вызывают заметный разогрев чипа ККЛ, что является источником нестабильности как амплитудных (мощностных), так и фазовых (частотных) характеристик лазерного излучения. В связи с этим для создания источника излучения для спектрометра терагерцевого частотного диапазона

необходимо изучение особенностей генерации излучения ККЛ (вольт-амперные характеристики, спектры, излучательные и временные характеристики), кроме того необходимо исследование влияния конструкционных особенностей ККЛ на шумовые характеристики излучения. В случае значительных флуктуаций амплитуды сигнала ККЛ флуктуации тока в его внешней цепи и сопротивление последней оказывают сильное влияние на интенсивность амплитудных шумов. Оба механизма конкурируют между собой, т. к. большой импеданс входной цепи, с одной стороны, подавляет флуктуации тока, вызванные, например, источником питания, а с другой — вносит существенные тепловые шумы во внешнюю цепь.

Для измерений спектральных и модуляционных характеристик ККЛ был разработан и создан специализированный стенд. Измерения шумовых характеристик ККЛ проводились при низких температурах, $T = 7 \div 50$ К. При этом ККЛ размещался на медном хладопроводе в гелиевом криостате замкнутого цикла «DISPLEX DE-202S». Блок управления температурой криостата позволял поддерживать автоматически заданную температуру и контролировать её с помощью термодатчика, расположенного на медном хладопроводе.

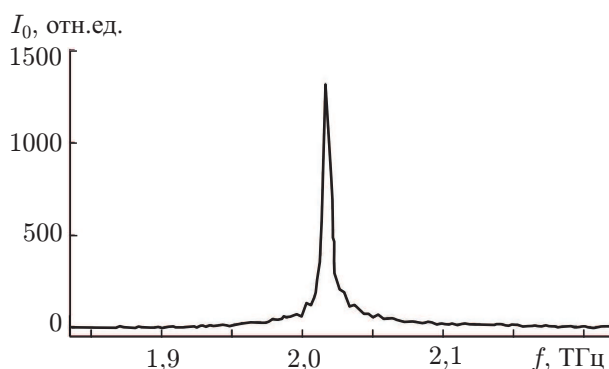


Рис. 1. Спектр ККЛ в свободном режиме. Максимальная интенсивность $I_0 = 1335$ отн. ед. достигается при частоте $f = 2,017$ ТГц

до 5 МГц. Спектроанализатор с такими параметрами позволяет измерять ожидаемые амплитудные и фазовые шумовые характеристики ККЛ с большой точностью. При измерениях необходимо обеспечить перенос спектра в низкочастотный диапазон без фазовых и амплитудных искажений. Для этих целей в качестве опорного был выбран генератор на основе ЛОВ диапазона $118 \div 178$ ГГц с системой фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). Высокие спектральные характеристики опорного генератора (например, долговременная стабильность частоты лучше (т. е. ниже) 10^{-8} , спектральная плотность мощности фазовых шумов при отстройке от несущей частоты на 10 МГц менее -100 дБ/Гц) позволяют не учитывать его фазовые и амплитудные шумы в измеряемом результирующем спектре в низкочастотном диапазоне.

Гармонический смеситель, применяемый в измерительной схеме, всегда должен работать в линейном режиме преобразования сигнала из терагерцевого в низкочастотный диапазон. В качестве такого устройства используется смеситель на основе полупроводниковых наноструктур — квантовых полупроводниковых сверхрешёток, рабочий частотный диапазон которых доходит до 8,1 ТГц [1].

Шумы свободно генерирующего ККЛ содержат фазовые и амплитудные составляющие. Как правило, фазовые шумы преобладают над амплитудными. Для тестирования характеристик фазовых шумов ККЛ был разработан измерительный стенд.

В тракте промежуточной частоты $f_{IF} = 500$ МГц после гармонического смесителя установлен линейный мал шумящий усилитель M42136 с равномерной амплитудно-частотной характеристи-

Измерение шумовых характеристик ККЛ в терагерцевом диапазоне частот рациональнее проводить гетеродинным методом. Такой метод предусматривает перенос спектра свободно генерирующего ККЛ из терагерцевого в низкочастотный диапазон. В диапазоне частот до 26 ГГц серийно выпускаются анализаторы спектра, обладающие большим динамическим диапазоном, малым уровнем собственных шумов и хорошим частотным разрешением. Анализатор спектра «Agilent Technologies E4402B», работающий в диапазоне от 9 кГц до 3 ГГц, имеет динамический диапазон 90,5 дБ, уровень собственных шумов -151 дБм/Гц и полосу анализа от 10 Гц

кой, который, как и смеситель, не вносит искажений в спектр измеряемого сигнала. Собственные шумы усилителя практически не влияют на спектр измеряемого сигнала. Для отделения амплитудных шумов от фазовых шумов ККЛ в тракте промежуточной частоты был установлен ограничитель уровня сигнала. За ним для измерения спектра на спектроанализаторе был установлен делитель частоты (коэффициент деления равен $N = 10$).

Перед началом измерений стенд был прокалброван.

Измерения амплитудных шумов ККЛ проводятся двумя методами. В первом случае измеряется спектр амплитудных и фазовых шумов на измерительной установке, в которой отсутствовали ограничитель уровня сигнала и делитель частоты. Измеренный спектр на промежуточной частоте $f_{IF} = 500$ МГц содержал как амплитудные, так и фазовые шумы. Для вычисления спектральной мощности амплитудных шумов необходимо из измеренного спектра шумов вычесть спектр мощности фазовых шумов. При этом измеренную мощность фазовых шумов необходимо увеличить на величину $20 \lg N$.

