

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Физический факультет

Кафедра общей физики

Папченко Анастасия Вячеславовна

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Исследование характеристик микроболометрического матричного
детектора в среднем ИК и ТГц диапазонах.**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №20302

Научный руководитель:

О. Э. Камешков

Оценка научного руководителя

«_____» _____ 2021г.

Преподаватель практикума:

А. А. Инжеваткина

Оценка преподавателя практикума

«_____» _____ 2021г.

Куратор практикума:

к.т.н. В. Т. Астрелин

Итоговая оценка

«_____» _____ 2021г.

Новосибирск, 2021

Аннотация

Целью данной работы являлось исследование характеристик матричного микроболометрического (МБМ) детектора в среднем инфракрасном и терагерцовом диапазонах. Для этого были дополнительно проведены эксперименты с измерителями мощности ИМО-4С и Ophir 3A-P-THz. В общей сложности было представлено четыре экспериментальных установки. В зависимости от приемника теплового излучения подбирались необходимые оптические элементы для ослабления и управления лазерным излучением. Сравнивая значения, полученные с помощью приемников, были рассчитаны коэффициенты пересчета показаний МБМ приемника в вольтах абсолютные единицы мощности с учетом всех погрешностей и возможных ошибок. В дальнейшем с помощью данного коэффициенты, были рассчитаны основные характеристики детектора такие как вольт-ваттная чувствительность, обнаружительная способность и эквивалентная мощность шумов.

Ключевые слова: приемник теплового излучения, квантово-каскадный лазер (ККЛ), лазер на свободных электронах (ЛСЭ), болометры.

Оглавление

1. Введение	4
2. Теоретическая часть	
2.1 Приемники теплового излучения	6
2.2 Болометры	7
2.3 Термоэлектрические явления	9
3. Экспериментальная часть.	
3.1 Схемы экспериментов	12
3.2 ККЛ	16
3.3 ЛСЭ	19
3.4 Измеритель мощности ИМО-4С	21
3.5 Измеритель мощности 3А-Р-ТНz	22
3.6 Микроболометрический приемник	23
3.7 Эксперименты с ККЛ и ИМО-4С	24
3.8 Эксперименты с ККЛ и Ophir	26
3.9 Эксперименты с ККЛ и МБМ	28
3.10 Эксперименты с ЛСЭ и МБМ	32
4. Заключение и обсуждение результатов	35
5. Библиографический список	38

1. Введение

Исследуемый прибор является приемником теплового излучения. В этом приемнике изменение состояния чувствительного элемента происходит за счет взаимодействия потока энергии излучения, которое регистрируется в виде электрического сигнала. На данный момент выделяют пять различных типов тепловых приемников такие как болометр, термоэлемент, пироэлектрический приемник, оптико-акустический приемник (ОАП) и сверхпроводящие болометры. Более подробно принцип действия каждого будет рассмотрен в теоретической части.

В данной работе основной эксперимент проводился на микроболометрическом детекторе (МБМ-приемник, болометр), изготовленном в ИФП СО РАН им. Ржанова. Он представляет собой матрицу из чувствительных элементов, каждый из которых подключен в цепь (используется мост Уинстона). Под воздействием теплового излучения изменяется сопротивление резистора и цепь выходит из равновесия. В цепи возникает электрический сигнал, который и регистрируется приемником. Болометры чувствительны ко всему спектру излучения, но применяют их в основном в терагерцовом, инфракрасном и субмиллиметровом диапазонах частот.

Целью данной работы является изучения характеристик микроболометрического детектора (МБМ-приемник) в терагерцовом и инфракрасном диапазонах частот. Для достижения цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Ознакомиться с принципами работы тепловых приемников излучения и регистрации сигнала.
2. Ознакомиться с экспериментальным оборудованием.
3. Собрать экспериментальные схемы для измерения абсолютной мощности ТГц и ИК пучка с использованием ИМО-4С и Ophir 3A-P-THz
4. Собрать экспериментальные схемы для измерения ТГц и ИК пучка с использованием МБМ приемника.

5. Провести измерения и зарегистрировать все необходимые сигналы.
6. Используя экспериментальные данные рассчитать коэффициент для перевода показаний МБМ приемника в вольтах в абсолютные единицы мощности
7. Используя полученный коэффициент рассчитать характеристики детектора такие как вольт-ваттная чувствительность, обнаружительная способность и эквивалентная мощность шумов.
8. Провести обсуждение результатов и оценить все возникающие ошибки.

2. Теоретическая часть

2.1 Приемники теплового излучения

Тепловые приемники излучения представляют собой устройства, в которых взаимодействие потока энергии излучения приводит к изменению состояния чувствительного элемента, Эти изменения фиксируются в виде электрического тока. Выделяют 5 приемников теплового излучения [1]:

- 1)Болометр
- 2)Термоэлемент
- 3)Пироэлектрический приемник
- 4)Оптико-акустический приемник (ОАП)
- 5)Сверхпроводящие болометры

Каждый из представленных типов способен оценить изменение температуры с помощью различных физических эффектов. В болометрах под действием лучистого потока изменяется сопротивление чувствительного элемента. Термопара изменяет свое значение термоэдс под воздействием излучения. Изменение поляризации в пироэлектрическом приемнике происходит после нагрева сегнетоэлектрического кристалла или керамики. Оптико-акустический приемник состоит из двух мембран, пространство между которыми заполнено газом. Под воздействием теплового излучения он расширяется, и фиксируется деформация мембраны. Параметры деформации преобразуются в электрический сигнал. В сверхпроводниковых болометрах под действием лучистого потока изменяется сопротивление чувствительного элемента. Работа такого болометра происходит в области перехода в сверхпроводящее состояние. В таблице 1 приведем сравнительную характеристику неохлаждаемых тепловых приемников ИК/ТГц излучения.

Таблица 1. Сравнительная характеристика неохлаждаемых тепловых приемников ИК/ТГц излучения

-	Болометры	Пироэлектрики	Термоэлемент
---	-----------	---------------	--------------

Физика процесса	Плотность и подвижность носителя	Диэлектрическая поляризация	Термоэдс
Объект процесса	Температура	Изменение температуры	Градиент температуры
Необходимость контроля температуры	Необходим	В зависимости от схемы включения	Не требуется
Сигнал	Сопротивление	Заряд	Напряжение
Необходимость модулятора	Не требуется	Необходим	Не требуется

В нашей работе используются два типа приемника теплового излучения - болометрический и термоэлектрический. Рассмотрим подробнее принципы работы каждого из приемников.

2.2 Болометры

История создания болометров берет свое начало в 1878 году. Первый образец прибора представил американский астроном Самуэль Пирпонт Ленглии. Он использовал это устройство для исследования Солнца. В самом первом болометре использовалась поглощающая пластина из черной платины, включенной в измерительную электрическую мостовую схему Уинстона, которая остается актуальной и в наше время.

Самый простой болометр включает в свою схему чувствительный элемент и сопротивление нагрузки. Под воздействием теплового излучения цепь выходит из равновесия. Ее приводят к нулю с помощью изменения нагрузочного сопротивления, благодаря нему можно оценить изменение сопротивления чувствительного элемента. Болометры чувствительны ко всему спектру

излучения, но применяют их в основном в терагерцовом, инфракрасном и субмиллиметровом диапазонах частот.

В настоящее время выделяют пять видов болометров: металлические, термисторные, полупроводниковые, композитные и сверхпроводящие [4]. Они различаются по схеме включения (рисунок 1.), чувствительности к измеряемому излучению, используемым материалам, области применения и скорости отклика.

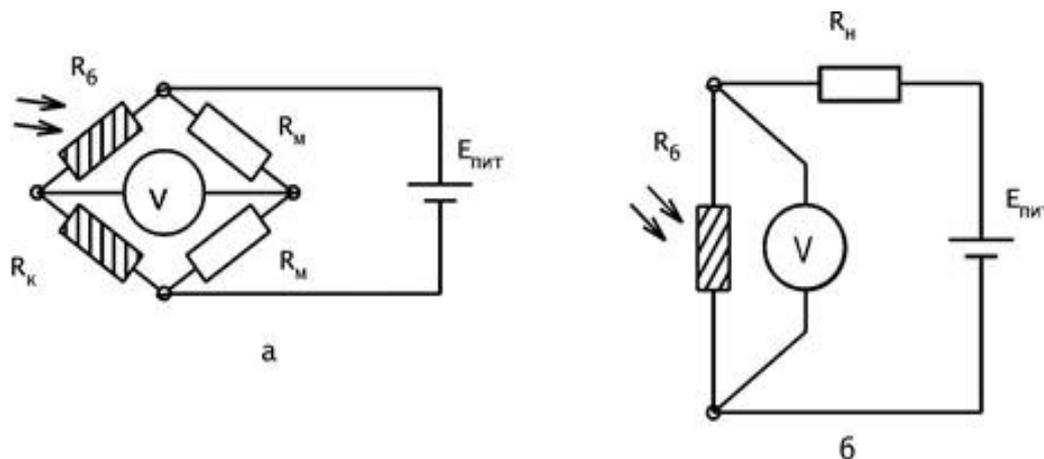


Рисунок 1. Схемы включения болометра по мостовой схеме (а) и по схеме с нагрузочным сопротивлением (б).

Металлические болометры

Основными материалами, из которых изготавливаются металлические болометры, являются платина, сурьма, никель или висмут. Приемники этого типа должны быть достаточно малы, чтобы уменьшить их теплоемкость и повысить чувствительность, именно поэтому их изготавливают в виде тонких пленок методом вакуумного распыления или испарения. Так же, пластины покрывают поглощающим слоем, например, платиновой чернью или золотом.

Металлические болометры работают при комнатной температуре с обнаружительной способностью примерно $1 \times 10^8 \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{Вт}^{-1}$, временем отклика 10 мс.

Термисторные болометры

С помощью синтеза полупроводниковых оксидов можно создать следующий вид болометров – термисторный. Они широко распространены в системах пожарной безопасности, системах ориентации и промышленных измерителях температуры, так как их температурный коэффициент сопротивления значительно выше, чем у металлических болометров. Время отклика таких детекторов изменяется в диапазоне от 1 до 10 мс.

Полупроводниковые болометры

Болометры этого типа более чувствительны, чем металлические. Основная особенность заключается в большом сопротивлении чувствительного элемента, при этом температурный коэффициент превышает коэффициент у металла в 10 раз и имеет отрицательный знак. В качестве материала больше всего подходят сплавы оксидов никеля, марганца и кобальта. Полупроводниковые болометры представляют собой две пленки толщиной до 10 мкм (термисторов). Одна из пленок подвергается излучению и является активной, а другая предназначена только для компенсации излучений температуры окружающей среды.

