

Министерство образования и науки Российской Федерации
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)
Радиофизический факультет
Кафедра квантовой электроники и фотоники

Допустить к защите в ГАК
Руководитель ООП
д-р физ.-мат. наук, профессор
Войцеховский А.В. А.В. Войцеховский
"16" июня 2017 г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

**ИЗУЧЕНИЕ МЕТОДА РЕГИСТРАЦИИ ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
ОСНОВАННОГО НА УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ТЕРМОМЕТРИИ**

по основной образовательной программе подготовки бакалавров
направление подготовки 12.03.03 – Фотоника и оптоинформатика

Ермаченков Павел Андреевич

Руководитель ВКР
д-р физ.-мат. наук, профессор
Войцеховская О.К. О.К. Войцеховская
"16" июня 2017 г.

Автор работы
студент группы № 735
Ермаченков П.А. П. А. Ермаченков

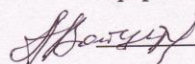
Томск 2017

РАДИОФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
Кафедра квантовой электроники и фотоники

УТВЕРЖДАЮ

Руководитель ООП

д-р физ.-мат. наук, профессор

 А.В. Войцеховский

ЗАДАНИЕ

по подготовке выпускной квалификационной работы
студента группы №735 Ермаченкова Павлу Андреевичу

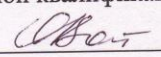
Тема работы: «Изучение метода регистрации инфракрасного излучения основанного на
ультразвуковой термометрии»

Руководитель работы: Войцеховская О.К.

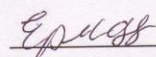
Основные этапы

- 1) Подготовка литературного обзора.
- 2) Ознакомление с особенностями распространения оптического излучения в газовых средах.
- 3) Установление критериев для выбора молекулярного газа в качестве рабочего.
- 4) Расчет коэффициентов поглощения и концентраций молекулярных газов.
- 5) Анализ полученных результатов.

Руководитель работы выпускной квалификационной работы

Д-р физ./ мат. наук  О.К. Войцеховская

С Положением о порядке организации и оформления выпускной квалификационной работы ознакомлен, задание принято к исполнению 15 сентября 2016.

 П.А. Ермаченков

Оглавление

Введение	3
1. Исследование тепловых приемников	4
1.1. Основные параметры	4
1.2. Тепловые приемники	5
1.2.1. Виды тепловых приемников	5
1.2.1.1. Термоэлектрический приемник	5
1.2.1.2. Болометр	7
1.2.1.3. Пироэлектрический приемник	10
1.2.1.4. Пневматический приемник	11
2. Метод ультразвуковой термометрии	13
2.1. Распространение звука в газе	13
2.2. Суть метода ультразвуковой термометрии	14
2.3. Устройство приемника	16
Заключение	24
Список использованных источников и литературы	25

Введение

Инфракрасное излучение (ИК излучение) – это излучение с длиной волны от 740 мкм до 1 мм.

Считается, что ИК излучение впервые зарегистрировано Уильямом Гершелем в 1800 году с помощью стеклянного жидкостного термометра. Считается, что эта дата положила начало к изучению инфракрасного излучения, а термометр стал первым приемником ИК излучения.

Приемники инфракрасного и видимого излучений относятся к такой области знаний, где их качество можно описать, прибегая к тем же понятиям, которые используются для описания свойств материала, из которого они изготовлены. Также можно вычислить и их предельные параметры, обусловленные статистической природой излучения.

Успехи, достигнутые в изучении инфракрасного (ИК) диапазона электромагнитного излучения, привели к созданию разнообразной техники медицинского, военного, научного и промышленного назначения. К разработке этой аппаратуры привлекаются множество специалистов.

В военных целях ИК излучение применяется в различных системах наведения для ракет, приборах ночного видения и тепловизорах. В медицине – в физиотерапии, стимуляции и улучшении кровообращения, а также в улучшении процессов метаболизма. В науке ИК-диапазон спектра интересен тем, что молекулярные спектры различных химических соединений лежат в ИК области. В промышленности инфракрасное излучение используется для передачи данных, в пищевой промышленности и для дистанционного управления.

В данной работе представлен обзор данных тепловых приемников ИК диапазона.

Также в работе рассмотрен метод измерения ИК излучения, основой которого служит акустооптическое взаимодействие. В качестве примера приведен оптико-акустический приемник излучения, разработанный Винокуровым С. А., Панкратовым Н. А., Робачевским М. В.

1. Исследование тепловых приемников

1.1. Основные параметры приемников излучения

Несмотря на сложность измерения рабочих характеристик, существует ряд параметров, по которым можно оценить их экспериментально. Эта сложность связана с множеством параметров, которые необходимо отслеживать.

Наиболее важные параметры приемников, это чувствительность, обнаружительная способность, постоянная времени, мощность эквивалентная шуму.

Постоянная времени – это промежуток времени, за который его выходная величина достигает заданного части установленного значения, при длительном облучении.

Чувствительность – это отношение выходного сигнала к мощности на входе. Чаще всего входной и выходной сигнал характеризуют его среднеквадратичной величиной:

$$R = \frac{V_s}{HA_d}, \quad (1)$$

Где R – чувствительность приемника ($B \cdot Bt^{-1}$), V_s – среднеквадратическая величина напряжения сигнала основной частоты, H – среднеквадратичная величина облученности на приемнике $Bt \cdot cm^{-2}$, A_d – площадь чувствительной площадки приемника cm^2 [17].

Мощность эквивалентной шуму – уровень мощности падающего излучения, необходимый для обеспечения отношения сигнал/шум равного 1:

$$P_{пор} = \frac{HA_d}{V_s/V_n}, \quad (2)$$

где V_n – среднеквадратичная величина напряжения шума на выходе приемника.

При сравнении нескольких приемников считают, что приемник, имеющий самый высокий выходной сигнал при данном излучении, имеет лучшую чувствительность. Однако, если приемники сравнивают по способности к обнаружению минимального потока излучения, то лучший приемник тот, который обладает меньшей $P_{пор}$.

Обнаружительная способность – это величина обратная $P_{\text{пор}}$:

$$D = \frac{1}{P_{\text{пор}}}. \quad (3)$$

1.2. Тепловые приемники

Принцип действия тепловых приемников основан на том, что физические свойства чувствительного элемента изменяются под действием нагревающего эффекта падающего излучения.