Во втором варианте измерения амплитудных шумов в тракте промежуточной частоты после малощумящего усилителя установлен амплитудный детектор, низкочастотный фильтр и усилитель постоянного тока, сигнал с которого поступает на анализатор спектра. Фильтр имеет частоту среза 10 МГц и пропускает низкочастотный сигнал амплитудной модуляции. Для измерения низкочастотной части спектра сигнала необходимо использовать анализатор спектра СК4-56 с диапазоном частот 0,01÷60 кГц, для измерений высокочастотной части спектра — Е4402В.

Спектр ККЛ (частота генерации равна 2,017 ТГц) в свободном режиме приведён на рис. 1. Ширина линии генерации ККЛ в этом режиме составляет несколько десятков мегагерц, что неприемлемо для терагерцевой спектроскопии высокого разрешения.

1.4. Стабилизация частоты (фазы) квантового каскадного лазера

Важным этапом в разработке прецизионного источника излучения на основе ККЛ является создание системы ФАПЧ. Стабилизация ККЛ на частоте 3,0 ТГц по сигналу молекулярного лазера позволила получить ширину линии излучения с учётом накопления сигнала на уровне 65 кГц [29]. В других экспериментах с использованием газовых лазеров была зафиксирована ширина линии ККЛ меньше 30 кГц [26, 30]. В работе [15] сообщается о реализации на основе ККЛ гетеродина на частоте 2,8 ТГц со смесителем на горячих электронах.

Существенным недостатком таких систем является привязка к частоте генерации молекулярного лазера, что не позволяет проводить широкодиапазонные исследования. Фазовая автоподстройка частоты ККЛ по высокостабильному источнику излучения микроволнового диапазона может обеспечить как широкий диапазон частот, так и плавную перестройку частоты в его пределах. Первая попытка разработки такой системы была предпринята в работе [31]. С использованием сверхпроводящего смесителя и опорного микроволнового генератора частоты авторам удалось добиться ширины линии генерации ККЛ на уровне 10 Гц. Однако, судя по спектру стабилизированного ККЛ, речь идёт о реализации эффекта затягивания частоты, что не является режимом ФАПЧ.

Успешный пример создания системы фазовой автоподстройки частоты ККЛ представлен в работе [32]. Основными компонентами цепи ФАПЧ являются блок фазового детектора, блок частотного детектора и блок управления (см. рис. 2). Квантовый каскадный лазер помещён в гелиевый криостат с окном из высокоплотного полиэтилена (с толщиной 1,2 мм). Терагерцевое излучение ККЛ направляется в гармонический смеситель, расположенный вне криостата, через две линзы из высокоплотного полиэтилена, которые используются в стандартной телескопической конфигурации для фокусировки излучения в рупоре гармонического смесителя. Частота лазера

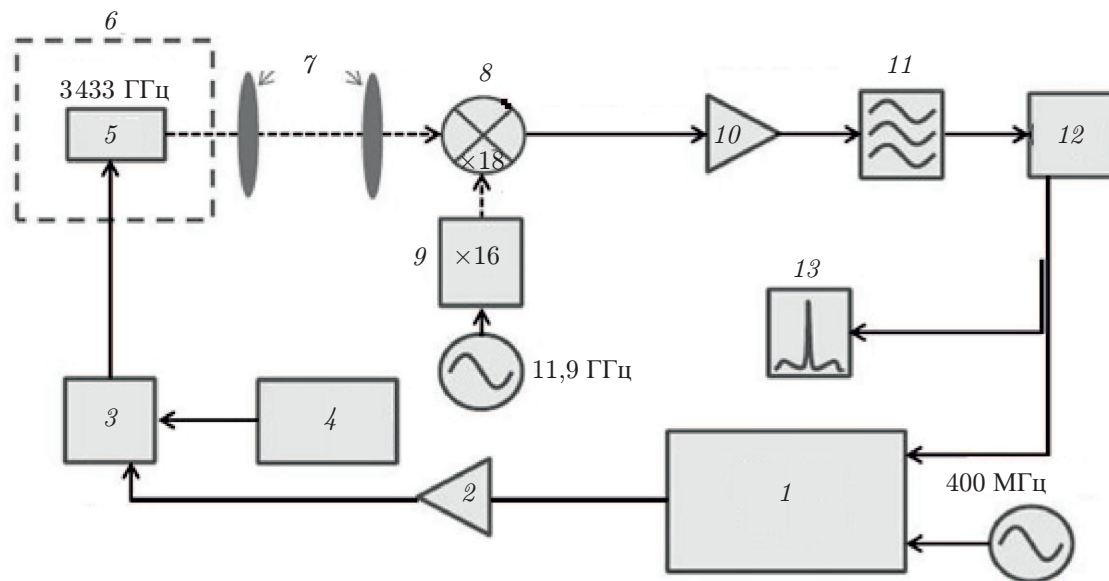


Рис. 2. Блок-схема системы ФАПЧ квантового каскадного лазера [32]: 1 — модуль ФАПЧ, 2 — усилитель постоянного тока, 3 — блок суммирования, 4 — смещение ККЛ, 5 — ККЛ, 6 — криостат ККЛ, 7 — линзы из полиэтилена, 8 — смеситель на квантовых полупроводниковых сверхрешётках, 9 — цепь усилителя-умножителя, 10 — усилитель промежуточной частоты (400 МГц), 11 — низкочастотный фильтр (1 ГГц), 12 — расщепитель мощности (−3 дБ), 13 — анализатор спектра