Композитные болометры

В микроволновом диапазоне поглощающая способность полупроводников, которые обычно используются в болометрах, сильно падает (кремний, германий). Это приводит к увеличению поглощающего полупроводникового элемента и, следовательно, увеличению теплоемкости болометра и уменьшения чувствительности. Для устранения данного ограничения были разработаны композитные болометры.

Композитный болометр состоит из трех частей: поглотителя, подложки и датчика температур. Поглотитель представляет собой тонкую пленку, материал которой должен иметь хорошую излучательную способность в диапазоне длин волн в сотни микрон. Подложка и датчик температур образуют систему с хорошей поглощающей способностью, большой площадью и маленькой теплоемкостью. Между собой они скрепляются эпоксидной смолой или лаком, для обеспечения теплового и механического контакта.

Сверхпроводящие болометры

Такие болометры работают вблизи точки перехода в сверхпроводящее состояние. Сложность измерений в этой области в том, что сверхпроводящие болометры чрезвычайно чувствительны, но скорость отклика крайне мала.

2.3 Термоэлектрические явления.

Под термоэлектрическими явлениями понимается взаимосвязь между тепловыми и электрическими процессами в полупроводниках и металлах. Выделяют три основных эффекта:

Эффект Зеебека

При соединении двух разнородных металлов (проводников), которые имеют различную температуру, в замкнутой цепи возникает электрический ток - термоэдс. Направление тока меняется за счет изменения знака разности температур. Если цепь состоит только из двух последовательно соединенных проводников, то ее принято называть термопарой или термоэлементом [2].

Особенностью эффекта Зеебека является то, что его можно применять в очень большом диапазоне температур. С помощью него можно измерять как и очень низкие температуры примерно -270°C , так и чрезвычайно высокие до 3000°C .

С помощью эффекта Зеебека измеряют температуру исследуемой среды. Один край проводника соединяют с гальванометром, другой помещают в среду. Такой метод измерения способен определить температуру как низкую, так и высокую, с точность до сотых долей градуса.

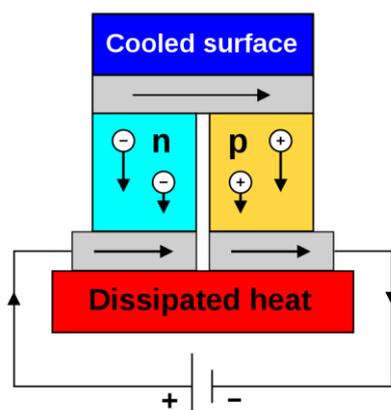


Рисунок 2. Схема эффекта Зеебека, сконфигурированная как термоэлектрический охладитель [9]

Эффект Пельтье

Эффект Пельтье [2], [3] является обратным эффекту Зеебека. При пропускании тока через последовательно соединенные проводники (разнородные), в одних спаях выделяется тепло, а в других поглощается. При этом количество выделившегося и поглощенного тепла пропорционально заряду, прошедшему по цепи.

Эффект Пельтье имеет различное объяснение при соединении проводников с одинаковым видом носителей тока и с различными типами проводимости. В первом случае, так как носитель тока по разную сторону спая имеет различную величину полной энергии, при прохождении границы спая, в случае попадания в область с меньшей энергией, ее избыток передается кристаллической решетке - происходит нагрев, следовательно при попадании в область с большей энергией происходит заимствование ее у кристаллической решетки - остывание проводника.

Эффект Томсона

Эффект Томсона [2] можно объяснить аналогично эффекту Пельтье. Выделение тепла должно происходить при прохождении вдоль однородного проводника, на котором присутствует градиент температур. Знак эффекта зависит от типа проводимости проводника. Если проводник имеет электронный тип проводимости, то перемещение зарядов будет происходить из зоны с наибольшей температурой в зону с наименьшей (направление от большей средней энергии в сторону с наименьшей), следовательно при дырочной проводимости происходит обратное действие.

3. Экспериментальная часть.

3.1 Схемы экспериментов.

В данной работе мы сравнивали отклик приемников на излучение ТГц и ИК диапазонов. Нам нужно было узнать переводной коэффициент между вольтами, в которых измеряет микроболометрический матричный приемник и измерителем мощности в ТГц и ИК диапазонах. Принципиальную схему измерения можно описать следующим образом: параллельный пучок квантово-каскадного лазера (ККЛ) или лазера на свободных электронах падал на собирающую кремниевую линзу с фокусным расстоянием $f=75$ мм. Затем все излучение пучка фокусировалось в пятно и регистрировалось детектором. В качестве детектора мы использовали микроболометрический матричный приемник (МБМ) произведенный в ИФП СО РАН, измеритель мощности 3А-Р-ТНz и измеритель мощности ИМО 4-С. Далее рассмотрим, опишем реальные схемы, использовавшиеся в эксперименте. Для проведения эксперимента с квантово-каскадным лазером и ИМО-4С нам потребовались две кремниевые линзы. Первая, с фокусным расстоянием 50 мм собирала расходящийся пучок от лазера и направляла его параллельно оптической оси. Вторая линза с фокусным расстоянием 75 мм непосредственно собирала пучок в фокусе, где находился наш прибор. (Рисунок 3.)

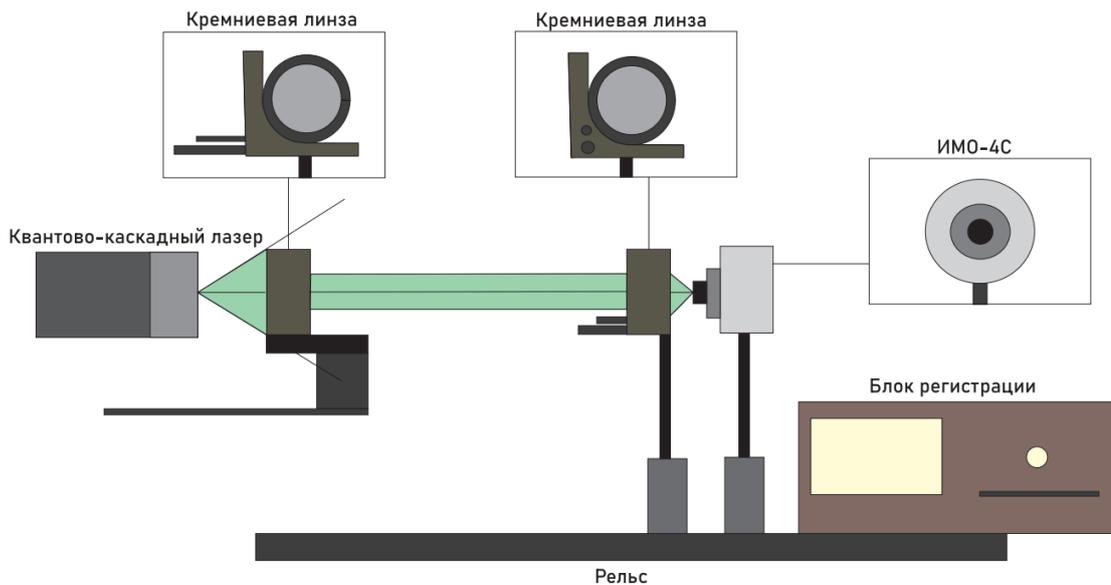


Рисунок 3. Схема эксперимент с ККЛ и ИМО-4С

Для исследования МБМ-приемника (Рисунок 4.) с помощью квантово-каскадного лазера нам потребовался, кроме двух кремниевых линз с фокусным расстоянием 50 мм и 75мм, пленочный поляризатор. С помощью него мы ослабляли излучения и делали возможным измерения излучения с более чувствительным матричным приемником.

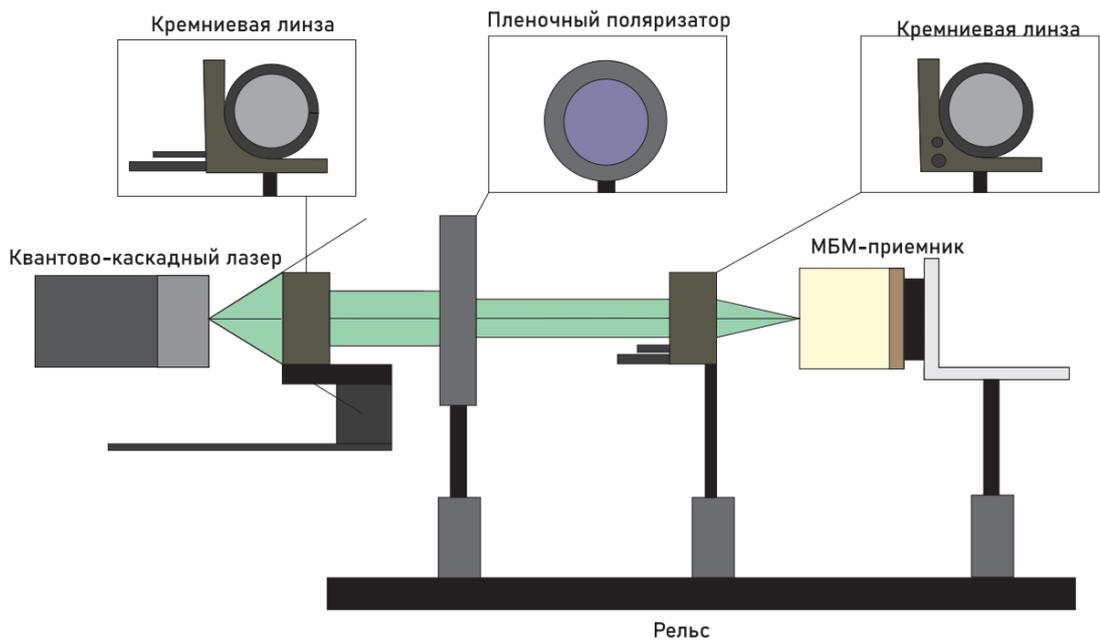


Рисунок 4. Схема эксперимент с ККЛ и МБМ-приемником.

Вид установки для исследования свойств Ophir с помощью ККЛ аналогичен установке с ИМО-4С. Прибор не обладает повышенной чувствительностью, поэтому достаточно направлять лазер через две кремниевые линзы. (Рисунок 5.).

