

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
«Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники»

Факультет телекоммуникаций

Кафедра защиты информации

**М. Ю. Дерябина**

***ЛАЗЕРНЫЕ И ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ  
ПЕРЕДАЧИ, ЛОКАЦИИ И ИЗМЕРЕНИЯ.  
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ***

*Рекомендовано УМО по образованию в области информатики  
и радиоэлектроники для специальности  
1-45 01 06 «Лазерные информационно-измерительные системы»  
и направления специальности  
1-45 01 01-06 «Инфокоммуникационные технологии (лазерные  
информационно-измерительные системы)» в качестве пособия*

Минск БГУИР 2017

УДК [621.373.8+681.78](076.5)

ББК 32.86-5я73

Д36

Рецензенты:

кафедра лазерной физики и спектроскопии  
Белорусского государственного университета  
(протокол №14 от 04.02.2015);

заведующий кафедрой промышленного дизайна и упаковки  
Белорусского национального технического университета,  
доктор технических наук, профессор В. В. Кузьмич

**Дерябина, М. Ю.**

Д36 Лазерные и оптоэлектронные системы передачи, локации и измерения. Лабораторный практикум : пособие / М. Ю. Дерябина. – Минск : БГУИР, 2017. – 63 с. : ил.

ISBN 978-985-543-282-2.

Пособие включает описание лабораторных работ, предназначенных для изучения методов измерения параметров оптоэлектронных и лазерных систем передачи. Приведены указания по оценке точности полученных результатов измерений.

Может быть использовано при выполнении лабораторных работ студентами других специальностей.

УДК [621.373.8+681.78](076.5)

ББК 32.86-5я73

ISBN 978-985-543-282-2

© Дерябина М. Ю., 2017

© УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», 2017

## СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа ЛИ-1 «Измерение расстояний с использованием лазерного дальномера» .....	4
1.1 Цель работы .....	4
1.2 Краткие теоретические сведения .....	4
1.3 Описание лазерного дальномера TruPulse™ .....	6
1.4 Лабораторное задание .....	15
1.5 Порядок выполнения работы .....	15
1.6 Контрольные вопросы .....	15
Лабораторная работа ЛИ-2 «Исследование основных характеристик оптических модуляторов» .....	16
2.1 Цель работы .....	16
2.2 Краткие теоретические сведения .....	16
2.3 Описание лабораторного макета .....	20
2.4 Лабораторное задание .....	22
2.5 Порядок выполнения работы .....	22
2.6 Контрольные вопросы .....	23
Лабораторная работа ЛИ-3 «Измерение длины волны лазерного излучения» .....	24
3.1 Цель работы .....	24
3.2 Краткие теоретические сведения .....	24
3.3 Описание лабораторной установки .....	28
3.4 Лабораторное задание .....	36
3.5 Порядок выполнения работы .....	36
3.6 Контрольные вопросы .....	39
Лабораторная работа ЛИ-4 «Интерференционные методы измерений» .....	40
4.1 Цель работы .....	40
4.2 Краткие теоретические сведения .....	40
4.3 Устройство и принцип действия интерферометра EDU-ВТ/М .....	44
4.4 Лабораторное задание .....	46
4.5 Порядок выполнения работы .....	46
4.6 Контрольные вопросы .....	46
Лабораторная работа ЛИ-5 «Определение скорости света в диэлектрике» .....	47
5.1 Цель работы .....	47
5.2 Краткие теоретические сведения .....	47
5.3 Описание лабораторного макета .....	52
5.4 Лабораторное задание .....	55
5.5 Порядок выполнения работы .....	56
5.6 Контрольные вопросы .....	60
Содержание отчета .....	61
Литература .....	62

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА ЛИ-1

## ИЗМЕРЕНИЕ РАССТОЯНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛАЗЕРНОГО ДАЛЬНОМЕРА

### 1.1 Цель работы

- 1 Изучение методов измерения расстояний с помощью методов лазерной дальнометрии.
- 2 Измерение расстояний с помощью лазерного дальномера.
- 3 Приобретение практических навыков оценки погрешностей полученных результатов измерений.

### 1.2 Краткие теоретические сведения

Измерение расстояний по времени распространения оптического излучения от точки, в которой расположен источник излучения, до объекта, отражающего или рассеивающего это излучение, называется светодальнометрией.

Измеряемое расстояние при этом определяется из соотношения

$$D = \frac{c}{2} \cdot \tau, \quad (1.1)$$

где  $c$  – скорость распространения света в среде;

$\tau$  – время прохождения светом двойного измеряемого расстояния.

Фактически в данном случае необходимо измерить интервал времени, в течение которого луч пройдет расстояние до цели, отразится от нее и вернется обратно.

Величина  $\tau$  может измеряться импульсным или фазовым методом.

При измерении импульсным методом излучение посылается короткими импульсами; при этом измеряется интервал между фронтами или энергетическими максимумами излученного и отраженного импульсов.

В случае измерения фазовым методом непрерывное излучение модулируется с высокой частотой  $f$ , а значение  $\tau$  определяется по запаздыванию фазы принимаемого отраженного излучения  $\Delta\varphi$  по отношению к фазе испускаемого:

$$\tau = \frac{\Delta\varphi}{2\pi f}. \quad (1.2)$$

При этом однозначный результат получается лишь при измерении расстояний, дающих фазовый сдвиг  $\Delta\varphi \leq 2\pi$ . Для однозначного определения больших расстояний измерения проводятся последовательно на нескольких различных частотах модуляции.

Существенным для светодальнометрии является значение скорости распространения оптического излучения вдоль измеряемого расстояния, определяемой показателем преломления. Он изменяется с температурой (около  $10^{-6}$  на 1 К), давлением и влажностью и зависит от длины волны излучения. Опреде-

лить его среднее значение в момент измерения позволяет последовательное измерение расстояния на нескольких длинах волн излучения (так называемая рефрактометрическая светодальнометрия).

Идея светодальнометрии была высказана А. Майкельсоном, первый светодальномер был реализован А. А. Лебедевым в 1936 году. Большое развитие светодальнометрии получила после разработки лазеров.

Импульсная лазерная светодальнометрия обеспечивает при длительности импульсов излучения 20–100 нс погрешность измерения 5–10 м. Применение систем с накоплением сигнала дает погрешность менее 1 м. При энергии излучения в импульсе около 0,3 Дж достигается дальность действия по протяженным объектам до 20 км.

Лазерная импульсная светодальнометрия применяется для измерения высоты облаков, высоты полета летательных аппаратов при аэрофотосъемке, точного определения орбиты искусственных спутников Земли и т. д.