выбирается в окне прозрачности атмосферы, так что потери в воздухе минимальны. Излучение от опорного синтезатора частоты, в качестве которого выбран источник излучения фирмы «Virginia Diodes», представляющий собой цепь микроволновый синтезатор—усилитель—умножитель, с частотой 190,744 ГГц и мощностью 8 мВт поступает в гармонический смеситель. Этот источник излучения представляет собой систему с четырёхкратным удвоением частоты микроволнового синтезатора (частота 11,92 ГГц, фирма «Rohde&Schwarz»). Восемнадцатая гармоника опорного синтезатора на частоте 3 433,4 ГГц смешивается с частотой излучения ККЛ 3 433 ГГц смесителем на квантовых полупроводниковых сверхрешётках, в результате чего получается сигнал биений с частотой 400 МГц и отношением сигнал/шум 60 дБ. Этот сигнал промежуточной частоты усиливается многокаскадными усилителями, работающими при комнатной температуре, с общим усилением 26 дБ и фильтруется с использованием фильтра низких частот с полосой 1 ГГц перед прохождением через устройство связи для получения сигнала, подающегося на радиочастотный спектроанализатор. Сигнал делится с использованием расщепителя мощности (3 дБ) между детекторными блоками — фазовым и частотным. Петля ФАПЧ завершается комбинированием сигналов фазовой обратной связи с смещением постоянного тока ККЛ (14÷16 В от блока питания «Agilent») с использованием широкодиапазонного (полоса 20 МГц) суммирующего блока. Выход с сумматора подаётся непосредственно на ККЛ. Сигнал фазовой ошибки генерируется модулем широкополосной системы ФАПЧ, которая имеет ширину полосы 40 МГц и регулируемое усиление петли ФАПЧ. Интегрирующий фильтр, размещённый после фазового детектора, обеспечивает стабильную ФАПЧ второго порядка. Выходной сигнал обратной связи от ФАПЧ в дальнейшем усиливается двумя усилителями, работающими при комнатной температуре с откликом сигнала постоянного тока до 7 МГц. Эти усилители ограничивают ширину диапазона всей петли ФАПЧ до 7 МГц, которой более чем достаточно для ФАПЧ квантовых каскадных лазеров терагерцевого диапазона, но при необходимости она может быть увеличена. Наблюдение сигнала промежуточной частоты с использованием спектроанализатора обеспечивает быстрый и

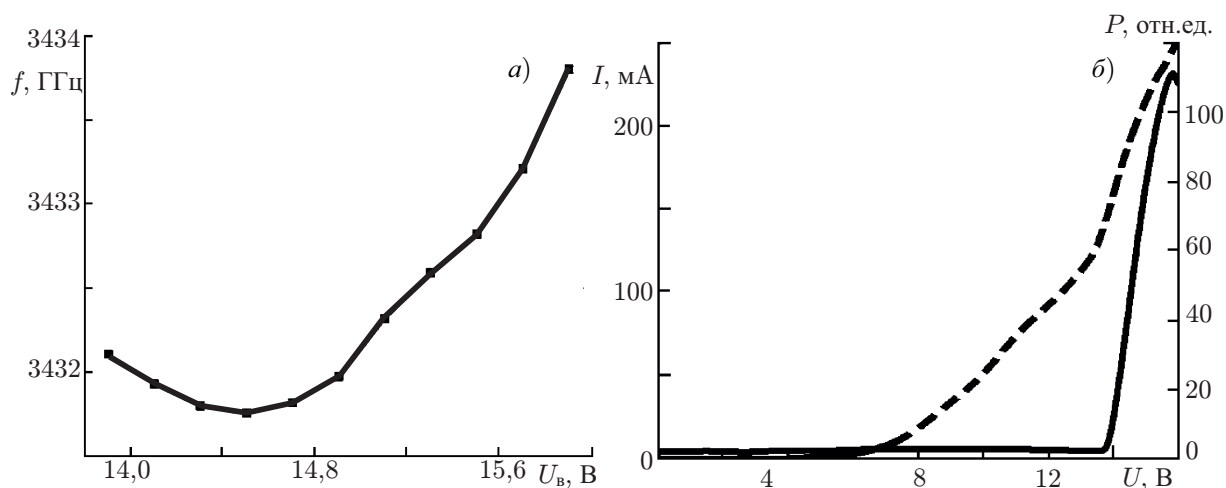


Рис. 3. Зависимость частоты излучения ККЛ в непрерывном режиме от напряжения смещения U_b при постоянной температуре в криостате 25 К (а) и зависимость тока I (штриховая линия) и мощности излучения ККЛ P (сплошная линия) от напряжения U согласно [32] (б)

точный способ измерения частоты излучения ККЛ.

Этот метод был первоначально использован для получения характеристики зависимости частоты от напряжения смещения для данного ККЛ, чтобы подтвердить его работу как генератора, управляемого напряжением. Это является фундаментальным требованием для фазовой/частотной автоподстройки. Данный лазер имеет диапазон перестройки от 3431,75 до 3433,80 ГГц при диапазоне напряжений смещения от 13,8 до 15,8 В, который был определён при постоянной температуре в криостате 25 К путём тщательного контроля потока жидкого гелия для каждой точки смещения. Видно, что при напряжении 14,5 В коэффициент перестройки меняет знак и остаётся положительным при более высоких напряжениях (см. рис. 3).

Эксперимент по ФАПЧ квантового каскадного лазера с частотой 3,4 ТГц проводился с использованием электроники, работающей при комнатной температуре. Исследуемый ККЛ с распределённой обратной связью третьего порядка работал в одномодовом режиме. Лазер состоит из активной области GaAs/AlGaAs с толщиной 10 мкм и шириной 17 мкм, выращенной методом молекулярно-пучковой эпитаксии с 27 поперечными периодами гофрированной дифракционной решётки на длине лазера, равной 1,07 мм.