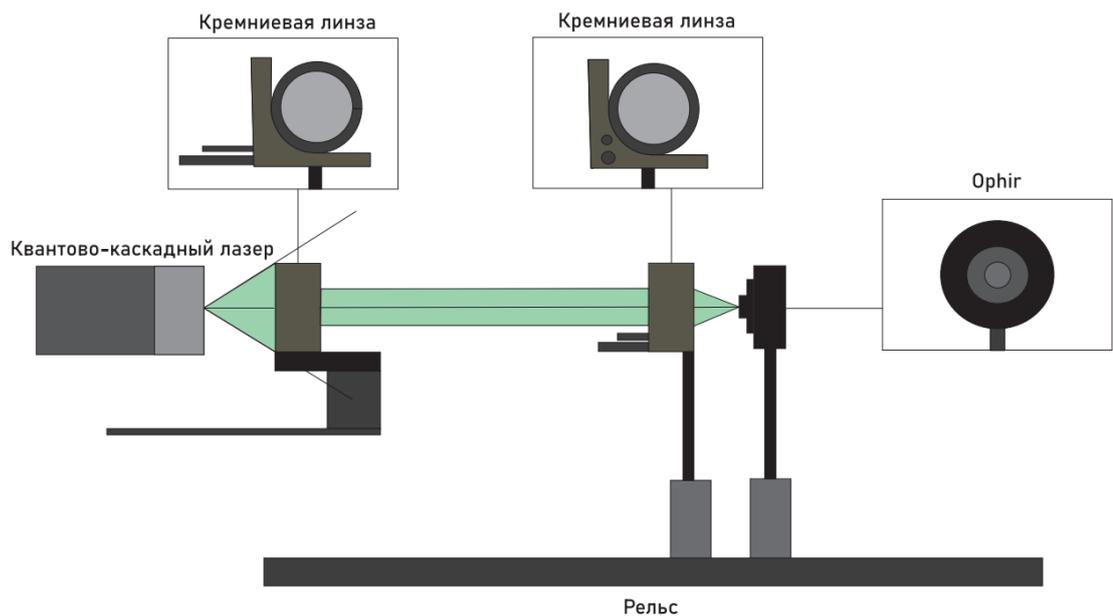


Рисунок 5. Схема эксперимент с ККЛ и Ophir.

В эксперименте с ТГц излучением в качестве источника выступал лазер на свободных электронах (Рисунок 6.). Так как излучение обладает большой мощностью необходимо создать систему ослабления лазера, чтобы принимаемый сигнал не повредил приборы. Для этого мы использовали два поляризатора проволочный и пленочный. С помощью делителя и ИМО-4С мы контролировали колебания мощности ЛСЭ, ирисовая диафрагма позволяла при необходимости мгновенного перекрыть излучение. Кремниевая линза с фокусным расстоянием 75 мм позволяла собрать все излучение.

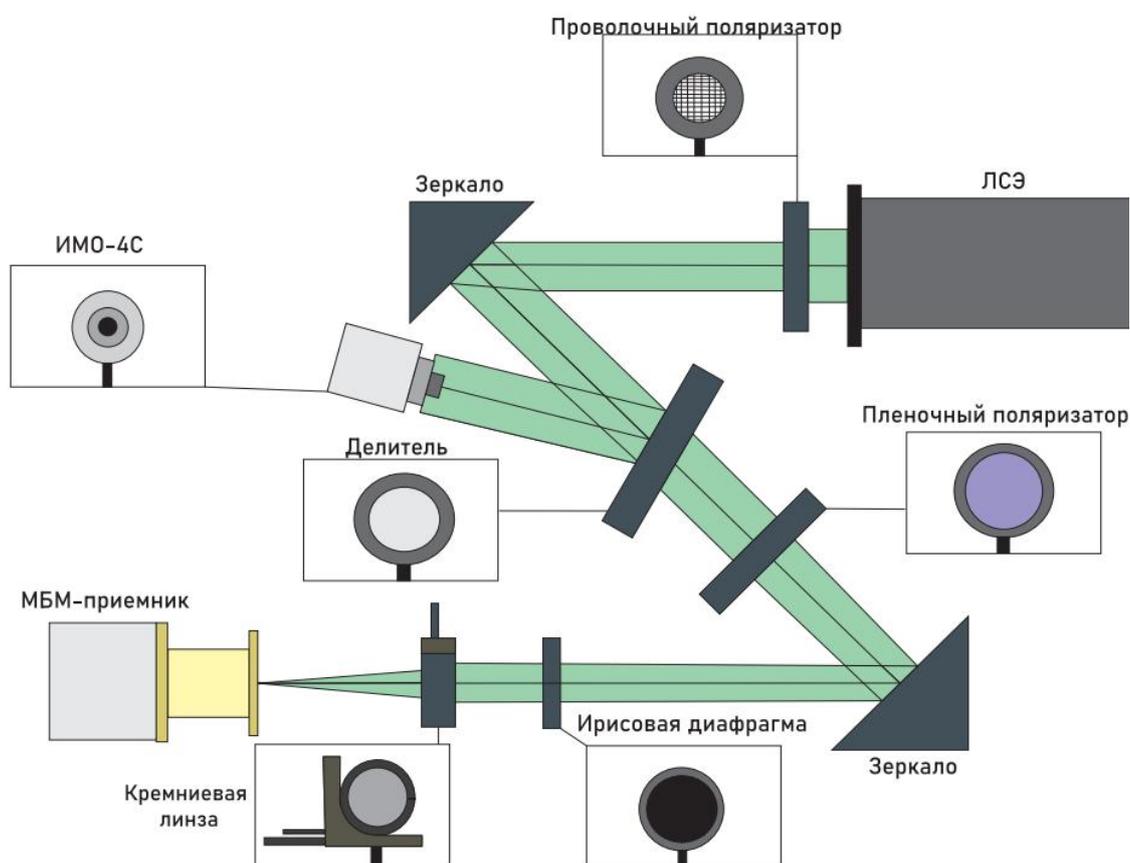


Рисунок 6. Схема эксперимент с ЛСЭ и МБМ-приемником

Терагерцовая волна проходит сквозь поляризатор, который преграждает путь небольшой части излучения. Луч отражается от первого зеркала (установлено под углом 45 градусов к лучу) и проходит сквозь делитель. Он отражает часть излучения, которая регистрируется ИМО-4С, другая часть излучения проходит через второй пленочный поляризаторы. На нем происходит ослабление

излучение еще раз. Теперь лазерное излучение ослаблено достаточно и оно не повредит исследуемый прибор. На последнем этапе луч фокусируется кремниевой линзой на МБМ-приемнике.

3.2 ККЛ

Квантово-каскадный лазер [6], [10] – униполярный полупроводниковый лазер, для генерации излучения используется носитель заряда одного знака (электроны или дырки). За счет последовательного туннелирования электронов из одной ячейки многослойной полупроводниковой структуры в соседнюю испускается квант света и происходит генерация излучения лазера. Последовательность квантовых ям, разделенных потенциальными барьерами, называется сверхрешетка или многослойная структура. Толщина потенциальных барьеров и ширина квантовых ям определяет длину волны излучения.

Рассмотрим подробнее принцип работы квантово-каскадного лазера [5]. Процесс туннелирования электрона из одной квантовой ямы в другую запускается после помещения сверхрешетки (Рисунок 7.) в электрическое поле. Электрон, находящийся на нижнем энергетическом уровне 1 квантовой ямы с номером n туннелирует на возбужденный уровень 2 квантовой ямы с номером $n+1$ и испускает фотон. При превышении темпа туннелирования со 2 на 1 энергетического уровня в каждой квантовой яме над туннелированием между ямами, заполненность нижних уровней превышает заполненность более высоких энергетических уровней. Все вышеперечисленное способствует повышению вероятности туннелирования электрона с последующим испусканием фотона и уменьшает вероятность обратного процесса, при котором электрон будет двигаться “вверх по лестнице” и поглощать кванты света. В условиях генерации излучения движение каждого электрона представляет собой каскад переходов между соседними ямами, сопровождающихся вынужденным испусканием фотонов.

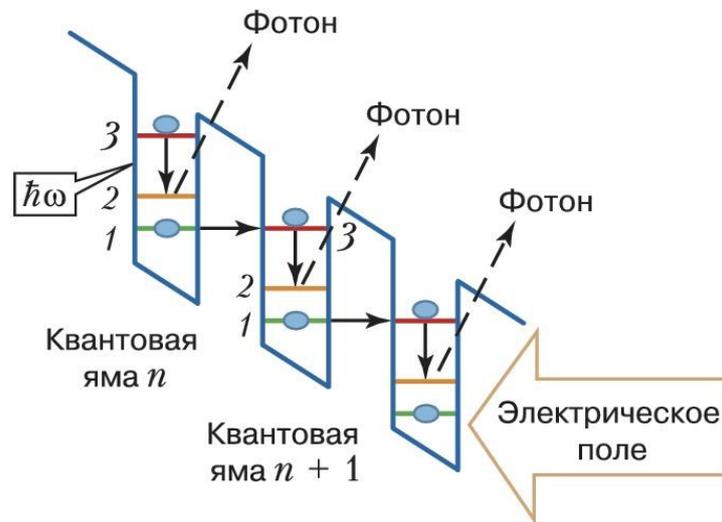


Рисунок 7. Сверхрешетка в электрическом поле [10]

Мы работаем с квантово-каскадным лазером (ККЛ) RT-CW-FP-QCL-100-s производства «Alpes Lasers» (рисунок 8.). Лазер представляет собой гребень из InGaAs и AlInAs, выращенный на InP, обеспечивающий усиление, и резонатор Фабри-Перо (ФП) для создания лазерных колебаний. Оптический волновод из квантово-каскадных материалов формирует активную область, а концы такого волновода сколоты. Остаточное отражения от сколов достаточно для формирования резонатора Фабри-Перо. Данный лазер не излучает на одной длине волны, а работает в многомодовом непрерывном режиме и широком диапазоне длин волн. Излучение ККЛ может быть точно настроено с помощью температуры или тока. Для управления температурой лазерного чипа используется элемент Пельтье и температурный контроллер ALPES LASERS TC-3. На рисунке 9. представлена зависимость силы тока от мощности при различных температурных режимах ККЛ. С точки зрения принципа действия лазера, уменьшая температуру, мы увеличиваем вероятность нахождения электронов на более низком уровне - увеличиваем темп температурной релаксации и тем самым повышаем общую эффективность работы ККЛ. Для управления генерацией излучения источник тока LDX-3232 производства Newport. Изменяя управляющий ток, мы изменяем температуру активной области и тем самым изменяем эффективную оптическую длину резонатора (изменяется показатель преломления волновода).