Фазовая светодальнометрия находит применение в основном в топографо-геодезических работах, инженерных изысканиях, машиностроении, гидротехнике (СВЧ-светодальномеры, позволяющие при частоте модуляции выше  $10^8$  Гц снизить инструментальную погрешность до 0,2–0,5 мм).

Дифференцирование данных о расстоянии до объекта как в фазовой, так и в импульсной светодальнометрии позволяет получить значение радиальной скорости его перемещения (светодальномерные системы стыковки в космосе). Определяя пространственное распределение расстояний до отражающих поверхностей, получают данные о профиле этих поверхностей. Этот метод носит название светодальномерной профилометрии и используется для определения профиля антенн радиотелескопов, корпусов судов, при изучении подвижек льда и т. д. Светодальномерный профилометр можно применять для автономного ориентирования планетоходов.

Светодальномер (дальномер оптический) – прибор для измерения расстояний по времени прохождения оптическим излучением измеряемого расстояния. Светодальномер содержит источник излучения, устройство управления его параметрами, передающую и приемную системы, фотоприемное устройство и устройство измерения временных интервалов.

Оптические дальномеры делятся на импульсные и фазовые в зависимости от методов определения времени прохождения излучением расстояния от объекта и обратно.

В импульсном дальномере источником излучения чаще всего является лазер, излучение которого формируется в виде коротких импульсов. Для измерения медленно меняющихся расстояний используют одиночные импульсы; при быстро меняющихся расстояниях применяется импульсный режим излучения.

Твердотельные лазеры допускают частоту следования импульсов излучения до 50–100 Гц, полупроводниковые – до  $10^4$ – $10^5$  Гц. Формирование коротких импульсов излучения в твердотельных лазерах осуществляется механическими, электрооптическими или акустооптическими затворами или их комбинациями.

Инжекционные лазеры управляются током инъекции.

В фазовых дальномерах в качестве источников света применяются накальные, газосветные лампы, светодиоды и почти все виды лазеров.

Дальномеры со светодиодами обеспечивают дальность действия до 2–5 км, с газовыми лазерами при работе с оптическими отражателями на объекте – до 100 км, а при диффузном отражении от объектов – до 0,8 км. Дальномеры с полупроводниковыми лазерами обеспечивают дальность действия 15 и 0,3 км.

В фазовых дальномерах излучение модулируется интерференционными, акустооптическими и электрооптическими модуляторами. В СВЧ фазовых дальномерах преимущественно применяются электрооптические модуляторы на резонаторных и волноводных СВЧ-структурах.

В импульсных дальномерах обычно в качестве светоприемного устройства применяются фотодиоды, в фазовых дальномерах фотоприем осуществляется на фотоэлектронные умножители. Чувствительность фотоприемного тракта может быть увеличена на несколько порядков применением оптического гетеродинамирования. Дальность действия такого дальномера ограничивается длиной когерентности передающего лазера, при этом возможна регистрация перемещений и колебаний объектов до 0,2 км.

Измерение временных интервалов осуществляется чаще всего счетно-импульсным методом.

### **1.3 Описание лазерного дальномера TruPulse™**

#### **1.3.1 Назначение**

Лазерный дальномер TruPulse предназначен для измерения расстояния до объекта, высоты объектов, а также углов.

#### **1.3.2 Технические характеристики**

1.3.2.1 Предел измеряемых расстояний (дальность) зависит от отражательной способности объекта (цели) и условий окружающей среды.

При пасмурной погоде максимальная дальность увеличивается, а при ясной погоде – уменьшается.

Дальность при определении расстояния до объекта с матовой поверхностью уменьшается.

Направление перпендикулярно поверхности объекта измерения обеспечивает лучшую дальность, чем при направлении к цели под острым углом.

Чем ярче цвет объекта, тем больше дальность.

При наведении на неотражающую цель предельное измеряемое расстояние составляет 1000 м.

При наведении на отражающую цель предельное измеряемое расстояние составляет 2000 м.

1.3.2.2 Точность измерения расстояния зависит от отражающей способности цели.

При измерении расстояния до объекта с высокой отражающей способностью погрешность измерения расстояния составляет  $\pm 0,3$  м.

При измерении расстояния до объекта с низкой отражающей способностью погрешность измерения расстояния составляет  $\pm 1$  м.

1.3.2.3 Имеющийся в приборе датчик угла наклона позволяет измерять вертикальные углы в пределах от плюс 90 до минус 90° (горизонтальное положение прибора соответствует 0°).

1.3.2.4 Компоненты TruPulse™ предназначены для работы при температуре от минус 20 до плюс 60 °С.

### 1.3.3 Указания по технике безопасности

1.3.3.1 Лазерный дальномер TruPulse™ излучает видимые инфракрасные импульсы, безопасные для глаз, соответствует требованиям безопасности FDA и относится к Классу 1.

Лазерное излучение может быть активно в течение максимум 10 с. При передаче лазерного излучения в окуляре индицируется надпись LASER.

Не рекомендуется смотреть в излучающую апертуру при работе лазера.

1.3.3.2 Не рекомендуется смотреть на солнце через оптическую трубу: это может повредить глаза.

1.3.3.3 Не направляйте прибор прямо на солнце. Прямое воздействие солнца на оптическую систему может привести к повреждению внутренних деталей.

1.3.3.4 Избегайте прямого воздействия солнечных лучей на окуляр: можно повредить внутренний дисплей.

### 1.3.4 Конструкция дальномера TruPulse™

Прибор состоит из лазерного дальномера, встроенного датчика наклона и микропроцессора. Прибор оснащен встроенным программным обеспечением, позволяющим автоматизировать процесс измерения.

Дальномер TruPulse™ определяет расстояние путем измерения времени, которое требуется каждому импульсу для прохождения расстояния от дальномера до цели и обратно.

При передаче лазерного излучения в окуляре индицируется надпись LASER. Лазерное излучение может быть активно максимум 10 с. В режиме измерения угла наклона (INC) лазерное излучение неактивно.

