**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

**БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**Факультет радиофизики и компьютерных
технологий**

**Кафедра квантовой радиофизики и оптоэлектроники**

СИДОРОВ
Виктор Иванович

**РАЗРАБОТКА ЛАЗЕРНОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ ВЛАЖНОСТИ
АГРЕССИВНЫХ АЭРОДИСПЕРСНЫХ СРЕД**

Дипломная работа

Научный руководитель:

канд.физ.-мат.наук,

доцент И. В. Иванов

Допущена к защите

«\_\_\_» \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 2023 г.

Зав. кафедрой квантовой радиофизики

и оптоэлектроники

доктор физико-математических наук, профессор А.А. Афоненко

Минск, 2023

Реферат

Дипломная работа: 69 страниц, 21 рисунок (схемы, диаграммы), 3 таблицы, 34 источника, 2 приложения.

ГАЗОАНАЛИТИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА, ИНФРАКРАСНАЯ ТЕХНИКА, ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ИНЖЕКЦИОННЫЕ ЛАЗЕРЫ, КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ МЕТОДЫ, СПЕКТРЫ ПОГЛОЩЕНИЯ, ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ НАДЕЖНОСТЬ

Объектом исследования являются аэродисперсные среды и эксплуатационно надежные портативные газоаналитические средства. Цель работы – создание лабораторного макета лазерного измерителя влажности аэродисперсных сред и исследование его характеристик.

Проанализированы пути использования методов лазерной спектроскопии для непрерывного контроля. Показана целесообразность использования для решения этой задачи полупроводниковых инжекционных лазеров с длиной волны излучения 1,33 мкм, которые широко используются в оптоволоконных линиях связи. Исследованы характеристики полупроводникового лазера ЛД-28 и создан лабораторный макет лазерного измерителя влажности. Проведен численный анализ методов обработки принимаемого после прохождения контролируемой трассы зондирующего лазерного сигнала и экспериментально исследованы основные характеристики лабораторного макета лазерного влагомера.

Показано, что использование модифицированного корреляционного метода обработки повышает метрологическую надежность лазерных влагомеров.

Разработанные методы и аппаратурные решения могут быть использованы при конструировании лазерных газоаналитических модулей, предназначенных для непрерывного контроля различных аэродисперсных сред в производственных условиях.

Результаты работы опубликованы в журнале «Измерительная техника» и доложены на 3-й Международной НТК «Квантовая электроника», проходившей в г. Минске в 2022 г.

Оглавление

[Перечень условных обозначений 4](#_Toc117001814)

[Введение 5](#_Toc117001815)

[1 Методы определения влажности 7](#_Toc117001816)

[1.1 Основные методы и средства, требующие контакта датчика с измеряемой средой 7](#_Toc117001817)

[1.2 Психрометрический метод контроля влажности 7](#_Toc117001818)

[1.3 Погрешности контактных методов 8](#_Toc117001819)

[1.4 Оптические методы определения влажности 8](#_Toc117001820)

[1.5 Параметры и спектральный состав излучения современных инфракрасных лазерных диодов 8](#_Toc117001821)

[2 Разработка модифицированного корреляционного метода лазерного контроля влажности 9](#_Toc117001822)

[2.1 Концепция «безаприорности измерений» 9](#_Toc117001823)

[2.2 Модифицированный корреляционный метод лазерной спектроскопии 9](#_Toc117001824)

[3 Габаритно-энергетический расчёт лазерного влагомера и моделирование процесса измерений 11](#_Toc117001825)

[3.1 Состав выхлопных газов 11](#_Toc117001826)

[4 Исследование характеристик лабораторного макета лазерного влагомера 12](#_Toc117001827)

[4.1 Функциональная схема влагомера, использующего модифицированный корреляционный метод 12](#_Toc117001828)

[4.2 Исследование ватт-амперных и спектральных характеристик инфракрасного лазерного диода ЛД-28 12](#_Toc117001829)

[4.3 Описание макета лазерного влагомера 12](#_Toc117001830)

[4.4 Экспериментальное определение влияния изменения температуры окружающей среды и загрязнения оптических элементов на погрешности измерений 12](#_Toc117001831)

[Заключение 13](#_Toc117001832)

[Список использованных источников 14](#_Toc117001833)

[Приложение А Принципиальная электрическая схема лазерного влагомера 15](#_Toc117001834)