Сигнал биений может быть на 30 дБ выше уровня шума для полосы разрешения спектроанализатора в 1 МГц. При использовании системы ФАПЧ с полосой управления 7 МГц нами также было обнаружено, что мощность излучения после фазовой автоподстройки частоты составляет 96 % полной мощности ККЛ. Спектр сигнала биений между сигналом ККЛ и гармоникой

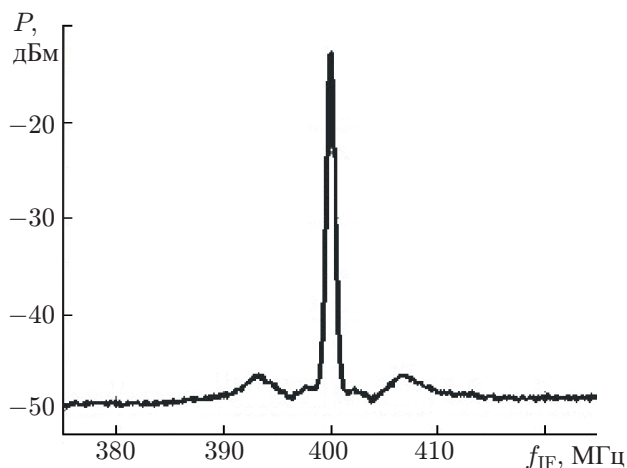


Рис. 4. Спектр сигнала биений ФАПЧ между сигналом ККЛ и опорным сигналом согласно [32]. Мощность ККЛ составляет 0,3 мВт, частота сигнала опорного синтезатора 190 ГГц, мощность сигнала опорного синтезатора 7 мВт, номер гармоники 18, ширина полосы пропускания приёмника 300 кГц

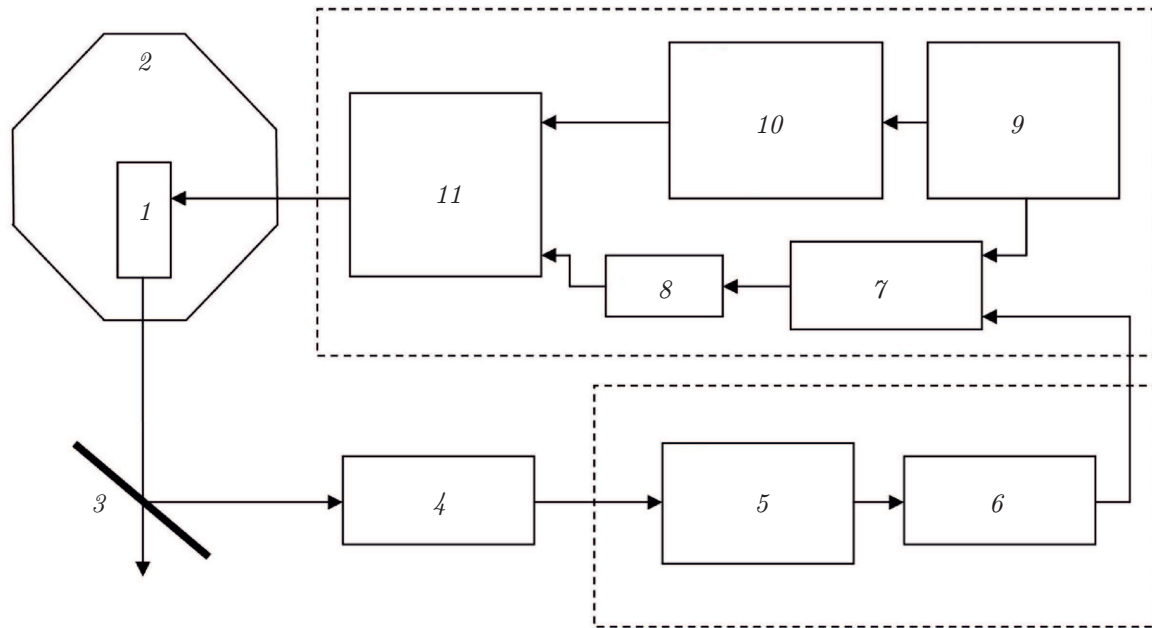


Рис. 5. Система стабилизации частоты ККЛ по линии поглощения паров газа: 1 — ККЛ, 2 — криостат, 3 — расщепитель пучка (полупрозрачное зеркало), 4 — ячейка (H_2O), 5 — детектор на квантовых полупроводниковых сверхрешётках, 6 — усилитель, 7 — фазовый детектор, 8 — низкочастотный фильтр, 9 — генератор сигнала модуляции, 10 — устройство регулировки амплитуды и фазы, 11 — источник питания лазера и сумматор

опорного синтезатора частоты представлен на рис. 4.

С использованием гармонического смесителя на квантовых полупроводниковых сверхрешётках, охлаждаемого до температуры 10 К, была разработана и реализована система ФАПЧ лазера на частоте 4,7 ТГц [33]. Лазер и гармонический смеситель на этих сверхрешётках размещались рядом в гелиевом криостате. Используемый ККЛ работал в одномодовом режиме. Это был ККЛ с распределённой обратной связью третьего порядка с низкой потребляемой мощностью (0,5 мВт) и мощностью излучения около 0,25 мВт. Связь между ККЛ и диодом на сверхрешётках осуществлялась прямым взаимодействием рупор в рупор, которого достаточно для демонстрации эффекта, но высокоточная оптика может дать улучшение от 3 до 10 дБ. Гармонический смеситель на сверхрешётке генерировал сигнал биений на частоте 400 МГц, являющийся результатом смещения сигнала ККЛ с 24-й гармоникой сигнала опорного синтезатора с частотой 198 ГГц. Опорный сигнал с мощностью 10 мВт от внешнего микроволнового источника подаётся через окно в криостат. Сигнал биений, превышающий уровень шума примерно на 10 дБ, является достаточным, чтобы продемонстрировать частотную автоподстройку линии лазера. Измеренная частотно-автоподстроенная линия с шириной 700 кГц имеет фойгтовский профиль из-за дополнительных шумов в системе. Это соответствует ширине в 100 кГц лоренцевской формы линии свободно генерирующего ККЛ. Достигнутое отношение сигнал/шум для биений является достаточно высоким для стабильной ФАПЧ. В настоящее время частота разработанной с использованием гармонического смесителя на квантовых полупроводниковых сверхрешётках системы ФАПЧ для ККЛ (4,7 ТГц) является наивысшей для таких систем, о которых сообщалось в литературе.