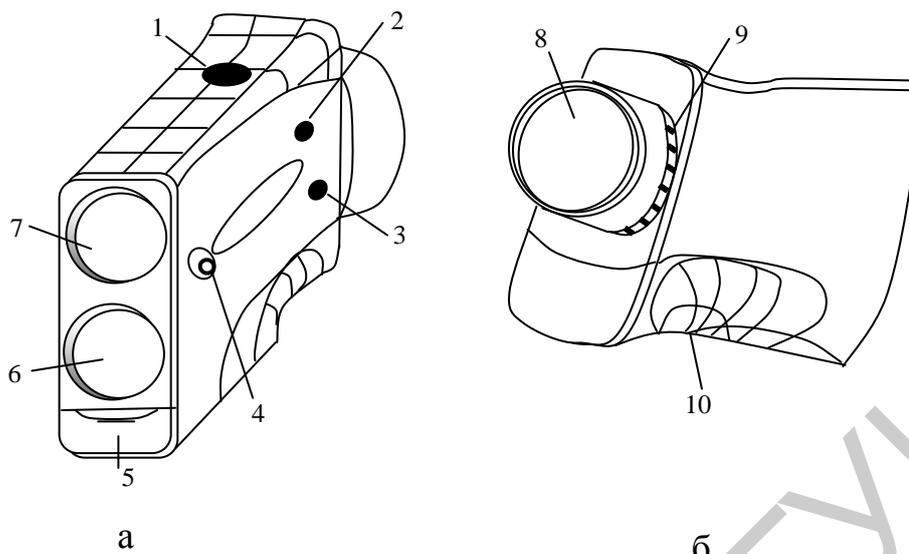
Лазерный датчик и встроенный датчик угла наклона предназначены для измерения горизонтального, вертикального и наклонного расстояний, угла наклона и быстрого вычисления высоты объекта.

Перестраиваемый окуляр позволяет проводить измерения с учетом индивидуальных особенностей зрения.

В приборе предусмотрена передача данных на ПК с помощью кабеля через порт передачи данных RS232 или по каналу Bluetooth.

Каждая опция программного обеспечения прибора относится к определенному типу измерения или функции установки и имеет соответствующий индикатор на дисплее.

Внешний вид прибора представлен на рисунке 1.1. Назначение кнопок указано в таблице 1.1.

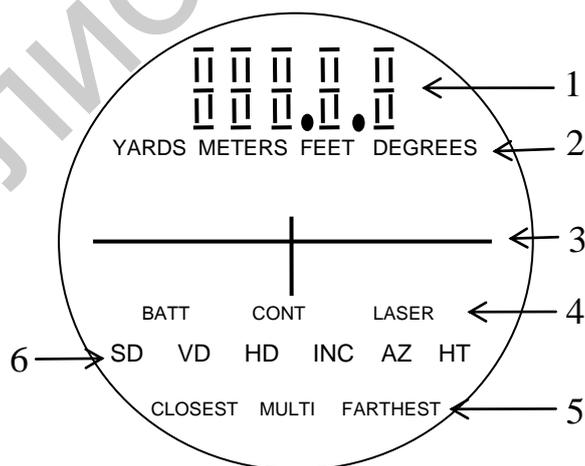


а – вид спереди; б – вид сзади:

- 1 – кнопка FIRE – ВКЛЮЧЕНИЕ; 2 – кнопка ▲ (UP) – ВВЕРХ; 3 – кнопка ▼ (DOWN) – ВНИЗ; 4 – порт передачи данных RS232; 5 – крышка отсека батарей;  
 6 – принимающие линзы; 7 – передающие линзы (просмотр цели);  
 8 – перестраиваемый окуляр; 9 – кольцо для настройки окуляра;  
 10 – крепление штатива

Рисунок 1.1 – Внешний вид TruPulse™

На рисунке 1.2 показан экран ЖК-дисплея в поле зрения прибора.



- 1 – главный дисплей; 2 – единицы измерения; 3 – визирная метка; 4 – индикаторы состояния; 5 – режимы наведения на цель; 6 – режимы измерения

Рисунок 1.2 – Экран ЖК-дисплея в поле зрения прибора

Таблица 1.1

Кнопка	Назначение	Действия оператора и результат
FIRE ВКЛЮЧЕНИЕ	Режимы измерения	Включить прибор. Измерить расстояние: включить лазерное излучение. Измерить угол наклона: отпустить блокировку датчика наклона в режиме измерения высоты и в режиме непрерывного наведения на цель
	Измерение высоты	HD – лазерное излучение. INC – снятие блокировки датчика наклона
	Режим наведения на цель. Режим установки системы	Выбрать опцию и вернуться в режим измерения
	Выравнивание датчика наклона	При появлении индикации «DonE» выйти из режима измерения высоты и вернуться в режим измерения
▲ UP ВВЕРХ	Режимы измерения	Нажать для прокрутки меню до предыдущего режима измерения Нажать и удерживать в течение 4 с, чтобы перейти в режим наведения на цель
	Измерение высоты	Сбросить последний результат измерения. На индикаторе отобразится предыдущий запрос
	Режим наведения на цель. Режим установки системы	Нажать для прокрутки до предыдущей опции
▼ DOWN ВНИЗ	Режимы измерения	Нажать для прокрутки меню до следующего режима измерения Нажать и удерживать в течение 4 с, чтобы перейти в режим установки системы
	Измерение высоты	Выйти из режима измерения высоты
	Режим наведения на цель. Режим установки системы	Нажать для прокрутки до следующей опции
	Режимы измерения	

На главном дисплее 1 отображаются сообщения и численные значения результата измерения.

Прибор позволяет измерять расстояние в ярдах, метрах, футах. Единицы измерения 2 выбираются в режимах установки системы (2 – YARDS, METERS, FEET). Единицы измерения угла наклона – градусы (2 – DEGREES).

Визирная метка 3 служит опорной точкой наведения при измерении горизонтального и вертикального расстояния.

Индикатор состояния BATT при необходимом уровне заряда батареи не отображается, мигает при низком заряде батареи и горит при недостаточном для работы системы уровне заряда батареи.

Индикатор состояния LASER отображается в режиме активации лазерного излучения.

Индикатор состояния MULTI отображается при задании нескольких целей в режиме определения самой ближней из них и самой дальней.

В режиме наведения на цель CONT (Непрерывный) при нажатой кнопке FIRE прибор непрерывно захватывает цели и отображает расстояние до последней захваченной цели.

В режиме CLOSEST (Самая ближняя цель) при нажатой кнопке FIRE прибор захватывает несколько целей и индицирует расстояние до самой ближней цели.

В режиме FARTHEST (Самая дальняя цель) при нажатой кнопке FIRE прибор захватывает несколько целей и индицирует расстояние до самой дальней цели.

При не отображенных на дисплее индикаторах прибор находится в стандартном режиме наведения на цель с использованием одной точки.

Появление на главном дисплее символа «F» (активирован режим ФИЛЬТР) означает работу прибора в режиме наведения на цель по одной точке. При этом чувствительность лазера снижена, а прибор может фиксировать только импульсы, вернувшиеся с отражателя. В целом режим аналогичен стандартному режиму, однако рекомендуется использовать дополнительный фильтр листы.

