

УДК: 662.2

**ТЕРАГЕРЦОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБНАРУЖЕНИЯ ВВ НА ОСНОВЕ
КВАНТОВО-КАСКАДНЫХ ЛАЗЕРОВ: ПРОБЛЕМЫ, ПОДХОДЫ, РЕШЕНИЯ****Ш.Ш. Набиев, В.Л. Вакс, Е.Г. Домрачева, Е.А. Собакинская, М.Б. Черняева**Российский научный центр «Курчатовский институт»,
Институт физики микроструктур РАН**Аннотация**

Представлены рекомендации, которые позволят разработать и создать компактный нестационарный спектрометр ТГц диапазона с высокой чувствительностью и спектральным разрешением детектирования химических агентов и взрывчатых веществ в атмосферном воздухе в режиме on-line. Ожидаемая чувствительность спектрометра позволит регистрировать концентрации целого ряда газов на уровне $1 \div 0,1$ ppb. Показано, что ТГц спектрометр по своим возможностям может стать первым в ряду нового поколения высокочувствительных газовых анализаторов, которые обычно используются для контроля атмосферного воздуха вблизи и внутри важных и стратегических объектов.

Ключевые слова: лазер, взрывчатое вещество, спектрометр, чувствительность

Введение

Разработка аналитических систем терагерцового (ТГц-) диапазона для обнаружения и идентификации ВВ является одним из активно развивающихся направлений молекулярной спектроскопии [1-3]. За последние несколько лет, благодаря активным усилиям, предпринимаемым исследовательскими группами всего мира, были достигнуты определенные успехи в разработке источников и приемников ТГц-излучения.

Среди источников когерентного излучения в ТГц-диапазоне наиболее распространены являются молекулярные лазеры с оптической накачкой [4], источники с умножением частоты [5], лазеры на свободных электронах (ЛСЭЛ) [6], квантово-каскадные лазеры (ККЛ) [7], а также широкополосные источники, в том числе на основе фемтосекундных лазеров [8].

Специфика ТГц-диапазона, занимающего промежуточное положение между микроволновым и инфракрасным (ИК-) диапазонами, накладывает отпечаток на подходы при разработке методов детектирования ТГц-излучения. В последние годы были предложены различные способы его детектирования, основанные на таких физических принципах, как межподзонные переходы и связанные с ними явления в квантовых ямах, сверхрешетках и точках [9, 10]; туннелирование с участием фотона в резонансных туннельных диодах

[11]; регистрация фотонов с помощью одноэлектронных транзисторов и поверхностных волн в транзисторах с высокой подвижностью электронов [12] и др.

Делаются попытки по применению источников и приемников ТГц-излучения для построения ТГц систем на их основе для обнаружения ВВ [13-16]. Серьезные исследования предприняты в попытках понимания механизмов взаимодействия ТГц-излучения с высокоэнергетическими материалами (ВЭМ) [17].

Однако, несмотря на заметный прогресс в области разработки и создания источников и приемников ТГц-излучения, развитие ТГц-методов и средств обнаружения ВВ пока ещё находится на начальном этапе. По сути, на сегодняшний день представлены лишь результаты демонстрационных экспериментов по обнаружению ВВ с использованием стандартных конфигураций ТГц-спектрометров на основе широкополосных источников излучения (на фемтосекундных лазерах), не адаптированных для реальных приложений, в частности, для работы в условиях открытой атмосферы. Для практического применения таких установок необходимо, прежде всего, улучшение их спектрального разрешения и стабильности работы, т.к. эти характеристики оказывают существенное влияние на результаты анализа.

Специальный анализ имеющихся на сегодняшний день результатов исследований, посвященных разработке методов и средств обнаружения ВВ с использованием излучения ТГц диапазона, показал [18-20], что наиболее

перспективными источниками ТГц-излучения для создания прецизионных и компактных детекторов ВВ являются источники на основе ККЛ и систем с умножением частоты [21]. Из приемников ТГц-излучения, по-видимому, наиболее перспективными для применения в реальных системах ТГц-анализа ВВ могут оказаться смесители и детекторы на горячих электронах (Hot Electron Bolometer – НЕВ), работающие при гелиевых температурах [22, 23].

Данная работа посвящена изучению возможностей разработки и создания высокочувствительных ТГц-систем, в т.ч. систем ТГц-видения, с использованием источников и приемников ТГц излучения на основе ККЛ и НЕВ-болометров, соответственно. Рассмотрены вопросы, касающиеся ограничений применения ККЛ и НЕВ в прецизионной ТГц спектроскопии, в частности, ТГц-спектроскопии паров ВВ, решения проблем управления и оптимизации пучка ТГц-излучения, быстрой частотной модуляции, связанной с системой фазовой автоподстройки частоты и др.

Специфика проблемы ТГц обнаружения паров ВВ

Как уже упоминалось в наших более ранних работах [18-20, 24, 25], в ряду устройств, позволяющих выявлять скрытые взрывные устройства (ВУ), видное место занимает аппаратура прямого обнаружения ВВ по детектированию их паров и частиц, присутствующих в тех или иных количествах вблизи или на поверхности ВУ. Однако возникает ряд проблем, существенно затрудняющих решение поставленной задачи как лазерно-оптическими методами, так и методами ТГц спектроскопии [1, 2, 13, 18-20, 24, 25]. Одной из них является относительно малое количество искомого вещества (10^{-12} - 10^{-15} г/см³) в виде твердых микрочастиц или паров, доступное для анализа [26, 27]. Это связано, прежде всего, с низким давлением насыщенных паров [28] при комнатной температуре для большинства распространенных ВВ (см. табл. 1).