Для создания системы ФАПЧ терагерцевого диапазона необходима генерация опорного сигнала на высоких частотах, для чего может быть применён успешно реализованный нами подход, заключающийся в использовании гармоник синтезатора частоты в качестве опорного сигнала

[19]. Представляется важным получение гармоник умножаемого высокостабильного генератора до частоты в несколько терагерц, что позволит осуществлять как стабилизацию частоты (фазы) ККЛ, так и введение необходимых для работы спектрометра модуляций, обеспечивающих быстрое управление частотой ККЛ. При этом сложность представляет получение гармоник с большими номерами.

Другим вариантом стабилизации частоты ККЛ является система стабилизации частоты ККЛ по линии поглощения паров газа (см. рис. 5), которая разработана и реализована в данной работе.

Известно, что линия молекулярного перехода может быть использована как высокостабильный источник опорной частоты. Этот подход применялся одним из авторов в 4-миллиметровом диапазоне длин волн для стабилизации частоты ЛОВ [34]. С помощью перестраиваемого в широком диапазоне частот генератора, модулированного по частоте сигналом низкочастотного генератора, формировались боковые спектральные составляющие излучения ЛОВ. Захват частоты ЛОВ осуществлялся на одной из боковых составляющих спектра. Перестройка высокочастотного генератора по частоте приводит к соответствующему сдвигу несущей частоты ЛОВ. Широкая полоса перестройки обеспечивалась широкополосным усилителем и фазовым детектором.

2. ПРИЁМНИК ТЕРАГЕРЦЕВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ БОЛОМЕТРА НА ГОРЯЧИХ ЭЛЕКТРОНАХ

Разработке приёмных систем в терагерцевом диапазоне частот посвящено большое число работ [35–40]. Для регистрации непрерывного излучения в диапазоне $100\div 1\,600$ ГГц разработаны сверхпроводящие приёмники на основе структур сверхпроводник–изолятор–сверхпроводник (СИС-смесители), чувствительность которых близка к квантовому пределу [35]. Их полоса приёма составляет порядка 10 %. Примером таких систем являются СИС-смесители на основе туннельных переходов Nb–AlO_x–Nb [36]. Шумовая температура лучших образцов СИС-смесителей составляет 26 К при частоте 500 ГГц, 70 К при 680 ГГц, 220 К при 950 ГГц и 350 К при 1,1 ТГц. Для более высоких частот ($f \geq 2,0$ ТГц) чувствительность таких болометров на порядок меньше.

Приёмники и смесители на горячих электронах [37–39] работают в диапазоне частот до $f = 6,0$ ТГц при гелиевых температурах. В основе работы этих приборов лежит эффект разогрева электронов в тонких плёнках сверхпроводников при поглощении ими электромагнитного излучения. Нагрев болометра осуществляется электронным газом в сверхпроводящей плёнке, переход которого в сверхпроводящее состояние может использоваться как датчик электронной температуры, что позволяет применять болометр на горячих электронах в качестве эффективного смесителя за счёт малого времени срабатывания (времени электрон-фононного взаимодействия) [40]. Для обеспечения нужной рабочей температуры детектор помещается в гелиевый криостат с оптическими окнами. Детектор представляет собой чувствительный элемент, встроенный в логопериодическую спиральную антенну, которая, в свою очередь, прижата к плоской стороне вытянутой сферической линзы [41, 42].

Лабораторные исследования показали, что в интервале частот $1\div 6$ ТГц эти смесители на сегодняшний день не имеют себе равных: их типичная шумовая температура изменяется от 1 000 К на частоте 700 ГГц до 8 800 К на частоте 5,2 ТГц (см. рис. 6).

Технические характеристики детекторов на основе болометров на горячих электронах [43] приведены в табл. 1. На данный момент такие детекторы являются единственными устройствами, позволяющими работать с частотно/фазово-модулированным излучением на частотах в несколько терагерц с высокими (порядка 1 МГц) частотами модуляции. Есть работы, в которых представлены результаты применения этих устройств в терагерцевых системах с гетеродинным приёмом, где роль гетеродина играет ККЛ [44, 45]. Реализованные на сегодняшний день характеристики

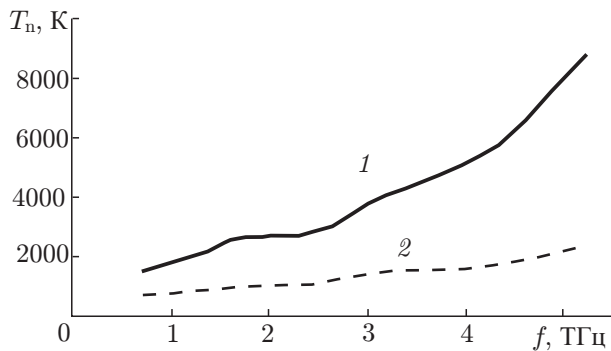


Рис. 6. Зависимости шумовой температуры приёмника (кривая 1) и смесителя (2) от частоты падающего излучения согласно [37]

ристик делает болометры на горячих электронах наиболее предпочтительными для регистрации узких линий в терагерцевом диапазоне. У детекторов на основе диодов с барьером Шоттки или СИС-структур имеются существенные недостатки, которые ограничивают их использование в предлагаемой системе. Так, смесители на основе диодов с барьером Шоттки требуют большой мощности гетеродина, а их чувствительность резко падает на частотах выше 1 ТГц. Смесители на СИС-структурах хорошо работают на частотах около 1 ТГц и ниже. Смесители на основе болометров на горячих электронах, где используется маломощный гетеродин, имеют высокую чувствительность.