Прибор может работать в следующих режимах:

1) SD (наклонное проложение) – измеряется расстояние до цели по прямой линии;

2) VD (вертикальное расстояние) – расстояние до цели перпендикулярно горизонтальной поверхности, на которой измеряется расстояние;

3) HD (горизонтальное проложение) – измеряется расстояние на горизонтальной плоскости между TruPulse™ и целью;

4) INC (угол наклона) – измеряется угол наклона между уровнем, на котором находится TruPulse™, и целью;

5) HT (высота) – режим измерения высоты в три этапа. Полученное значение – это вертикальное расстояние между точками на цели, обозначенными как ANG1 и ANG2;

6) режим AZ не активирован.

Дальномер TruPulse™ имеет настраиваемый окуляр, который обеспечивает комфорт в работе и блокирует попадание внешнего света.

Чтобы выдвинуть окуляр, поднимите и одновременно поверните его против часовой стрелки.

С помощью кольца фокусировки окуляра можно настроить четкое изображение ЖК-дисплея и цели. Чтобы настроить фокус ЖК-дисплея, поверните кольцо фокусировки как вам удобно.

### 1.3.5 Порядок работы с прибором

#### 1.3.5.1 Проверка индикатора.

Нажмите и удерживайте FIRE. При этом на дисплее появится изображение, показанное на рисунке 1.2.

Если прибор выявил условие, при котором может возникнуть ошибка, на дисплее отобразится данное условие и код ошибки вместо результата измерения. Коды ошибки появляются на дисплее в виде «Ехх», где «хх» – номер кода ошибки (рисунок 1.3).

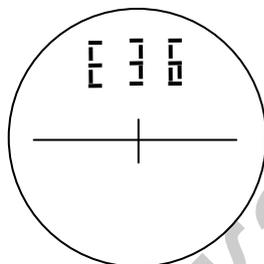


Рисунок 1.3 – Изображение на дисплее в режиме проверки индикаторов (пример кода ошибки E36)

Отпустите кнопку FIRE для запуска системы.

Если код ошибки не исчезает, попробуйте произвести следующие действия:

а) отпустите и снова нажмите кнопку FIRE, чтобы повторно выполнить измерение;

б) выньте и переустановите батареи, после чего попытайтесь повторно выполнить измерение.

#### 1.3.5.2 Выбор единиц измерения.

В режиме измерения нажимайте кнопку ▼ в течение 4 с, чтобы перейти в режим установки системы. На главном дисплее появится надпись UNITS.

Нажмите FIRE, чтобы выбрать опцию UNITS.

Нажимая кнопку ▼ или ▲, выберите нужные единицы измерения расстояния.

Нажмите FIRE, чтобы выбрать отображенную единицу измерения расстояния и вернуться в режим измерения.

#### 1.3.5.3 Режимы измерения.

При включении TruPulse™ начинает работу в последнем установленном режиме измерения. Нажимая кнопку ▼ или ▲, выберите тип измерения: SD, INC, HD, VD, NT.

### Режим «Быстрый старт»

Включите TruPulse™, нажав кнопку FIRE.

Выберите цель, которая должна находиться от вас на расстоянии около 75 м.

Посмотрите в окуляр и наведите визирную метку на цель. Поле зрения дисплея изображено на рисунке 1.4, а. Если индикатор HD (горизонтальное проложение) не отображается, нажимайте кнопку ▼ или ▲ до тех пор, пока он не появится.

Нажмите и удерживайте кнопку FIRE. Если лазерное излучение активно, на дисплее отобразится индикатор состояния LASER (лазерное излучение) (рисунок 1.4, б). Лазер будет активен в течение максимум 10 с.

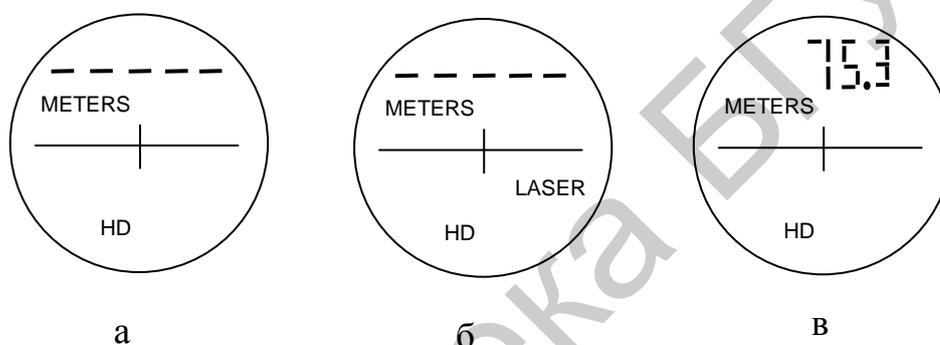


Рисунок 1.4 – Изображение дисплея дальномера в режиме «Быстрый старт»

Если цель не захвачена, отпустите кнопку FIRE и повторите действия, описанные в данном пункте.

Отпустите кнопку FIRE, как только на дисплее индицируется измеряемое расстояние (рисунок 1.4, в). Значение измеренного расстояния мигает один раз, затем горит постоянно, пока будет нажата кнопка FIRE или прибор не будет выключен.

С помощью кнопки ▲ или ▼ можно выбирать режимы измерения и просматривать полученные результаты для каждой функции.

Чтобы выполнить следующее измерение, повторите действия, описанные в данном пункте.

Чтобы выключить TruPulse™, нажмите одновременно кнопки ▲ и ▼ и удерживайте в течение 4 с.

### Измерение расстояния

Посмотрите через окуляр и наведите прибор на цель, используя визирную марку.

Нажмите и удерживайте кнопку FIRE. Если лазерное излучение активно, появится индикатор состояния LASER. Как только будет отображен результат измерения, отпустите кнопку FIRE. Зафиксируйте результат измерения.

Если цель не захвачена в течение 10 с, отпустите кнопку FIRE и повторите данный пункт.

### Измерение угла наклона

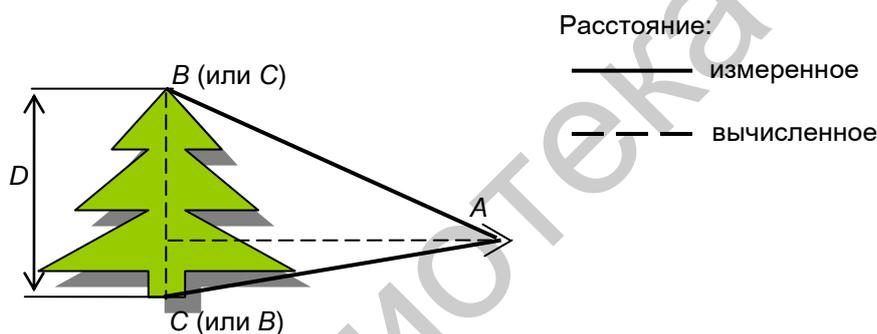
Угол наклона измеряется в режиме INC. При этом лазерное излучение будет выключено.