Рисунок 9. Зависимость силы тока от мощности при разных температурных режимах лазера от производителя лазера

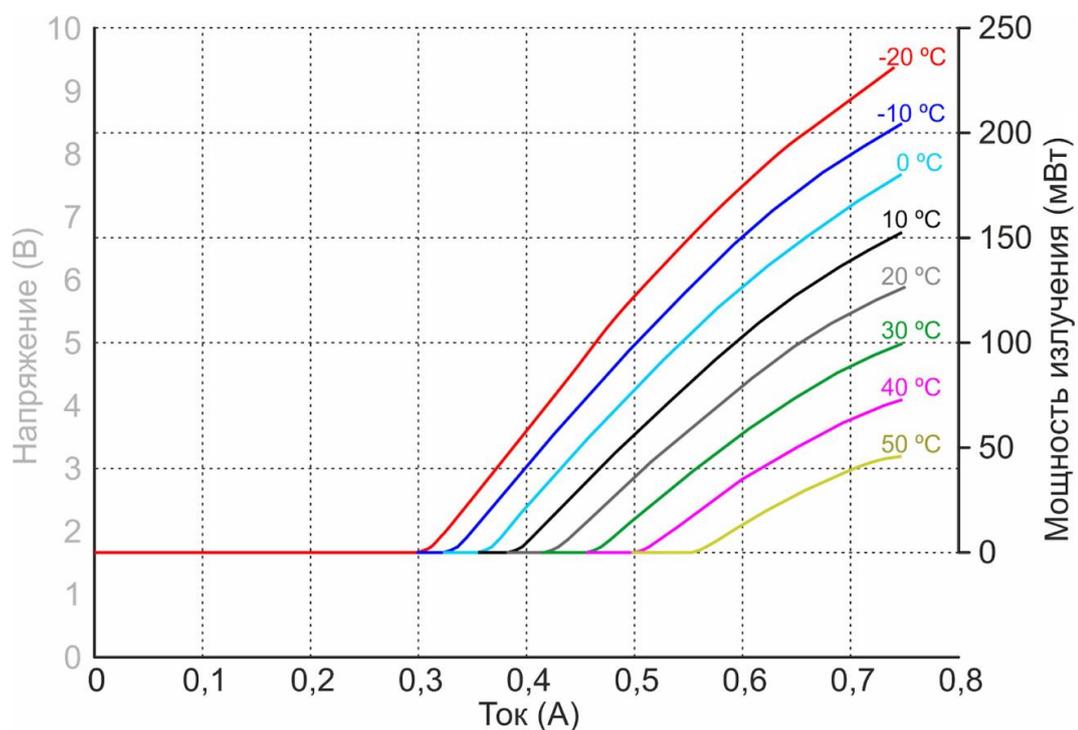
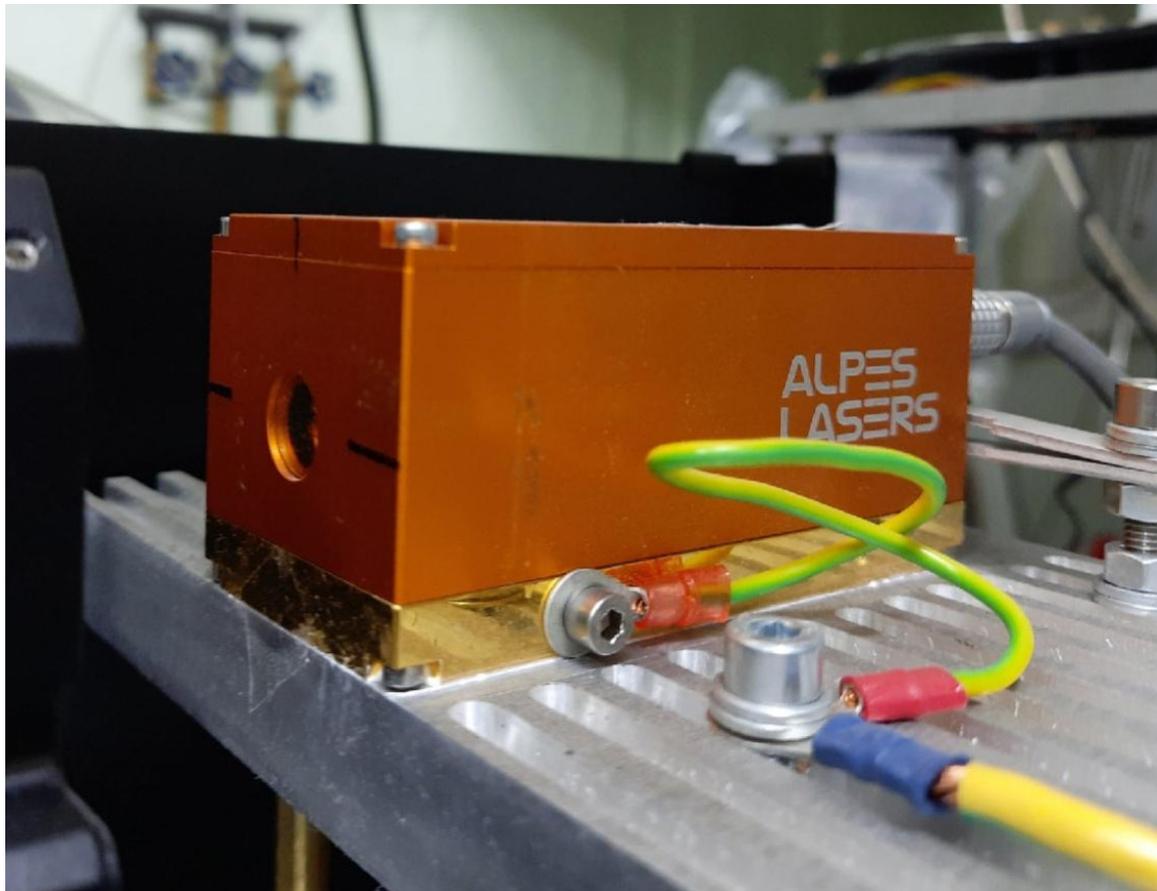


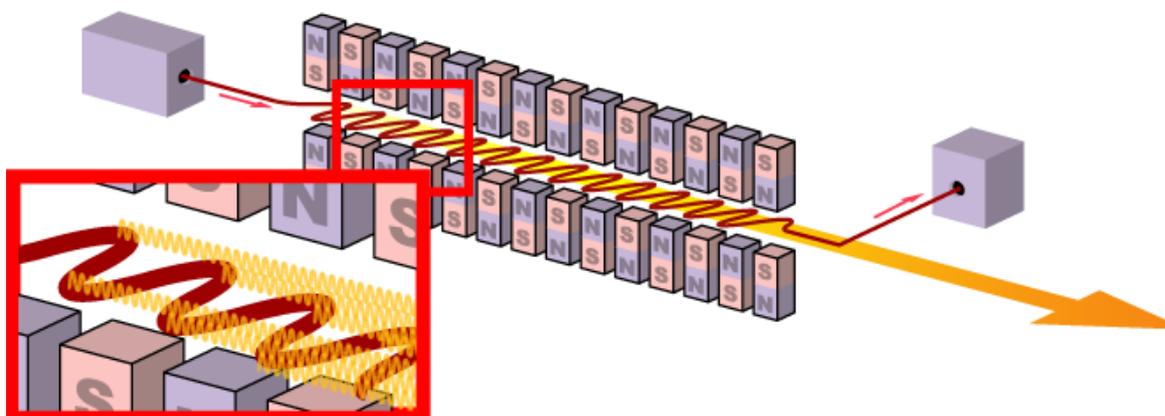
Рисунок 8. Фото квантово-каскадного лазера RT-CW-FP-QCL-100-s производства «Alpes Lasers»



3.3 ЛСЭ

Лазер на свободных электронах (ЛСЭ) - это установка, целью которого служит преобразование энергии ультррелятивистских электронов в энергию электромагнитного излучения. Для создания резонансного взаимодействия релятивистских электронов с электромагнитной волной их траекторию необходимо сделать в виде волнистой линии или спирали. В пустом пространстве траектория движения частиц является прямой. Чтобы искривить траекторию используют специальную магнитную систему, которую называют вигглером или ондулятором (Рисунок 9.) .

Рисунок 9. магнитной системы (ондулятора) [8]



Целью работы ЛСЭ является увеличение мощности электромагнитной волны, при уменьшении энергии электронов. Рассмотрим принцип работы лазера. Электромагнитная волна и электронный пучок входят в ондулятор. На данном этапе необходимо соблюдение условия синхронизма, при котором после прохождения одного периода траектории электромагнитной волны и электронов должны отставать друг от друга на одну длину волны. Значит одна половина электронов, поступившая в ондулятор, будет терять энергию, а другая половина, поступившая на одну длины волны позже постепенно, будет набирать энергию. Происходит модуляция энергии, пучок разбивается на слои, толщиной в половину длины волны с чередующимся отклонением энергии от начального. “Быстрые” слои частиц догоняют “медленные” слои и возникает модуляция плотности электронов с постоянным периодом. Далее повторяется то что было в первой половине ондулятора, более быстрые слои догоняют

медленные, только теперь теряют энергию слои с наибольшей плотностью частиц и получают слои с наименьшей.

В нашем эксперименте в качестве источника терагерцового диапазона использовался Новосибирский лазер на свободных электронах [7] (Таблица 2.). Мы работали на 1 очереди лазера, которая позволяет генерировать излучение с длиной волны от 120 мкм до 235 мкм и средней мощностью до 100 Вт. Параметры излучения представлены в таблице.

Таблица 2. Характеристика лазера.

Длина волны ЛСЭ-1	(120 ... 235) мкм
Длина волны ЛСЭ-2	(50 ... 110) мкм
Относительная спектральная ширина	(0,3 ... 1) %
Диаметр гауссового пучка на рабочих станциях	~30 мм
Степень поляризации излучения	>99.6 %
Поперечная когерентность	Полная
Временная когерентность	(40 ... 100) пс
Максимальная средняя мощность	0.4 кВт (на 11,2 МГц)
Длительность импульса	(40 ... 100) пс
Частота повторения	(2.8 ... 11,2) МГц

3.4 Измеритель мощности ИМО-4С

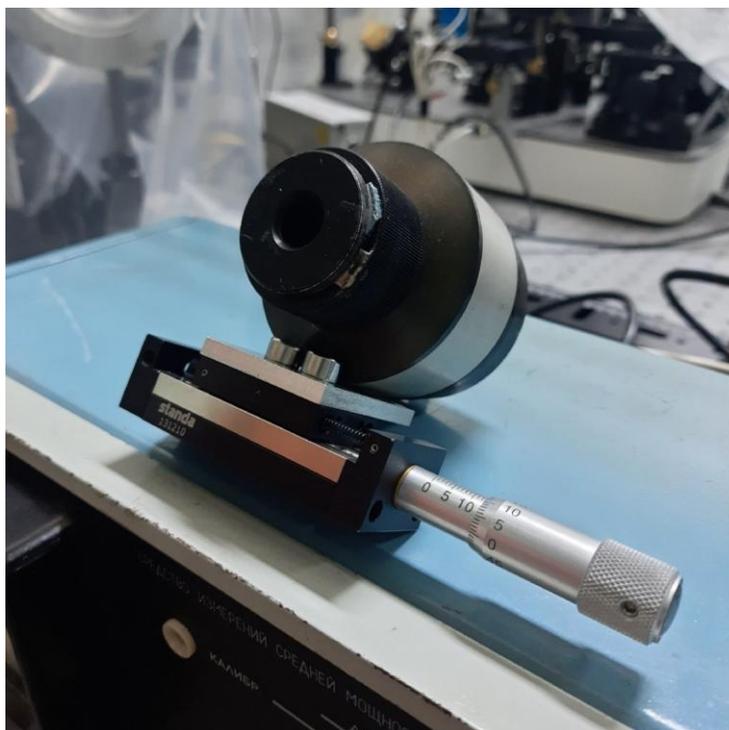
Принцип работы прибора заключается в поглощении приемным элементом мощности лазерного излучения (Таблица 3.) и преобразовании их в эквивалентное значение термо-ЭДС, значение которой измеряется блоком регистрации. Функциональная схема прибора: преобразователь обеспечивает

нормированное преобразование в термо-ЭДС средней мощности поглощенной приемным элементом лазерного излучения; входной сигнал преобразователя поступает в блок регистрации, усиливается и регистрируется показывающим прибором; Генератор тока, расположенный в блоке регистрации, обеспечивает калибровку преобразователя подачей стабильного тока в нагреватель в режиме “КАЛИБРОВКА”.