Несколько лучше обстоит дело с так называемыми маркерами ИКАО (ИКАО – Международная организация гражданской авиации). В соответствии с конвенцией ИКАО, принятой в марте 1991 г. (Монреаль, Канада) [28], с целью повышения эффективности проведения досмотровых операций, упрощения, облегчения и удешевления аппаратуры обна-

ружения скрытых закладок ВВ было предложено вводить в состав пластичных взрывчатых веществ (ПВВ) легколетучие добавки, у которых давление насыщенных паров на несколько порядков превышало бы соответствующую величину для гексогена и ТЭН и не влияло на основные эксплуатационные характеристики ПВВ [27, 30].

В настоящее время при производстве ПВВ в их состав для повышения эффективности их обнаружения газоаналитическими методами предлагается вводить нитросоединения (0,1-0,5 % масс.) под названием «метка» (taggant), см. [27] и табл. 2. В число этих меток входят орто-мононитротолуол (o-MNT), парамононитротолуол (p-MNT) [31] и диметилнитробутан (DMNB) [32]. Кроме указанных меток, некоторые специалисты предлагают в качестве газовых маркеров ПВВ вводить в их состав этиленгликольдинитрат (EGDN), 2-амино-4,6-динитротолуол (2АДНТ-С), 4-амино-2,6-динитротолуол (4АДНТ-С), динитробензол (DNB) и даже динитротолуол (2,4-ДНТ) [33,34].

Эти метки имеют относительно высокое давление насыщенных паров, аналогичное NG, поэтому присутствие паров делает возможным обнаружение пластиковых ВВ методом анализа проб атмосферного воздуха [33, 35-37], в частности, газовой фазы над поверхностью багажа с помощью высокочувствительных аппаратных комплексов. В табл.3 приведены значения давления насыщенных паров DMNB, EGDN, MNT и DNT. В конце таблицы для сравнения приведена соответствующая величина для TNT. Нельзя забывать о том, что кроме маркеров ИКАО существуют также газообразные продукты естественного распада ВВ, такие как оксиды азота, оксид углерода, аммиак и др., факт регистрации повышения концентрации которых по сравнению с естественным атмосферным фоном может рассматриваться как наличие ВВ [38].

Здесь необходимо отметить, что, хотя обнаружение следов присутствия маркеров ИКАО методом анализа газовой фазы может (и должно) трактоваться как возможное наличие ПВВ (целый ряд производителей уже перешли на выпуск только маркированных ПВВ), целиком полагаться на этот метод довольно рискованно, т.к. в старых запасах ВВ или же в ПВВ, изготовленных в домашних условиях, со всей очевидностью высоколетучие метки будут отсутствовать.

Таблица 1 - Значения давления насыщенных паров некоторых ВВ при двух различных температурах

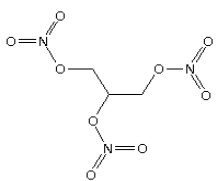
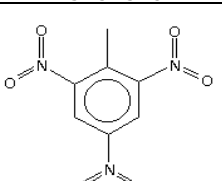
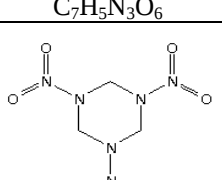
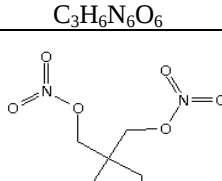
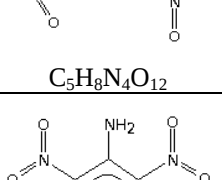
№	ВВ	Формула	Давление паров, ррб	
			300 К	400 К
2	NG (НГ) Нитроглицерин (Nitroglycerine 1,2,3-Propanetriol, trinitrate)	 $C_3H_5N_3O_9$	740	$5,1 \cdot 10^6$
3	TNT (ТНТ) Тринитротолуол (Trinitrotoluene)	 $C_7H_5N_3O_6$	13	$4,7 \cdot 10^5$
4	RDX Гексоген, циклотриметилентринитрамин (1,3,5-Triazine, hexahydro-1,3,5-trinitro-amine)	 $C_3H_6N_6O_6$	0,0084	$2,1 \cdot 10^3$
5	PETN (ТЭН) Пентаэритрит-тетранитрат (Pentaerythritol, tetranitrate)	 $C_5H_8N_4O_{12}$	0,026	$2,8 \cdot 10^4$
6	ТАТБ Триаминотринитробензол (1,3,5-Benzenetriamine, 2,4,6-trinitro-benzene)	 $C_6H_6N_6O_6$	$3,6 \times 10^{-9}$	$7,6 \cdot 10^{-2}$

Таблица 2 - Минимальная концентрация маркирующего вещества в готовом ПВВ после изготовления

Название маркирующего вещества	Молекулярная формула	Молекулярный вес	Минимальная концентрация (% по массе)
EGDN	$C_2H_4(NO_1)_2$	152	0,2
DMNB	$C_6H_{12}(NO_2)_2$	176	0,1
p-MNT	$C_7H_7NO_2$	137	0,5
o-MNT	$C_7H_7NO_2$	137	0,5

Малые концентрации детектируемых газов, а также сложный состав атмосферного воздуха налагают жёсткие требования на ха-

рактеристики аппаратуры прямого обнаружения ВВ на основе ТГц-методов: чувствительность на уровне единиц ррб, высокая разре-

шающая способность. Кроме того, прибор, предназначенный для работы в реальных усло-

виях, должен обладать высоким быстродействием и быть прост в эксплуатации.

Таблица 3- Давление насыщенных паров некоторых маркеров ИКАО при $T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$

Вещество	Хим. формула	Давление насыщенных паров	
		мм рт.ст.	Па
DMNB	$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{N}_2\text{O}_4$	0.117	15.6
EGDN	$\text{C}_2\text{H}_4\text{N}_2\text{O}_6$	0.481	64.1
p-MNT	$\text{C}_7\text{H}_7\text{NO}_2$	0.155	20.7
DNT	$\text{C}_7\text{H}_6\text{N}_2\text{O}_4$	0.00207	0.28
TNT	$\text{C}_7\text{H}_5\text{N}_3\text{O}_6$	0.000183	0.024

На сегодняшний день всем вышеперечисленным требованиям удовлетворяет лишь метод нестационарной микроволновой газовой спектроскопии, обеспечивающий наилучшее приближение к теоретическому пределу чувствительности, а также частотное разрешение, ограниченное лишь эффектом Доплера [39]. Практически реализуемая чувствительность таких спектрометров составляет в сканирующем режиме порядка 0,2 ррб. Кроме высокой чувствительности и спектрального разрешения такие приборы имеют время измерения порядка 1-2 с, что позволяет проводить анализ в режиме реального времени. Продвижение этого метода в ТГц-частотный диапазон позволяет повысить чувствительность анализа, и, следовательно, достоверность метода обнаружения ВВ, т.к. именно в этом диапазоне находятся наиболее интенсивные линии поглощения многих газов.