Нажмите кнопку FIRE.

При работе в режиме непрерывного наведения на цель и в режиме измерения высоты результаты измерения угла наклона появляются на главном дисплее и обновляются по мере изменения точки наведения при нажатии кнопки FIRE.

### Измерение высоты

При измерении высоты необходимо выполнить три измерения до цели: HD – горизонтальное проложение; INC – угол наклона при основании (или верхний), INC – верхний угол наклона (или при основании). Дальномер TruPulse использует эти результаты для вычисления высоты цели. На рисунке 1.5 показаны три точки, необходимые для вычисления высоты.



A – горизонтальное проложение; B – верхний угол;

C – угол при основании; D – высота

Рисунок 1.5 – Измерение высоты

Выберите цель и посмотрите через окуляр, используя визирную марку для наведения на цель. При этом индикатор HT горит, индикатор HD мигает, что означает необходимость измерить горизонтальное расстояние до передней поверхности цели.

Нажмите и удерживайте кнопку FIRE. Если лазерное излучение активно, отобразится индикатор состояния LASER. Результат измерения горизонтального расстояния появится на главном дисплее. При этом индикаторы ANG и INC мигают, что сигнализирует о необходимости измерения угла наклона при основании цели (или верхнего угла).

Нажмите и удерживайте кнопку FIRE. Направьте прибор на основание (или верхнюю точку) цели. Результат измерения угла наклона появится на главном дисплее и будет обновляться, пока вы удерживаете кнопку FIRE. При отпускании кнопки FIRE значение измеренного угла наклона будет индицироваться на главном дисплее; при этом появится надпись ANG2, индикатор INC будет мигать, сигнализируя о необходимости измерить угол наклона до верхней точки (или основания) цели.

Нажмите и удерживайте кнопку FIRE. Направьте прибор на верхнюю точку (или основание) цели. Результат измерения угла наклона появится на главном дисплее и будет обновляться, пока вы удерживаете кнопку FIRE. При отпускании кнопки FIRE значение измеренного угла наклона будет индицироваться на главном дисплее; затем отобразится рассчитанное значение высоты. Результаты будут индицироваться до тех пор, пока вы не нажмете любую кнопку или не выключите прибор.

Для повторного наведения на предыдущую точку нажмите кнопку ▲.

Для выхода из режима измерения высоты нажмите кнопку ▼.

### **Режимы наведения на цель**

Дальномер TruPulse™ имеет пять режимов наведения на цель, которые позволяют выбрать или удалить цель и произвести наиболее точные измерения.

**ВНИМАНИЕ.** Выбранный режим наведения на цель всегда активен до тех пор, пока вы не повторите вышеописанные действия и не выберете другой режим наведения на цель. При каждом последующем включении TruPulse™ работает в ранее использованном режиме наведения на цель. В режимах «самая ближняя цель» и «самая дальняя цель» минимальное расстояние между целями составляет около 20 м.

В режиме измерения нажимайте кнопку ▲ в течение 4 с. На главном дисплее индицируется активный режим наведения на цель.

При нажатии кнопки ▲ или ▼ на дисплее отобразится предыдущий или следующий режим наведения на цель.

Нажмите кнопку FIRE, чтобы выбрать режим наведения на цель и вернуться в режим измерения.

В приборе предусмотрены следующие режимы:

- стандартный (Std) – режим измерения по одной точке;
- непрерывный режим (Con). Для измерения в этом режиме нажмите и удерживайте FIRE. Как только цель будет захвачена, дальномер может захватить дополнительные цели в течение максимум 10 с. Самая последняя захваченная цель появится на главном дисплее. При этом индикатор MULTI не отображается;

- самая ближняя цель (CLO). Для измерения нажмите и удерживайте FIRE. Как только начальная цель будет захвачена, дальномер может захватить дополнительные цели. Индикатор MULTI обозначает захват дополнительных целей. На главном дисплее всегда появляется самая ближняя захваченная цель;

- самая дальняя цель (Far). Для измерения нажмите и удерживайте FIRE. Как только начальная цель будет захвачена, дальномер может захватить допол-

нительные цели. Индикатор MULTI обозначает захват дополнительных целей. На главном дисплее всегда появляется самая дальняя захваченная цель;

- фильтр (Fit). В этом режиме чувствительность луча снижена, прибор может выявлять только импульсы, поступающие с отражателя. Рекомендуется использовать дополнительный фильтр листвы. На главном дисплее отображается результат измерения, который всегда включает символ 'F' (слева). Максимальное расстояние – 100 м (350 футов) до 3-дюймового отражателя.

#### **1.4 Лабораторное задание**

1.4.1 Изучить принципы светодальнометрии.

1.4.2 Изучить устройство и принцип действия дальномера TruPulse™.

1.4.3 Выбрать три объекта измерения и измерить расстояние до них, высоту и угол наклона.

1.4.4 Оценить погрешность измерения.

#### **1.5 Порядок выполнения работы**

1.5.1 Ознакомьтесь с принципом действия дальномера TruPulse™.

1.5.2 Подготовьте к работе дальномер согласно руководству по эксплуатации.

1.5.3 Измерьте расстояние до объекта, высоту и угловой параметр объекта. Объект измерения выберите произвольно. Количество измерений каждого параметра равно 5.

1.5.4 Оцените погрешность измерения заданных параметров.

1.5.5 Результаты измерений занесите в таблицу. Форму таблицы составьте самостоятельно.

#### **1.6 Контрольные вопросы**

1 Что такое оптическая дальнометрия?

2 Поясните физические принципы лазерной дальнометрии.

3 В чем сущность импульсного метода измерения расстояний?

4 В чем заключается фазовый метод измерения расстояний?

5 Какой метод положен в основу работы лазерного дальномера TruPulse™?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА ЛИ-2 ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТИЧЕСКИХ МОДУЛЯТОРОВ

### 2.1 Цель работы

- 1 Изучение назначения и принципа действия оптических модуляторов.
- 2 Исследование статических и динамических характеристик оптического модулятора МЛ-4.
- 3 Приобретение практических навыков оценки погрешностей полученных результатов измерений.

### 2.2 Краткие теоретические сведения

Модуляция – это изменение какого-либо параметра сигнала (амплитуды, интенсивности, частоты, фазы или поляризации) в соответствии с определенным законом (чаще всего по закону информационного сигнала).