Поскольку тепловые приемники являются приборами, обнаруживающими энергию, то их характеристики зависят от мощности потока поглощаемого излучения, но не зависят от спектрального состава излучения (если не учитывать зависимость поглощательной способности от длины волны). Основой теплового приемника служит материал, температура которого изменяется при поглощении излучения. Необходимо отметить, что малая масса чувствительного элемента вызывает большие изменения температуры на единицу поглощаемой мощности, поэтому чувствительный элемент тепловых приемников очень мал.

Процесс нагревания и охлаждения макроскопического образца инерционен, поэтому класс тепловых приемников обладает значительно меньшим быстродействием по сравнению с фотонными приемниками. Принято считать, что быстродействие тепловых приемников ограничено миллисекундами, а для фотонных оно составляет микросекунды.

1.2.1. Виды тепловых приемников

1.2.1.1. Термоэлектрический приемник

Термоэлектрический приемник – это простейший тепловой приемник, основанный на эффекте Зеебека. Эффект Зеебека заключается в возникновении электродвижущей силы в цепи, состоящей из двух разных проводников при нагревании места их соединения.

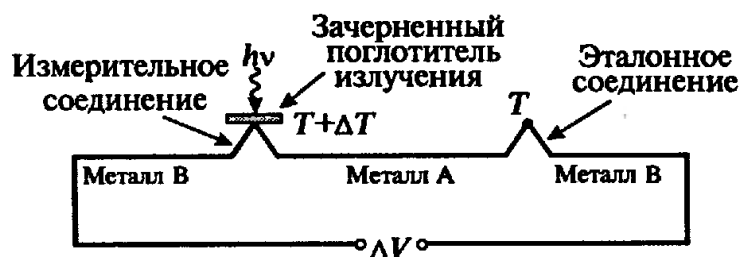


Рис. 1. Два последовательно соединенных разнородных металла [14].

Повысить эффективность прибора можно, если зачернить соединение для большего поглощения падающего излучения. Также теплоемкость соединения - большой коэффициент Зеебека,

- низкую теплопроводность,
- низкое объемное сопротивление.

Однако, эти требования несовместимы, так как теплопроводность G_{th} и электрическое сопротивление r связаны соотношением:

$$\frac{G_{th} r}{T} \approx 2.45 \cdot 10^{-8}, \text{ В/К}, \quad (4)$$

Это приводит к известному критерию качества для материалов термопар, который определяется максимальным значением α^2/rT , где α – коэффициент Зеебека [14].

Наиболее широко применяемые пары: висмут — серебро, медь — константан, висмут — сплав висмута с оловом.

Проволоки, изготовленные из двух разных материалов, соединяются одним концом, образуя термоэлектрический спай. Зачерненный приемник, являющийся чувствительным элементом, подсоединяется непосредственно к этому спаю. Напряжение, возникающее на термоэлектрическом спае, пропорционально температуре приемника.

Одиночные термопары не очень удобны в качестве приемников. Поэтому их чувствительность увеличивают, соединяя последовательно несколько термопар. Получившийся прибор называют термобатареей. Термобатарея изготавливается, как правило, напылением на подложку сначала одного

металла, а затем другого, так чтобы образовался открытый для излучения контакт между двумя металлами.

Развитие тонкопленочной технологии привело к появлению дешевых и надежных термопарных приемников, изготовленных напылением в едином технологическом процессе. Использование в таких приборах сурьмы и висмута позволяет получать элементы, которые сочетают некоторые преимущества металлических термопар с высокой чувствительностью [12].

1.2.1.2. Болометр

Другим широко используемым типом тепловых приемников является болометр. Он представляет собой резистор, изготовленный из материала с очень малой теплоемкостью и большим температурным коэффициентом сопротивления.

должна быть мала для того короткого времени отклика.

Соединение должно быть изготовлено из двух материалов, имеющих следующие свойства:

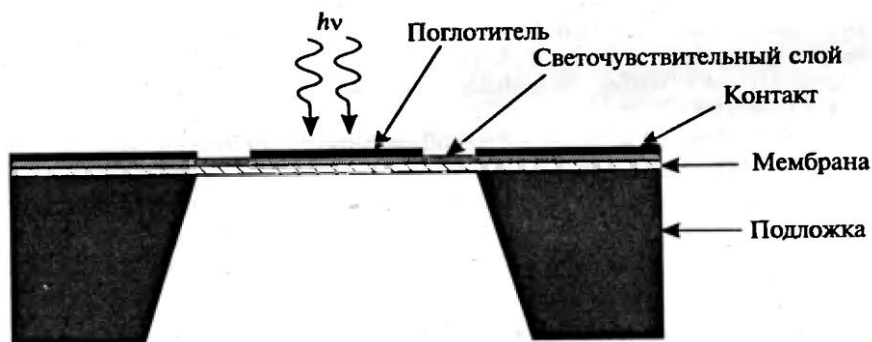


Рис. 2. Схематичное поперечное сечение тонкопленочного болометра [14].

Принцип действия болометра основан на изменении электрического сопротивления чувствительного элемента при изменении его температуры, под действием падающего на него потока излучения.

Чувствительный слой болометра выполняют обычно в виде металлической или полупроводниковой пленки, представляющей собой термосопротивление.

Конструктивно, болометр, чаще всего, содержит два термосопротивления, на одно из которых падает поток излучения, а второе компенсационное — компенсирует изменение температуры внешней среды.

Болометры можно разделить на пять типов, называемых соответственно термисторными, металлическими, сверхпроводящими, и охлаждаемыми полупроводниковыми (криогенными). Среди них только термисторные и криогенные полупроводниковые болометры приобрели практическое значение [12].

Термисторы. В термисторах используются оксиды полупроводников, чаще всего это оксиды марганца, кобальта или никеля в виде пленки толщиной порядка 10 мкм. Они имеют отрицательный температурный коэффициент сопротивления, который уменьшается пропорционально квадрату температуры. Типичные значения удельного сопротивления термисторов лежат в интервале 250-2500 Ом*см, а их размеры составляют 0,05-5 мм².

Термисторные болометры работают при смещениях, меньших критического, т. е. их дифференциальное сопротивление положительно. Обычно их используют без охлаждения, поэтому термисторные болометры относительно недороги. Поскольку изменения температуры окружающей среды оказывают сильное влияние на сопротивление, термисторы обычно монтируются по мостовой схеме, где один из двух одинаковых термисторов экранируется от внешнего излучения, а второй служит приемником излучения. Таким образом, энергия падающего излучения приводит к разбалансу моста, а изменения окружающей температуры разбаланса моста не вызывают.