Для продвижения методов прецизионной спектроскопии в ТГц-диапазон необходимы, прежде всего, источники излучения с определенными характеристиками: доплеровское разрешение (около 10^{-6}), измерение частоты с точностью порядка 10^{-8} - 10^{-10} и плавная перестройка частоты в широком (0,5-5,0 ТГц) спектральном диапазоне. Кроме того, нужны высокочувствительные детекторы ТГц-излучения с хорошим быстродействием.

Как уже упоминалось выше, на наш взгляд, наиболее перспективными источниками ТГц-излучения для создания прецизионных детекторов ВВ являются источники на основе ККЛ. Что касается приемников ТГц-излучения, то наиболее перспективными для применения в реальных системах ТГц-анализа ВВ, по-видимому, являются смесители и детекторы на горячих электронах (НЕВ).

Однако создание прецизионных ТГц-спектрометров на основе ККЛ и НЕВ сопряжено с рядом проблем и ограничений, связанных как с изготовлением ТГц ККЛ с необходимыми параметрами излучения, так и с управлением и оптимизацией пучка полученного ТГц излучения.

Прецизионные спектрометры на основе ККЛ. Проблемы и возможные пути их решения

Хорошо известно [40], что ККЛ представляют собой униполярные полупроводниковые лазеры, основанные на межподзонных переходах в гетероструктурах. В отличие от традиционных диодных лазеров, где оптические переходы идут между зонами и приводят к рекомбинации электронов и дырок, в ККЛ все переходы совершаются только электронами и идут между подзонами, принадлежащими одной зоне проводимости [21].

На сегодняшний день разработано и создано несколько типов ТГц ККЛ:

- на основе чирпированных сверхрешеток (СР);
- 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 пони-

мается чередование в структуре слоев, где осуществляются переходы при взаимодействии с фотонами и фононами.

Вид этих структур и схемы квантовых переходов в них при генерации ТГц-излучения представлены на рис. 1.

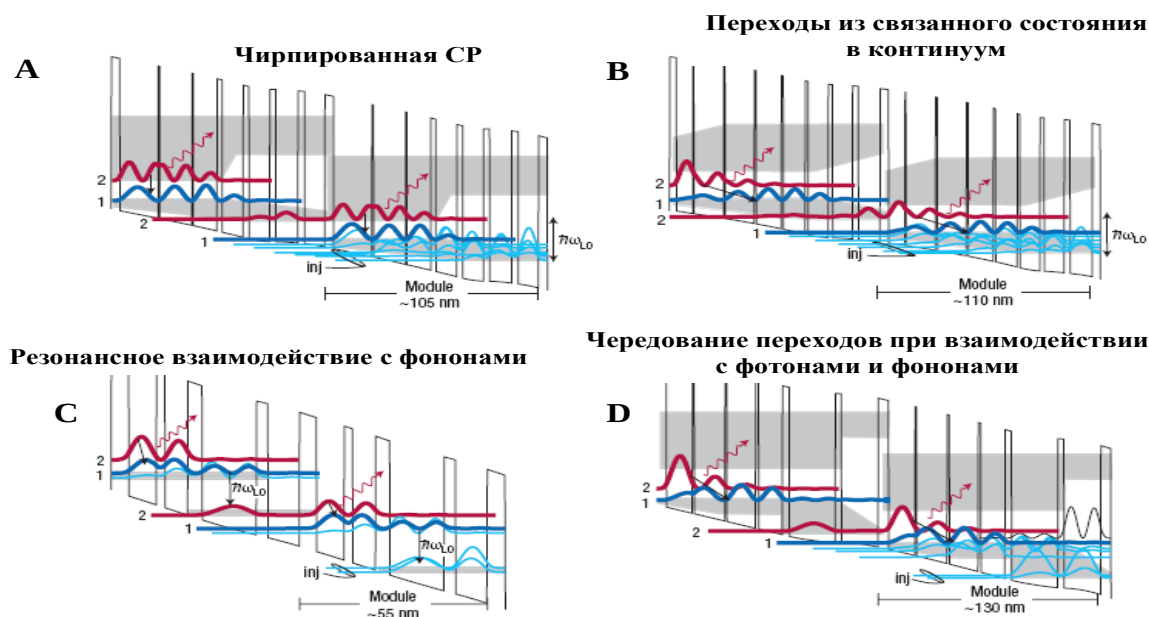


Рис.1 – Схемы квантовых переходов в основных типах ТГц ККЛ

Такой тип лазеров позволяет получить достаточно высокую мощность излучения. Так, выходные мощности при криогенных температурах составляют обычно десятки мВт; для ККЛ на 4,4 ТГц получены выходные мощности 248 мВт в импульсном и 138 мВт – в непрерывном режиме. Рабочая температура некоторых ТГц ККЛ достигает в настоящее время 225 К и может обеспечиваться элементами Пелтье. Дизайн полупроводниковых структур позволяет изменять частоту рабочего межзонного перехода в широких пределах ТГц-спектра: от 1,2 до 4,8 ТГц [21].