Уравнение распространения плоской монохроматической волны в изотропной среде имеет вид

$$U = U_m \cdot e^{-\chi l} \cdot \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} nl\right), \quad (2.1)$$

где  $U_m$  – амплитуда электрического вектора до вхождения волны в среду;

$l$  – длины пути волны в среде;

$\lambda$  – длина волны излучения;

$\omega$  – круговая частота излучения;

$\chi$  – коэффициент поглощения среды;

$n$  – коэффициент преломления среды.

Методы модуляции оптических колебаний отличаются от соответствующих методов колебаний частот радиодиапазона из-за характеристик и ограничений устройств, используемых для осуществления процесса модуляции.

Поскольку оптические детекторы реагируют на интенсивность оптического колебания, аналоговая амплитудная модуляция находит ограниченное применение вследствие существенной нелинейной зависимости между модулирующим сигналом и сигналом на выходе детектора.

Устройство, модулирующее оптическую волну, несущую информацию по закону электрического сигнала, называется модулятором.

В большинстве систем эту функцию выполняет лазер, однако в системах с непрямой модуляцией для этого используются отдельные устройства.

В основу работы оптических модуляторов могут быть положены различные эффекты; в зависимости от этого различают несколько видов модуляции: электрооптическая, электроабсорбционная, акустооптическая.

**Электрооптическая модуляция** может происходить вследствие линейного и нелинейного изменения коэффициента преломления физической среды под действием электрического поля.

В некоторых веществах величина коэффициента преломления  $n$  различна для разных направлений (явление анизотропии), что определяется зависимостью фазовой скорости распространения волны в среде.

В случае линейного изменения коэффициента преломления используется эффект Поккельса, заключающийся в изменении показателя преломления света в кристаллах, помещенных в электрическое поле, пропорционально напряженности приложенного поля.

Возникновение двойного лучепреломления в оптически изотропных веществах под воздействием однородного электрического поля (эффект Керра) вызывает нелинейное изменение показателя преломления среды и может происходить в глицерине, сероуглероде. Это связано с тем, что в одном из направлений распространения света в веществе плоскополяризованный луч света расщепляется на два плоскополяризованных луча, распространяющихся в том же направлении, плоскости поляризации которых взаимно перпендикулярны и в общем случае не совпадают с плоскостью поляризации вышедшего луча.

При этом скорости распространения этих лучей в среде неодинаковы. Постоянная скорость одного из них не зависит от внешнего воздействия на вещество (это так называемый обыкновенный луч), а скорость другого луча изменяется в зависимости от степени воздействия (так называемый необыкновенный луч). Если на вещество воздействовать модулирующим сигналом, то скорость необыкновенного луча  $v_l$  будет зависеть от показателя преломления этого луча в среде  $n_l$  и от скорости распространения света в среде при отсутствии внешнего воздействия  $v$ :

$$v_l = \frac{v}{n_l}. \quad (2.2)$$

При сложении этих двух колебаний за пределами среды оптического модулятора образуется луч света, характер поляризации которого зависит от сдвига фаз между обыкновенным и необыкновенным лучами. Следовательно, если воздействовать модулирующим сигналом на активное вещество и тем самым изменять скорость распространения необыкновенного луча, на выходе будет соответственно изменяться характер поляризации света.

В зависимости от способа преобразования луча света в оптически активном веществе можно получить амплитудную либо поляризованную модуляцию.

Описанный эффект наблюдается, например, в кристаллах  $\text{LiNbO}_3$ .

**Электроабсорбционная модуляция** основана на **эффекте Франца – Келдыша**. Он проявляется в сдвиге границы собственного поглощения света в полупроводнике в сторону меньших частот в присутствии внешнего электрического поля. При этом одновременно с коэффициентом поглощения меняется и показатель преломления.

В основе **акустооптической модуляции** лежит акустооптический эффект – возникновение постоянного тока или ЭДС в проводящей среде (металл, полупроводник) под действием бегущей ультразвуковой волны. Вследствие этого происходит дифракция, преломление, отражение и рассеяние света на периодических неоднородностях среды, вызванных упругими деформациями при прохождении ультразвука. Для изготовления акустооптических модуляторов используют кристаллы  $\text{TeO}_2$ .

В светодиодах и инжекционных лазерах, как правило, осуществляется внутренняя модуляция путем изменения питающего тока.

Для внешней модуляции используется в основном эффект Поккельса в  $\text{LiNbO}_3$ .

В оптических модуляторах используются различные способы модуляции лазерного излучения: аналоговый, импульсный и цифровой. На рисунке 2.1 представлены примеры методов модуляции оптического излучения по интенсивности.

При аналоговой модуляции непрерывного во времени информационного сигнала параметр колебания несущей частоты (амплитуда, интенсивность, частота, фаза или поляризация) непрерывно изменяется во времени (рисунок 2.1, а). Импульсная модуляция непрерывного или дискретного во времени сигнала позволяет изменять параметр колебания непрерывно или квантованно (рисунок 2.1, б). При цифровой модуляции дискретный во времени информационный сигнал и его квантованный (кодированный) параметр изменяются дискретно (рисунок 2.1, в).

В большинстве импульсных модуляционных систем информационный сигнал может быть восстановлен по значениям отсчетов  $M(t)$ , отстоящих во времени на интервал  $1/2$  с. На практике многие источники сигналов не имеют четкого ограничения по полосе, поэтому квантование по времени должно осуществляться по возможности на наивысшей частоте в целях уменьшения ошибок при восстановлении информационного сигнала.