Быстродействие определяется временем, необходимым для того, чтобы принявший излучение термистор успел охладиться до температуры среды, в которой находится болометр.

Металлический болометр. Чувствительным элементом металлических болометров является небольшой кусок металла, чаще всего используется никель, висмут, платина или сурьму. В основном чувствительность металлических болометров меньше, чем у термисторных болометров, поэтому

чувствительный элемент покрывается золотым или платиновым чернением для увеличения поглощаемого излучения.

Температурный коэффициент сопротивления металлов положителен и имеет значение около $0,3\%/^{\circ}\text{C}$ [14].

Металлические болометры должны иметь малый размер, для того чтобы обеспечить высокую чувствительность и их можно легко изготовить простым напылением металла на подложку, однако из-за этого они хрупки что ограничивает область их применения.

Сверхпроводящий болометр. Сверхпроводящий болометр основан на резком переходе некоторых металлов и полупроводников от нормального в сверхпроводящее состояние. Если температура среды, окружающей сверхпроводящий болометр, поддерживается немного меньшей, чем температура перехода в сверхпроводящее состояние, то небольшое ее увеличение, обусловленное поглощением внешнего излучения, вызовет очень большое изменение сопротивления образца, и выходной сигнал будет очень большим. В качестве материалов используются тантал, нитрид ниобия, нитрид колумбия, олово, свинец, станат ниобия.

Для изготовления наиболее чувствительных, хотя и самых медленных болометров, необходимо ухудшить контакт между подложкой и базой прибора. Это можно осуществить с помощью либо с помощью особых нейлоновых волокон, либо отводить тепло через подложку, концы которой находятся в контакте с базой. Последние конструкции позволили создать болометр микро секундного диапазона [14].

Криогенные болометры. Хотя сверхпроводящие болометры не получили широкого применения, другие охлаждаемые болометры используются достаточно широко, особенно в качестве детекторов излучения дальней ИК области спектра. К ранним приборам такого типа относятся угольные болометры. Они состоят из угольного резистора на медной подложке, охлаждаемой жидким гелием. Благодаря большому значению температурного коэффициента сопротивления и малой теплоемкости угольных резисторов,

такие болометры имеют очень высокую чувствительность. Они относительно просты в изготовлении, так что параметры прибора из того или иного материала можно предсказывать заранее. Криогенные полупроводниковые болометры особенно широко применяются в астрономии.

1.2.1.3. Пироэлектрический приемник

Изменение температуры пироэлектрического кристалла приводит к появлению поверхностного заряда из-за изменения спонтанной поляризации. При постоянной температуре эта поляризация незаметна, так как поверхностные заряды скомпенсированы объемной и поверхностной проводимостью кристалла. Величина спонтанной поляризации зависит от температуры и при ее изменении на гранях кристалла, перпендикулярных к полярной оси, могут быть обнаружены заряды. В этом и состоит пироэлектрический эффект.

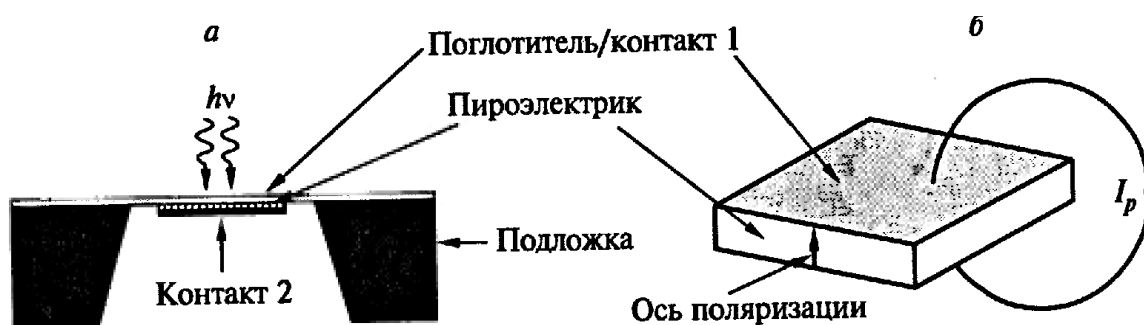


Рис. 3. Пироэлектрический приемник. а – схематичное поперечное сечение, б – пироэлектрический элемент [14].

Большинство пироэлектриков являются и ферроэлектриками (ферроэлектрик – это диэлектрик, который в некотором интервале температур обладает спонтанной поляризацией и поляризованность которого может изменить направление при приложении внешнего электрического поля), а при некоторой температуре T_c (температуре Кюри) их поляризация исчезает. Если же температура выше T_c , то материал становится параэлектриком

(параэлектрик – диэлектрик, для которого нелинейная зависимость поляризации от электрического поля проявляется уже при слабых полях).

Пироэлектрический приемник не нуждается в источнике питания. Возникающая разность потенциалов измеряется непосредственно либо после предварительного усиления.

Пороговая чувствительность пироэлектрического приемника не зависит от размеров площади чувствительного элемента, поэтому они могут иметь различные конструктивные формы [11].

В зависимости от направления вектора поляризации P_c при облучении приемника лучистым потоком различают пироэлектрические приемники продольного и поперечного типов.

Чувствительность приемников продольного типа выше, чем поперечного. Однако, так как у приемников продольного типа больше емкость (определяется площадью электродов), чем у приемников поперечного типа, постоянная времени приемников поперечного типа меньше: $\tau_{пр} = \text{от } 10^{-5} \text{ до } 10^{-6} \text{ с}$; $\tau_{поп} = \text{от } 10^{-7} \text{ до } 10^{-8} \text{ с}$. Кроме того, приемники поперечного типа можно изготавливать без черни на собственном поглощении, что также снижает их инерционность [10].

Также следует отметить, что ток в пироэлектрике это сложная функция, зависящая от физических характеристик кристалла его геометрических размеров и теплообмена со средой.

