

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Институт инженерной физики и радиоэлектроники
Базовая кафедра фотоники и лазерных технологий

УТВЕРЖДАЮ
Зав. баз. кафедрой ФилЛТ
_____ А.Н. Втюрин
« ____ » _____ 2018 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Исследование молекулярного лазера ТГц-диапазона с оптической накачкой

16.04.01 «Техническая физика»
16.04.01.02 «Оптическая физика и квантовая электроника»

Научный руководитель	_____	доцент, канд. физ.-мат. наук	М.Ю. Реушев
Выпускник	_____		К.А. Коротких
Рецензент	_____	профессор, д-р физ.-мат. наук	В.В. Слабко

Красноярск 2018

РЕФЕРАТ

В магистерской диссертации на тему "Исследование молекулярного лазера ТГц-диапазона с оптической накачкой" 46 страниц, 19 рисунков, 4 таблицы, 2 формулы, 13 источников, 2 приложения.

МОЛЕКУЛЯРНЫЙ ЛАЗЕР С ОПТИЧЕСКОЙ НАКАЧКОЙ, ТГЦ-ИЗЛУЧЕНИЕ, МЕТАНОЛ, CH_3OH , ВОЛНОВОДНЫЙ РЕЗОНАТОР, CO_2 -ЛАЗЕР

Магистерская диссертация посвящена исследованию молекулярного лазера, излучающего в терагерцовом диапазоне с оптической накачкой излучением CO_2 -лазера непрерывного действия. Были экспериментально исследованы зависимости мощности излучения ТГц-лазера от давления активной среды лазера.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1 Техника ТГц-диапазона и области её применения.....	6
1.1 Общие сведения о ТГц-излучении.....	6
1.2 Свойства ТГц-излучения.....	10
1.3 Области применения ТГц-излучения.....	11
1.4 Техника ТГц-диапазона.....	14
1.5 Детектирование сигнала в ТГц-диапазоне.....	15
1.6 Генерирование сигнала в ТГц-диапазоне.....	23
2 Модель молекулярного лазера ТГц-диапазона с оптической накачкой излучением СО ₂ -лазера.....	26
2.1 Актуальность решения поставленных задач.....	26
2.2 Механизм инверсии населённостей в молекулярном ТГц-лазере с оптической накачкой.....	28
2.3 Модель оптического резонатора.....	31
3 Экспериментальное исследование эффективности возбуждения активной лазерной среды на метаноле с использованием оптической накачки.....	33
3.1 Схема экспериментальной установки.....	33
3.2 Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение.....	36
Заключение.....	38
Список использованных источников.....	39
Приложение А.....	41
Приложение Б.....	43

ВВЕДЕНИЕ

Терагерцовым (ТГц) излучением называется электромагнитное излучение в интервале частот от 0,3 до 10 ТГц, т.е. $0,3 \cdot 10^{12} - 10 \cdot 10^{12}$ Гц и диапазоном длин волн от 1 мм до 30 мкм. Этот частотный интервал занимает хоть и малую, но достаточно важную на практике часть электромагнитного спектра между инфракрасным (ИК) и микроволновым диапазонами, поэтому его также часто называют дальним ИК или субмиллиметровым диапазоном.

Несмотря на существенный прогресс в области генерации и приёма ТГц-излучения, данное направление исследований остаётся одним из быстро развивающихся в современной прикладной физике. Многочисленные задачи, стоящие перед исследователями в этой области, еще не решены. К ним относится всё ещё невысокая, порядка 0,1%, эффективность оптико-терагерцового преобразования, сложность установок и др.

Анализ публикаций по теме: «Молекулярные газовые лазеры ТГц-диапазона с оптической накачкой» показал, что молекулярные газовые лазеры с оптической накачкой остаются по-прежнему практически единственными источниками, работающими в непрерывном режиме, излучение которых обладает высокой когерентностью и мощностью порядка 10 мВт.

Актуальность применения таких лазеров обусловлена тем, что они, обладая высокими характеристиками лазерного излучения, могут служить в качестве опорных генераторов при гетеродинном детектировании слабых сигналов в ТГц-области, а, как известно, гетеродинный приём является наиболее эффективным средством борьбы с шумами при приёме слабых сигналов.

Существующие в настоящее время технические решения, как это будет показано ниже, обладают определёнными недостатками, и данное обстоятельство определяет направление настоящих исследований в этой области, положительный результат которых может содержать научную новизну и оригинальные технические решения.

В ходе работы была поставлена цель: исследовать эффективность возбуждения активной лазерной среды в ТГц-диапазоне на метаноле с использованием оптической накачки при помощи CO₂-лазера.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- выполнить литературный обзор по теме: «Молекулярные газовые лазеры ТГц-диапазона с оптической накачкой»;
- разработать конструкцию молекулярного газового ТГц-лазера с оптической накачкой излучением CO₂-лазера, пользуясь оценками элементов конструкции резонатора лазера мощностью излучения не менее 1 мВт;
- выполнить исследования зависимостей длины волны излучения ТГц-лазера от длины волны излучения CO₂-лазера и зависимости мощности генерации лазера от давления активной среды;
- по результатам исследования сделать выводы о дальнейшей оптимизации конструкции ТГц-лазера и об условиях накачки активной среды для достижения максимальной эффективности его работы.

1 Техника ТГц-диапазона и области её применения

1.1 Общие сведения о ТГц-излучении

ТГц-излучение является наиболее распространённым термином, используемым для обозначения этого диапазона частот, аналогично микроволнам, инфракрасному излучению и рентгеновскому излучению. Довольно неудобно использовать единицы частот для обозначения спектральной полосы. Тем не менее, поскольку «терагерц» стал символическим словом, обозначающим всю полосу частот, этот термин используют универсально.

До недавнего времени ТГц-технологии разрабатывались самостоятельно исследователями из нескольких научных дисциплин. На практике используют различные единицы для описания спектра ТГц-излучения. В основном используют ТГц (10^{12} Гц) в качестве универсальной единицы. Часто используются следующие единицы и их преобразование в 1 ТГц:

- частота $\nu = 1 \text{ ТГц} = 1000 \text{ ГГц}$;
- угловая частота $\omega = 2\pi\nu = 6,28 \text{ ТГц}$;
- период $T = 1/\nu = 1 \text{ пс}$;
- длина волны $\lambda = c/\nu = 0,3 \text{ мм} = 300 \text{ мкм}$;
- волновое число $k = 1/\lambda = 33,3 \text{ см}^{-1}$;
- энергия фотонов $h\nu = 4,14 \text{ мэВ}$;

где c – скорость света в вакууме;

h – постоянная Планка.

Физики, как правило, используют мкм и мэВ в качестве единиц длины волны фотонов и энергии, соответственно, химики используют см^{-1} в качестве единицы волнового числа; инженеры используют мм и ГГц в качестве единиц длины волны и частоты соответственно. В физике, угловое волновое число ($k = 2\pi / \lambda$), как правило, сокращают как волновое число.

ТГц-излучение представляет большой интерес для изучения учёными из разных стран. Этот диапазон электромагнитного спектра интересен свойствами самого излучения, поскольку это уже однозначно не оптическое (видимое) излучение и ещё определённо не радиоволна. До недавнего времени большая часть ТГц-спектра не использовалась, поскольку отсутствовали как источники, так и приёмники когерентного излучения этого диапазона. Поэтому участок электромагнитного спектра, который приходится на ТГц-диапазон назвали «терагерцовым провалом», изображён на рисунке 1.1.



Рисунок 1.1 – Спектр электромагнитных волн и «терагерцовый провал»

К естественным источникам ТГц-излучения относится, например, космическое реликтовое излучение, на высокочастотную область этого диапазона приходится тепловое излучение предметов комнатной температуры (Рисунок 1.2).

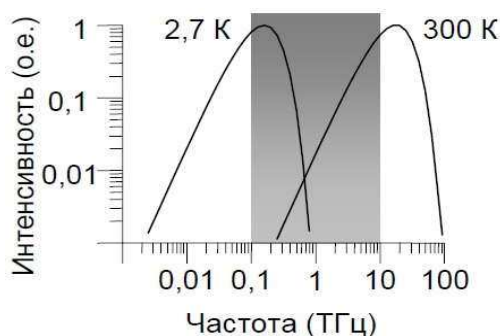


Рисунок 1.2 – ТГц-диапазон в сравнении со спектрами излучения абсолютно чёрного тела при температуре 2,7 К (реликтовое излучение) и 300 К

Однако излучение естественных ТГц-источников не является когерентным, поэтому его нельзя применить для таких задач, как связь, локация, имиджинг, спектроскопия и т.п.

На рисунке 1.3, взятом из [1], показана нижняя частотная граница лазерных методов генерации излучения и верхняя частотная граница работы электронных приборов. Видно, что ТГц-провал сомкнулся в конце 90-х годов. Однако эффективность лазерных и электронных приборов, достигающих (с противоположных сторон) рекордных частот в центре ТГц-провала, остаётся невысокой.

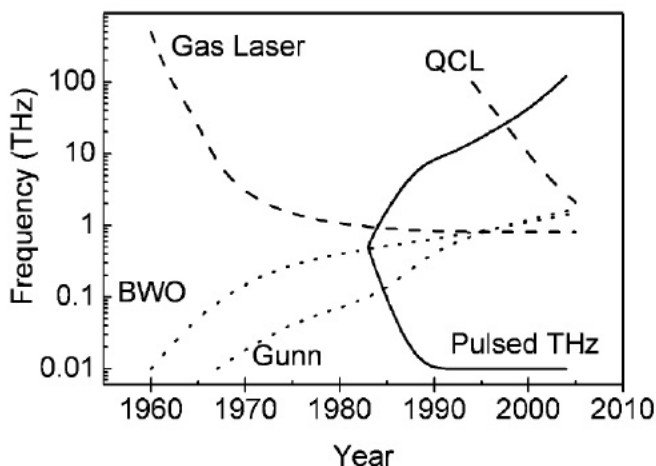


Рисунок 1.3 – Развитие источников когерентного ТГц-излучения

Сплошная линия ограничивает рабочий диапазон импульсных источников на основе лазеров оптического диапазона; пунктирные линии — нижние границы для газовых и квантово-каскадных (QCL) лазеров; точки — верхние границы для ламп обратной волны (BWO) и диодов Ганна.

Сложность создания эффективных ТГц-источников связана с тем, что в ТГц-диапазоне плохо применимы хорошо разработанные методы генерации ТГц-излучения в оптическом и микроволновом диапазонах. Оптические генераторы когерентного излучения (лазеры) основаны на вынужденных переходах электронов между уровнями. Из-за того, что квант ТГц-излучения невелик (эквивалентная температура излучения частотой 1 ТГц составляет всего 47,6 К), тепловая релаксация лазерных уровней при комнатной

температуре приводит к выравниванию населённости и быстрому уничтожению инверсии. Поэтому, например, квантово-каскадные лазеры, являющиеся одним из перспективных источников, генерировать на ТГц-частотах пока способны только в условиях криогенного охлаждения [13].