[Приложение Б Текст программы для расчета характеристик модифицированного корреляционного метода 16](#_Toc117001835)

# Перечень условных обозначений

АЦП – аналого-цифровой преобразователь

БДО – блок дополнительной обработки

БПП – блок предварительных преобразований

БПН – буферный повторитель напряжения

БЦФ – блок цифрового фильтра

БМУ – блок микропрограммного управления

ВБУ – блок входного буфера и умножителя

ГТД – газотурбинный двигатель

КАЦП – контролер АЦП

КИС – коммутатор измерительных сигналов

ККС – коммутатор контрольного сигнала

ОЗУ – оперативное запоминающее устройство

ПЗУ – постоянное запоминающее устройство

РВИК – сигнал разрешения выдачи контрольной информации

СВ – схема выдачи

СОИ – смена обмена информацией

ССД – схема сдвигов

# Введение

Ниже приведен пример оформления Введения со ссылками на литературные источники.

Измерение содержания влаги в аэродисперсных средах необходимо для поддержания оптимальных режимов многих технологических процессов. Например, можно указать на необходимость контроля влажности в цехах ткацких производств, влажности сушильного агента в камерах паровоздушной сушки древесины и т. д. Относительная влажность воздушной среды в помещениях обычно определяется контактными датчиками, в основном емкостными.

 В сложных случаях, когда аэродисперсная среда является агрессивной, применение контактных датчиков для непрерывного контроля невозможно вследствие загрязнения и последующего разрушения их чувствительного слоя и деградации характеристик. В таких случаях необходимо применять датчики, не имеющие непосредственного контакта с контролируемой средой. Оптоэлектронные датчики влажности позволяют вести контроль дистанционно и имеют малые погрешности измерения. Их принцип действия основан на измерении поглощения проходящего через среду излучения, т. е. со средой взаимодействуют только фотоны, что и позволяет этим датчиком иметь стабильные характеристики, не зависящие от состава среды.

Известно несколько методов оптического контроля [[[1]](#endnote-1)]: газоразрядный, оптико-акустический, метод прямого измерения поглощения или абсорбционный, метод дифференциальной абсорбционной спектроскопии, метод комбинационного рассеяния, лазерно-флуоресцентный анализ и метод внутрирезонаторного лазерного поглощения. Наиболее простым и дешевым в реализации является абсорбционный метод, основанный на избирательном поглощении проходящего через среду излучения колебательно-вращательными переходами молекул воды.

Молекула воды имеет несколько основных и комбинационных колебательно-вращательных полос поглощения, центры которых приближенно располагаются около 0,94; 1,1; 1,38; 1,87; 2,7; 3,2; 6,3 мкм. Для контроля влажности среды целесообразно использовать полосы поглощения в ближней ИК области спектра, в которой возможно применение оптических элементов из обычного оптического стекла. Традиционное построение абсорбционного измерителя концентрации паров воды при наличии теплового или светодиодного источника излучения и использовании дифференциального метода требует применения двух узкополосных интерференционных фильтров, один из которых должен пропускать излучение в максимуме полосы поглощения, а второй – на крыле. Также необходима механическая модуляция потока, что усложняет оптико-механическую схему.

При использовании лазерных диодов возможно существенное упрощение оптико-механического блока. За последние годы созданы полупроводниковые лазеры, работающие в видимой и инфракрасной области спектра без криогенного охлаждения. Хорошо освоено производство лазеров в области 1,33 мкм, применяемых в оптоволоконных линиях связи. Отдельные образцы таких лазеров можно перестраивать при изменении температуры его кристалла с помощью холодильника Пельтье по длине волны в области около 1,35 мкм, где наблюдаются линии поглощения молекул H2O. Однако зависимость генерируемой ими мощности и частоты излучения от тока инжекции и температуры, а также возникающее в процессе эксплуатации загрязнение оптических поверхностей не позволяют даже при использовании корреляционных методов лазерной спектроскопии обеспечить метрологическую надежность в производственных условиях эксплуатации влагомеров. Несмотря на достаточное число научно-исследовательских работ [[[2]](#endnote-2), [[3]](#endnote-3)], на практике был создан лишь ряд макетов лазерных газоаналитических средств, которые вследствие вышеуказанных причин так и не нашли применения за стенами лабораторий.