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

1. Обеспечение направленности излучения ККЛ. Высокая расходимость излучения ККЛ и неоднородный волновой фронт связаны с субволновым поперечным размером лазерной структуры. Ряд работ в последнее время был посвящен улучшению направленности и структуры излучения терагерцовых ККЛ с помощью плазменной антенны, внешнего резонатора, дизайна резонатора для вертикального вывода излучения, рупорной антенны и др. [41, 42]. Результаты показали возможность существенного улучшения направленности, однако надежный и простой способ получения

аксиально-симметричного узкого пучка с однородным волновым фронтом до сих пор является проблемой. Одним из путей преодоления проблемы может стать использование интерференции излучения от продольного распределения источников в резонаторе лазера [43]. Этот путь требует разработки дизайна резонатора для контроля фазовой скорости продольной моды.

2. Обеспечение одномодового режима генерации ККЛ. Другой важной проблемой, препятствующей использованию ККЛ в ТГц-спектроскопии высокого разрешения, является отсутствие одномодового режима генерации. Селекция продольных мод ККЛ в пределах полосы усиления осуществляется в основном с помощью распределенной обратной связи, которая создается периодической решеткой на продольной грани резонатора (щели в металлическом контакте или модуляции показателя преломления). Селекция низшей поперечной моды обеспечивается малыми поперечными размерами резонатора. Перестройка частоты ККЛ может осуществляться модуляцией инжекционного тока (в пределах $0,05 \text{ см}^{-1}$), и изменением температуры (в пределах $0,1 \text{ см}^{-1}$) [44]. Небольшое увеличение диапазона перестройки ($0,4 \text{ см}^{-1}$) возможно с использованием внешних резонаторов с подвижными зеркалами.

ми, или с помощью решеток. В более широких пределах (порядка 10 см^{-1}) могут перестраиваться ККЛ, основанные на нелокальных переходах, за счет штарковского сдвига частоты перехода [45].

3. Обеспечение узкой ширины линии генерации ККЛ. Важным этапом в разработке прецизионного источника излучения на основе ККЛ является создание системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), т.к. обычно ширина линии генерации ККЛ составляет несколько десятков МГц, что неприемлемо для ТГц-спектроскопии высокого разрешения. На сегодняшний день в литературе известно несколько работ по разработке системы ФАПЧ для ККЛ ТГц-диапазона. Стабилизация ККЛ на частоте 3,0 ТГц по сигналу молекулярного лазера позволило получить ширину линии излучения с учетом накопления сигнала на уровне 65 кГц [46]. В других экспериментах, также с использованием газовых лазеров, была зафиксирована ширина линии ККЛ меньше 30 кГц [44, 47]. Отметим, что существенным недостатком таких систем является то, что указанные параметры могут реализовываться только на частоте генерации молекулярного лазера. Существенным прорывом в этой области должна стать система ФАПЧ ККЛ по высокостабильному источнику излучения микроволнового диапазона, что обеспечит как работоспособность в широком диапазоне частот, так и плавную перестройку частоты источника. Первая попытка разработки такой системы была предпринята в работе [48]. 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 идет о реализации эффекта затягивания частоты, что не является полноценным режимом ФАПЧ. Кроме того, применение ККЛ в нестационарной спектроскопии требует также создания системы частотной (фазовой) модуляции, которая обеспечит многократное взаимодействие ТГц-излучения с исследуемым газом.

4. Обеспечение высокой рабочей температуры ККЛ. Основной проблемой ТГц ККЛ является достаточно низкая рабочая температура, которая не превышает 186 К [49]. Такие температуры требуют использования специальных охлаждающих систем для импульсных и непрерывно излучающих ККЛ-источников.

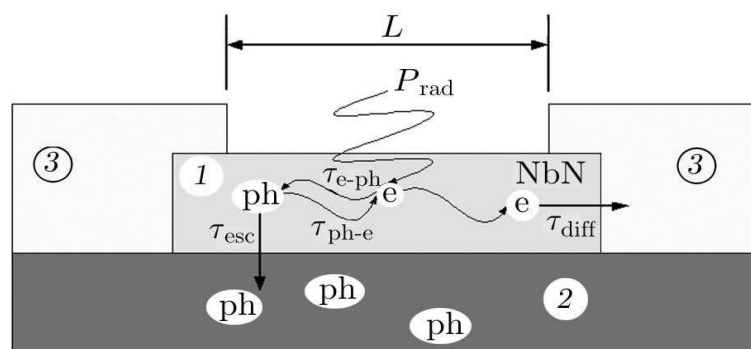
Одним из вариантов решения этой проблемы может стать подход, основанный на генерации разностной частоты. Так, авторами [7] получена генерация на частоте около 5 ТГц с выходной мощностью 7 мВт ($T=80 \text{ K}$), 1 мВт ($T=250 \text{ K}$) и 300 нВт ($T=300 \text{ K}$). Очевидно, что для увеличения выходной мощности такого лазера при комнатных температурах, помимо выбора активной среды, необходимо дальнейшее усовершенствование волноводов.

5. Обеспечение широкой полосы и чувствительности приема ТГц-излучения. Разработка приемных систем в ТГц-диапазоне частот также представляет актуальную задачу, которой посвящено большое количество работ. Для регистрации непрерывного излучения в диапазоне 100-1600 ГГц разработаны сверхпроводящие приемники - СИС смесители (сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник), чувствительность которых близка к квантовому пределу [50]. Полоса их приема составляет около 10 % от несущей частоты. Примером таких систем являются СИС смесители на основе туннельных переходов $\text{Nb-AlO}_x\text{-Nb}$ [51]. Шумовая температура лучших образцов СИС смесителей составляет 26 К при 500 ГГц, 70 К при 680 ГГц, 220 К при 950 ГГц и 350 К при 1,1 ТГц. Для более высоких частот ($\nu \geq 2,0 \text{ ТГц}$) чувствительность таких болометров на порядок меньше.

Особый интерес сейчас вызывают приемники и смесители на горячих электронах [22, 23, 52, 53], работающие в диапазоне до $\nu = 6,0 \text{ ТГц}$ при гелиевых температурах (рис. 2). В основе работы этих приборов лежит эффект разогрева электронов в тонких пленках сверхпроводников при поглощении ими электромагнитного излучения.