В микроволновом и СВЧ-диапазонах, расположенных по другую сторону от ТГц-диапазона, генерация электромагнитного излучения связана с транспортом (движением) носителей заряда. Верхний предел частоты излучения определяется характерным временем пролёта носителя в приборе. Если необходимо получить осцилляции носителей на ТГц-частотах, то необходимо приложить сильное электрическое поле к малой области пространства, что и наталкивается на технические сложности. Мощными источниками ТГц-излучения, основанными на переносе носителей заряда, являются синхротроны и лазеры на свободных электронах, однако их дороговизна и размеры препятствуют их широкому использованию даже для чисто научных приложений.

Область частот от сотен гигагерц до нескольких терагерц (Рисунок 1.3) стала доступной для исследования благодаря созданию ТГц-источников на основе воздействия лазерным излучением на вещество (оптико-терагерцового преобразования). Существуют как узкополосные (квазинепрерывные) источники, генерирующие узкий спектр ТГц-частот, так и широкополосные импульсные источники, спектр которых перекрывает существенную часть или даже весь ТГц-диапазон. Возможность «адресной» настройки на определённую ТГц-частоту, перестройки в широком спектре, или настройки на широкий спектр частот, а также работа при комнатной температуре делает лазерные методы генерации сравнительно эффективными и простыми в реализации. Кроме того, возбуждённые лазерным импульсом ТГц-волны обладают очень важным свойством, уникальным для этой группы методов – такие импульсы «привязаны» по фазе к породившему их лазерному импульсу. В результате один и тот же лазерный импульс (разделённый на два) может быть использован и для генерации ТГц-импульса, и для его детектирования электрооптическими

методами. При этом можно измерить электрическое поле быстро осциллирующего ТГц-излучения с очень высоким разрешением – порядка длительности фемтосекундного лазерного импульса. Основанный на этом свойстве метод ТГц-генерации и детектирования получил название ТГц спектроскопии во временной области [1].

1.2 Свойства ТГц-излучения

Несмотря на сложности генерации ТГц-излучения, его уникальные свойства стимулируют освоение ТГц-диапазона. Далее представлены некоторые отличительные особенности ТГц-излучения и вытекающие из них применения:

- ТГц-излучение является неионизирующим, в отличие от рентгеновского излучения, используемого в медицинской диагностике. В то же время, различные биологические ткани обладают существенно различным поглощением в данном диапазоне, что позволяет обеспечить контрастность снимков. Однако, чрезвычайно высокое поглощение водой не позволяет ТГц-излучению проникать глубоко в ткани, что ограничивает область его применения поверхностью тканей;

- по сравнению с видимым и ИК-излучением, ТГц-излучение является длинноволновым, а значит, что оно менее подвержено рассеянию. В результате, в этом диапазоне прозрачны многие сухие диэлектрические материалы, такие как ткани, дерево, бумага, пластмассы. Поэтому ТГц-излучение можно использовать для неразрушающего контроля материалов, сканирования в аэропортах, и пр. В то же время длина волны излучения достаточно мала, чтобы обеспечить субмикронное пространственное разрешение при использовании свободно распространяющегося излучения. При использовании методов ближнего поля может быть достигнуто пространственное разрешение порядка нанометров;

- в ТГц-диапазоне лежат резонансы вращательных и колебательных переходов многих молекул. Это позволяет проводить идентификацию молекул по их спектральным «отпечаткам пальцев». В сочетании с получением изображения (имиджинг) в ТГц-диапазоне это позволяет определить не только форму, но и состав исследуемого объекта;

- ТГц-излучение может быть продетектировано во временной области, т.е. может быть измерена как амплитуда, так и фаза поля. Это позволяет напрямую измерять вносимый исследуемым объектом сдвиг фаз, а значит, позволяет исследовать быстропротекающие процессы и даже управлять ими.

1.3 Области применения ТГц-излучения

Когерентная ТГц спектроскопия во временной области, обеспечивающая сверхширокую частотную полосу и высокое разрешение по времени, позволяет исследовать состав, электронные и колебательные свойства твёрдых тел, жидкостей и газов, плазмы и плазмоподобных сред, потоков. Многие биологические и химические агенты имеют спектральные «отпечатки пальцев» в ТГц-диапазоне, связанные с уникальными колебательными и вращательными уровнями молекул, что позволяет исследовать их химический состав с помощью ТГц-излучения. Это свойство можно применить для диагностики заболеваний, обнаружения биологических и химических агентов, загрязнений, контроля качества продуктов питания и медикаментов. Одним из важных возможных применений является обнаружение замаскированной пластиковой взрывчатки. Детектирование связанных состояний генетического материала (ДНК и РНК) путем прямого использования ТГц-излучения, без применения специальных маркеров, позволит в будущем проводить безмаркерный генетический анализ биочипов.

ТГц имиджинг (фотография) позволяет получить изображения образцов с контрастом по составляющим их компонентам, исследовать содержание воды в биологических образцах, их состав. Благодаря меньшему (по сравнению с ИК-

излучением) рассеянию биологическими тканями ТГц изображения могут обеспечивать лучший контраст при медицинской диагностике [11].

Освоение ТГц-диапазона частот – одно из наиболее развивающихся направлений современной прикладной физики.

Создание в 80-ых годах прошлого века мощных импульсных лазеров, в частности, фемтосекундных, т.е. генерирующих импульсы длительностью порядка 100 фс ($1 \text{ фс} = 10^{-15} \text{ с}$), открыло путь для создания компактных источников ТГц-излучения, основанных на взаимодействии лазерного излучения с веществом. Выяснилось, что ТГц-излучение можно получать за счёт нелинейного преобразования высокоинтенсивного лазерного излучения в кристаллах (генерация разностной частоты), а также за счёт некоторых линейных эффектов, таких как индуцированная лазерным импульсом генерация носителей в полупроводниках [10].

В конце 80-ых годов был совершён прорыв в ТГц исследовании – впервые был продемонстрирован метод ТГц спектроскопии во временной области (Terahertz Time-Domain Spectroscopy, THz TDS). Этот метод основан на генерации и детектировании когерентного ТГц-излучения с помощью импульсов одного и того же лазера. В отличие от других методов, где измеряется только огибающая импульса или мощность излучения, ТГц спектроскопия во временной области позволяет с высоким разрешением непосредственно детектировать электрическое поле ТГц-импульса, длительность которого всего порядка 1 пс (10^{-12} с). Непосредственное измерение электрического поля позволяет извлечь информацию о сдвиге фаз ТГц-поля при его взаимодействии с объектом, а значит, открывает возможности для исследования сверхбыстрых (происходящих за доли пикосекунд) процессов.

Интерес к ТГц-диапазону частот учёными и инженерами в различных странах мира, обусловлен перспективами широких практических приложений ТГц-излучения (Т-лучей). Электромагнитное излучение ТГц-диапазона, с периодом колебания около 1 пс, является уникальным инструментом для исследований и технических применений.

Приведём характерные примеры физических явлений, поясняющих такой интерес. Электроны, находящиеся на высоковозбужденных ридберговских состояниях атомных орбит, соответствуют энергии кванта на ТГц-частоте. Частота вращения молекул соответствует также ТГц-диапазону. Столкновения между молекулами в газовой фазе при комнатной температуре имеют характерный временной интервал в 1 пс. Моды коллективной вибрации биологически-важных белков имеют характеристические частоты в ТГц-области. Электроны в полупроводниках имеют резонансы на ТГц-частотах. Энергетические щели в сверхпроводниках имеют границы в ТГц-области. Переходы электронов в транзисторах технологии Intel's имеют временное разрешение ~ 1 пс. Газообразная и кристаллическая плазма имеет собственные частоты колебаний в ТГц-области.

С помощью ТГц-излучения можно управлять химическими реакциями и манипулировать электронными состояниями в квантовых ямах [2,3].

ТГц или дальняя инфракрасная область электромагнитного спектра имеет огромное значение в спектроскопии газов, конденсированных сред, при получении изображений с предельно высоким разрешением – ближнеполевая SNOM спектроскопия, в бесконтактном получении изображений скрытых объектов – проекты по безопасности. ТГц-излучение также потенциально применимо в медицине, микроэлектронике, высокоскоростной беспроводной передаче данных на небольшие расстояния, и многих других областях [1].

В отличие от рентгена Т-лучи позволяют проводить безвредную для человека диагностику, в том числе раковых опухолей, а также глубины и степени ожогов.

Перспективны такие применения ТГц-излучения, как беспроводная коммуникация компьютеров и периферийных устройств внутри зданий, разработка систем безопасности на основе ТГц-видения [9].

Несмотря на успешное применение лазерной генерации импульсного ТГц-излучения в целом ряде приложений, существует ряд факторов, ограничивающих развитие данного направления:

- современные ТГц-излучатели имеют довольно низкую эффективность преобразования энергии оптического импульса в энергию ТГц-волны. Для регистрации приходится использовать синхронный детектор, а время накопления сигнала в единичном измерении составляет несколько мс;

- высокое поглощение парами воды существенно ослабляет ТГц-сигнал при его распространении в атмосфере, что существенно усложняет задачу удалённой ТГц-диагностики;

- толстые образцы или образцы с высоким коэффициентом поглощения в ТГц-диапазоне не позволяют зарегистрировать прошедший ТГц-сигнал, можно исследовать только слабый рассеянный или отражённый сигнал.

Эти проблемы имеют общее решение – увеличение отношения «сигнал-шум» системы, то есть, фактически, увеличение мощности ТГц-излучателя или увеличение чувствительности детектора.

1.4 Техника ТГц-диапазона

Для решения важных прикладных задач в ТГц-диапазоне требуется соответствующая техника. К технике ТГц-диапазона относятся следующие приборы и устройства.

Источники излучения: классические (например ртутные), лампы обратной волны (ЛОВ), полупроводниковые диоды, газовые лазеры, каскадные лазеры, генераторы волнового фронта, генераторы разностной частоты, синтезаторы частоты, синхротроны, генераторы на свободных электронах.

Приёмники излучения: калориметры, болометры на обычных носителях тока, сверхпроводниковые болометры, фотодетекторы на сверхпроводниках, приёмники на разогретых электронах, квазиоптические гетеродины, приёмники Джозефсона.

Модуляторы и преобразователи излучения: полупроводниковые модуляторы, фазовые модуляторы, диэлектрические линзы, внеосевые

металлические фокусаторы, зонные пластинки, поляризаторы, фазовые пластинки, фазовращатели, аттенюаторы.

Линии передач: металлические волноведущие системы, диэлектрические волноводы, линзовые линии, квазиоптические пучки.

Системы визуализации: сканеры, матричные приёмники, люминесцентные преобразователи.

Из всего многообразия техники ТГц-диапазона наиболее значимыми являются детекторы и излучатели (генераторы). Проблема генерации и детектирования в ТГц-диапазоне является весьма сложной. В этом диапазоне, между инфракрасным и микроволновым диапазонами, не применимы хорошо разработанные за последние полвека физические принципы генерации оптического и СВЧ-излучений. Причём, развитие приёмных элементов для ТГц-диапазона происходит быстрее, чем развитие в области разработки и создания источников ТГц-излучения, хотя в последнее время и здесь наметился прогресс. При этом, интерес представляют не только рекордные параметры этих приборов, но и фундаментальные исследования природы физических процессов в используемых материалах.

Остановимся подробнее на генераторах и детекторах излучения ТГц-диапазона.