Таблица 3. Характеристика прибора теплового излучения ИМО-4С

Характеристика	Значение
Средняя мощность, Вт	$3 \cdot 10^{-4} - 100$
Диаметр входного окна, мм	12
Диапазон длин волн, мкм	0.5 – 12.0
Предельный угол падения, °	5
Ошибка прибора	6%

Рисунок 10. Измеритель мощности ИМО-4С



3.5 Измеритель мощности ЗА-Р-ТНz

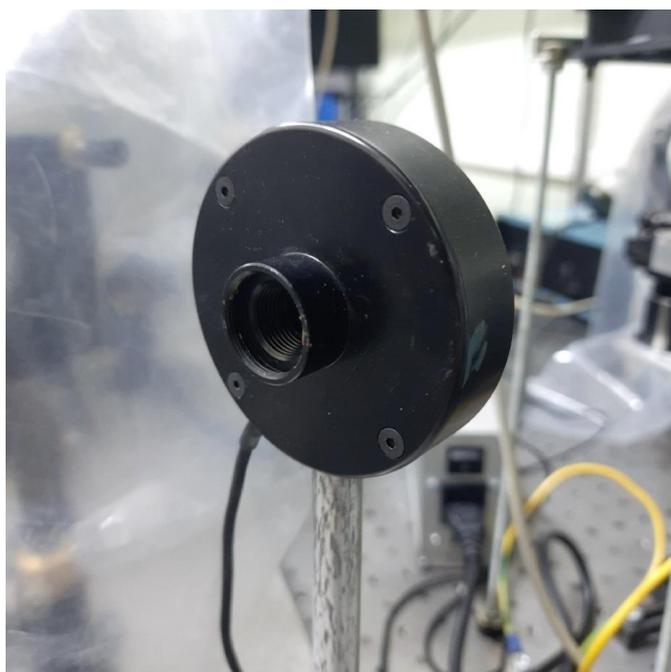
Данный прибор является очень чувствительным датчиком для измерения тепловой мощности, откалиброванный для терагерцевых длин волн, имеет апертуру 12 мм.

Таблица 3. Некоторые характеристики Ophir.

Спектральный диапазон, ТГц	0,3 – 10
Диапазон измерения энергии, Дж	$20 \cdot 10^{-6}$ - 2
Диапазон измерения мощности, Вт	$15 \cdot 10^{-6}$ - 3

Принцип работы 3A-P-THz аналогичен, выше описанному прибору ИМО-4С. Ophir поглощает приемным элементом (поглотитель Р-полупроводник) лазерное излучение и преобразует ее в эквивалентное значение термо-ЭДС.

Рисунок 11. Измеритель мощности 3A-P-THz



3.6 Микроболометрический приемник

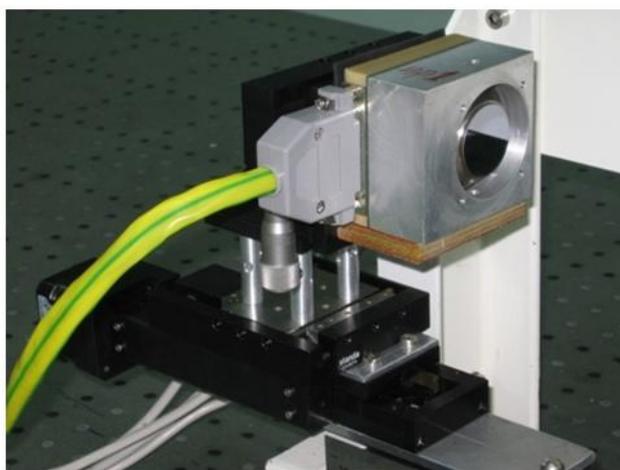
Микроболометрический приемник представляет собой матрицу микроболометров с числом элементов 320×240 и размером 12×12 мм². Элементы матрицы располагаются в вакуумном объеме с германиевым окном. Под воздействием терагерцового излучения элементы матрицы (микроболометры) нагреваются и их сопротивление возрастает. После выведения из равновесия моста Уинстона, к которому подключены все

элементы, появляется электрический сигнал. С помощью можно измерить интенсивность излучения. Характеристики МБМ-приемника приведены в таблице ниже.

Таблица 4. Характеристика МБМ-приемника.

Скорость съемки (кадров/с)	До 26
Время записи (с)/количество кадров	До 30 / до 749
Формат записи	tvid/tab

Рисунок 12. Изображение МБМ-приемника.



3.7 Эксперименты с ККЛ и ИМО-4С

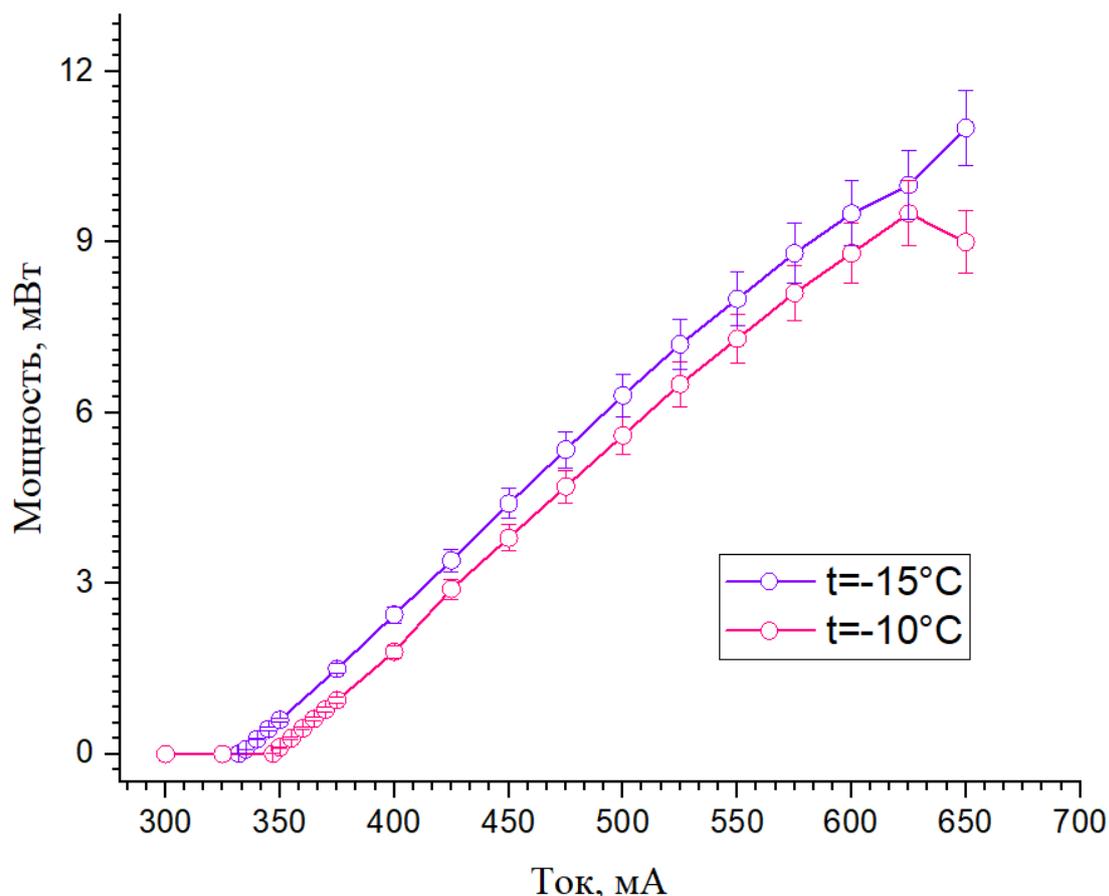
Экспериментальная установка была собрана по схеме, представленной на рисунке 3. Перед самым экспериментом измеритель мощности прогревался около 30 мин, затем в режиме калибровки был выставлен нормировочный множитель равный 100. Это означает, что все показания на шкале прибора делятся на это число. Для других длин волн, справедливы другие калибровочные множители. Перед измерениями мы выставляли ноль на блоке регистрации, чтобы учесть влияния внешних источников теплового излучения.

Следующими подготовительным этапом перед проведением измерений была юстировка ИМО-4С и фокусирующей линзы относительно излучения ККЛ. Фокусирующую линзу установили посередине падающего пучка и поместили ИМО-4С в фокус линзы. Все излучение будет собрано в том случае, если блок регистрации покажет максимальное значение.

После окончания юстировки мы записали две температурных зависимости мощности от тока, используя два температурных режима работы лазера при -10°C и -15°C . Ток подаваемый на активную зону лазера изменялся в пределах от 300 мА до 650 мА с шагом 25 мА. Также мы уменьшали шаг до 5 мА в области начала регистрации (генерации) сигнала.

Полученные данные имеют аналогичную зависимость с теоретической (Рисунок 13.), однако потеряно значительное количество мощности излучения лазера. Это происходит из-за поглощения излучения на кремниевых линзах, сначала на первой с фокусным расстоянием 50 мм, затем на второй с фокусным расстоянием 75мм. График при температурном режиме -15°C располагается выше, чем график при -10°C , значит мощность излучения в первом случае выше, однако в области 600-650 мА наблюдается скачок мощности. Это экспериментальная ошибка. У нас есть два предположения почему она возникает: мы не дождались, когда в приборе достаточно нагреется чувствительный элемента - прибор не успел среагировать на изменение падающего излучения, или произошел тепловой дрейф нуля прибора, что привело к общему смещению шкалы измерения.

Рисунок 13. График зависимости мощности от тока в опыте с квантово-каскадном лазере и ИМО-4С.



Из графика видно, что максимальный сигнал достигается: температурный режим $t=-10^{\circ}\text{C}$ на силе тока $I=625$ мА величиной $W = 9.50 \pm 0.57 \text{ мВт}$; температурный режим $t=-15^{\circ}\text{C}$ на силе тока $I=650$ мА величиной $W = 11.00 \pm 0.66 \text{ мВт}$. Рассмотрим минимальный зарегистрированный сигнал: температурный режим $t=-10^{\circ}\text{C}$ на силе тока $I=347$ мА величиной $W = 10,0 \pm 0,6 \text{ мкВт}$; температурный режим $t=-15^{\circ}\text{C}$ на силе тока $I=332$ мА величиной $W = 10.0 \pm 0.6 \text{ мкВт}$.