3. СПЕКТРОМЕТР ТЕРАГЕРЦЕВОГО ДИАПАЗОНА НА КВАНТОВОМ КАСКАДНОМ ЛАЗЕРЕ

Блок-схемы возможных типов терагерцевых спектрометров высокого разрешения на основе ККЛ представлены на рис. 7 и 8. Для создания нестационарного терагерцевого спектрометра высокого разрешения, как следует из вышеизложенного, необходимы одномодовые терагерцевые ККЛ с высокими рабочими температурами (около 300 К), мощностью несколько десятков милливатт и улучшенными направленностью и структурой выходного излучения. Для управления излучением ККЛ требуется также система быстрой частотной модуляции, связанная с системой ФАПЧ. Источник терагерцевого излучения на основе ККЛ, используемый для возбуждения молекул, также может быть использован как гетеродин, для чего необходима разработка малошумящего широкополосного смесителя и его интеграция с ККЛ.

В другом варианте источника излучения терагерцевого диапазона частот в прототипе спектрометра этого диапазона предлагается использовать ККЛ с системой стабилизации частоты,

смесителей на основе болометров на горячих электронах, а также предварительные результаты их интегрирования в единую систему с ККЛ позволяют рассчитывать на создание быстродействующего и высокочувствительного приёмника для нестационарного прецизионного спектрометра терагерцевого диапазона.

Детекторы на горячих электронах в сверхпроводящей тонкой плёнке NbN обеспечивают чувствительность, приближающуюся на частотах до 5 ТГц к квантовому пределу $8h\nu/k$, где h — постоянная Планка, k — постоянная Больцмана и время отклика порядка нескольких микросекунд одновременно [37]. Сочетание этих характе-

Таблица 1

Тип детектора	1/1a	2/2a	3/3a
Диапазон частот, ТГц	0,3÷3	25÷70	1÷30
Эквивалентная мощность шума (NEP), Вт·Гц ^{-1/2}	$(5÷7) \cdot 10^{-14} / (3÷5) \cdot 10^{-13}$	$(1÷2) \cdot 10^{-12} / (4÷5) \cdot 10^{-12}$	$(1÷2) \cdot 10^{-11} / (6÷8) \cdot 10^{-11}$
Время отклика, нс	1/0,05	1/0,05	1/0,05
Динамический диапазон, мкВт	1	50	105

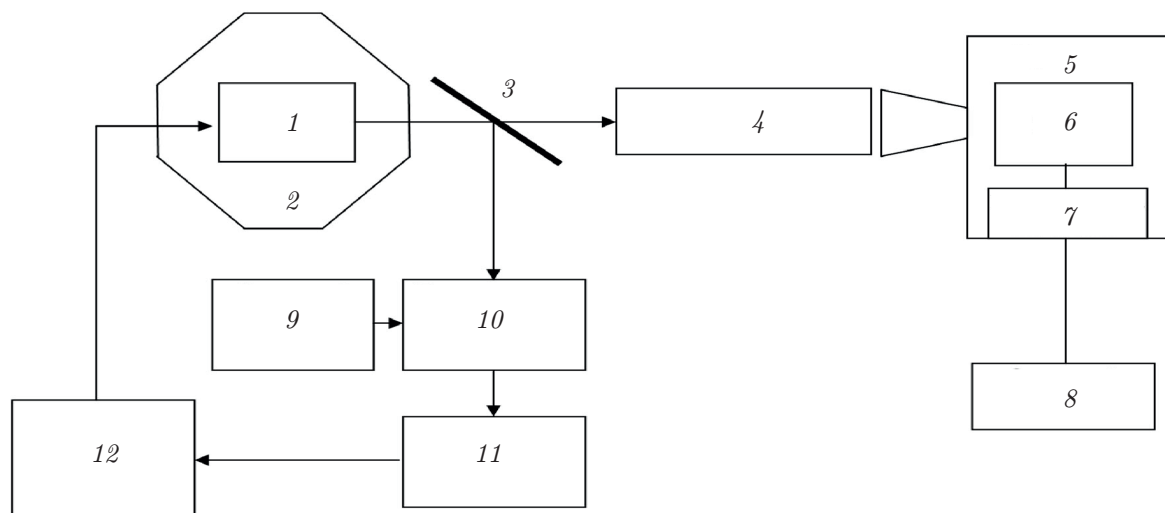


Рис. 7. Блок-схема прототипа спектрометра терагерцевого частотного диапазона на основе ККЛ и болометра на горячих электронах с системой ФАПЧ лазера: 1 — ККЛ, 2 и 5 — криостаты, 3 — расщепитель пучка (полупрозрачное зеркало), 4 — ячейка с газом, 6 — болометр на горячих электронах, 7 — умножитель частоты на квантовых полупроводниковых сверхрешётках, 8 — опорный синтезатор, 9 — опорный генератор, 10 — гармонический смеситель, 11 — ФАПЧ, 12 — блок питания и управления ККЛ