1.5 Детектирование сигнала в ТГц-диапазоне

Детектирование на ТГц-частотах отличается от детектирования в области более коротких длин волн оптического и более длинных волн радиодиапазона. По сравнению с короткими длинами волн, в связи с низким уровнем энергии фотонов на ТГц-частотах, шумы окружающего фона в виде теплового шума являются доминирующими, что требует как криогенного охлаждения детекторов, так и увеличения времени обработки радиометрических измерений. Подчеркнём ещё одну сложность в процессе детектирования сигнала в ТГц-диапазоне. В отличие от радиочастного диапазона, и в устройствах оптического

диапазона в области ТГц-частот практически невозможно сделать усилитель сигнала, в связи с отсутствием подходящих компонент. В связи с этими трудностями при детектировании сигналов в ТГц-диапазоне применяют в основном гетеродинные методы, хотя в последние годы значительное внимание стали уделять технологиям прямого детектирования [2]. В общем случае, удобно выделить два основных типа методов для генерации и детектирования

Во-первых, это оптические методы, такие как метод ТГц-сигнала (Рисунок 1.4).

«Photomixing» – смешения оптических частот, пригодный как для детектирования, так и генерирования сигнала в ТГц-области и методах оптической накачки.

Во-вторых, это электронные методы, реализованные в квантово-каскадных лазерах, диодах Ганна, умножителях частоты на диодах Шотки и т.д. К примеру, излучение и детектирование ТГц-сигнала на основе колебаний двумерного электронного газа (2DEG) в полевых транзисторах, позволяет создавать приборы, работающие в качестве детектора и источника излучения в ТГц-диапазоне в широком диапазоне рабочих температур и частот.

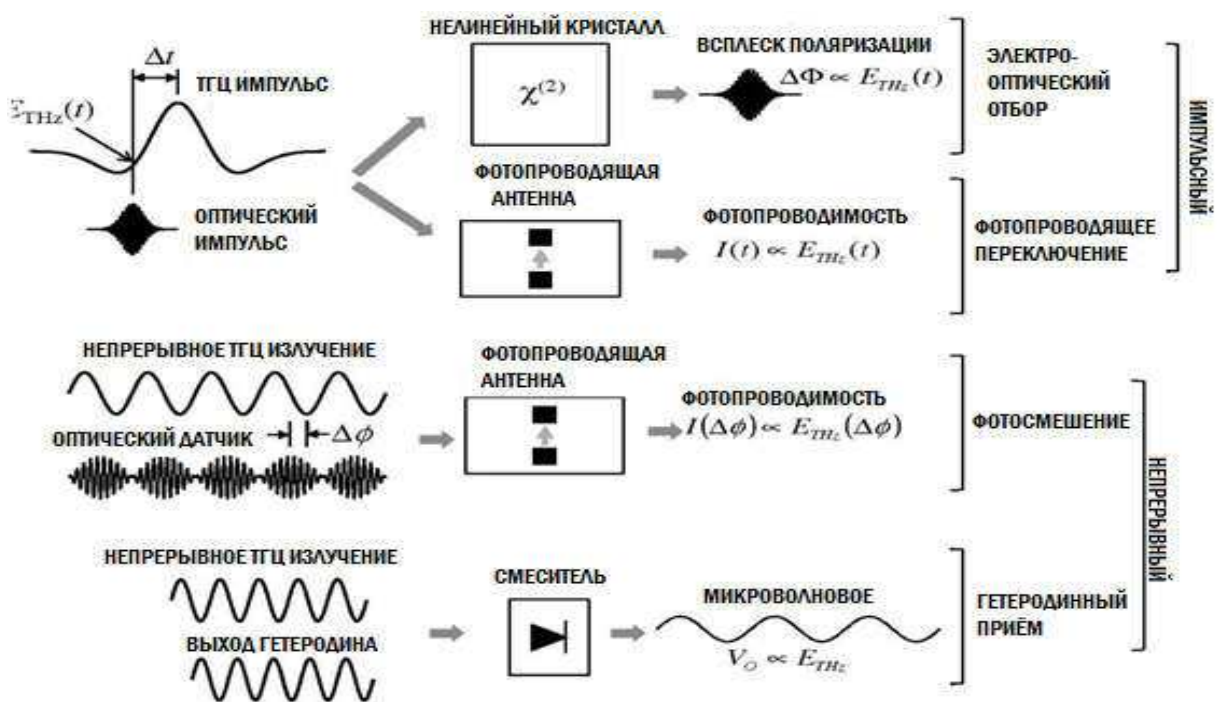


Рисунок 1.4 – Схемы методов детектирования в ТГц-диапазоне

В настоящее время разработаны и коммерчески доступны различные типы приёмников ТГц-диапазона, которые отличаются как по своей стоимости, так и по основным характеристикам. Широкое распространение получили полупроводниковые фоторезисторы и пиродетекторы, основными достоинствами которых является работа при комнатных температурах и достаточно высокая чувствительность. Эквивалентная мощность шума (NEP) этих приборов составляет $\sim 10^{-9}$ Вт/Гц. В таблице 1.1 приведены типовые характеристики наиболее применяемых в настоящее время детекторов в ТГц-диапазоне [3].

Таблица 1.1 – Характеристики наиболее распространённых детекторов в ТГц-диапазоне

Образец	Диапазон длин волн (мкм)	Время реакции	Реакция (V/W)	Эквивалентная мощность шума NEP (W/ $\sqrt{\text{Hz}}$)
Внешние				
GeGa	30-160	100 нс	10^7	$6 \cdot 10^{-14}$
SiAs	100-500	1 нс	$2 \cdot 10^3$	10^{-11}
GaAs	100-350	10 нс	10^7	$4 \cdot 10^{-14}$
Болометры				
Ge 4,2 К	30-1000	10 мс	$2 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^{-11}$
Ge 1,5 К	30-1000	1 мс	$2 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^{-13}$
Si 4,2 К	2-2000	1 мс	$1,5 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^{-12}$
InSb 4,2 К	200-2000	10 мкс	10^3	10^{-12}
InSb 1,5 К	200-2000	10 мкс	$2 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^{-13}$
InSb 4,2 К магн. поле	100-2000	1 мкс	$5 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^{-12}$
Болометры НЕВ				
Nb, NbN	Широкополосн.	нс		$10^{-12} \sim 10^{-14}$
Ячейка Голея	Широкополосн.	мс-с	10^{-4}	$\cdot 10^{-10}$
Оптоэлектроника				
Фото-переключатели	Широкополосн. ~ 30 ТГц	суб-пс	$0,5-1 \cdot 10^3$	$\sim 3 \cdot 10^{-10}$
Кристалл EO	Широкополосн. ~ 60 ТГц	суб-пс		

Однако предельное быстродействие полупроводниковых фоторезисторов и пиродетекторов не удовлетворяет многим перспективным научно-исследовательским и коммерческим применениям.

Интенсивно развивающиеся в последние несколько лет исследования и применения излучения ТГц-диапазона частот стимулируются как разработкой и созданием новых твердотельных источников ТГц-излучения, квантово-каскадных и фемтосекундных лазеров, так и совершенствованием болометрических приёмников, являющихся наиболее чувствительными в данном диапазоне [9].

Развитие на рубеже 21 века тонкоплёночных сверхпроводниковых технологий привело к появлению и созданию нового типа ТГц-приёмников – сверхпроводниковых болометров на эффекте электронного разогрева (hot-electron bolometers), обладающих значительно лучшим быстродействием и чувствительностью. Приёмным элементом такого болометра является структура из ультратонкой (3-4 нм) сверхпроводниковой пленки с субмикронными (до 50 нм) планарными размерами. Благодаря быстрым временам релаксации энергии в ультратонких сверхпроводниковых пленках, резкой зависимости сопротивления от температуры в области сверхпроводящего перехода, малому объёму чувствительной области болометра для таких структур удаётся добиться, как предельно высокой чувствительности ($NEP \sim 10^{-12}$ ч 10^{-14} Вт/Гц^{-1/2}), так и рекордного быстродействия (~ 50 пс).

Для повышения чувствительности измерений на частотах выше 100 ГГц, где отсутствуют малошумящие усилители, используют гетеродинные приёмники с высоким спектральным разрешением. Одним из основных элементов таких приёмников является нелинейный элемент – смеситель, который смешивает слабое сигнальное излучение, улавливаемое антенной, с излучением гетеродина, работающего на близкой частоте. На выходе смесителя образуется сигнал на разностной частоте, который можно легко зарегистрировать после усиления малошумящим усилителем.

Наибольшие успехи в гетеродинном ТГц детектировании получены благодаря исследованиям в области сверхпроводимости. В частности, исследование эффекта электронного разогрева в тонких сверхпроводниковых

пленках в середине 80-х годов, привело к созданию в 90-е годы нового класса приборов – сверхпроводниковых болометров на горячих электронах, в международной литературе обозначаемых как НЕВ (hot-electron bolometers) [7].

Наряду с появлением в начале 90-х годов сверхпроводниковых НЕВ смесителей был предложен еще один тип НЕВ смесителей, отличающихся от первых типом используемых материалов. Это смесители ТГц и суб-ТГц-диапазона волн на эффекте разогрева двумерного электронного газа (2DEG) в полупроводниковых гетероструктурах AlGaAs/GaAs [4].

Электроны в таких гетероструктурах, как AlGaAs/GaAs, относительно слабо связаны с фононами, поэтому даже для малых рассеиваемых мощностей наблюдается эффект электронного разогрева, играющий важную роль в механизме детектирования ТГц-излучения. Такие параметры гетероструктуры AlGaAs/GaAs, как высокая подвижность носителей и её зависимость от температуры, позволяют реализовывать на её основе смесители, работающие при температуре жидкого азота – 77 К и выше. Охлаждение смесителя до этого уровня температур может легко осуществляться при помощи компактных криогенных машин. Основными достоинствами такого типа смесителей являются относительно высокая рабочая температура и широкая полоса преобразования (до 20 ТГц для диффузионного механизма охлаждения и до 37 ТГц).

На основе сверхпроводниковых болометров из плёнок NbN и MoRe разработаны и созданы приёмные системы нескольких типов, покрывающих частотный диапазон 0,3 – 70 ТГц [8]. Типовая система состоит из детекторного блока и электронного блока управления. В детекторный блок включены: откачной вакуумный гелиевый криостат с рабочей температурой около 4,2 К, держатель, в который установлена вытянутая полусферическая линза с зафиксированным болометром, криогенный малошумящий НЕМТ усилитель и адаптер смещения. Нагреватель болометра позволяет работать вблизи сверхпроводящего перехода ($\max \partial R / \partial T$), тем самым работать в области максимального отклика болометра на ТГц-излучение. Электронный блок управления интегрирован с дополнительным малошумящим усилителем и

предоставляет возможность использования приёмной системы в среде программирования LabView.

К примеру, детальная информация о быстродействующих сверхпроводниковых приёмных системах ТГц-диапазона частот представлена на сайте компании Scontel (www.scontel.ru). Быстродействие приёмных систем на основе MoRe сверхпроводниковых болометров составляет 1 нс, на основе NbN сверхпроводниковых болометров составляет 50 пс.

Результаты измерения NEP в диапазоне частот 0,3 – 70 ТГц для трёх типов разработанных приёмных систем на основе сверхпроводниковых болометров из тонких плёнок MoRe представлены на графиках, приведённых на рисунке 1.5 [8].