Для создания рабочей температуры детектор помещается в гелиевый криостат с оптическими окнами. Детектор представляет собой чувствительный элемент, включенный в логарифмическую спиральную антенну, которая в свою очередь прижата к плоской стороне вытянутой сферической линзы.

Лабораторные исследования показали, что в интервале частот 1-6 ТГц эти смесители на сегодняшний день не имеют себе равных – их типичная температура шума изменяется от 1000 К на частоте 700 ГГц до 8800 К на частоте 5,2 ТГц (рис. 3). Технические характеристики НЕВ детекторов двух типов [22, 23] приведены в табл. 4.



1 – сверхпроводящая пленка, 2 – подложка,
3 – контактные площадки,
 P_{rad} – мощность падающего излучения

Рис. 2. Схематическое изображение сверхпроводящего смесителя на горячих электронах:

Таблица 4 – Технические характеристики НЕВ детекторов различного типа

Характеристика	Широкополосный детектор	Скоростной детектор
Спектральный интервал	1-2000 мкм	1-1000 мкм
Чувствительность	50 В/Вт	4 В/Вт
Эквивалентная мощность шума	10^{-11} Вт/Гц ^{-1/2}	10^{-10} Вт/Гц ^{-1/2}
Динамический диапазон	10-100	300
Импеданс	50 Ом	50 Ом
Постоянная времени	1 нс	20 пс
Рабочая температура	4,5 К	7-10 К
Ток смещения	5 мА	5 мА

Фактически на данный момент НЕВ-детекторы являются единственными устройствами ТГц-диапазона, работающие с сигналами с высокой частотой модуляции. Уже появились работы, где сообщается о применении этих устройств в ТГц-системах с гетеродинным приемом, где роль гетеродина играет ККЛ [54, 55]. Реализованные на сегодняшний день характеристики НЕВ-смесителей, а также предварительные результаты их интегрирования в единую систему совместно с ККЛ, позволяют рассчитывать на создание быстродействующего, высокочувствительного приемника для нестационарного прецизионного спектрометра ТГц-диапазона.

Выводы и рекомендации

Из сказанного выше очевидно, что для создания нестационарного прецизионного спектрометра ТГц-диапазона необходимы терагерцовые ККЛ с высокими рабочими температурами ($T \approx 300$ К), излучающие одномодовое ТГц-излучение мощностью несколько десятков мВт, с улучшенной направленностью и

структурой. Для такого ККЛ требуется также система быстрой частотной модуляции, связанная с системой ФАПЧ. Источник ТГц-излучения на основе ККЛ, используемый для возбуждения молекул, будет применен как гетеродин, поэтому необходима разработка маломощного широкополосного смесителя и его интеграция с ККЛ. Блок-схема прецизионного ТГц-спектрометра представлена на рис. 4.

Смесители, основанные на эффекте горячих электронов в сверхпроводящей тонкой пленке NbN, обеспечивают чувствительность, приближающуюся к квантовому пределу, время отклика (порядка нескольких миллисекунд) и высокое спектральное разрешение (не хуже 20 кГц) одновременно. Сочетание этих характеристик делает НЕВ наиболее предпочтительным для регистрации узких линий в ТГц-диапазоне. У смесителей на основе диодов с барьером Шоттки (ДБШ) или СИС-структур имеются существенные недостатки, которые ограничивают их использование в предлагаемой системе. Так, смесители на ДБШ требуют большой мощности гетеродина, а их чувствительность резко падает на частотах выше 1,0

ТГц. СИС-смесители хорошо работают на частотах около 1 ТГц и ниже. НЕВ-смесители используют маломощный гетеродин и показы-

вают высокую чувствительность (8 hv/k) на частотах до 5 ТГц.

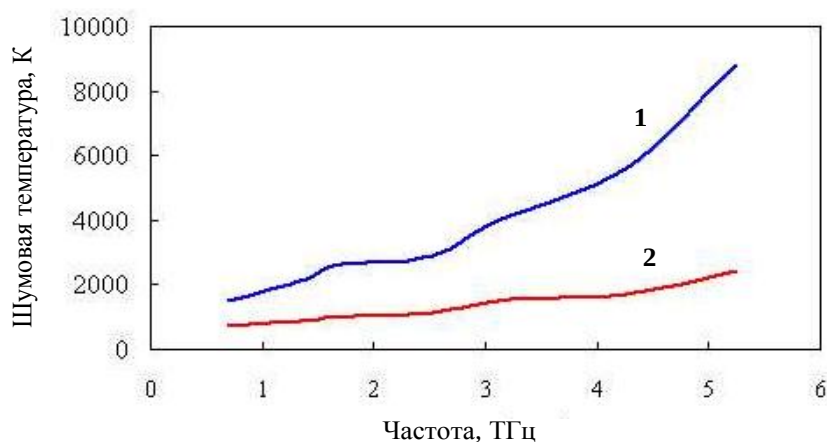


Рис.3 – Зависимость шумовой температуры НЕВ приемника (1) и смесителя (2) от частоты падающего излучения