1.2.1.4. Пневматический приемник

Пневматический приемник или ячейка Голя это один из самых ранних тепловых ИК приемников, который характеризуется высокой чувствительностью и большой постоянной времени. В ячейке Голя падающее излучение поглощается внутренней поверхностью газонаполненной закрытой капсулы (обычно используют ксенон из-за его низкой теплопроводности), в результате чего происходит нагрев и расширение газа. Это, в свою очередь, приводит к деформации гибкой мембраны, на которой прикреплено небольшое зеркало. При повороте зеркала смещается и световой пучок, которым оно

освещается, что вызывает изменение освещенности и тока на выходе оптического фотоэлемента, на который падает отраженный от зеркала свет. В современных конструкциях приемника Голя для освещения зеркала применяется светоизлучающий диод, а приемником служит полупроводниковый фотодиод. Надежность и стабильность в этом случае значительно выше, чем в ранних конструкциях приемников Голя, где в качестве осветительного элемента и фотоприемника использовались вольфрамовая лампа накаливания и вакуумный фотоэлемент. Помимо более высокой надежности самих компонентов такой конструкции (свето- и фотодиод), использование светоизлучающего диода обеспечивает малое рассеяние мощности на зеркале, что дополнительно повышает надежность приемника.

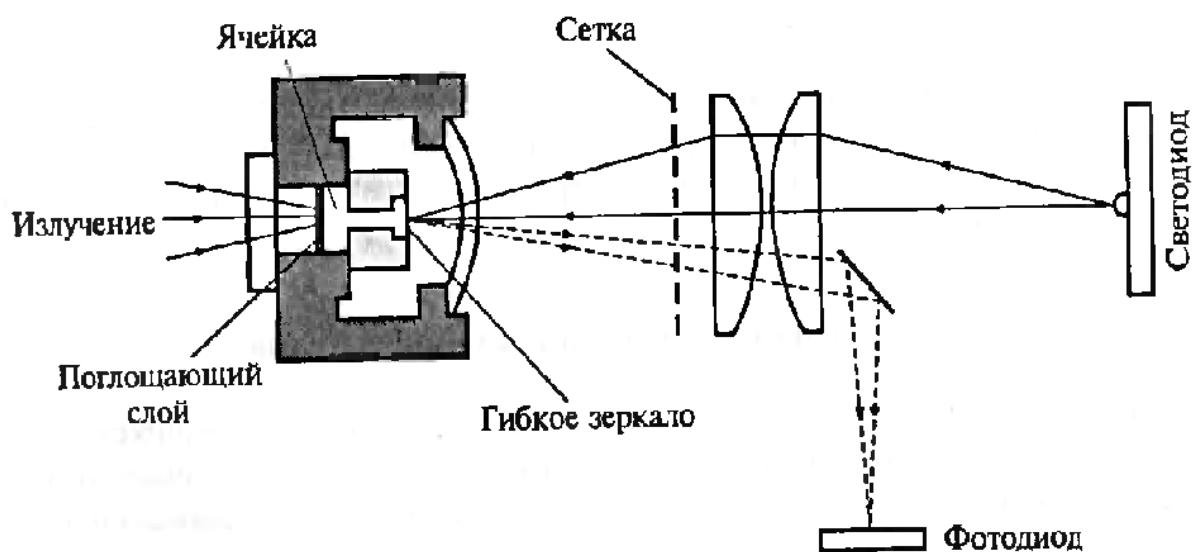


Рис. 4. Ячейка Голя [14].

Другой способ регистрации выходного сигнала состоит в размещении вблизи деформирующейся мембраны неподвижного проводника, который вместе с мембраной образует обкладки конденсатора. Емкость конденсатора может быть измерена с помощью соответствующей электрической схемы. Этот способ использовался в газовых анализаторах (ячейки Люфта), где

исследуемым газом заполняют один приемник, а выходной сигнал сравнивают с сигналом точно такого же приемника, заполненного эталонным газом.

Пневматический приемник ИК-излучения приближается по своим характеристикам к идеальному приемнику, ограниченному фотонными шумами. Однако он отличается от идеального прибора наличием прибора тепловой связи пневматической камеры со стенками и потерями на отражение, возникающими в окне камеры.

2. Метод ультразвуковой термометрии

2.1. Распространение звука в газе

Звук — это распространение упругих волн механических колебаний в твердой, жидкой или газообразной среде. Звуковая волна, по своей природе является продольной.

Рассмотрим процесс распространения звука в направлении ее движения. В качестве источника звука возьмем динамик, диффузор которого быстро колеблется в воздухе с частотой передаваемых звуковых сигналов. Диффузор, колеблясь в воздушной среде, сжимает (уплотняет) близлежащий к нему элемент объема воздуха с некоторой периодичностью, в процессе сжатия воздуха возникает избыточное давление в этом слое по отношению к последующему несжатому (разреженному) элементу объема воздуха. Молекулы сжатого слоя, вылетая из области с повышенной плотностью и давлением, передают импульс силы другим молекулам, находящимся в соседнем разреженном слое. Этот элемент объема воздуха, в свою очередь, сжимается, в нем возникает избыточное давление и т.д. Таким образом, распространение звуковой волны в воздушной среде, т.е. распространение деформации (уплотнения), происходит за счет упругой передачи импульса силы от предыдущего элемента объема к следующему в направлении распространения волны. Несмотря на то, что был рассмотрен частный случай для воздуха, механизм распространения справедлив для любого газа.

2.2. Суть метода ультразвуковой термометрии

Предлагаемый способ измерения энергии оптического излучения основан на том, что поглощение газом электромагнитного излучения приводит к увеличению температуры поглощающего газа, причем это увеличение однозначно связано с энергией поглощаемого излучения, оптическими и физико-химическими параметрами поглощающего газа (сечением поглощения молекулами газа излучения данного спектрального состава и теплоемкостью газа).

$$\Delta T = K \Delta E \quad (5)$$

Где ΔT - величина нагрева газа в градусах Кельвина, ΔE - количество поглощенной газом энергии электромагнитного излучения в джоулях, K - коэффициент пропорциональности, являющийся константой для данного сорта газа, геометрических размеров измерительной ячейки и давления газа в ячейке. Коэффициент пропорциональности K может быть рассчитан, если известна теплоемкость используемого газа или она определена эмпирически, путем калибровочных измерений.

Принцип действия данного приемника состоит в облучении исследуемым излучением поглощающей рабочей среды, находящейся в закрытой приемной камере, измерении изменения температуры этой среды, возникающего под действием излучения и определении его мощности по изменению температуры. Новизна состоит в том, что изменение температуры регистрируется с помощью метода акустической термометрии заключающегося в зависимости скорости звука от температуры газа, в котором этот звук распространяется [1, 7, 8].

Известно [1, 7, 8], что формула скорости звука c в газе выводится из линеаризованных уравнений гидродинамики. При этом для идеального в термодинамическом смысле газа получается выражение

$$c = \sqrt{\frac{\chi R T_k}{\mu}}, \text{ м / с}, \quad (6)$$

где c - скорость распространения звука в неподвижном газе, $\chi = C_p/C_v$ - отношение теплоемкостей при постоянном давлении и постоянном объеме, R -

универсальная газовая постоянная, T_k - температура в градусах Кельвина, μ - молекулярный вес газа.