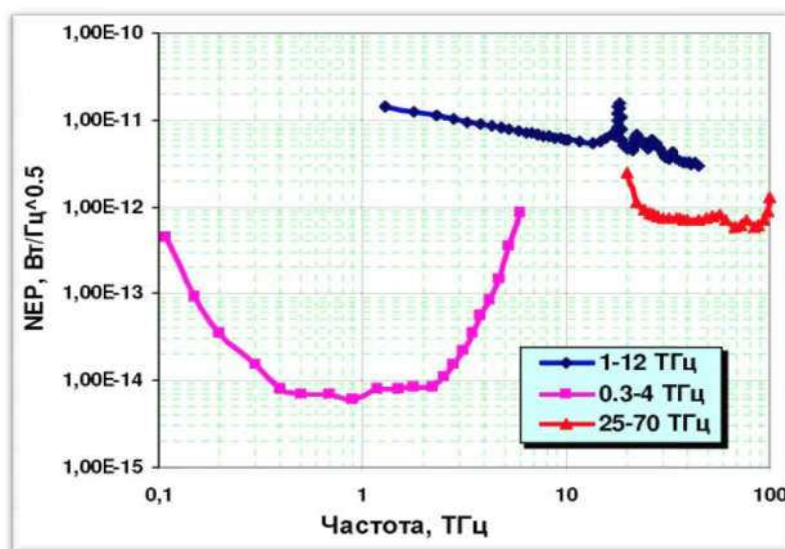


Рисунок 1.5 – Шумовые характеристики сверхпроводящих болометров фирмы SCOTNEL

В настоящее время многие проекты субмиллиметровой супергетеродинной радиоастрономии и зондирования атмосферы в ТГц-диапазоне основаны на СИС смесителях диодах Шоттки и на сверхпроводниковых НЕВ смесителях. Каждый из представленных типов смесителей обеспечивает работу в том или ином диапазоне частот, где его характеристики существенно лучше, чем у остальных.

Благодаря сильной температурной зависимости сопротивления в условиях перехода в сверхпроводящее состояние НЕВ смесители обладают очень

высокой чувствительностью. За прошедшие годы технология этих смесителей значительно продвинулась вперед и на сегодняшний день они обладают наилучшими характеристиками и не имеют аналогов на частотах выше 1,2 ТГц. Низкая шумовая температура (950 К на частоте гетеродина 2,5 ТГц, измеренная в двухполосном режиме, и низкая требуемая мощность гетеродина (десятки нановатт - единицы микроватт)) определяют НЕВ смесители, как единственный приемлемый тип для использования в современных радиоастрономических проектах на ТГц-частотах.

Эффект электронного разогрева в тонких разупорядоченных сверхпроводниковых металлических плёнках обладает двумя очень важными свойствами: коэффициент поглощения не зависит от частоты вплоть до видимого диапазона частот и время энергетической релаксации электронов в таких структурах очень мало (для плёнок NbN $\approx 10^{-11}$ с). Это позволяет реализовать смесители с полосой промежуточных частот более 10 ТГц [8], а также их работу на более высоких частотах гетеродина, чем разработанные к настоящему времени.

Многие международные проекты, уже находящиеся на стадии реализации, предполагают использование сверхпроводящих смесителей на электронном разогреве в приёмниках наиболее высокочастотных каналов. Вместе с тем, в ряде современных проектов, находящихся на стадии разработки и направленных на радиоастрономические исследования с космическим базированием, к смесителям уже предъявлены требования, для реализации которых необходимо приложить значительные усилия в их разработке и оптимизации. Одним из наиболее значимых требований является широкая полоса преобразования (более 6 ТГц) при низкой шумовой температуре, превышающей не более чем в несколько раз квантовый предел.

В этой связи, актуальным является поиск других сверхпроводниковых материалов (кроме, как NbN), демонстрирующих неравновесный отклик с постоянной времени пикосекундного диапазона. Этот поиск – длительный и трудоёмкий процесс, поскольку разработка процесса осаждения тонких

сверхпроводящих плёнок требует значительных временных и материальных затрат. Перспективными материалами для разработки НЕВ смесителей представляются сверхпроводящие материалы и их сплавы с достаточно высокой критической температурой, такие как Nb_3Ge , Nb_3Al и др. с критической температурой до 20 К и способные осаждаться в тонких сверхпроводящих плёнках. Сейчас невозможно указать на какой-либо сверхпроводник, который в будущем окажется удачным с точки зрения технических применений: в частности одновременное выполнение всех условий для реализации широкой полосы преобразования может наблюдаться далеко не всегда. Весьма перспективным материалом является $NdZr$, имеющий довольно высокую критическую температуру в объеме (около 11 К), при этом он имеет весьма хорошие механические свойства и устойчив к воздействию окружающей среды.

Проанализировав существующие направления исследований процессов релаксации в новых сверхпроводниковых материалах и в двумерном электронном газе гетероструктуры $AlGaAs/GaAs$ при температуре 77 К, можно прийти к выводу, что разработка, создание и оптимизация широкополосных НЕВ смесителей и гетеродинных приёмников ТГц-диапазона на их основе является, несомненно, актуальной задачей.

Современные технологии производства твердотельных материалов и в особенности полупроводниковых позволяют снять основные причины затруднения детектирования и генерации в ТГц-диапазоне. К примеру, к таким технологиям, прежде всего, необходимо отнести методы молекулярно-лучевой эпитаксии (МВЕ). В настоящее время типы приборов на основе квантовых структур произведённых методами МВЕ имеют самый широкий спектр применений для генерации и обнаружения ТГц-излучения. К примеру, квантово-каскадные лазеры (QCL), как генераторы на квантовых ямах или инфракрасные фотоэмиссионные детекторы на межфазных гетеропереходах с заданным частотным интервалом работы могут быть рассчитаны и произведены путём изменения профиля легирования для изменения ширины квантовых ям или потенциальных барьеров [7]. Кроме того, легированием можно менять

свойства носителей в слоистых гетероструктурах для детекторов ТГц-излучения с использованием возбуждения плазменных волн или неоднородного нагрева электронов в двумерном электронном газе [4].

1.6 Генерирование сигнала в ТГц-диапазоне

В настоящее время для генерирования сигналов в ТГц-диапазоне на стадии практического использования применяют такие источники, как гиротроны (мазеры на свободных электронах), лампы обратной волны (ЛОВ), лазеры дальнего ИК-диапазона, квантово-каскадные лазеры, лазеры на свободных электронах, источники работающие на принципе фотосмещения частот. На рисунках 1.6, 1.7, и 1.8 приведены принципиальные схемы реализации источников ТГц-излучения.

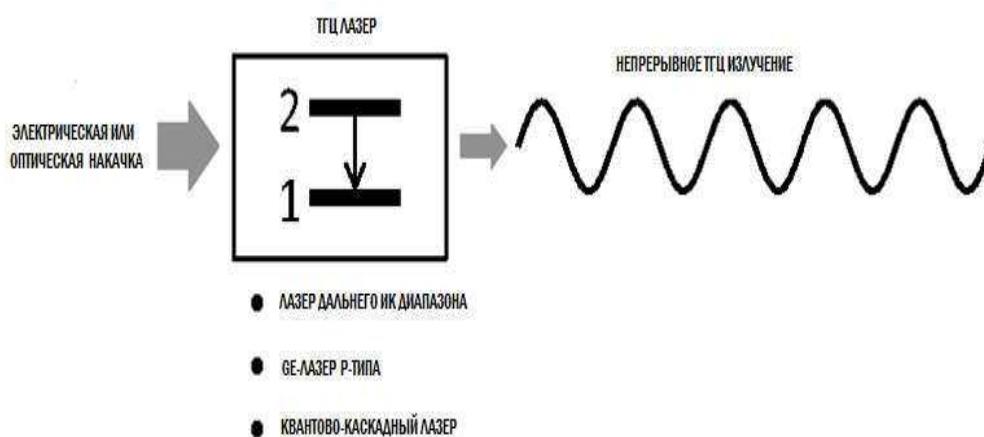


Рисунок 1.6 – Генерация ТГц-излучения за счёт инжекции электронов и оптической накачки

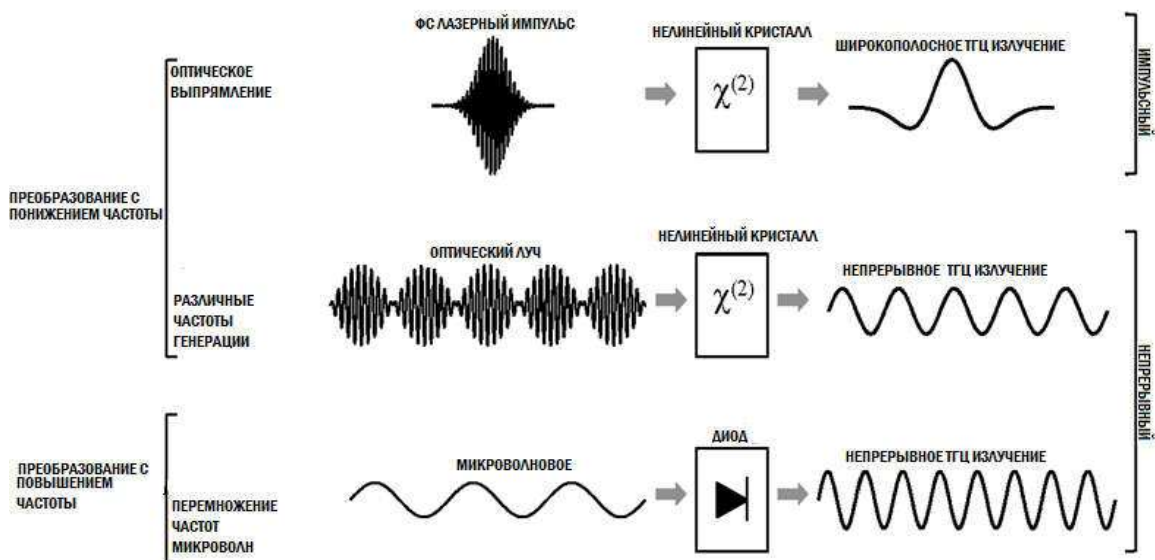


Рисунок 1.7 – Генерация ТГц-излучения в нелинейных средах

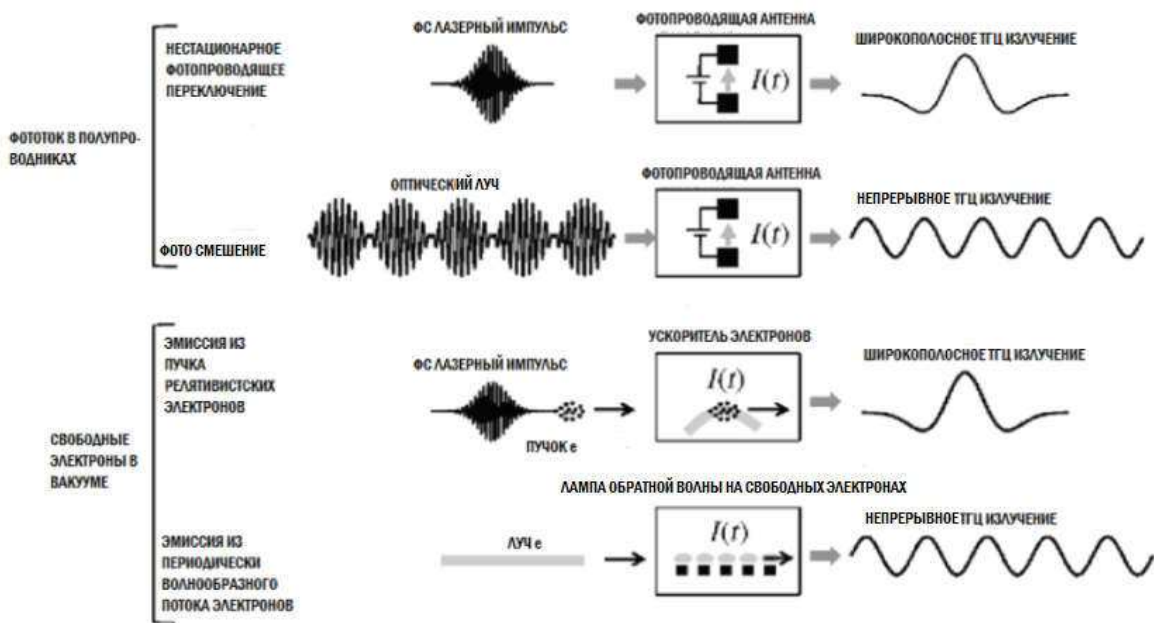


Рисунок 1.8 – Генерация ТГц-излучения за счёт ускорения электронов

Существенный прогресс в области создания компактных источников когерентного ТГц-излучения произошел в 90-е годы 20-го века в связи с появлением мощных фемтосекундных лазеров. Излучение таких лазеров способно наводить в веществе всплески поляризации (или тока) субпикосекундной длительности, которые и являются источником ТГц-излучения. Физические механизмы создания всплеска поляризации (тока) могут