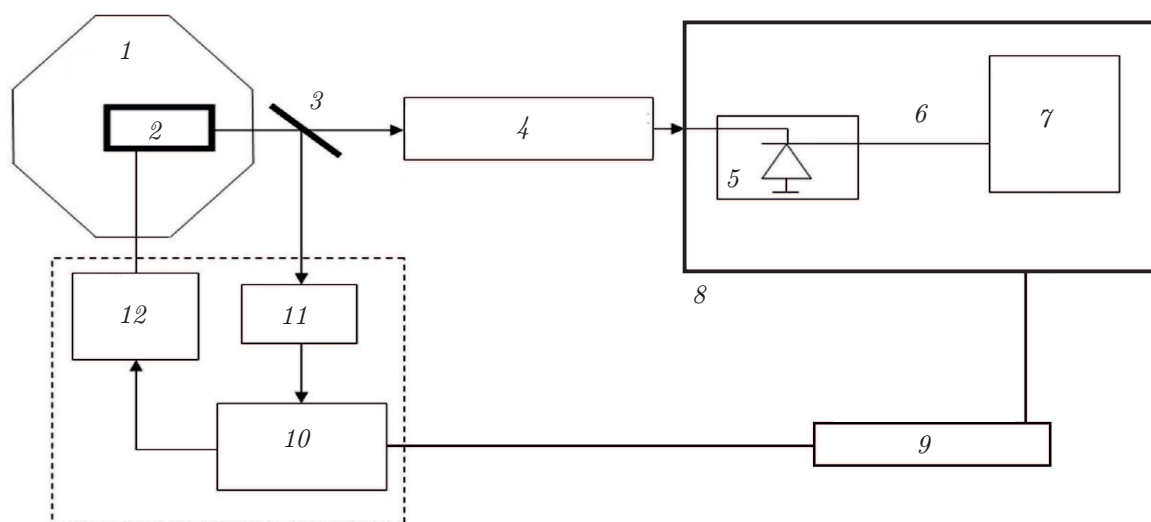


Рис. 8. Блок-схема прототипа спектрометра терагерцевого частотного диапазона на основе ККЛ и болометра на горячих электронах со стабилизацией частоты ККЛ по линии поглощения газа: 1 и 6 — криостаты, 2 — ККЛ, 3 — расщепитель пучка (полупрозрачное зеркало), 4 — ячейка с исследуемым газом (NO), 5 — детектор на основе болометра на горячих электронах, 7 — гетеродин с системой ФАПЧ, 8 — приёмный блок, 9 — персональный компьютер, 10 — частотная автоподстройка, 11 — ячейка (NO), 12 — блок питания ККЛ

выполненной по линии поглощения газа (воды или NO; см. рис. 8).

Детектирование осуществляется с помощью гетеродинного приёмника, реализованного на основе болометра на горячих электронах. В качестве гетеродина используются синтезатор частот на основе ЛОВ диапазона $117 \div 178$ ГГц и умножитель частоты на основе полупроводниковых сверхрешёток, причём умножитель помещён в криостат. Затем происходит обработка данных

на компьютере. Ключевая проблема отладки такого спектрометра заключается в оптимизации рабочих параметров входящих в спектрометры блоков и устройств.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе показана принципиальная возможность реализации спектрометра высокого разрешения терагерцевого частотного диапазона с использованием ККЛ в качестве источника излучения. Рассмотрена возможность стабилизации частоты как с применением классической системы ФАПЧ, так и с использованием линии поглощения газа.

Предполагается, что использование стабилизации частоты ККЛ по спектральной линии поглощения газа может существенно упростить и удешевить создание спектрометра и позволит разработать компактный нестационарный спектрометр терагерцевого диапазона с высокой чувствительностью и спектральным разрешением для быстрого детектирования химических агентов и взрывчатых веществ в атмосферном воздухе.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект 15-12-10035).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Vaks V. // J. Infrared, Millimeter and Terahertz Waves. 2012. V. 33. P. 43.
2. Мухин А. А., Иванов В. Ю., Травкин В. Д. и др. // Успехи физ. наук. 2009. Т. 179, № 8. С. 904.
3. Вакс В. Л., Домрачева Е. Г., Собакинская Е. А., Черняева М. Б. // Успехи физ. наук. 2014. Т. 184, № 7. С. 739.
4. Dicke R. H., Romer R. H. // Rev. Sci. Instrum. 1955. V. 26. P. 915.
5. Ekkers J., Flygare W. H. // Rev. Sci. Instrum. 1976. V. 47. P. 448.
6. Balle T. J., Flygare W. H. // Rev. Sci. Instrum. 1981. V. 52. P. 33.
7. McGurk J. C., Schmalz T. G., Flygare W. H. // J. Chem. Phys. 1974. V. 60. P. 4181.
8. Khodos V. V., Ryndyk D. A., Vaks V. L. // Eur. Phys. J. Appl. Phys. 2004. V. 25. P. 203.
9. Братман В. Л., Литвак А. Г., Суворов Е. В. // Успехи физ. наук. 2011. Т. 181, № 8. С. 867.
10. Kohler R., Tredicucci A., Beltram F., et al. // Nature. 2002. V. 417, Iss. 2. P. 156.
11. Belkin M. A., Fan J. A., Hormoz S., et al. // Optics Express. 2008. V. 16, Iss. 5. P. 3242.
12. Kumar S., Hu Q., Reno J. L. // Appl. Phys. Lett. 2009. V. 94. Art. no. 131105.
13. Belkin M. A., Capasso F. // Phys. Scr. 2015. V. 90. Art. no. 118002.
14. Fatholouloumi S., Dupont E., Chan C. W. I., et al. // Optics Express. 2012. V. 20, No. 4. P. 3866.
15. Gao J. R., Hovenier J. N., Yang Z. Q., et al. // Appl. Phys. Lett. 2005. V. 86, Iss. 24. Art. no. 244104.
16. Wright S., Duxbury G., Langford N. // Appl. Phys. B. 2006. V. 85. P. 243.
17. Ma J., Cheesman A., Ashfold M. N. R., et al. // J. Appl. Physics. 2009. V. 106. Art. no. 033305.
18. Lewicki R., Liu K., Day T., Tittel F. K. // Proc. SPIE. 2012. V. 8268. P. 82682H-1.
19. Lu Q. Y., Slivken S., Bandyopadhyay N., et al. // Appl. Phys. Lett. 2014. V. 105, Iss. 20. Art. no. 201102.
20. Вакс В. Л., Панин А. Н., Басов С. А. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2009. Т. 52, № 7. С. 569.
21. Williams B. // Nature Photonics. 2007. V. 1. P. 517.
22. Карапузиков А. И., Набиев Ш. Ш., Надеждинский А. И., Пономарев Ю. Н. // Оптика атмосферы и океана. 2010. Т. 23, № 10. С. 894.