Для бинарных газовых смесей

$$c = \sqrt{\frac{\chi R T_k}{C_1 \mu_1 + (1 - C_1) \mu_2}}, \text{ м / с}, \quad (7)$$

где χ – отношение теплоемкостей компонентов, C_1 – концентрация определяемого компонента, μ_1, μ_2 - молекулярные массы компонентов.

В ультразвуковых системах измеряют время t прохождения сигнала между парой ультразвуковых преобразователей (датчиков), разнесенных на известные расстояния L – расстояние между излучателем и приемником.

Тогда

$$t = L / c. \quad (8)$$

Изменение температуры ΔT_k заключенного в ячейку газа определяют из соотношения, следующего из (6),

$$\Delta T_k = \frac{\mu}{\chi R} (c_2^2 - c_1^2), \quad (9)$$

а величины c_1 и c_2 определяют из соотношений

$$c_1 = L/t_1; \quad c_2 = L/t_2. \quad (10)$$

Где L - геометрическая длина пути акустического сигнала, пропускаемого через измерительную ячейку, t_1, t_2 - времена прохождения этим сигналом длины L до (t_1) и после (t_2) поглощения газовой средой контролируемого электромагнитного излучения.

Величина L является константой, определяемой конструкцией измерительной ячейки (геометрическим расстоянием между излучателем и приемником акустических сигналов), значения t_1 и t_2 измеряют посредством известных схем измерения временных интервалов.

Подставив (10) в (9) получим

$$\Delta T_k = \frac{\mu}{\chi R} L^2 \frac{(t_2^2 - t_1^2)}{t_1^2 t_2^2}. \quad (11)$$

Таким образом, исходя из (5) и (11), величина энергии оптического излучения, поступающего в измерительную ячейку и поглощаемого находящимся в ней газом, однозначно связана с изменением времени прохождения акустическим сигналом, распространяющимся внутри ячейки, фиксированного расстояния L .

2.3. Устройство приемника

Рассматриваемый приемник является тепловым, так как его характеристики меняются при поглощении тепла.

Ближе всего к предложенному способу измерения – это способ, описанный в работе [5]. Устройство, реализующее этот способ, представлено на рис. 5.

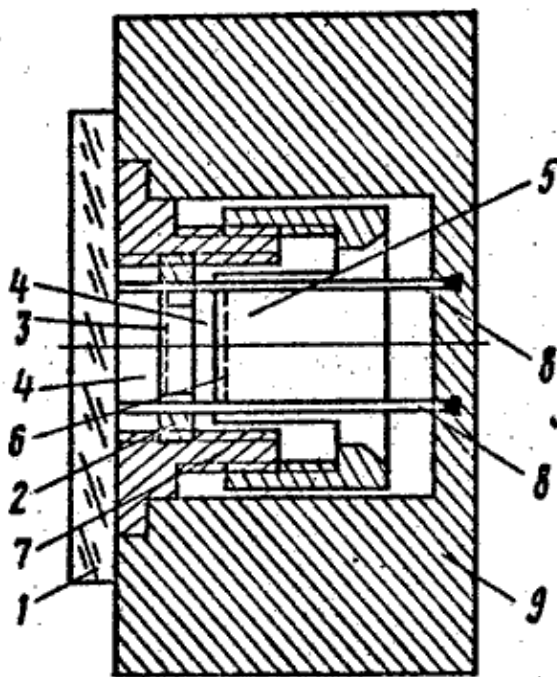


Рис. 5. Оптико-акустический приемник излучения [4].

- 1 – входное окно, 2 – резьбовая оправа, 3 – поглощающая пленка,
4 – приемная камера заполненная газом, 5 – микрофон, 6 – мембрана,
7 – резьбовая втулка, 8 – направляющие, 9 – корпус.

Приемник работает следующим образом: модулированный поток излучения проходит через входное окно и падает на поглощающую пленку. В результате поглощения пленка нагревается и нагревает газ, находящийся в камере. Газ расширяется и воздействует на мембрану. Прогиб мембраны

преобразуется микрофоном в электрический сигнал. Резьбовая оправа и микрофон с мембраной связаны между собой резьбовой втулкой таким образом, что расстояния от поглощающей пленки до входного окна и мембраны до микрофона равны. Поэтому при вращении втулки, глубина камеры изменяется на одну и ту же величину. Для предотвращения проворачивания оправы и микрофона при повороте втулки служат направляющие, жестко закрепленные в корпусе. При изменении частоты модуляции, резьбовую втулку поворачивают так, чтобы глубина камеры была меньше $0,25$ длины тепловой волны в газе (длина волны теплового излучения лежит в инфракрасной части спектра и имеет длину $0,8 - 40$ мкм), преимущественно $0,2$. При этом развиваемый приемником сигнал будет максимальным [4].

Основными недостатками этого приемника является крайне низкая защищенность от влияния акустических и вибрационных помех, обусловленная использованием в качестве чувствительного элемента акустического микрофона, а также возможные ошибки при изменении глубины камеры. Это обстоятельство приводит к тому, что, не смотря на то на то, что этот способ приема оптического излучения по своей чувствительности в средней ИК-области спектра приближается к фотоприемникам других типов, а в дальней ИК-области существенно превосходит их, использование его при решении целого ряда практических задач существенно ограничено. Высокая степень чувствительности данного способа измерения оптического излучения к акустическим и вибрационным шумам ухудшает пороговую чувствительность способа измерений и делает его малоприменимым для использования в широкой практике в реальных условиях.

Известен еще один приемник для измерения средней мощности излучения, содержащий заполненную газом камеру с окном и приемник акустических колебаний, в котором поток излучения, модулированный при помощи вращающегося диска с отверстиями, попадает в специальную камеру с газом, поглощающим излучение. В результате периодически выделяющейся в газе тепловой энергии в камере возникают акустические колебания, которые через

специальную мембрану регистрируются микрофоном. По интенсивности акустических колебаний определяют мощность излучения [3].