быть как нелинейными (пондеромоторная сила в плазме, нелинейно-оптическое выпрямление в электрооптических средах), так и линейными (фотоионизация в полупроводниках). В настоящее время взаимодействие фемтосекундных лазерных импульсов с электрооптическими и полупроводниковыми средами стало наиболее распространённым способом генерации ТГц-излучения [1]. Оптико-терагерцовые преобразователи на основе таких сред сравнительно дешёвы, компактны и могут генерировать мощности до несколько кВт. Их основным недостатком является малый коэффициент преобразования по энергии – порядка 10^{-5} - 10^{-6} , так что поиск эффективных источников ТГц-излучения продолжается.

На рисунке 1.9 показано: какое место занимает то или иное техническое решение в области разработок источников ТГц-излучения.

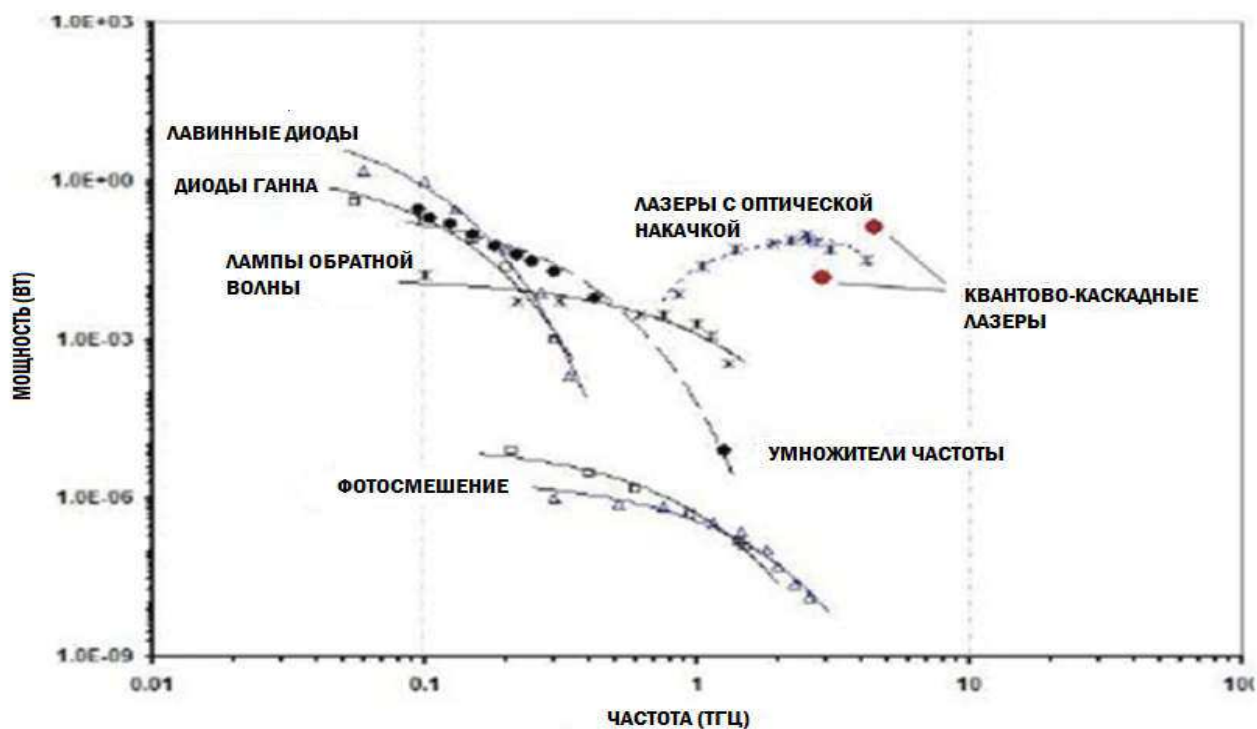


Рисунок 1.9 – Современные технические решения в области ТГц-источников

В целом, выбор источника ТГц-диапазона определяется конкретным типом схемы детектирования.

2 Модель молекулярного лазера ТГц-диапазона с оптической накачкой излучением CO₂-лазера

2.1 Актуальность решения поставленных задач

Несмотря на достижения в области исследований генерации и детектирования в ТГц-диапазоне, по-прежнему, лазерные источники ТГц-диапазона с оптической накачкой (OPTL), являются наиболее предпочтительными. Такие лазеры обладают значительной когерентностью, просты в эксплуатации, имеют значительный ресурс в эксплуатации, имеют возможность работать в очень широком диапазоне. Разработки OPTL широко используются по всему миру, в первую очередь для астрономии, экологического мониторинга и диагностики плазмы.

Реализация потенциальных возможностей нового метода генерирования излучения в диапазоне субмиллиметровых длин волн потребовала углублённого, комплексного изучения сложных физических процессов, лежащих в основе лазерного эффекта на вращательных переходах многоатомных молекул, возбуждаемых излучением мощного ИК-лазера. Возникла необходимость в проведении целого комплекса физических исследований, связанных с выбором подходящих молекул, детальным изучением их спектров вынужденного излучения, изучением вращательных и вращательно-колебательных спектров поглощения, идентификацией рабочих переходов лазеров, изучением общих закономерностей свойств активной среды, изучением энергетических и частотных характеристик лазеров, выработкой рекомендаций по оптимальному конструированию генераторов, разработкой и созданием действующих образцов приборов. Принцип действия OPTL позволяет оптимизировать параметры лазера (улучшения КПД и уровня генерируемой мощности) в непрерывном и в импульсном режимах. Отсутствие электрического разряда в газе позволяет создать "отпаянные" приборы.

И самое главное, к концу 90-х годов на коммерческом рынке высоких технологий появились предложения лазеров накачки, например CO₂-лазеров, имеющих высокие технические характеристики, значительную надёжность в работе, что послужило значительным толчком для освоения ТГц-диапазона с их помощью.

Анализ научно-технической литературы [12] позволил выявить данные о достижении разными исследователями более чем 800 линий генерации в ТГц-диапазоне от 144 ГГц до 7919 ГГц с возбуждением молекулярных сред излучением перестраиваемого по частоте излучения CO₂-лазера, практически непрерывно заполняющих этот диапазон с шагом примерно в 50 МГц.

К примеру в таблице 2.1 приведены некоторые сведения о соответствии линий накачки CO₂-лазера и частот генерируемых лазером на метаноле.

Таблица 2.1 – Результаты сопоставления длин волн

Частота (ГГц)	Молекула	Переход	Линия накачки CO ₂
764,6426	CH ₃ OH	(n, t, K; J) : (0,1,8;16) - (0,1,8;15)	9P (36)
775,9824	CH ₃ OH		9P (14)
812,1954	CH ₃ OH		9P (16)
1286,9995	CH ₃ OH	(n, t, K; J) : (0,2,10;27) - (0,2,10;26)	9R (10)
1287,8322	CH ₃ OH		9R (22)
1329,3629	CH ₃ OH		9R (8)
1404,4269	CH ₃ OH		
1509,0402	CH ₃ OH	(n, t, K; J) : (0,2,5X;10) - (0,2,5L;9)	9P (22)
1525,1641	CH ₃ OH		9P (44)
1544,8187	CH ₃ OH	(n, t, K; J) : (0,3,9;30) - (0,1,8;30)	9R (14)
1552,1901	CH ₃ OH	(n, t, K; J) : (0,2,5X;10) - (0,2,5U;9)	9P (38)
1564,5187	CH ₃ OH		10R (10)
1982,0506	CH ₃ OH		9R (26)
2063,9411	CH ₃ OH		10R (32)
2541,4856	CH ₃ OH		9P (14)
3239,4616	CH ₃ OH		9P (22)

2.2 Механизм инверсии населённостей в молекулярном ТГц-лазере с оптической накачкой

Инверсия населённостей для ОРТЛ достигается на вращательных переходах в возбуждённых колебательных состояниях. Рассмотрим физические принципы работы такого лазера на примере лазера на метаноле (CH_3OH) с частотой излучения 118,8 мкм [12].

Физические диаграммы процесса генерации представлены на рисунках 2.1 и 2.2.



Рисунок 2.1 – Иллюстрация процессов возбуждения в ТГц-лазере на метаноле

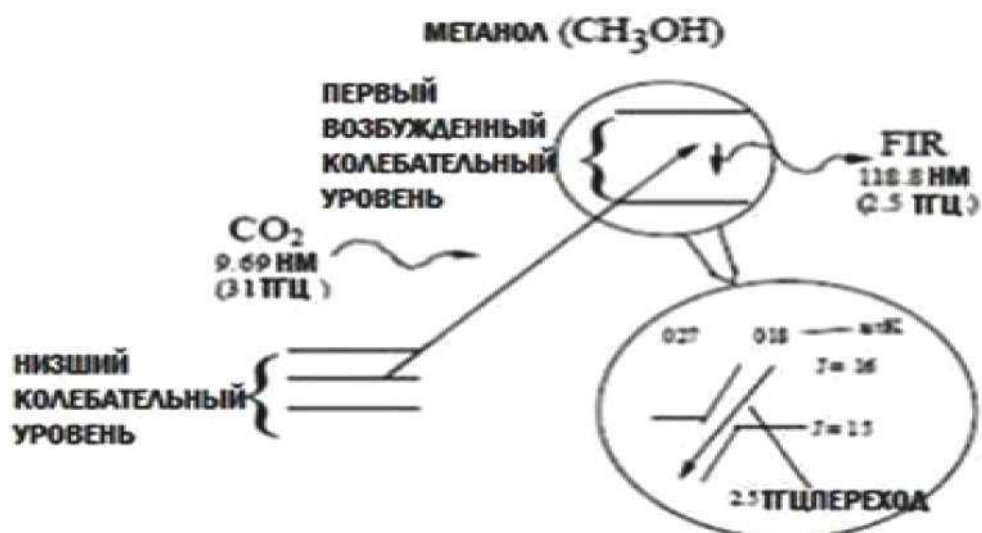


Рисунок 2.2 – Схема генерации ТГц-лазера на метаноле

В процессе генерации ИК-излучения CO_2 -лазера поглощается молекулой метанола, индуцируя переход молекулы, находящейся в определённом (нижнем) колебательно-вращательном состоянии в возбуждённое (верхнее) колебательно-вращательное состояние. Это становится возможным при совпадении энергии фотонов излучения CO_2 -лазера с энергией перехода между ними. При достаточной энергии фотонов могут возникнуть условия для инверсии во вращательных состояниях «верхнего» колебательно-вращательного состояния. Возврат энергетической системы в состояние соответствующее нормальному термодинамическому равновесию может приводить к вынужденному усилению фотонов в ТГц-диапазоне и при наличии положительной обратной связи в усилителе – к генерации когерентного ТГц-излучения.