Целью данной работы является разработка модифицированного корреляционного метода, использующего в качестве информационного сигнала отношение принимаемых на двух разных длинах волн потоков лазерного излучения, и экспериментальное исследование основных характеристик влагомера на основе лазера ЛД-28, излучающего в области 1,35 мкм.

Устранение влияния неконтролируемых изменений физических параметров аэродисперсной среды и характеристик оптоэлектронного тракта влагомера на результаты непрерывного контроля влажности позволит обеспечить его метрологическую надежность в сложных условиях эксплуатации.

1. Методы определения влажности

Здесь преамбула, что в этом разделе или главе.

История гигрометрии насчитывает уже не одно столетие, однако, до сих пор нет универсального метода измерения влажности аэродисперсных сред, удовлетворяющего всем разнообразным требованиям к этим измерениям. Рассмотрим основные и наиболее широко распространенные методы определения относительной влажности аэродисперсных сред [[[4]](#endnote-4)].

## Основные методы и средства, требующие контакта датчика с измеряемой средой

Исторически первым методом определения относительной влажности явился психрометрический метод. Рассмотрим особенности и возможности контактных датчиков.

Далее идет текст первого параграфа с объемом не менее 1 стр.

…..

…..

## Психрометрический метод контроля влажности

В настоящее время самыми распространенными в промышленности, метеорологии и других отраслях народного хозяйства являются гигрометры, основанные на психрометрическом принципе, т.е. на зависимости между влажностью воздуха и так называемой психрометрической разностью – разностью показаний сухого и смоченного термометров, находящихся в термодинамическом равновесии с анализируемым газом. Мокрый термометр имеет чувствительный элемент, смоченный водой, и находится в термодинамическом равновесии с окружающей газовой средой. Испарение с поверхности чувствительного элемента мокрого термометра происходит тем интенсивнее, чем ниже влажность газа. Разность показаний сухого и влажного термометров будет зависеть от значения влажности. Основой метода служат полуэмпирические формулы. Общепринятыми из них являются:

, (1)

где *e* – парциальное давление водяного пара; *Em* и *Ec* – давления насыщенного водяного пара при температуре влажного *t*м и сухого *t*с термометров; ϕ – относительная влажность; *Ap* – психрометрический коэффициент, зависящий от атмосферного давления *p*.

Здесь показана формула, которая не имеет нумерации.

.

## Погрешности контактных методов

Рассмотрим погрешности контактных методов.

…..

Это пример оформления пункта при необходимости разбить параграф на более мелкие структурные единицы. При необходимости разделить параграф на пункты необходимо набрать название пункта и назначить ему стиль «Заголовок 3». Получим

### Погрешности психрометрического метода

Аналогично действуем при необходимости создать подпункт.

#### Название подпункта

## Оптические методы определения влажности

Оптические методы не требуют ………………………………………… ………………….

На практике используют несколько газоаналитических методов:

- газоразрядный;

- оптико-акустический;

- метод прямого измерения поглощения или абсорбционный;

- метод дифференциальной абсорбционной спектроскопии;

- метод комбинационного рассеяния;

- лазерно-флуоресцентный анализ;

- метод внутрирезонаторного лазерного поглощения.

……………………..

## Параметры и спектральный состав излучения современных инфракрасных лазерных диодов

Технологические успехи последних лет позволили ……………….. ……..

1. Разработка модифицированного
корреляционного метода лазерного контроля
влажности

Здесь преамбула, что в этом разделе или главе.

Существующие в настоящее время оптико-электронные методы определения компонентного состава аэродисперсных сред [[[5]](#endnote-5), [[6]](#endnote-6)] не отвечают в полной мере современным требованиям.

………………………………

…………………………….

## Концепция «безаприорности измерений»

Для устранения влияния вышеотмеченных факторов ….

…………………………….

…………………………

### Синтез структур систем диагностики аэродисперсных сред на основе концепции «безаприорности»

В теории измерений различают совместные и совокупные измерения [[[7]](#endnote-7)]. Пусть уравнение, описывающее процесс измерения на длине волны , имеет вид

, (2)

где  – известные коэффициенты, – непосредственно измеряемая величина,  – искомые неизвестные. Формулу (2) можно преобразовать к виду ….

## Модифицированный корреляционный метод лазерной спектроскопии

Использование принципов предлагаемой концепции при корреляционной обработке в лазерной спектроскопии, позволяет создать модифицированный корреляционный метод контроля состава среды.