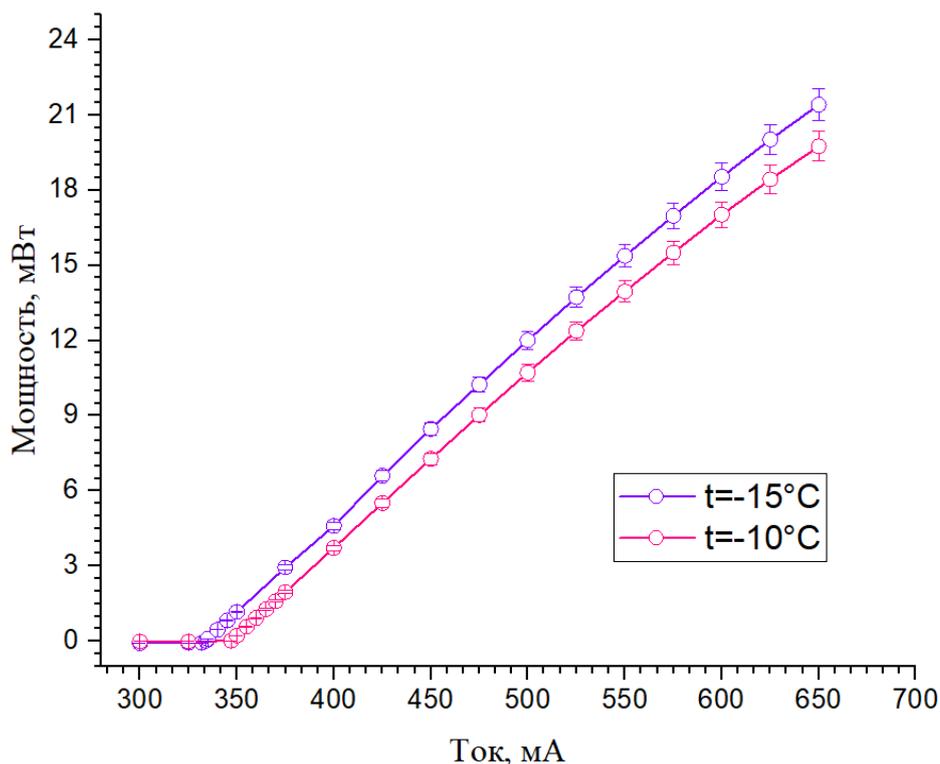
Также важной деталью является начало генерации сигнала. Из графика видно, что при температуре $t=-15^{\circ}\text{C}$ генерация начинается раньше, чем при $t=-10^{\circ}\text{C}$. На первом температурном режиме сигнал появляется при силе тока $I=332$ мА, а на второй при $I=347$ мА (эти значения соответствуют минимальному регистрируемому сигналу).

В данном эксперименте мы не учитывали поглощение линз и погрешность измерений рассчитывалась только из погрешности прибора, которая известна нам из документации к прибору.

3.8 Эксперименты с ККЛ и Ophir

Принцип работы измерителя мощности 3A-P-THz аналогичен приемнику ИМО-4С. Оба прибора фиксируют тепловое излучение и переводят его в значение мощности. Юстировка прибора аналогична: устанавливаем фокусирующую линзу, с фокусным расстоянием 75 мм, посередине падающего пучка, Ophir устанавливаем в фокус линзы. Сравнивая результаты измерения ИМО-4С и Ophir можно заметить, что 3A-P-THz не показывает скачок мощности на границе графика (Рисунок 14.). Это говорит, о том, что в измерении с ИМО-4С действительно присутствовала экспериментальная ошибка. Для проведения эксперимента с Ophir мы использовали те же температурные режимы работы лазера и диапазон силы тока от 300 мА до 650 мА. В промежутках генерации сигнала уменьшали шаг снятия показаний с прибора. На графике была учтена погрешность Ophir величиной в 3%.

Рисунок 14. График результатов эксперимента с квантово-каскадным лазером и Ophir.



Наш прибор работает в диапазоне частот 0,3—10 ТГц, а диапазон измеряемой мощности от 15 мкВт до 3 Вт. Поглотитель (полупроводник Р типа), используемый в измерителе мощности, позволяет проводить измерения в диапазоне частот работы ККЛ (~8.5 мкм), но прибор не откалиброван. Найдем калибровочный коэффициент для измерителя мощности:

Используем результаты измерения на ИМО-4С и Ophir.

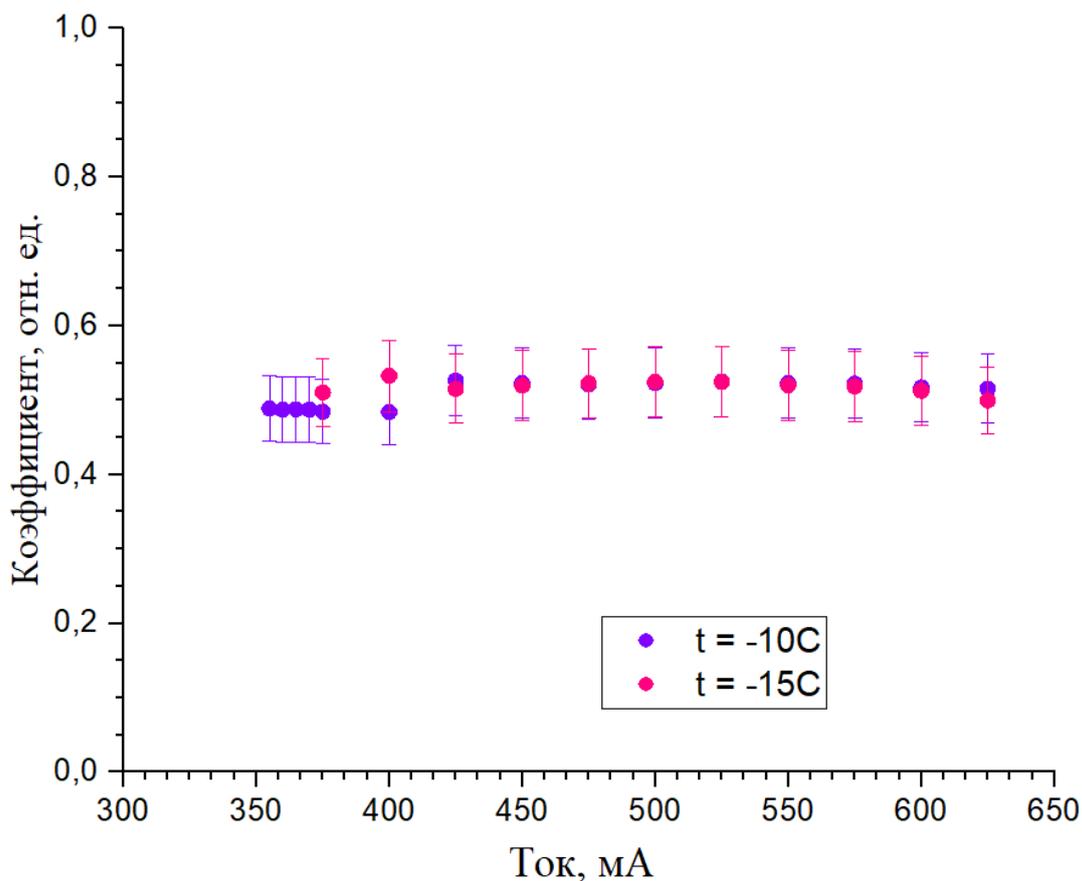
$$\frac{P_{ИМО-4С}}{P_{Ophir}} = x$$

где P_{Ophir} - мощность, полученная на 3А-Р-ТНz;

$P_{ИМО-4С}$ - мощность, полученная на ИМО-4С;

x - калибровочный коэффициент пересчета для измерителя мощности;

Рисунок 15. График зависимости коэффициента пересчета от силы тока.

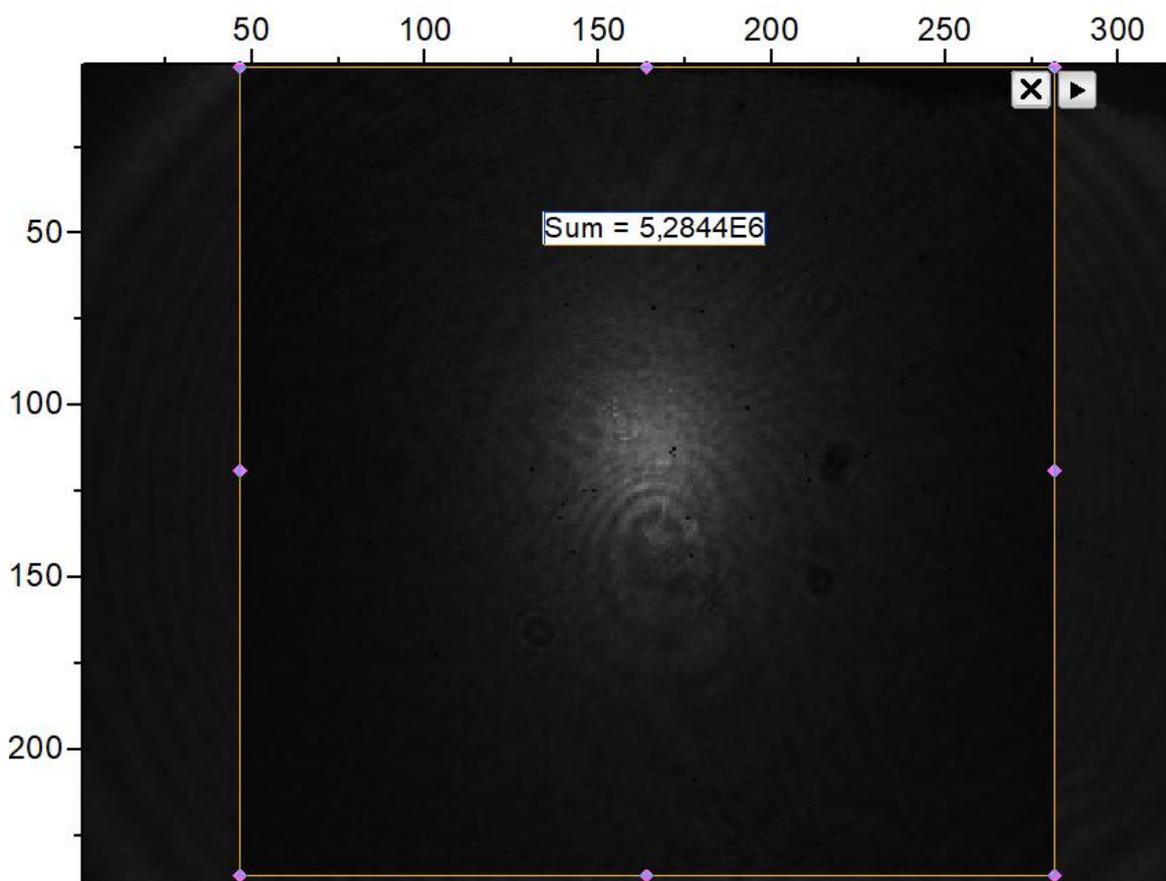


На графике (Рисунок 15.) наглядно видна зависимость коэффициента пересчета мощности от силы тока. Среднее значение коэффициента для $t = -10^{\circ}\text{C}$ равно $x = 0.510 \pm 0.046$ отн. ед., а для $t = -15^{\circ}\text{C}$ $x = 0.520 \pm 0.047$ отн. ед. При этом ошибка коэффициента складывается из ошибок приборов ИМО-4С и Ophir. Она составляет 9%.