В примере, приведённом на рисунке 2.1 энергия инфракрасного фотона, соответствующая длине волны 9,69 мкм вызывает колебание молекулярной связи CO с соответствующим вращательным квантовым числом $J = 16$. При вынужденной релаксации во вращательных состояниях молекулы при переходе с $J = 16$ на $J = 15$ излучаются фотоны с длиной волны 118,8 мкм. В этом состоянии молекула CH_3OH может оставаться достаточно долго, до соударения со стенкой трубки и последующей V-T релаксацией до состояния на момент возбуждения.

Вследствие большой разницы между вращательными и колебательными уровнями энергий, процесс генерации является весьма неэффективным. Значительная доля излучения накачки просто преобразуется в тепло. Теоретический предел эффективности OPTL определяется известным пределом Мэнли-Роу (соотношения Мэнли-Роу справедливы для системы с произвольной реактивной нелинейностью). В совокупности с законами сохранения энергии и импульса, соотношения Мэнли-Роу определяют характер нелинейного взаимодействия волн (колебаний) и позволяют рассчитать максимальную эффективность преобразователя частоты на реактивной нелинейности. Для лучших образцов ТГц-лазеров с оптической накачкой ограничения Мэнли-Роу

теоретически не позволяют получать эффективность OPTL на метаноле более чем 5-10%.

Для рассматриваемого примера (рисунок 2.1 и рисунок 2.2) выполним оценку мощности генерации ТГц-лазера при мощности генерации CO₂-лазера 10 Вт, излучаемой на лазерном переходе 9P(36). Для этого запишем соотношения Мэнли-Роу в упрощённом виде:

$$\frac{P_{CO_2}}{\omega_{CO_2}} = \frac{P_{118.8\mu}}{\omega_{118.8\mu}} \quad (1)$$

где P_{CO_2} – мощность излучения CO₂-лазера на линии 9P(36);

ω_{CO_2} – частота излучения CO₂-лазера на линии 9P(36);

$P_{118.8\mu}$ – мощность излучения ТГц-лазера на метаноле;

$\omega_{118.8\mu}$ – частота излучения ТГц-лазера на метаноле.

После подстановки значений получаем: при входной мощности излучения накачки 10 Вт, мощность генерации ТГц-лазера на длине волны 118,8 мкм составляет величину $P_{118.8\mu} = 0,8$ Вт, что соответствует КПД ТГц-лазера = 8%. Необходимо отметить, что данные значения являются теоретически предельными оценками, не учитывающими ряд факторов. К этим факторам относятся релаксационные процессы для возбуждённых молекул метанола, а также неэффективность поглощения CO₂-лазера в газовых средах с низкой плотностью молекул. Даже в наиболее успешных технических решениях для OPTL, таких как SIFIR-50 (COHERENT, USA) КПД ТГц-лазера не превышал 0,3 %. В дальнейшем будем руководствоваться, именно такими значениями КПД, как показателем эффективности в наших исследованиях.

2.3 Модель оптического резонатора

Для эффективной генерации лазера был проведён анализ достоинств и недостатков лучших образцов молекулярных лазеров ТГц-диапазона с оптической накачкой излучением CO₂-лазера.

В ходе анализа было выявлено, что стремление получить генерацию ТГц-излучения в широком диапазоне частот (0,86 ТГц – 7,09 ТГц), приводит к различным дифракционным потерям при неизменной конструкции кюветы резонатора лазера. С этой точки зрения, оптимальным соотношением длины резонатора и диаметром трубчатого волновода, является требование, чтобы число зон Френеля не превышало 10. Известно, что при таком требовании распространение электромагнитных волн проходит с минимальными потерями в виде простых мод полого волновода [6].

Зададим условия:

- а) дифракционные потери в резонаторе не должны превышать 1-2%;
- б) резонатор должен иметь конфокальную конфигурацию, при которой он наиболее устойчив к разъюстировке;
- в) размеры резонатора: апертура кюветы $a = 30$ мм, длина кварцевой трубки кюветы $L = 1,5$ м.

Тогда, на частоте 0,86 ТГц (длина волны – 349 мкм), число зон Френеля $N = a^2/\lambda L$ на торце трубки составит величину $N = 1,71$, на частоте 2,52 ТГц (118,8 мкм) составит величину $N = 5,05$, то есть в обоих случаях не превышает 10.

Оценим потери мощности из-за дифракции при рассмотренных выше условиях как отношение площади отверстия для вывода ТГц-излучения из резонатора, к площади Френеля (S_0/S_1) резонатора. Оценка даёт величину не более 1,3%.

Пользуясь условием генерации [5], оценим требуемый коэффициент усиления активной среды лазера.

Имеем:

$$a \geq \frac{-\ln(r)}{2L} \quad (2)$$

где a – коэффициент усиления;

r – коэффициент отражения;

L – длина резонатора.

Откуда требуемое значение коэффициента усиления $a = 0,006 \text{ м}^{-1}$.

3 Экспериментальное исследование эффективности возбуждения активной лазерной среды на метаноле с использованием оптической накачки

3.1 Схема экспериментальной установки

Принципиальная схема экспериментальной установки приведена на рисунке 3.1

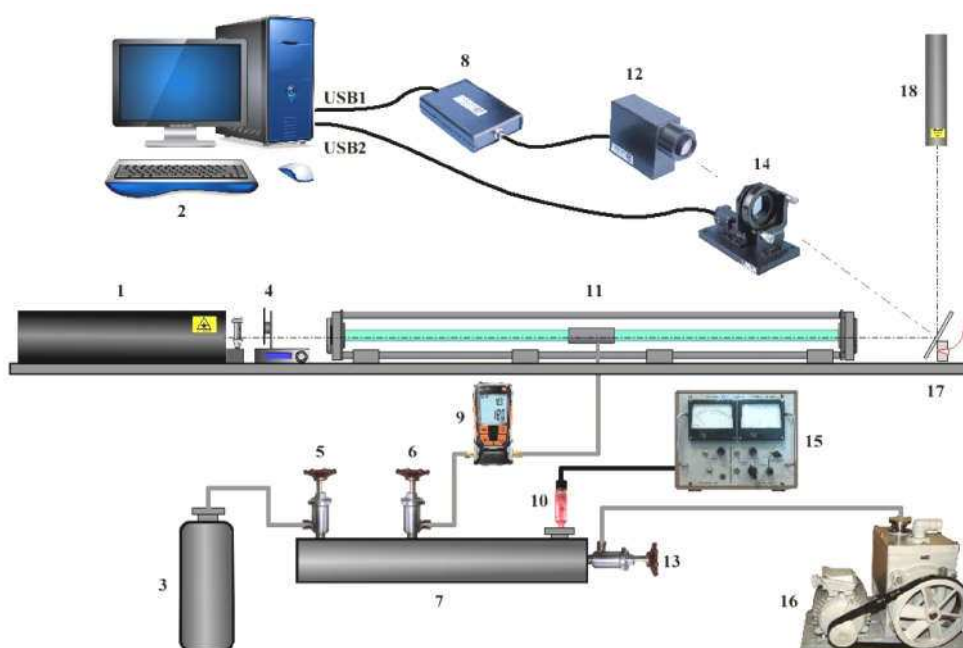


Рисунок 3.1 – Принципиальная схема экспериментальной установки

На рисунке 3.1 введены следующие обозначения конструктивных элементов: 1 – волноводный CO_2 -лазер; 2 – персональный компьютер ПК; 3 – сосуд, герметизированный для CH_3OH ; 4 – оптико-механический модулятор излучения CO_2 -лазера; 5 – клапан вакуумный, дозирующий; 6, 13 – клапан вакуумный, проходной; 7 – объем для приготовления газовой смеси; 8 – электронный модуль, соединяющий приёмник Голя с персональным компьютером ПК через USB интерфейс; 9 – вакуумметр Testo 552; 10 – термопарный манометрический преобразователь ПМТ-2; 11 – ТГц-лазер; 12 – приёмник Голя (Tydex GC-1P); 14 – ТГц сканирующий интерферометр Фабри-

Перо (TSFPI); 15 – вакуумметр ВИТ-2; 16 – насос вакуумный двухступенчатый НВР-5Д; 17 – узел для регулировки вывода ТГц-излучения; 18 – HeNe-лазер.

В качестве источника накачки использовался перестраиваемый по частоте излучения ($\lambda = 9,2 - 107$ мкм) волноводный CO₂-лазер. Особенностью конструкции лазера являлось применение в резонаторе оригинальных зеркал. Одно из зеркал было изготовлено путём напыления Au на плоский диск диаметром 50,8 мм из ZnSe. В середине зеркала имелся не запылённый участок в виде круга диаметром 2.5 мм для ввода излучения накачки от CO₂-лазера. Второе зеркало было изготовлено также путём напыления Au на плоский диск диаметром 50,8 мм, но уже из кристаллического кварца (z-срез). В середине зеркала имелся не запылённый участок в виде круга диаметром 3 мм для вывода ТГц-излучения. Как уже говорилось в п.п.2, традиционный способ ввода-вывода излучения в лазерах подобного типа осуществлялся через отверстия в зеркалах. Недостатком такого способа являются дополнительные апертурные потери, дифракционные потери и потери, связанные с качеством технологии изготовления отверстий в зеркалах. В нашем случае конструкция зеркал вносит в оптический резонатор только дифракционные потери. В качестве волновода использовалась кварцевая труба общей длиной 200 мм и внутренним диаметром 36 мм. Для измерений использовались приборы: ТГц-сканирующий интерферометр Фабри-Перо (TSFPI) и детектор Голея (GC-1P) производства ООО «Тидекс», Санкт-Петербург и программный комплекс GC-USBPC/1. Описание и характеристики приборов представлены в приложениях А и Б.

Результаты измерений определялись в ходе обработки изображений, полученных методом захвата изображений интерфейсом управления приёмником Голея с экрана ПК.

На рисунке 3.2 приведено типовое изображение измерений зависимости мощности ТГц-излучения от частоты, где частота – есть результат Фурье преобразования напряжения с приёмника Голея в зависимости от времени измерения. Нулевой частоте соответствует частота вращения оптико-механического модулятора.