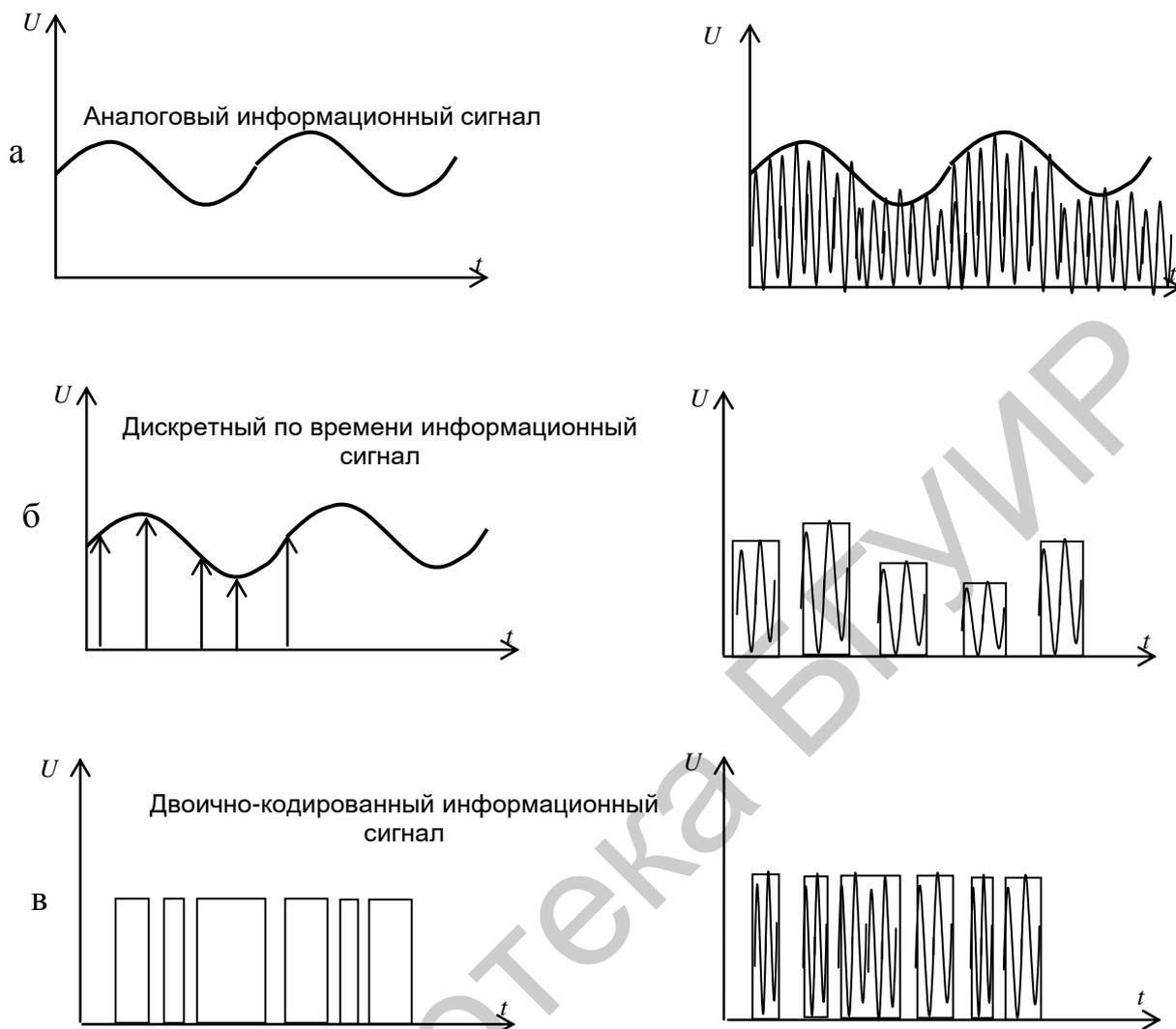
Квантование по амплитуде требуется для всех цифровых видов модуляции.

В цифровых модуляционных системах каждый квантованный отсчет сопоставляется с дискретной группой символов, или кодом.

Обычно кодовый набор состоит из последовательности «единиц» и «нулей»; такое кодирование информации называется кодово-импульсной модуляцией (КИМ).

**Пространственно-временные модуляторы света (ПВМС)** представляют собой матрицы светоклапанных устройств, с помощью которых можно создавать и обрабатывать двухмерные изображения.

Управление пропусканием ПВМС может осуществляться электрически или магнитными полями (электрооптически или магнитооптически управляемые ПВМС) или слабыми световыми сигналами (оптически управляемые ПВМС).



а – аналоговая модуляция по интенсивности (МИ); б – импульсная модуляция по интенсивности (ИМИ); в – цифровая модуляция по интенсивности, или кодово-импульсная (КИМ)

Рисунок 2.1 – Методы модуляции оптического излучения по интенсивности

Наибольшее распространение получили ПВМС на жидких кристаллах. Они обладают наименьшим полувольтным напряжением ( $\sim 1$  В), но их быстродействие не превышает десятков микросекунд. Применение специальных керамик для ПВМС обеспечивает быстродействие до  $10^{-7}$  с, но полувольтное напряжение значительно выше ( $\sim 100$  В).

Наиболее распространенными являются системы с прямой модуляцией, в которых лазер одновременно является и источником сигнала, и модулятором, непосредственно преобразующим электрический сигнал в оптический.

Применение фазовых модуляторов в оптическом диапазоне ограничивается возможностями демодуляции из-за нестабильности частот передающего устройства и местного гетеродина приемника.

В оптическом диапазоне легко осуществим способ поляризационной модуляции, а в радиодиапазоне применение этого способа ограничено.

При аналоговой модуляции интенсивности (МИ) интенсивность лазерного луча изменяется в соответствии с информационным сигналом.

При квантованной импульсной модуляции по интенсивности (ИМИ) интенсивность несущей пропорциональна квантованному значению амплитуды информационного сигнала в течение фиксированного интервала времени.

Для модуляции оптической несущей информационным сигналом используют следующие виды модуляции:

- по интенсивности (МИ);
- частотную (ЧМ);
- фазовую (ФМ);
- поляризационную (ПМ).

## 2.3 Описание лабораторного макета

### 2.3.1 Принцип действия прибора

Структурная схема лабораторного макета представлена на рисунке 2.2.