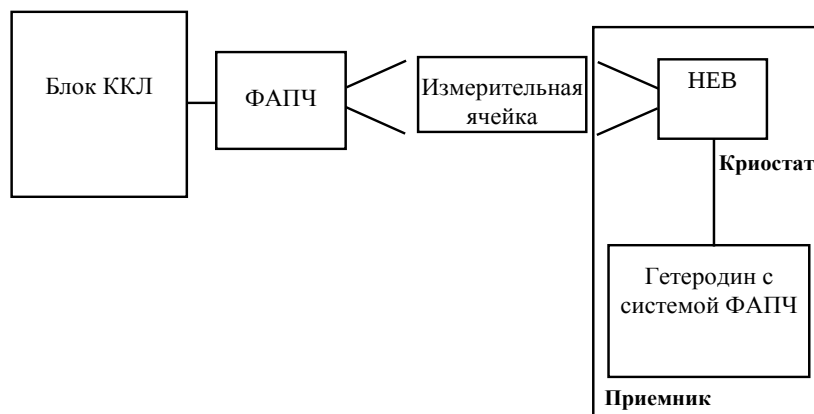


Рис. 4 – Блок-схема прототипа прецизионного ТГц спектрометра на основе ККЛ и НЕВ

Современные технологии производства NbN НЕВ смесителей основаны на том, что слой Au осаждается на пленку NbN без нарушения вакуума, что делает границу Au-NbN более чистой. Это, в свою очередь, уменьшает сопротивление контакта и потерю сигнала. Более того, чистая граница раздела между антенной и мостиком NbN приводит к увеличению ширины полосы зоны за счет дополнительного охлаждения электронов из-за диффузии горячих электронов к контактам антенны. Технология *in-situ* позволяет достигать рекордно низкой шумовой температуры приемника (750 К при частоте гетеродина 2.5 ТГц и рекордно большой зоны и полосы шума 6.5 ТГц) [22,23].

Еще одним важным элементом спектрометра является измерительная газовая ячейка. Проведенные исследования показали, что наиболее оптимальным вариантом ячейки для компактного ТГц спектрометра является гер-

метизированный металлический волновод круглого сечения ($d=50$ мм), длиной 1 м из нержавеющей стали с прозрачными для излучения окнами под углом 45° . Предусматривается возможность нагрева ячейки до температуры выше 100°C . Среднее рабочее давление в ячейке составляет 0.05 мм рт.ст.

Таким образом, выполнение всех перечисленных выше рекомендаций позволит разработать и создать компактный нестационарный спектрометр ТГц диапазона с высокой чувствительностью и спектральным разрешением детектирования химических агентов и взрывчатых веществ в атмосферном воздухе в режиме *on-line*. Ожидаемая чувствительность спектрометра позволит регистрировать концентрации целого ряда газов на уровне $1 \div 0,1$ ppb. Реализованный ТГц спектрометр может стать первым в ряду нового поколения высокочувствительных газовых анализаторов, ко-

торые обычно используются для контроля атмосферного воздуха вблизи и внутри важных и стратегических объектов.

Литература

1. Terahertz Frequency Detection and Identification of Materials and Objects. NATO Science for Peace and Security Series B: Physics and Biophysics. Eds. R.E. Miles, X.-C. Zhang, H. Eisele, A. Krotkus. Berlin-Heidelberg: Springer, 2007. 364 p.
2. Terahertz Science And Technology For Military And Security Applications. Selected Topics in Electronics and Systems. Eds. D.L. Woolard, J.O. Jensen, R. Hwu, M.S. Shur. N.Y.-L.: World Scientific Publ. Comp., 2007. 260 p.
3. Ueno Y., Ajito K. Analytical Terahertz Spectroscopy // *Analyt. Sci.* 2008. Vol. 24. P. 185-192.
4. He Zhihong, Ren Xia, Yang Yang, Xizhang Luo, Peng Wang. Study of optimal gas pressure in optically pumped D₂O gas terahertz laser. In: *Terahertz Photonics*. Eds. Zhang C., Zhang X.-C. // *Proc. SPIE*. 2007. Vol. 6840. P. 684004.
5. Vaks V.L., Pripolsin S.I., Panin A.N., et al. Fast sweep solid state spectrometer for subTHz and THz frequency ranges // *Proc. Int. Conf IRMMW-THz*. California Institute of Technology (Pasadena, USA), 2008. T4B4. P.1627.
6. Madey J. Spontaneous emission of bremsstrahlung in a periodic magnetic field // *J. Appl. Phys.* 1971. Vol. 42. P. 906-1913.
7. Belkin M., Capasso F., Xie F. Room temperature terahertz quantum cascade laser source based on intracavity difference-frequency generation // *Appl. Phys. Lett.* 2008. Vol. 92. P. 201101(1)-201101(3).
8. Hoffmann M.C., Yeh K.-L., Hwang H.Y., Sosnowski T.S. Fiber laser pumped high average power single-cycle terahertz pulse source // *Appl. Phys. Lett.* 2008. Vol. 93. P. 141107(1)-141107(3).
9. Алфёров Ж.И. История и будущее полупроводниковых гетероструктур // *Физика и техника полупроводников*. 1998. Т. 32. С. 3-18.
10. Ye Z., Campbell J. C., Chen Z., et al. Voltage-Controllable Multiwavelength InAs Quantum Dot Infrared Photodetectors for Mid- and Far-Infrared Detection // *J. Appl. Phys.* 2002. Vol. 92. № 7. P. 4141-4143.
11. Kawano Y., Fuse T., Toyokawa S., et al. Terahertz photon-assisted tunneling in carbon nanotube quantum dots // *J. Appl. Phys.* 2008. Vol. 103. P. 034307(1)-034307(4).
12. Astafiev O., Komiiyama S., Kutsuwa T. Single-photon detector in the microwave range // *Appl. Phys. Lett.* 2002. Vol. 80. P.4250-4252.
13. Liu H.-B., Zhang X.-C. Terahertz Spectroscopy for Explosive, Pharmaceutical, and Biological Sensing Applications / *Terahertz Frequency Detection and Identification of Materials and Objects*. NATO Security through Science Series. Ed. R.E. Miles. Springer. 2007. P.251-323.
14. Liu H.-B., Chen Y., Bastians G.J., Zhang X.-C. Detection and identification of explosive RDX by THz diffuse reflection spectroscopy // *Opt. Express*. 2006. Vol. 14. P. 415-423.
15. Zhong H., Redo A., Chen Y., Zhang X.-C. THz wave stand-off detection of explosive materials In: *Terahertz for Military and Security Applications IV* // *Proc. SPIE*. 2006. Vol. 6212. P. 62120L.
16. Hubers H.-W., Semenov A.D., Richter H., Böttger U. Terahertz imaging system for stand-off detection of threats. In: *Terahertz for Military and Security Applications V*. Eds. J.O. Jensen, Hong-Liang Cui // *Proc. SPIE*. 2007. Vol. 6549. P. 65490A.
17. Allis D.G., Prokhorova D.A., Korter T.M. Solid-state modeling of the terahertz spectrum of the high explosive HMX // *J. Phys. Chem. A*. 2006. Vol. 110. P. 1951-1956.
18. Вакс В.Л., Володин А.В., Набиев Ш.Ш. и др. Спектроскопия терагерцового диапазона: возможности и перспективы противодействия террористической угрозе. Часть 1. // *Наука и технологии в промышленности*. 2009. № 29. С. 45-53.
19. Вакс В.Л., Володин А.В., Набиев Ш.Ш. и др. Спектроскопия терагерцового диапазона: возможности и перспективы противодействия террористической угрозе. Часть 2. // *Наука и технологии в промышленности*. 2009. № 3. С. 32-44.
20. Вакс В.Л., Володин А.В., Набиев Ш.Ш. и др. Обнаружение и идентификация ВВ методами терагерцовой спектроскопии: возможности и перспективы // *Вопросы оборонной техники. Сер.16. Технические средства противодействия терроризму*. 2009. Вып. 11-12. С. 23-37.
21. Williams B. Terahertz quantum-cascade lasers // *Nature Photonics*. 2007. Vol. 1. P. 517-525.
22. Гольцман Г.Н., Лудков Д.Н. Сверхпроводниковые смесители на горячих электро-