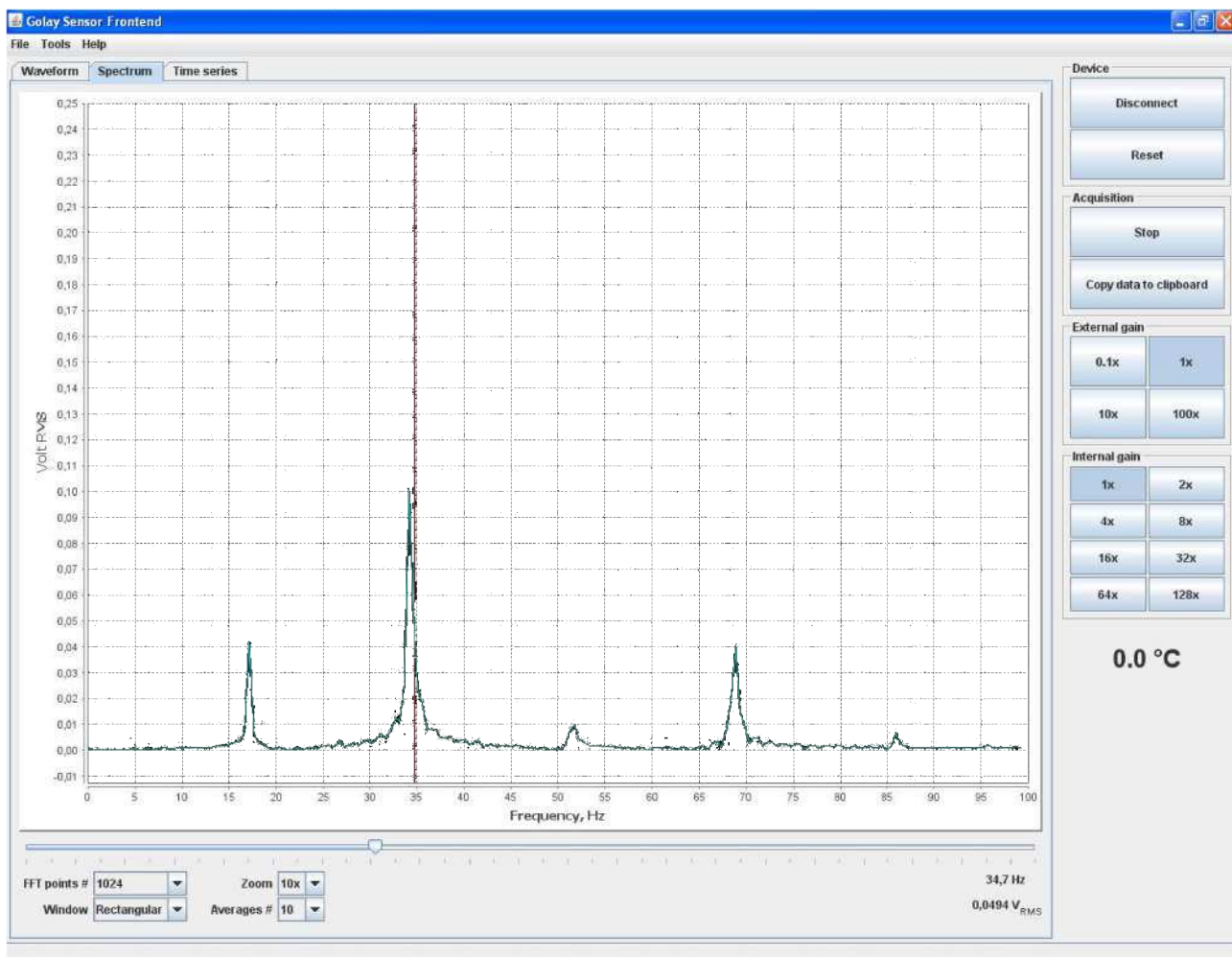


Рисунок 3.2 – Изображение интерфейса управления приёмником Голея

Точные абсолютные измерения мощности ТГц-излучения на момент исследований не проводились, так как требуют дополнительных калибровочных измерений, которые не были сделаны в настоящее время.

Тем не менее, используя технические данные на детектор Голея, можно оценить приблизительную мощность. Согласно техническому описанию, детектор Голея имеет коэффициент преобразования порядка 10×10^{-5} В/Вт. Необходимо отметить, что в этой оценке не учтены возможные апертурные потери, возникающие вследствие расходимости пучка ТГц-излучения.

3.2 Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение

В ходе исследований были проведены исследования зависимости мощности генерации ТГц-лазера и длины волны излучения от длины волны и мощности излучения CO₂-лазера, а также от давления активной среды.

В ходе экспериментов наблюдалась устойчивая генерация на трёх длинах волн 118 мкм, 170 мкм и 110 мкм. Максимальная мощность излучения 3,6 мВт была получена на длине волны 118 мкм при давлении метанола порядка 0,135 мм рт. ст. и накачке излучением CO₂-лазера мощностью 3 Вт, работающего на лазерном переходе 9P(36). В экспериментах использовался метанол марки ОЧ с содержанием воды в растворе не более 0,01% согласно паспортным данным на образец вещества. Температура окружающего воздуха в экспериментальной лаборатории поддерживалась кондиционером на уровне +23°C. Влажность в лаборатории не превышала 60%.

На рисунке 3.2 приведён график зависимости мощности генерации ТГц-лазера от давления метанола в резонаторе.

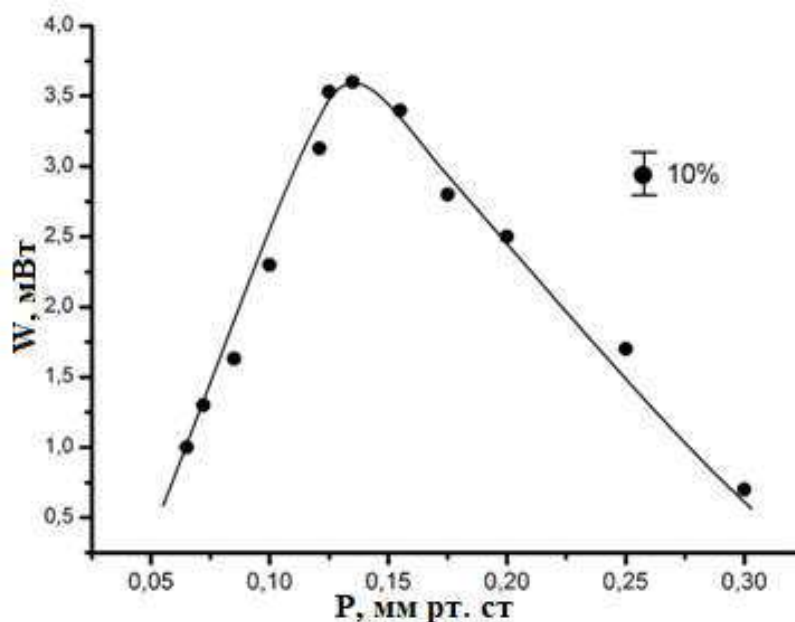


Рисунок 3.2 – Зависимость мощности генерации ТГц-лазера от давления метанола в резонаторе

Как можно видеть из графика эффективность работы лазера (КПД) имеет ярко выраженный максимум при давлении 0,135 мм рт. ст. и составляет величину 0,12%, что является хорошим показателем в сравнении с КПД лазеров подобного типа, измеренными другими авторами.

Дальнейшие исследования и проведение ОКР по повышению эффективности действия, выходной мощности и расширение числа генерируемых линий молекулярного ТГц-лазера связаны с повышением селективности оптического резонатора, выходной мощности лазера накачки и оптимизацией молекулярных сред, используемых в лазере.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе магистерской диссертации были получены следующие результаты:

- проведён анализ публикаций по теме «Молекулярные газовые лазеры ТГц-диапазона с оптической накачкой». В ходе которого были определены условия накачки молекулярных лазеров излучением перестраиваемого по частоте CO₂-лазера. Определены диапазоны рабочих давлений и состав газовых смесей;

- разработана конструкция молекулярного газового ТГц-лазера с оптической накачкой излучением CO₂-лазера, для которой потери волноводного конфокального резонатора не превышают 2%;

- выполнены исследования зависимостей длины волны излучения ТГц-лазера от длины волны излучения CO₂-лазера и зависимости мощности генерации лазера от давления активной среды;

- получена устойчивая генерация на трёх длинах волн 118 мкм, 170 мкм и 110 мкм, максимально достигнутая мощность излучения составила 3,6 мВт на длине волны 118,8 мкм при давлении метанола порядка 0,135 мм рт. ст. и накачке излучением CO₂-лазера мощностью 3 Вт, работающего на лазерном переходе 9P(36);

- выполненная работа может быть полезна для создания опытной модели молекулярного ТГц-лазера с оптической накачкой в диапазоне длин волн от 144 ГГц до 7919 ГГц.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ахмеджанов, Р.А. Генерация и регистрация сверхкоротких импульсов электромагнитного поля в терагерцовом диапазоне и их применение для спектроскопии. / Р.А. Ахмеджанов, А.И. Корытин, А.Г. Литвак, А.М. Сергеев, Е.В. Суворов // Радиофизика. – 2005. – №48. – С. 939-946.
2. Войцеховский, А.В. Детектирование в терагерцовом диапазоне / А.В. Войцеховский // Нано и микросистемная техника. – 2012. – № 2. – С. 28-35.
3. Войцеховский, А.В. Типы детекторов терагерцового излучения / А.В. Войцеховский // Нано и микросистемная техника. – 2012. – № 2. – С. 25-34.
4. Морозов, Д.В. Миллиметровый/субмиллиметровый смеситель на основе разогрева двумерного электронного газа в гетероструктуре AlGaAs/GaAs с фононным каналом охлаждения / Д.В. Морозов // Физика и техника полупроводников. – 2005. – Т.39. – Вып.9. – С. 4-10.
5. Рябцев, Н.Г. Материалы квантовой электроники. / Н.Г. Рябцев. // "Советское радио". – 1972. – С.38-40.4.
6. Degnan, J.J. The waveguide laser: A review. / J.J. Degnan. // J. Appl. Phys. – 1976. – Vol. 11. – №1. – Pp. 1-33.
7. Gao, J.R. Terahertz heterodyne receiver based on a quantum-cascade laser and a superconducting bolometer / J.R. Gao, J.N. Hovenier, Z.Q. Yang et al // Appl. Phys. Lett. – 2005. – Vol. 86. – Pp. 105-109.
8. Gol'tsman, G.N. Sensitive picosecond NbN detector for radiation from millimeter wavelength to visible light / G.N. Gol'tsman, A.D. Semenov, Y.P. Gousev, M.A. Zorin // Supercond Sci. Technol. – 1991. – Vol. 4. – Pp. 67-72.
9. Jepsen, P.U. Terahertz spectroscopy and imaging-modern techniques and applications / P.U. Jepsen, D.G. Cooke, M. Koch // Laser & Photonics Reviews – 2011. – Pp. 124-166.
10. Kulipanov, G.N. Status of the Novosibirsk high-power free electron laser [Электронный ресурс] / G.N. Kulipanov // Proceedings of APAC – 2004. – Режим доступа: <http://www.kinetics.nsc.ru/center/public/status.pdf>.