Недостатком такого способа фотоприемника является то, что можно измерять только непрерывное излучение, которое достаточно просто можно модулировать при помощи вращающегося диска. Кроме того, для измерения излучения большой мощности необходимо обеспечивать интенсивное охлаждение модулятора (вращающегося диска) и газа, поглощающего излучение. Для измерения мощности импульсно-периодического излучения необходимо предусмотреть сложное устройство для согласования частоты излучения и частоты возникающих акустических колебаний. Также к недостаткам этого способа можно отнести его низкую помехозащищенность вследствие того, что микрофон регистрирует всевозможные акустические колебания газа.

Рассмотрим работу предложенного приемника излучения.

Фотоприемник состоит из камеры наполненной газовой средой, окна для приема излучения, источника и приемника звуковых колебаний, и схемы регистрации временных интервалов.

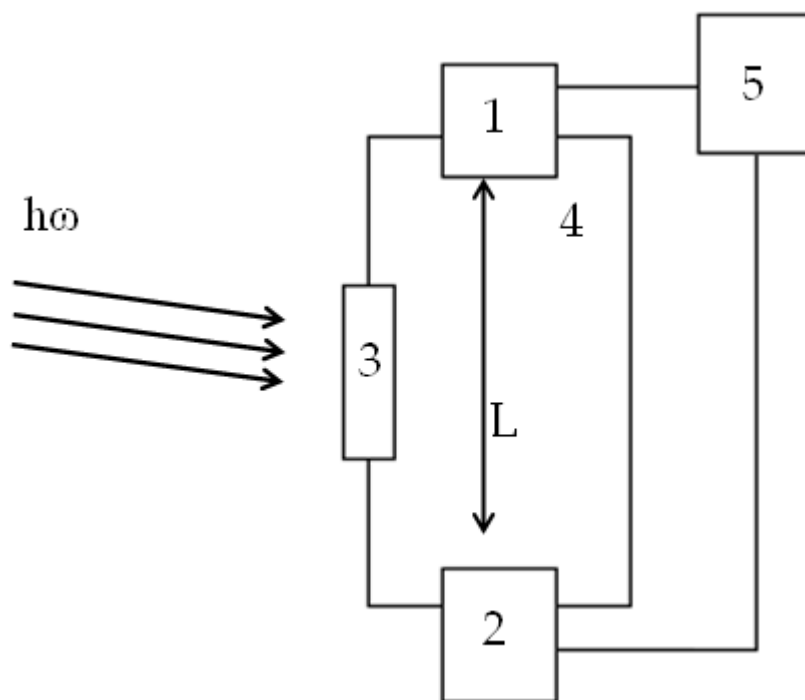


Рис. 6. Схематичное изображение приемника.

1 – источник звуковых колебаний; 2 – приемник звуковых колебаний;

3 - окно для приема излучения; 4 - камера с газовой средой;

5 – схема для регистрации временных интервалов

Падающее излучение $h\omega$, проходя через окно, поглощается газом в камере, что вызывает нагрев газа и изменение скорость прохождения ультразвука в звуковом канале длины L (расстояние между передатчиком 1 и приемником 2 ультразвука).

Для более точного измерения температуры необходимо подобрать газ, такой чтобы поглощение излучения на рабочей длине волны лазера было максимальным. Так как в работе использовался CO_2 лазер с длиной волны 10,6 мкм, то коэффициент поглощения рассчитывался для диапазона частот $940 \leq \omega \leq 950 \text{ см}^{-1}$, при температуре 296 К и давлении в одну атмосферу.

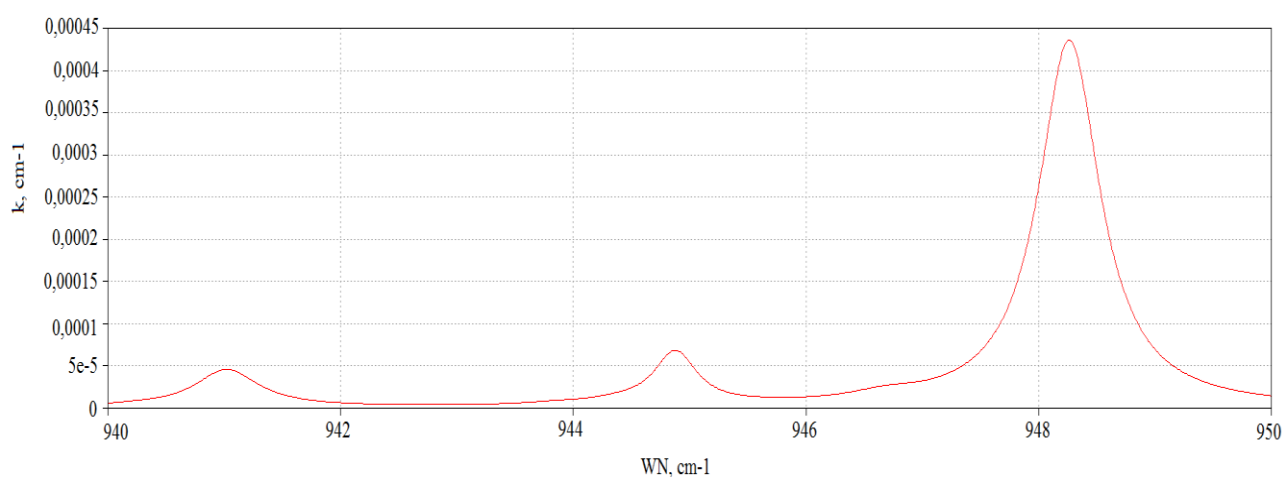


Рис. 7. Коэффициент поглощения H_2O [16].