3.9 Эксперименты с ККЛ и МБМ

В эксперименте с МБМ-приемником мы также работали в двух температурных режимах работы лазера (-10°C и -15°C) и получали изображение пучка ККЛ (8.5 мкм) при различных силах тока (измеряли в диапазоне от 300 мА до 650 мА в фокусе линзы). Пример изображения представлен на Рисунке 16.

Рисунок 16. Одно из изображений пучка ККЛ после начала генерации сигнала.



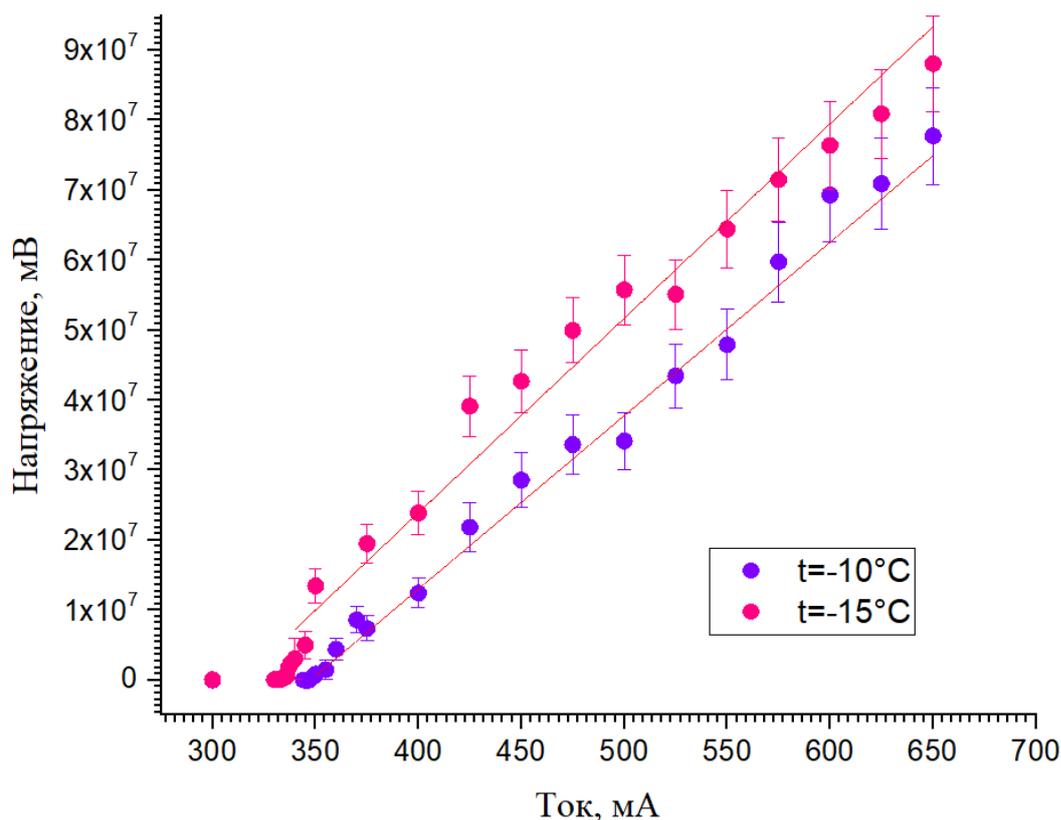
В данном эксперименте для того, чтобы получить значение мощности, получаемое на матричном приемнике, мы интегрировали по квадрату область образования изображения. Размер квадрата был $12 \times 12 \text{ мм}^2$, что соответствует размеру окон Ophir и ИМО-4С. График зависимости мВ МБМ приемника от силы тока ККЛ представлен на Рисунке 17.

МБМ-приемник имеет большую чувствительность чем измерители мощности, поэтому мы не можем проводить эксперимент без ослабления излучения. Велика вероятность повредить прибор. Чтобы не допустить этого, в данном эксперименте мы использовали поляризатор в качестве ослабителя.

Промежуточным шагом для получения коэффициента поглощения был дополнительный опыт с Ophir. Так как Ophir менее чувствителен, чем МБМ-приемник, то для него можно отдельно посмотреть значения излучения, с ослаблением и без него. В данном эксперименте ошибка измерений складывалась из очень многих факторов, таких как ошибка на ИМО-4С и Ophir, угол поворота поляризаторов и шумы на МБМ-приемники, которые появлялись

под воздействием внешних источников излучения. Мы не будем подробно описывать процесс получения ошибки при угле поворота поляризаторов, так как эта тема больше связана с оптическими явлениями, нежели чем с электричеством и магнетизмом.

Рисунок 17. График зависимости напряжения от силы тока с аппроксимирующими прямыми.



С помощью программы Origin аппроксимировали части графиков и получили их функции (дополнительные коэффициенты a и b) (Рисунок 18.)

Рисунок 18. Таблица, сгенерированная в программе Origin после аппроксимации $t = -15^\circ\text{C}$.

Equation	$y = a + b*x$		
Weight	Instrumental		
Residual Sum of Squares	17,47685		
Pearson's r	0,98669		
Adj. R-Square	0,97153		
		Value	Standard Error
F	Intercept	-1579,42483	95,82502
	Slope	5,03088	0,22994

Рисунок 19. Таблица, сгенерированная в программе Origin после аппроксимации $t = -10^{\circ}C$.

Equation	y = a + b*x		
Weight	Instrumental		
Residual Sum of Squares	20,34635		
Pearson's r	0,98874		
Adj. R-Square	0,97612		
		Value	Standard Error
F	Intercept	-1558,23666	61,81563
	Slope	4,48487	0,17525

В данных таблица коэффициент $a = Value(Intercept)$, $b = Value(Slope)$. Переобозначим функцию $y = a + b \cdot x$, которая является пересчетом мВ на МБМ-приемнике в мВт на ИМО-4С. $x = I_{ККЛ}$ - сила тока; $y = U_{МБМ}$ - значение напряжения. Получаем формулу:

$$U_{МБМ} = Value(Intercept) + Value(Slope) \cdot I_{ККЛ}$$

Ошибка коэффициента пересчета рассчитывается как ошибка ИМО-4С, сложенная с отношением по модулю стандартной ошибки к ее значимости при подсчете (из таблицы для аппроксимации).

$$Error_{ИМО-4С} + \left| \frac{Standard\ Error\ (Intercept)}{Value\ (Intercept)} \right| \cdot 100$$

Следовательно, во время температурного режима работы лазера $-10^{\circ}C$ погрешность коэффициента равна 10%, а при $-15^{\circ}C$ 12%.

$$\frac{P_{ИМО-4С}}{U_{МБМ}} = x_{ИК}$$

$x_{ИК}$ - коэффициент пересчета напряжения на МБМ-приемнике в единицы мощности в инфракрасном диапазоне. Он равен $x_{ИК} = 1.4 \cdot 10^{-7} \pm 0.2 \cdot 10^{-7} \frac{Вт}{В}$.

Рассчитаем предельную мощность МБМ-приемника на один пиксель. Максимальный сигнал, который может измерить МБМ-приемник

$$U_{МБМ\{\max\}} = 1000\text{ мВ}.$$

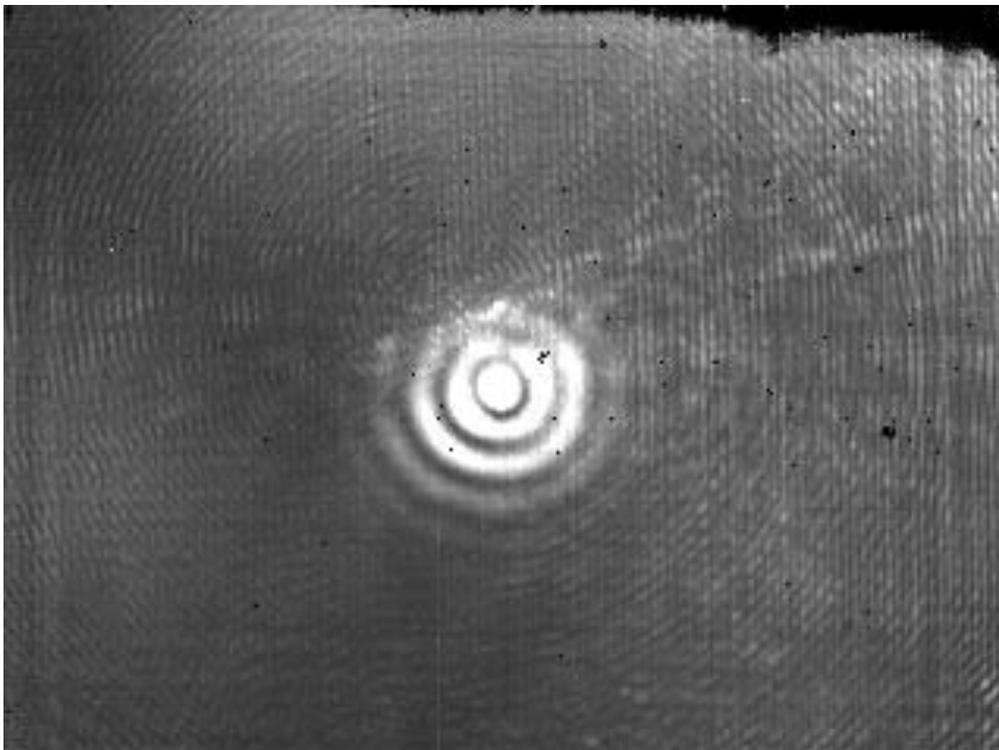
$$\frac{P_{ИМО-4С}}{U_{МБМ}} \cdot U_{МБМ\{\max\}} = P_{МБМ\{\max\}-ИК}$$