Описание параметров потока, излучаемого многомодовым полупроводниковым лазером …

В общем случае поток, излучаемый лазерным диодом, можно …..

На рис. 1 приведены функциональные зависимости, поясняющие процесс формирования образа.

ΔΘн=0

Θ0=ΔΘк/2

ΔΘк

*k*н(ΔΘ)-*k*н(ΔΘк/2-ΔΘ)

*k*н(ΔΘ)

*k*н(ΔΘк/2-ΔΘ)

*k*н(ΔΘк-ΔΘ)

*k*н(ΔΘ)-*k*н(ΔΘк-ΔΘ)

Сплошная линия – зависимость нормированного линейного коэффициента поглощения *k*н(ΔΘ) выбранной линии контролируемого компонента от параметра перестройки ΔΘ в интервале от ΔΘн=0 до ΔΘк; штриховая – зеркальное отображение *k*н(ΔΘ) относительно оси, проходящей через Θ0; штрих-пунктир – разность этих зависимостей (22)

Рис. 1. Функциональные зависимости, используемые при формировании
образа калибровочного сигнала

1. Габаритно-энергетический расчёт лазерного влагомера и моделирование процесса измерений

Здесь преамбула, что в этом разделе или главе.

Для ………………………………………………………

……………………………………………

………………………………………….

…………………………………

## Состав выхлопных газов

Таблица 1. Состав выхлопных газов карбюраторных и дизельных двигателей

В процентных долях % от общего объема

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Компонент | Карбюраторные двигатели | Дизельные двигатели |
| Азот | 74 - 77 | 76 - 78 |
| Кислород | 0.3 - 8.0 | 2-18 |
| Пары воды | 3.0 - 5.5 | 0.5 - 18 |
| Диоксид углерода | 5.0 - 12.0 | 1.0 -10.0 |
| Оксид углерода | 0.5 - 12.0 | 0.01- 0.5 |
| Оксиды азота | 0.0 - 0.8 | 0.0002 - 0.5 |
| Углеводороды (неканцерогенные) | 0.2 - 3.0 | 0.009 - 0.5 |
| Альдегиды | 0.0 - 0.2 | 0.001 - 0.009 |
| Сажа | 0.0 - 0.4\* | 0.01 - 1.1\* |
| Бензапирен | До 10 - 20\*\* | До 10\*\* |
| Примечание: \* - в г/м3;\*\* - в мкг/м3. |

Операции по нумерации таблицы и введения ссылки на ее номер осуществляются также, как и для рисунка или формулы. Вначале клавишей Enter переносят номер таблицы и ее название на новые строки, затем осуществляют перекрестную ссылку на его (получим в месте вставки ссылки 1 и возвращают номер таблицы на место.

Для создания, форматирования и изменения таблицы путем вставки или удаления строк или столбцов, объединения или разъединения ячеек пользуйтесь панелью Таблица, набор команд в которой позволяет выполнить практически все операции.

1. Исследование характеристик лабораторного
макета лазерного влагомера

Здесь преамбула, что в этом разделе или главе.

## Функциональная схема влагомера, использующего модифицированный корреляционный метод

## Исследование ватт-амперных и спектральных характеристик инфракрасного лазерного диода ЛД-28

……….

## Описание макета лазерного влагомера

## Экспериментальное определение влияния изменения температуры окружающей среды и загрязнения оптических элементов на погрешности измерений

………………………………….

# Заключение

В результате проделанной работы можно сделать следующие выводы.

1) Анализ известных методов измерения влажности показал, что для количественного контроля концентрации водяных паров в агрессивных аэродисперсных средах необходимо использовать оптические методы, из которых методы лазерной диодной спектроскопии имеют лучшие эксплуатационные характеристики.

2) Для исключения влияния различных дестабилизирующих факторов при непрерывном контроле влажности целесообразно использовать модифицированный корреляционный метод обработки лазерного зондирующего сигнала, при применении которого требуется минимум априорной информации.

3) Для непрерывного контроля влажности возможно использование серийно выпускаемых лазеров для оптоволоконных линий связи с длиной волны 1,33 мкм, при этом оптико-механическая схема лазерного влагомера значительно упрощается по сравнению с традиционными ИК влагомерами.

4) Исследование характеристик созданного макета лазерного влагомера, использующего модифицированный корреляционный метод обработки, показало подавление влияния изменения температуры окружающей среды от +5 до +40 °С и десятикратного изменения коэффициента передачи оптоэлектронного тракта на результаты определения относительной влажности.