11. Linden, Kurt J. Terahertz Laser Based Standoff Imaging System / Kurt J Linden. // IEEE Computer Society, Proceedings of the 34th Applied Imagery Recognition Workshop. – Washington, D.C. – Pp. 25-28.
12. Mueller, E. R. Optically-pumped THz-laser technology [Электронный ресурс] / E. R. Mueller. – Режим доступа: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.203.2425&rep=rep1&type=pdf>.
13. Williams, B.S. Terahertz quantum-cascade lasers [Электронный ресурс] / B.S. Williams // Nature photonics. – SEPTEMBER, 2007. – №1. – Pp. 517-525. – Режим доступа: <http://www.nature.com/nphoton/journal/v1/n9/full/nphoton.2007.166.html>.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Оптоакустический детектор Голея GC-1T

GC-1T детекторы производятся и индивидуально калибруются на собственном производстве и поставляются со склада. Комплект поставки включает в себя детекторную головку и блок питания. Дополнительно детектор может быть укомплектован держателем фильтров. Благодаря замене полиэтиленового окна на окно из TRX, детекторы GC-1T имеют более широкий диапазон работы, расширяющийся вплоть до видимых и ультрафиолетовых длин волн. Они могут рассматриваться в качестве хорошей замены модели с алмазным окном, поскольку TRX имеет более высокое пропускание, чем алмаз, и, безусловно, дешевле последнего. Потому модель GC-1T только слегка дороже детектора GC-1P и дешевле алмазной модели GC-1D. Различные ТГц-оптические компоненты, такие как высокочастотные отрезающие фильтры, полиэтиленовые поляризаторы, а также окна, линзы и лучеделители из высокоомного кремния и TRX могут быть поставлены в качестве полезного дополнения для ТГц-приложений.

Для преобразования аналогового сигнала детектора Голея в цифровой сигнал мы предлагаем программно-аппаратный комплекс. Комплекс представляет собой пакет специализированного программного обеспечения и электронный модуль, соединяющий детектор Голея с персональным компьютером через USB интерфейс, и предназначен для решения задач, связанных с регистрацией, обработкой и анализом сигналов оптоакустических приёмников.

Применение детектора GC-1T: мониторинг и контроль УФ – БИК и ТГц-излучений.



Рисунок А.1 – Общий вид детектора Голея и блока управления

Таблица А.1 – Технические характеристики детектора

Диаметр входного конуса, мм	11.0
Диаметр входного окна, мм	6.0
Материал входного окна	TRX
Рабочий диапазон длин волн, микрон	0.3 ÷ 6.5 & 13 ÷ 8000
Рекомендуемая регистрируемая мощность, Вт, до	1 x 10 ⁻⁵
Эквивалентная мощность шума (NEP) @ 15 Гц: типичное значение, Вт/Гц ^{1/2} минимальное значение, Вт/Гц ^{1/2}	1.4 x 10 ⁻¹⁰ 0.8 x 10 ⁻¹⁰
Оптическая чувствительность @ 15 Гц: типичное значение, В/Вт максимальное значение, В/Вт	1 x 10 ⁵ 1.5 x 10 ⁵
Скорость отклика: типичное значение, мс минимальное значение, мс	30 25
Обнаружительная способность (D*) на апертуре входного конуса: типичное значение, см x Гц ^{1/2} /Вт максимальное значение, см x Гц ^{1/2} /Вт	7.0 x 10 ⁹ 11.0 x 10 ⁹
Рабочий диапазон давлений окружающей среды, мм. рт. ст	760 x 10 ³
Температура работы и хранения, °С	5 ÷ 40
Влажность, %	Без специальных требований
Вибрации	Рекомендуется избегать вибраций в диапазоне 1 ÷ 100 Гц
Оптимальная частота модуляции, Гц	15 ± 5
Напряжение питания, В	100/115 ± 10%, 220/230 ± 10%
Частота переменного тока, Гц	50 ÷ 60
Внешние размеры, Д x Ш x В, мм ³	126 x 45 x 87
Масса, кг	0.8

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

ТГц-сканирующий интерферометр Фабри-Перо (ТСИФП)

ТГц-сканирующий интерферометр Фабри-Перо (ТСИФП), именуемый в дальнейшем "Устройство", предназначен для измерения длины волны и интенсивности узкополосного ТГц-излучения. Устройство может быть использовано для работы как с импульсными, так и с непрерывными источниками узкополосного ТГц-излучения. Внешний вид прибора приведён на рисунке Б.1.



Рисунок Б.1 – Внешний вид ТГц-сканирующего интерферометра Фабри-Перо

ТСИФП состоит из двух полупрозрачных, параллельных друг другу кремниевых зеркал, одно из которых смонтировано на моторизованном линейном трансляторе. Измерение параметров ТГц-излучения происходит за счёт перемещения подвижного зеркала (сканирования), как показано на рисунке Б.2.

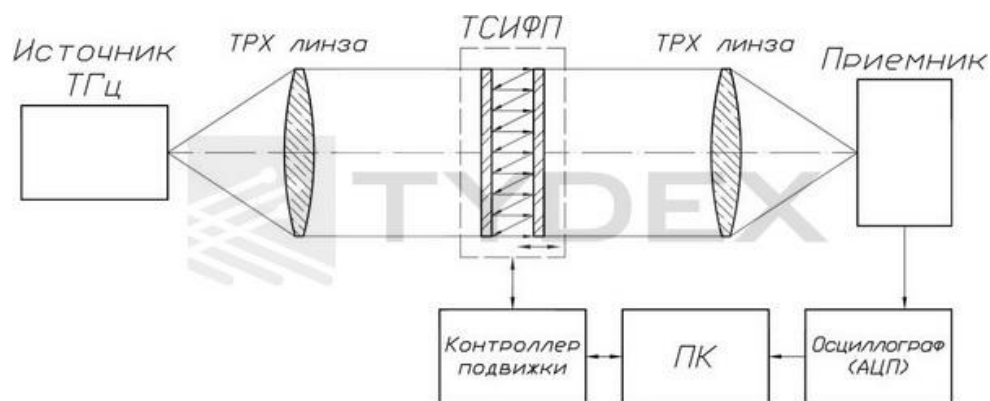


Рисунок Б.2 – Принципиальная схема работы ТСИФП

ТСИФП может быть использован следующими источниками:

- гиротронами;
- субмиллиметровыми лазерами с оптической накачкой;
- лампами обратной волны;
- лазерами на свободных электронах;
- источниками ТГц-излучения на основе разностной генерации;
- источниками ТГц-излучения на основе фотосмещения;
- квантово-каскадными лазерами;
- р-Ge лазерами;
- принципиально новыми источниками ТГц-излучения.

ТГц-сканирующий интерферометр Фабри-Перо может быть применён и для измерения длины волны и интенсивности широкополосных источников ТГц-излучения, а также для фильтрации ТГц-излучения согласно спектру пропускания интерферометра Фабри-Перо (Рисунок Б.2).

В ТСИФП возможно реализовать следующие варианты перемещения зеркала: движение зеркала в заданную позицию, сдвиг зеркала на заданное расстояние, непрерывное движение зеркала, циклическое движение зеркала. Также, есть возможность задавать скорость движения зеркала, интервалы между перемещениями, начальное и конечное положение зеркала.

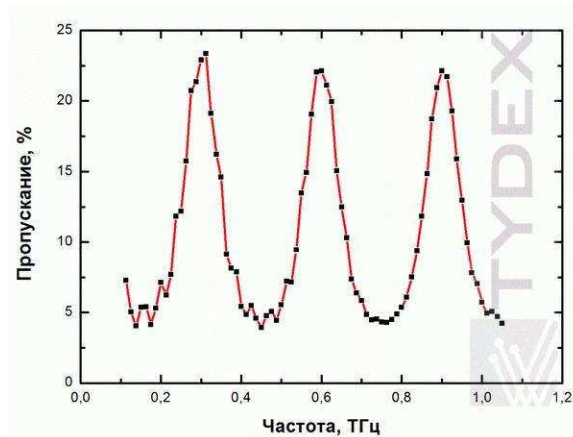


Рисунок Б.2 – Спектр пропускания ТСИФП при расстоянии между зеркалами 500 мкм, измеренный на TDS-спектрометре Menlo Systems TERA K8

На рисунке Б.3 представлен результат измерений длины волны генерации субмиллиметрового лазера с оптической накачкой при помощи ТСИФП. Как видно из графика, расстояние между соседними максимумами пропускания ТСИФП составляет порядка 216 мкм (433 мкм - 216 мкм = 217 мкм; 647 мкм - 433 мкм = 214 мкм; 865 мкм - 647 мкм = 218 мкм), что является половиной длины волны генерации данного лазера. Данный результат также согласуется с теоретическими расчётами положений максимумов пропускания ТСИФП: $\lambda = 2 * d/m$, где d – расстояние между зеркалами ТСИФП (мкм); m – порядок интерференции; λ – измеряемая длина волны (мкм).

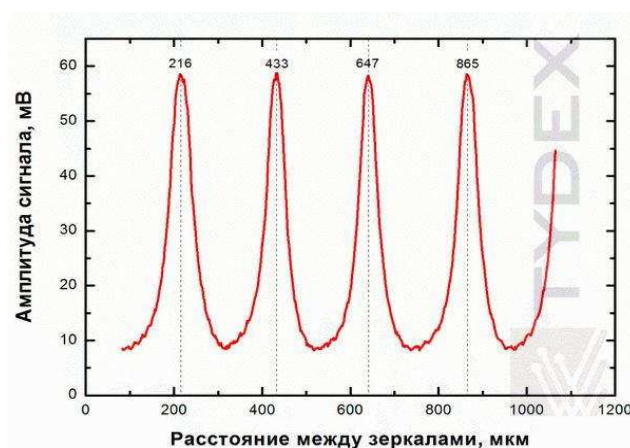


Рисунок Б.3 – Зависимость амплитуды сигнала с оптоакустического детектора Tydex GP-1P от расстояния между зеркалами ТСИФП. Источник ТГц-излучения – субмиллиметровый лазер с оптической накачкой, $\lambda_{ген} = 432$ мкм

Основные параметры ТСИФП представлены в таблице Б.1:

Таблица Б.1 – Основные параметры ТСИФП

Параметр	Значение
Диапазон работы устройства, ТГц	0,1 - 15
Область свободной дисперсии, ТГц	0,01 - 1,8
Ширина зазора между зеркалами, мм	0 - 9,5
Точность установки зазора, мкм	$\pm 1,25$
Высота оптической оси, мм	110
Световой диаметр, мм	52
Размеры (ДхВхШ), мм	232x151x120
Вес, кг	5,0

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Институт инженерной физики и радиоэлектроники
Базовая кафедра фотоники и лазерных технологий

УТВЕРЖДАЮ

Зав. баз. кафедрой ФилТ

А.Н. Втюрин

« » 2018 г.

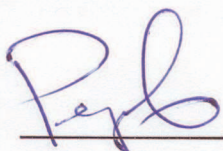
МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Исследование молекулярного лазера ТГц-диапазона с оптической накачкой

16.04.01 «Техническая физика»

16.04.01.02 «Оптическая физика и квантовая электроника»

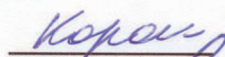
Научный руководитель



доцент,
канд. физ.-мат. наук

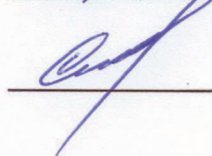
М.Ю. Реушев

Выпускник



К.А. Коротких

Рецензент



профессор,
д-р физ.-мат. наук

В.В. Слабко

Красноярск 2018