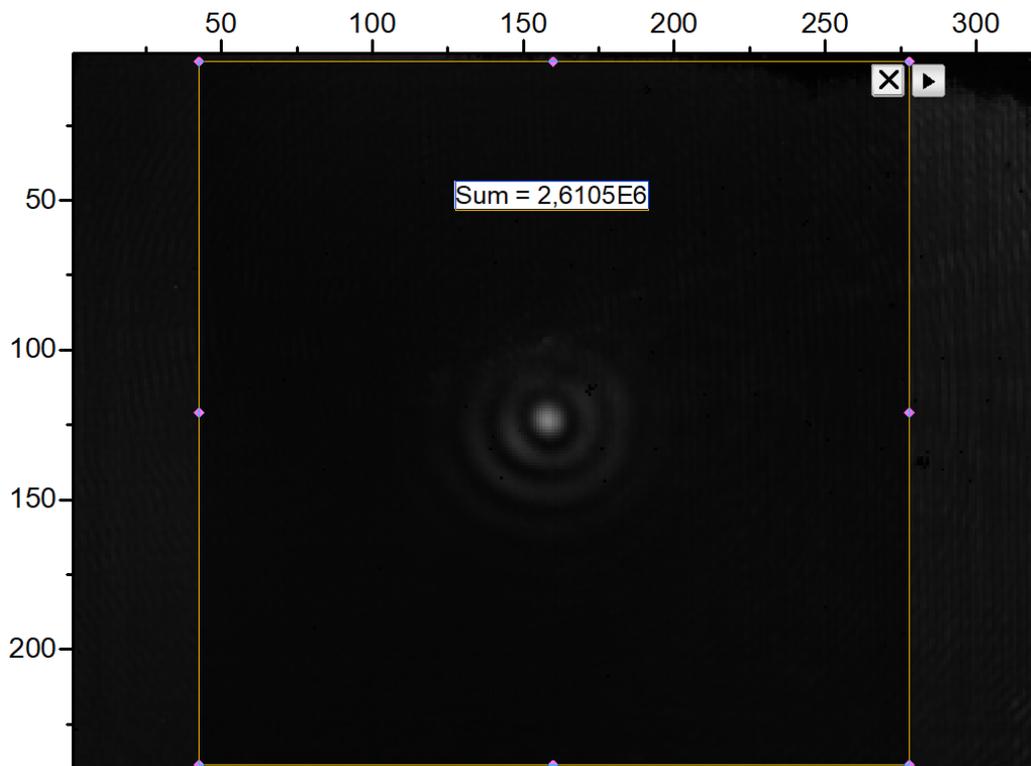
Следовательно, максимальное значение мощности на микроболометрическом детекторе равно $P_{МБМ\{\max\}-ИК} = 1.4 \cdot 10^{-4} \pm 0.2 \cdot 10^{-4} \text{ мВт}$. Здесь была учтена ошибка равная 16%.

3.10 Эксперименты с ЛСЭ и МБМ.

В эксперименте с лазером на свободных электронах (ЛСЭ) и МБМ-приемником терагерцовый пучок, с длиной волны 141 мкм, проходил через сложную систему ослабления излучения и попадал на приемник. Как результат мы получили изображение пучка (Рисунок 20.). Обработка данных на МБМ и ЛСЭ происходит аналогично опыту с использованием квантово-каскадного лазера. Проинтегрировали по квадрату зону изображения пучка, получили общее напряжение измеренное приемником значение на один пиксель равное $2.61 \cdot 10^6 \text{ мВ}$.

Рисунок 20. Изображения пучка ЛСЭ.





Аналогично предыдущим опытам нам необходимо было рассчитать коэффициент пересчета условных единиц в единицы мощности мВт. Для этого мы отдельно измерили мощности с помощью Ophir. Она составляла в зоне фокуса $P_{Ophir\{max\}} = 10.5 мВт$.

$$\frac{P_{Ophir\{max\}}}{U_{МБМ}} = x_{ТГц}$$

$x_{ТГц}$ - коэффициент пересчета напряжения на МБМ-приемнике в единицы мощности на терагерцовом диапазоне. $x_{ТГц} = 4.02 \cdot 10^{-6} \pm 0,11 \cdot 10^{-6} \frac{Вт}{В}$.

$$\frac{P_{Ophir\{max\}}}{U_{МБМ}} \cdot U_{МБМ\{max\}} = P_{МБМ\{max\}_-ТГц}$$

$P_{МБМ\{max\}_-ТГц}$ - максимальное значение мощности, которое может зарегистрировать один пиксель МБМ-приемника микролометрического детектора. $P_{МБМ\{max\}_-ТГц} = 4.02 \cdot 10^{-3} \pm 0,11 \cdot 10^{-3} мВт$.

В данном случае мы не учитываем ошибку измерения МБМ приемника так как ее влияние при больших мощностях пренебрежительно мало, поэтому на погрешность коэффициента влияет только O_{phig} . Ошибка измерения данного прибор 3%.

4. Заключение и обсуждение результатов

В рамках данной работы были посчитан переводной коэффициент для матричного микроболометрического приемника, позволяющий переводить единицы измерения приемника в абсолютные единицы ватт в терагерцовом и среднем инфракрасном диапазонах. Данный коэффициент позволяет посчитать такие характеристики приемника как NEP (Noise Equivalent Power), динамический диапазон, вольт-ваттная чувствительность и обнаружительную способность. С помощью этих параметров можно сравнивать различные приемники друг относительно друга. Для завершения курсовой работы рассчитаем данные характеристики и сведем их в одну таблицу.

Динамический диапазон (ΔP)

Динамический диапазон определяет в каком диапазоне мощностей приемник может работать.

$$P_{noise} = 0,08145 \text{ мВ (на один пиксель)}$$

$$\Delta P = \frac{P_{max}}{2 \cdot P_{noise}} = \frac{1000 \text{ мВ}}{2 \cdot 0.08145 \text{ мВ}} = 6138.74$$

$$\Delta P = 6138.7 \text{ (в данном случае не учитываем ошибку МБМ-приемника)}$$

Вольт-ваттная чувствительность (S_u)

Определим вольт-ваттную характеристику для терагерцового и инфракрасного диапазонов:

$$S_{u_ИК} = \frac{1}{x_{ИК}}$$

Инфракрасный диапазон: $S_{u_ИК} = 0.71 \cdot 10^7 \pm 0.11 \cdot 10^7 \frac{B}{Вт}$

$$S_{u_ТГц} = \frac{1}{x_{ТГц}}$$

В терагерцовом диапазоне: $S_{u_ТГц} = 0.25 \cdot 10^6 \pm 0.0075 \cdot 10^6 \frac{B}{Вт}$

Эквивалентная мощность шумов (NEP)

Эквивалентная мощность шумов определяет способность детектора обнаруживать малое излучение

$$U_{noise} = P_{noise} \cdot 235^2 = 4498 \text{ мВ}$$

$$NEP = \frac{\left(\frac{2 \cdot U_{noise}}{S_u} \right)}{\sqrt{\frac{f}{A}}}$$

где $f = 26 \frac{1}{c}$ - скорость обновления кадров приемника, $A = 240 \times 320$ - площадь приемника в пикселях.

$NEP_{ИК} = 0.069 \pm 0.011 \frac{\text{Вт}}{\sqrt{\text{Гц}}}$ - эквивалентная мощность шумов для инфракрасного диапазона.

$NEP_{ТГц} = 1.96 \pm 0.06 \frac{\text{Вт}}{\sqrt{\text{Гц}}}$ - эквивалентная мощность шумов для инфракрасного диапазона.

Обнаружительная способность (D)

Это мера чувствительности, связанная обратной зависимостью с эквивалентной мощностью шума. Высокие значения обнаружительной способности указывают на высокую чувствительность детектора.

$$D = \frac{d}{NEP}$$

где $d = 0.051 \text{ мм}$ - размер пикселя матричного приемника.

$D_{ИК} = 0.74 \pm 0.12 \frac{\sqrt{\text{Гц}} \cdot \text{мм}}{\text{Вт}}$ - обнаружительная способность для инфракрасного диапазона.

$D_{ТГц} = 0.026 \pm 0.001 \frac{\sqrt{\text{Гц}} \cdot \text{мм}}{\text{Вт}}$ - обнаружительная способность для терагерцового диапазона.

Итоговые результаты

Таблица 5. Сводная таблица с результатами измерений.

-	ИК (8.5 мкм)	ТГц (141 мкм)
ΔP	$\Delta P = 6138.7$	
S_u	$0.71 \cdot 10^7 \pm 0.11 \cdot 10^7 \frac{B}{Bm}$	$0.25 \cdot 10^6 \pm 0.0075 \cdot 10^6 \frac{B}{Bm}$
NEP	$0.069 \pm 0.011 \frac{Bm}{\sqrt{\Gamma\zeta}}$	$1.96 \pm 0.06 \frac{Bm}{\sqrt{\Gamma\zeta}}$
D	$0.74 \pm 0.12 \frac{\sqrt{\Gamma\zeta} \cdot мм}{Bm}$	$0.026 \pm 0.001 \frac{\sqrt{\Gamma\zeta} \cdot мм}{Bm}$
x	$1.4 \cdot 10^{-7} \pm 0.2 \cdot 10^{-7} \frac{Bm}{B}$	$4.02 \cdot 10^{-6} \pm 0,11 \cdot 10^{-6} \frac{Bm}{B}$
$P_{МБМ\{\max\}}$	$1.4 \cdot 10^{-4} \pm 0.2 \cdot 10^{-4} мВт$	$4.02 \cdot 10^{-3} \pm 0,11 \cdot 10^{-3} мВт$

5. Библиографический список

1. И. М. Несмелова, С. В. Рагинов, В. П. Иванов ВВЕДЕНИЕ В ОПТОЭЛЕКТРОНИКУ. - Казань: Отечество, 2006 - 276 с.
2. Д. В. Сивухин ОБЩИЙ КУРС ФИЗИКИ. Т.3 ЭЛЕКТРИЧЕСТВО
3. Под ред. Г. С. Ландсберга ЭЛЕМЕНТАРНЫЙ УЧЕБНИК ФИЗИКИ 2. Электричество и магнетизм
4. А. Рогальский Инфракрасные детекторы ; Пер. с англ. под ред. А. В. Войцеховского. - Новосибирск : Наука, 2003 - 636 с.
5. Савельев И. В. Курс общей физики: Учеб. пособие. В 3-х т. Т. 3. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц. 3-е изд., 1987. — 320 с.
6. КВАНТОВО-КАСКАДНЫЕ ЛАЗЕРЫ В МЕДИЦИНЕ И БИОЛОГИИ (Обзор) in Journal of Applied Spectroscopy
7. ЛАЗЕРЫ НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ Н. А. Винокуров
8. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:FEL_principle.png?uselang=ru
9. https://en.wikipedia.org/wiki/Thermoelectric_effect#Seebeck_effect
10. Большая российская энциклопедия: квантово-каскадный лазер