5) Путем численного моделирования процесса измерений установлена зависимость верхнего предела достоверно определяемого парциального давления паров воды от величины вклада боковых мод в суммарную мощность излучения лазерного диода.

# Список использованных источников

Внимание! Этот нумерованный список может использоваться в качестве списка использованных источников, если не использовать способ на основе концевых сносок.

При использовании способа с концевыми сносками они копируются и вставляются сюда (при этом придется удалить для каждого источника нумерацию в виде «1.» (курсор устанавливаем перед 1, а затем три раза нажимаем клавишу «Delete») и затем пронумеровать список (вкладка «Главная», группа «Абзац», кнопка «Нумерация», выбрать последовательность 1. и т. д.)) и назначить ему стиль «Список использ источн»

1. Спектральный анализ неорганических газов / В. М. Немец, А. А. Петров, А. А. Соловьев. – Л.: Химия, 1998. – 240 с.
2. Надеждинский А. Н. Диодная лазерная спектроскопия // Диодная лазерная спектроскопия – М., 1990. – С. 7-38.
3. Лазерная аналитическая спектроскопия / В. С. Антонов, Г. И. Беков, М. А. Большов и др. М.: Наука. 1986. – 318 с.
4. Берлинер М. А. Измерение влажности. Изд. 2-е., переработанное и дополнен. М.: Энергия, 1973. – 327 с.
5. Надеждинский А. Н. Диодная лазерная спектроскопия // Диодная лазерная спектроскопия – М., 1990. – С. 7-38.
6. Лазерная аналитическая спектроскопия / В. С. Антонов, Г. И. Беков, М. А. Большов и др. М.: Наука. 1986. – 318 С.
7. Рабинович С. Г. Погрешности измерений – Л.: Энергия, 1978. – 255 с.
8. Принципиальная электрическая схема лазерного влагомера

На рис. А.1 приведена принципиальная электрическая схема лазерного влагомера на основе лазерного диода ЛД-28. Далее можно кратко отметить основные особенности схемы.

1. Текст программы для расчета характеристик модифицированного корреляционного метода

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

Внимание! Далее за длинной чертой следуют пронумерованные концевые сноски. Если они используются как список использованных источников, их удалять нельзя. Для распечатки финального варианта работы на принтере рекомендуется сначала преобразовать этот файл в pdf (для этого необходимо выполнить последовательность вкладка «Файл», «Печать», «Принтер», «Microsoft Print to pdf», «Страницы» и в меню «Параметры» указать страницы, которые будут выведены на печать, причем страницы с концевыми сносками не печатать).

Не забывайте, что на основе этих концевых сносок необходимо сделать нумерованный список источников, чтобы они попали в область текста, который будет напечатан на принтере. Для этого его надо скопировать и вставить в «Список использованных источников», который расположен перед Приложениями, а потом удалить перед каждым источником «1.» и оформить его как нумерованный список (вкладка «Главная», группа «Абзац», кнопка «Нумерация»).

Здесь начинается область концевых сносок.

1. . Спектральный анализ неорганических газов / В. М. Немец, А. А. Петров, А. А. Соловьев. – Л.: Химия, 1998. – 240 с. [↑](#endnote-ref-1)
2. . Надеждинский А. Н. Диодная лазерная спектроскопия // Диодная лазерная спектроскопия – М., 1990. – С. 7-38. [↑](#endnote-ref-2)
3. . Лазерная аналитическая спектроскопия / В. С. Антонов, Г. И. Беков, М. А. Большов и др. М.: Наука. 1986. – 318 с. [↑](#endnote-ref-3)
4. . Берлинер М. А. Измерение влажности. Изд. 2-е., переработанное и дополнен. М.: Энергия, 1973. – 327 с. [↑](#endnote-ref-4)
5. . Надеждинский А. Н. Диодная лазерная спектроскопия // Диодная лазерная спектроскопия – М., 1990. – С. 7-38. [↑](#endnote-ref-5)
6. . Лазерная аналитическая спектроскопия / В. С. Антонов, Г. И. Беков, М. А. Большов и др. М.: Наука. 1986. – 318 С. [↑](#endnote-ref-6)
7. . Рабинович С. Г. Погрешности измерений – Л.: Энергия, 1978. – 255 с. [↑](#endnote-ref-7)