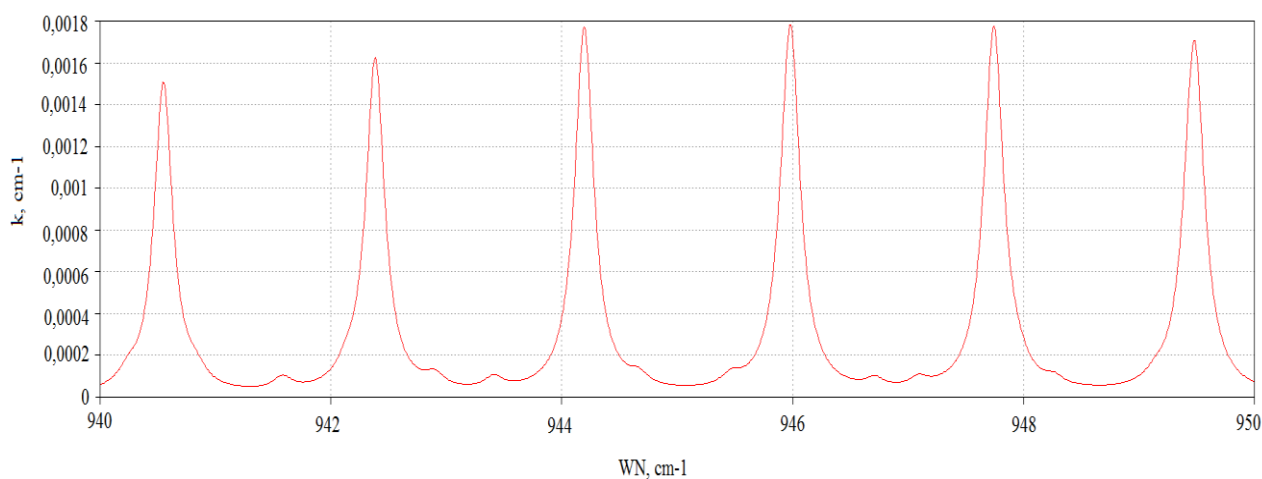


Рис. 8. Коэффициент поглощения CO₂ [16].

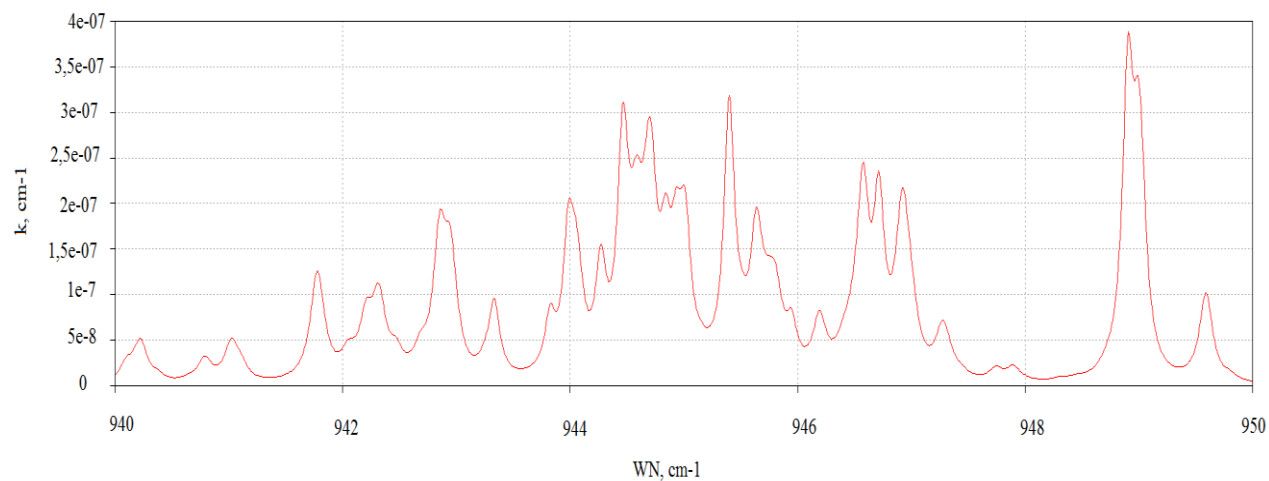


Рис. 9. Коэффициент поглощения CH₄ [16].

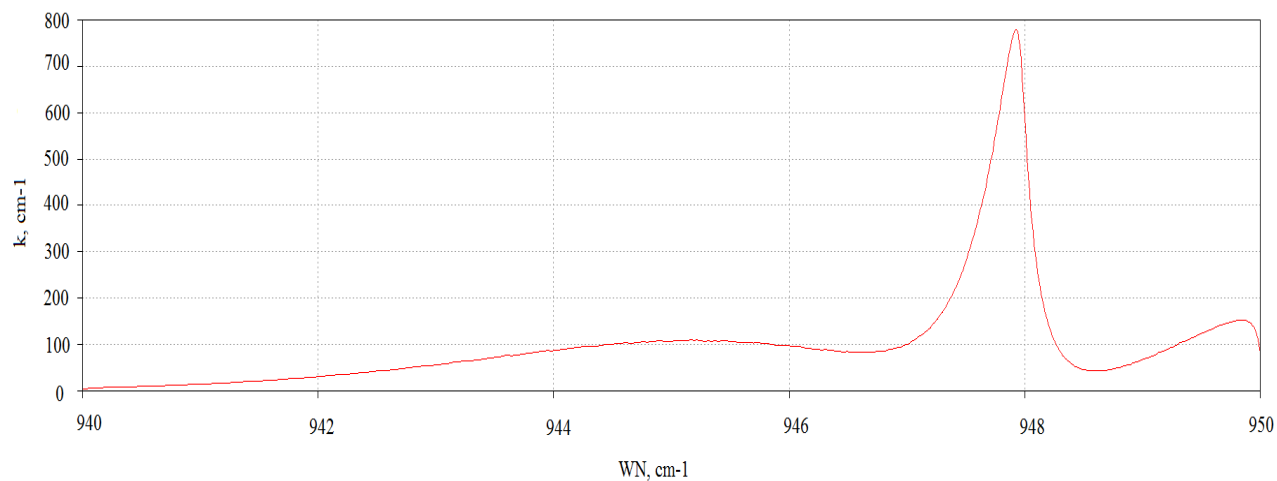


Рис. 10. Коэффициент поглощения SF₆ [16].

Таблица 1. Коэффициент поглощения в диапазоне частот $940 \leq \omega \leq 950 \text{ см}^{-1}$ [16].

Газ	Коэффициент поглощения, см^{-1}
H ₂ O	$7,132335 \cdot 10^{-7}$
CO ₂	$7,369519 \cdot 10^{-5}$
CH ₄	$4,473985 \cdot 10^{-8}$
SF ₆	66,714986

Из таблицы 1 видно, что максимальным коэффициентом поглощения имеет газ SF₆.

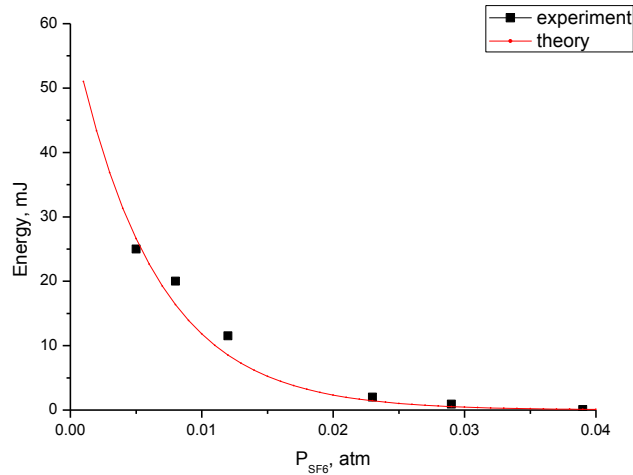


Рис. 11. Ослабление лазерного импульса после прохождения камеры с различной концентрацией SF_6 [19].