нах терагерцового диапазона и их применение в радиоастрономии // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 2003. Т. 46. № 8-9. С. 671-686.

23. Chen J., Kang L., Jin B.B., et al. Properties of Terahertz Superconducting Hot Electron Bolometer Mixers // Terahertz Science and Technology. 2008. Vol. 1. № 1. P. 37-41.

24. Григорьев Г.Ю., Каретников М.Д., Набиев Ш.Ш. и др. Комбинированная система для обнаружения и идентификации взрывчатых веществ и взрывных устройств // Вопросы оборонной техники. Сер. Технические средства противодействия терроризму. 2008. Вып. 7-8. С. 33-42.

25. Григорьев Г.Ю., Карапузиков А.И., Набиев Ш.Ш. и др. Комплексная лазерно-оптическая система обнаружения и идентификации ВВ в открытой атмосфере // Вопросы оборонной техники. Сер.16. Технические средства противодействия терроризму. 2009. Вып. 1-2. С. 86-96.

26. Existing and potential standoff explosives detection techniques. – Committee of the Review Existing and Potential Standoff Explosives Detection Techniques. Washington: National Academic Science, 2004. 149 p. Материалы сайта <http://www.nap.edu>.

27. Counterterrorist detection techniques of explosives. Ed. Yinon J.. N.Y: Elsevier, 2007. 454 p.

28. Gruznov V.M., Baldin M.N., Filonenko V.G. High-speed Gas Analysis for Explosives Detection // NATO Science series. II. Mathematics, Physics and Chemistry. 2004. Vol. 167. P. 87-99.

29. Конвенция о маркировке пластических взрывчатых веществ в целях их обнаружения. Материалы сайта <http://www.un.org/russian/document/convents/marconv.htm>

30. Containing the Threat from Illegal Bombings: An Integrated National Strategy for Marking, Tagging, Rendering Inert, and Licensing Explosives and Their Precursors. Committee on Marking, Rendering Inert, and Licensing of Explosive Materials, National Research Council. N.Y.: National Academy Science, 1998. 384 p.

31. Cutler D.P., Brown A.K. Investigation into an explosion and fire in a mononitrotoluene manufacturing plant // J. of Hazardous Materials. 1996. Vol. 46. № 2-3. P. 169-183.

32. Jones D.E.G., Lightfoot P.D., Fouchard R.C., Kwok Q.S.M. Thermal properties of DMNB, a detection agent for explosives //

Thermochim. Acta. 2002. Vol. 388. № 1-2. P. 159-173.

33. Method and apparatus for Detecting Explosives. US Patent №20090309016. Publ. Date: 12/17/2009.

34. Руденко А.Б. Хроматография опасных веществ при террористических актах, авариях и катастрофах // Рос. Хим. Журн. 2005. Т. XLIX. №. 4. С. 125-131.

35. Morrison R.D. The Forensic Detection of Explosives in the Subsurface // Environ. Claims J. 2002. Vol. 14. № 3. P. 351-367.

36. Mostak P., Stancl M., Preussler V. Consideration of Some Aspects of Marking Plastic Explosive Semtex // Adv. Anal. Detect. Explos.: Proc. 4-th Intern. Symp. Anal. Detect. Explos. Ed. J. Yinon. Jerusalem, Israel; Dordrecht, Holland: Kluwer Acad. Publ., 1992. P. 429-436.

37. Horacek M., Mostak P., Stancl M. Detection of plastic explosives // Proc. of the Annual Conf. of Explosive Blasting Technology. 2001. Vol. 27. P. 257-283.

38. Вакс В.Л., Володин А.В., Набиев Ш.Ш. и др. Исследование состава паров ВВ методами субтерагерцовой и инфракрасной Фурье спектроскопии // Вопросы оборонной техники. Сер.16. «Технические средства противодействия терроризму. 2009. Вып.11-12. С.78-90.

39. Vaks V.L., Brailovsky A.B., Khodos V.V. Millimeter Range Spectrometer with Phase Switching – Novel Method for Reaching of the Top Sensitivity // Infrared & Millimeter Waves. 1999. Vol. 20. No. 5. P.883-896.

40. Solid-State Mid-Infrared Laser Sources. Ser. Topics in Applied Physics. Vol. 89. Eds. I.T. Sorokina, K.L. Vodopyanov. Berlin-Heidelberg: Springer, 2003. 558 p.