23. Sorokina I. T., Vodopyanov K. L. (eds.) Solid-state mid-infrared laser sources. // Ser. Topics in Applied Physics. Berlin-Heidelberg: Springer. 2003. P. 89.
24. Yu N., Fan J., Wang Q., Edamura T., et al. // Nature Photonics. 2008. V. 2. P. 564.
25. Maineult W., Gellie P., Andronico A., et al. // Appl. Phys. Lett. 2008. V. 93. Art. no. 183508.
26. Orlova E. E., Hovenier J. N., Klaassen T. O., et al. // Phys. Rev. Lett. 2006. V. 96. Art. no. 173904.
27. Barkan A., Tittel F. K., Mittleman D. M., et al. // Optics Letters. 2004. V. 29, Iss. 6. P. 575.
28. Walther C., Fischer M., Scalari G., et al. // Appl. Phys. Lett. 2007. V. 91. Art. no. 131122.
29. Betz A. L., Boreiko R. T., Williams B. S., et al. // Optics Lett. 2005. V. 30, Iss. 14. P. 1837.
30. Barbieri S., Alton J., Beere H. E., et al. // Optics Lett. 2004. V. 29, Iss. 14. P. 1632.
31. Hovenier J. N., Adam A. J. L., Kasalynas I., et al. // Proc. 2006 11th Annual Symp. IEEE/LEOS Benelux Chapter. Eindhoven, The Netherlands. 30 November–1 December 2006. P. 125.
32. Hayton D. J., Khudchenko A., Pavelyev D. G. et al. // Appl. Phys. Lett. 2013. V. 103. Art. no. 051115.
33. Khudchenko A. V., Hayton D. J., Pavelyev D. G., et al. // Proc. 39th Intern. Conf. Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2014). Tucson, Arizona, USA. 14–19 September 2014. Art. no. 2811642.
34. Pripolsin S. I., Spivak E. V., Vaks V. L. // Proc. Int. Conf. Millimeter and Submillimeter Waves and Appl. San-Diego, USA, 10–14 Jan. 1994. P. 196.
35. Dieleman P. PhD Thesis: Fundamental limitations of THz and Niobium nitride SIS mixers // Department of Applied Physics of the University of Groningen. 1997. 124 p.
36. Кошелев В. П., Шитов С. В., Филиппенко Л. В. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2003. Т. 46. С. 687.
37. Гольцман Г. Н., Лудков Д. Н. // Изв. вузов. Радиофизика. 2003. Т. 46, № 8–9. С. 671.
38. Jiang L., Shiba S., Shimbo K., et al. // Proc. 19th Int. Symp. on Space Terahertz Technology. Groningen. 28–30 April 2008. P. 54.
39. Khosropanah P., Gao J. R., Laauwen W. M., et al. // Appl. Phys. Lett. 2007. V. 91. Art. no. 221111.
40. Гольцман Г. // Соросовский образовательный журн. 1996. № 4. С. 90.
41. Zhang W., Miao W., Yao Q. J., et al. // Phys. Procedia. 2012. V. 36. P. 334.
42. Shurakov A., Seliverstov S., Kaurova N., et al. // IEEE Trans. Terahertz Science and Technology. 2012. V. 2. P. 400.
43. Пентин И. В., Смирнов К. В., Вахтомин Ю. Б. и др. // Физика, электроника, нанотехнологии. Труды МФТИ. 2011. Т. 3, № 2. С. 38.
44. Khosropanah P., Zhang W., Hovenier J. N., et al. // J. Appl. Phys. 2008. V. 104. Art. no. 113106.
45. Richter H., Semenov A. D., Pavlov S. G., et al. // Appl. Phys. Lett. 2008. V. 93. Art. no. 141108.

Поступила в редакцию 13 октября 2015 г.; принята в печать 12 января 2016 г.

HIGH-RESOLUTION TERAHERTZ SPECTROMETER BASED ON QUANTUM CASCADE LASERS

V. L. Vaks, E. G. Domracheva, Yu. P. Korneeva, L. S. Rev'in, I. V. Tretyakov, V. A. Anfert'ev, and M. B. Chernyaeva

We consider the possibility of realizing the terahertz spectrometer using the radiation sources based on the quantum cascade lasers and the receiving system based on the hot-electron bolometers. The precision measurements of the amplitude and phase noise of the quantum cascade lasers of this frequency range are performed. The systems for stabilizing the quantum cascade laser frequency are described. The flow diagrams of the high-resolution terahertz spectrometers are presented.

В. Л. Вакс, Е. Г. Домрачева, Ю. П. Корнеева и др.

929