Рассчитать концентрацию SF_6 в камере можно с помощью закона Ламберта-Бугера-Бера:

$$I = I_0 e^{-knd}, \quad (12)$$

где I – интенсивность прошедшего излучения,

I_0 – интенсивность входящего излучения,

k – коэффициент поглощения,

n – концентрация газа,

d – расстояние пройденное излучением.

Нам необходимо чтобы поглощалось как можно больше излучения, так как это позволит более точно регистрировать количество поглощенного излучения, поэтому возьмем $I/I_0 = 0,01$. Тогда при $n = 1$ атм. и $d=2,5$ см получим, что $n_{SF_6} = 0,0276$ атм. Полученная концентрация очень мала для распространения ультразвукового импульса. Тогда можно сделать вывод, что необходим дополнительный (буферный) газ, но соответственно, встает вопрос о том, какой это должен быть газ. Так как действие приемника основано на изменении скорости звука, то газ должен иметь низкую удельную теплоемкость для того чтобы даже малая доля поглощенного излучения изменила его температуру и низкую скорость звука, так как чем ниже скорость звука, тем точнее измеряется температура.

Таблица 2. Таблица удельной теплоемкости и скорости звука [6].

Газ	Удельная теплоемкость, Дж/(г*К)	Скорость звука, м/с
He	5,194121	965
Ne	1,030243	435
Ar	0,520427	319
Kr	0,248097	224,36
Xe	0,158348	169
H ₂	14,301447	1284
N ₂	1,038786	334
O ₂	0,917243	314
CO ₂	0,843217	256,7
CH ₄	2,226309	430

В таблице 2 скорости звука приведены для температуры $T=273$ К, за исключением криптона – его скорость звука приведена для $T=303,26$ К.

Из данных таблицы 2, следует, что наиболее целесообразно выбрать в качестве буферного газа Хе из-за низкой удельной теплоемкости и низкой скорости звука.

Заключение

В результате проделанной работы проведен информационный поиск по теме приемников излучения ИК диапазона.

Было изучено влияние ИК излучение на акустооптическое взаимодействие. Произведен анализ работы оптико-акустического приемника излучения, разработанного Винокуровым С. А., Панкратовым Н. А., Робачевским М. В. В работе осуществлен поиск газовой среды и расчет ее концентрации. В результате проделанной работы выяснено, что наиболее эффективным рабочим газом является SF₆ с концентрацией 0,0276 атм, а в качестве буферного газа – Хе с концентрацией 0,9724атм.

Список использованных источников и литературы:

1. Бабилов О. И. Ультразвуковые приборы контроля. - М.: Наука, 1985.
2. Байбородина, Ю. В. Справочник по лазерной технике / Ю. В. Байбородина, Л. З. Криксунова, О. Н. Литвиненко. – Киев: "Техника", 1978. – 289 с.
3. Бреслер П. И. Оптико-акустический газоанализатор. А.С. № 368497, G01J 3/02, G01N 21/22. 1973.
4. Винокуров С. А., Панкратов Н. А., Робачевский М. В. Оптико-акустический приемник излучения. А.С. № 993712, G01J 5/50. , G01 N 21/61. 1981.
5. Воробьев В. В., Гурвич А. С., Мякинин В. А. Опто-акустический способ измерения энергетических параметров импульсного лазерного излучения А.С. № 1448838, G01J 5/50. 1986.
6. Григорьев, И. С. Физические величины / И. С. Григорьев, Е. З. Мейлиховва. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1234 с.
7. Ермолов И. Н., Алешин Н. П. Акустические методы контроля. - М.: Высшая школа, 1991.
8. Ермолов И. Н. Теория и практика ультразвукового контроля. 1981.
9. Ишанин, Г. Г. Источники и приемники излучения / Г. Г. Ишанин. – СПб.: "Политехника", 1991. – 242 с.
10. Ишанин, Г. Г. Приемники излучения оптических и оптико-электронных приборов / Г. Г. Ишанин. – Л.: "Машиностроение" Ленинградское отделение, 1986. – 178 с.
11. Криксунов, Л. З. Справочник по основам инфракрасной техники / Л. З. Криксунов. – М.: "Советское радио", 1978. – 400 с.
12. Круз, П. Основы инфракрасной техники / П. Круз, Макглоулин Л., Р. Макквистан. – М.: Военное издательство Министерства обороны СССР, 1964. – 466 с.
13. Мирошников, М. М. Теоретические основы оптико-электронных приборов / М. М. Мирошников. – Л.: "Машиностроение" Ленинградское

отделение, 1977. – 601 с.

14. Рогальский, А. Инфракрасные детекторы / А. Рогальский. – Новосибирск: "Наука", 2003. – 636 с.

15. Росс М. Лазерные приемники. – М.: Мир, 1974.

16. Спектроскопия атмосферных газов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://spectra.iao.ru>, свободный. – Загл. с экрана.

17. Хадсон, Р. Инфракрасные системы / Р. Хадсон. – М.: "Мир", 1972. – 537 с.

18. Хорбенко, И. Г. Звук, ультразвук, инфразвук / И. Г. Хорбенко. – М. : Издательство: "Знание", 1986. – 192 с.

19. Petrov D.V., Genin D.E., Telminov A.E., Zaripov A.R. Approbation of method of IR-radiation detection based on ultrasonic thermometry //Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. 2016. Vol. 10035. P. 100352D-1-100352D-4.

Отчет о проверке № 1

Информация о документе

A donut chart with a white center. The chart is divided into two segments: a smaller orange segment representing 10% and a larger grey segment representing 90%.

Информация об отчете

Источники

Доля в тексте	Источник	Ссылка	Дата	Найдено в
7.75%	[1] 	http://inethub.olvi.net.ua	22.04.2014	Модуль поиска Интернет
4.37%	[2] 	http://inethub.olvi.net.ua	22.04.2014	Модуль поиска Интернет
2.71%	[3] Радзишевский А. - Основы аналогового и цифрового звука (2006).djvu	http://eom.pp.ua	27.04.2014	Модуль поиска Интернет