41. Yu N., Fan J., Wang Q., Edamura T., et al., Small-divergence semiconductor lasers by plasmonic collimation // Nature Photonics. 2008. Vol. 2. P. 564-570.

42. Maineult W., Gellie P., Andronico A., et al., Metal-metal terahertz quantum cascade laser with micro-transverse-electromagnetic-horn antenna // Appl. Phys. Lett. 2008. Vol. 93. P. 183508(1)-183508(3).

43. Orlova E.E., Hovenier J.N., Klaassen T.O., et al. Antenna model for wire lasers // Phys. Rev. Lett. 2006. Vol. 96. P. 173904(1)-173904(4).

44. Barkan A., Tittel F.K., Mittleman D.M., Dengler R., et al., Linewidth and tuning characteristics of terahertz quantum cascade lasers // Optics Letters. 2004. Vol. 29. No. 6. P. 575-577.

45. Walther C., Fischer M., Scallari G., Terazzi R., et al., Quantum cascade lasers operating from 1,2 to 1,6 THz // Appl. Phys. Lett. 2007. Vol. 91. P. 131122(1)-131122(3).

46. Betz A.L., R. T. Boreiko, B. S. Williams, S. Kumar, et al. Frequency and phase-lock control of a 3 THz quantum cascade laser // Optics Letters. 2005. Vol. 30. No. 14. P.1837-1839.

47. Barbieri S., Alton J., Beere H.E., Linfield E.H., et al., Heterodyne mixing of two far-infrared quantum cascade lasers by use of a pointcontact Schottky diode // Optics Letters. 2004. Vol.29. No. 14. P.1632-1634.

48. Hovenier J.N., Adam A.J.L., Kasalynas I., Gao J.R., et al., Phase-locking on the beat signal of a two-mode 2.7 terahertz metal-metal quantum cascade laser // Proceedings Symposium IEEE/LEOS Benelux Chapter. Eindhoven, 2006. P. 125.

49. Kumar S., Hu Q., Reno J.L. 186 K operation of terahertz quantum-cascade lasers based on a diagonal design // Appl. Phys. Lett. 2009. Vol.94, P. 131105(1)-131105(3).

50. Dieleman P. Fundamental limitations of THz and Niobium nitride SIS mixers. PhD Thesis.

Department of Applied Physics of the University of Groningen, 1997. 124 p.

51. Кошелец В.П., Шитов С.В., Филиппенко Л.В. и др. Сверхпроводниковые интегральные приемники субмм волн // Изв. Вузов. Радиофизика. 2003. Т. XLVI. С. 687-701.

52. Jiang L., Shiba S., Shimbo K., Sugimura M., et al. Development of 0,8 THz and 1,5 THz Waveguide NbTiN HEB Mixers // Proc.19-th Int. Symp. on Space Terahertz Technology. Groningen, 2008. P. 54-57.

53. Khosropanah P., Gao J.R., Laauwen W.M., et al. Low noise NbN hot electron bolometer mixer at 4.3 THz // Appl. Phys. Lett. 2007. Vol. 91. P. 221111(1)-221111(3).

54. Khosropanah P., W. Zhang, J. N. Hovenier, J. R. Gao, et al. 3,4 THz heterodyne receiver using a hot electron bolometer and a distributed feedback quantum cascade laser // J. Appl. Phys., 2008. Vol.104. P. 113106(1)-113106(6).

55. Richter H., Semenov A.D., Pavlov S.G., et al., Terahertz heterodyne receiver with quantum cascade laser and hot electron bolometer mixer in a pulse tube cooler // Appl. Phys. Lett. 2008. Vol. 93. P. 141108(1)-141108(3).

TERAHERTZ OF TECHNOLOGIES OF DETECTION EXPLOSIVES ON THE BASIS OF QUANTUM-CASCADE LASERS: PROBLEMS, SOLVING, APPROACHES

Sh.Sh. Nabiev, V.L. Vaks, E.G. Domracheva, E.A. Sobakinskaya, M.B. Chernyaeva

Russian Research Center «Kurchatov Institute»,
Institute of Physics of microstructures RAS

Abstract

Submit recommendations, which will lead to the development and create of compact of nonstationary spectrometer THz range with high sensitivity and spectral resolution detection of chemical agents and explosives in ambient air in on-line mode. The expected sensitivity spectrometer will register a range of gas concentration at level $1 \div 0.1$ ppb. It is shown that THz spectrometer on its capabilities may be the first in a series high sensitive gas analyzers which used for monitoring ambient air near and inside the important and strategic object.

КВАНТТЫҚ-КАСКАДТЫ ЛАЗЕР НЕГІЗІНДЕ АНЫҚТАЛАТЫН ЖЗ-ДЫҢ ТЕРАГЕРЦТІК ТЕХНОЛОГИЯСЫ: МӘСЕЛЕЛЕРІ, ТӘСІЛДЕРІ, ШЕШІМДЕР

Ш.Ш. Набиев, В.Л. Вакс, Е.Г. Домрачева, Е.А. Собакинская, М.Б. Черняева

Ресей ғылыми-зерттеу орталығы «Курчатов институты»
Микроқұрылым физика институты, РАН

Аннотация

Онлайн режимінде ауаның жоғары сезімталдық және спектральдық қаулы де тектіrovaniya химиялық агенттер мен жарылғыш заттар бар жинақы, уақыт тәуелді THz спектрометр спектрін дамыту және салу болады ұсыныстар берілген. Спектрометрдің күтілетін сезімталдығы $1 \div 0,1$ миллиард бөліктерін де газдардың санының шоғырлануы жазуға мүмкіндік береді. Ол өз мүмкіндіктерін THz спектрометр әдетте жақын және маңызды және стратегиялық жобалар шеңберінде ауаны бақылау үшін пайдаланылады жоғары сезімтал газ анализаторлары жаңа буын, сериясы бірінші болуы мүмкін екендігі көрсетілген.