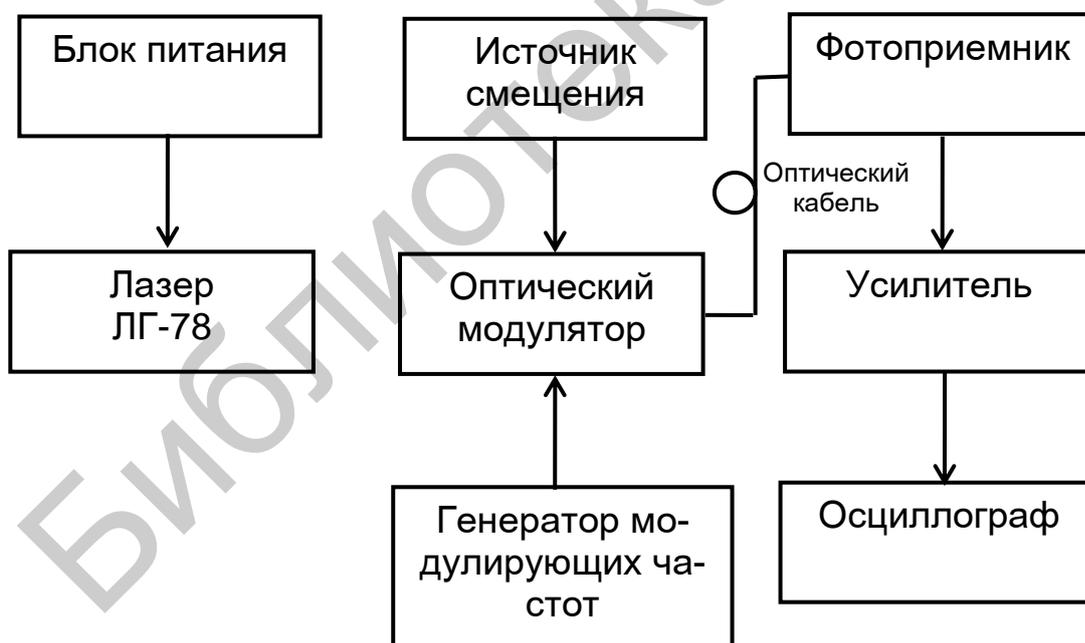


Рисунок 2.2 – Структурная схема лабораторного макета

В качестве источника сигнала используется лазер ЛГ-78, излучение которого поступает на вход оптического модулятора МЛ-4 или МЛ-5.

В оптическом модуляторе МЛ-4 в качестве активного вещества используется кристалл ниобата лития  $\text{LiNbO}_3$ , в модуляторе МЛ-5 – кристалл тантала-та лития  $\text{LiTaO}_3$ . Эти кристаллы обладают высокой прозрачностью. Кроме того, для их работы требуются невысокие модулирующие напряжения.

Сдвиг фаз между обыкновенным и необыкновенным лучами зависит от размеров кристалла (длины пути, проходимого в них световой волной). Максимальная длина кристалла ограничивается расстоянием, которое проходит излучение за половину периода модулирующего напряжения, чем и ограничивается глубина модуляции в модуляторах данного типа. При длинах, больших этого расстояния, фазовый набег уже не меняется.

Источник смещения подает напряжение смещения на модулятор, а генератор модулирующих частот служит источником модулирующего напряжения.

Модулированный световой поток регистрируется фотодетектором, усиливается и индицируется на экране осциллографа в виде электрического сигнала.

Модулятор света МЛ-4 предназначен для модуляции излучения лазера в диапазоне длин волн 0,45–2 мкм в условиях воздействия механических и климатических факторов.

Технические данные модулятора приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1

Наименование параметра	Числовое значение	Единица измерения
Напряжение полного просветления на длинах волн: не более 0,51 мкм не более 0,63 мкм	130	В
	190	В
Остаточный световой поток, не более	5	%
Потери света в режиме полного просветления на длинах волн 0,51 и 0,63 мкм	40	%
Электрическая прочность, не менее	600	В
Входная емкость, не более	25	пФ
Тангенс угла диэлектрических потерь, не более	0,02	–
Полоса модулирующих частот	10	МГц
Сопротивление изоляции, не менее	$10^{10}$	Ом
Диапазон рабочих температур	от –60 до +65	°С

Модулятор выполнен в виде цилиндрической конструкции, укрепленной на установочной плите. Электрооптический элемент состоит из кристалла ниобата лития и поляризаторов. С помощью колец, расположенных на выходном конце оптического элемента, осуществляется юстировка.

Действие прибора основано на линейном электрооптическом эффекте.

Разность фаз между колебаниями в обыкновенном и необыкновенном лучах связана с параметрами приложенного электрического поля следующим соотношением:

$$\varphi = \frac{2\pi \cdot n_0^3 \cdot r_{22} \cdot U}{\lambda} \cdot \frac{l}{d}, \quad (2.3)$$

где  $n_0$  – показатель преломления обыкновенного луча;

$r_{22}$  – электрооптический коэффициент, см/В;

$U$  – приложенное электрическое напряжение, В;

$l$  – длина кристалла, см;

$d$  – расстояние между электродами, см;

$\lambda$  – длина волны излучения, см.

Кристалл расположен между двумя скрещенными поляризаторами, выполненными в виде призм из кальцита. Мощность светового излучения на выходе модулятора изменяется по закону

$$J = J_0 \cdot \sin^2 \frac{\varphi}{2}, \quad (2.4)$$

где  $J_0$  – максимальная мощность светового потока, прошедшего через модулятор, Вт.

### 2.3.2 Меры безопасности при работе с прибором

2.3.2.1 Прежде чем приступить к работе с прибором, необходимо ознакомиться с Руководством по эксплуатации прибора.

2.3.2.2 При работе с прибором категорически ЗАПРЕЩАЕТСЯ:

- открывать крышку;
- вращать диафрагмы;
- производить изменения в электрической схеме.

2.3.2.3 Подсоединение к прибору должно осуществляться с помощью специальных разъемов, входящих в состав прибора.

### 2.3.3 Параметры светового луча

Для работы с прибором необходимо обеспечить следующие параметры светового луча:

- диаметр луча не более 1 мм;
- расходимость луча не более 15 угл. мин;
- направление поляризации света – вертикальное;
- максимальная световая мощность на входе не более 10 мВт.

## 2.4 Лабораторное задание

2.4.1 Изучить принцип получения модуляционной характеристики.

2.4.2 Получить статическую модуляционную характеристику оптического модулятора.

2.4.3 Получить динамическую модуляционную характеристику оптического модулятора.

## 2.5 Порядок выполнения работы

2.5.1 Соберите лабораторную установку согласно схеме (см. рисунок 2.2).

2.5.2 Включите лазер ЛГ-78.

**ВНИМАНИЕ!** Ток нагрузки не должен превышать 20 мА.

2.5.3 Включите осциллограф и выберите необходимый режим работы.

2.5.4 Подготовьте к работе модулятор МЛ-4.

2.5.4.1 Юстировка модулятора:

- установите модулятор на горизонтальную платформу и закрепите его;
- снимите защитные крышки;
- выставьте входную диафрагму на луч лазера ЛГ-78;
- закоротите один из разъемов вставкой, входящей в состав прибора;
- подсоедините ко второму разьему питающий кабель для подачи на прибор постоянного напряжения;
- подайте на прибор постоянное напряжение, равное напряжению полного просветления;
- отстопорите винты, закрепляющие оправы;
- вращая оправы, добейтесь максимальной интенсивности светового луча на выходе модулятора;
- снизьте напряжение на приборе до нуля, убедитесь в хорошем затемнении луча. Если величина остаточного светового потока превышает значение, указанное в таблице 2.1, произведите переюстировку прибора;
- зафиксируйте установленное положение, затянув стопорящие винты;
- снизьте постоянное напряжение до нуля.

2.5.4.2 Получение модуляционной характеристики:

- при работе на симметричный вход подайте на оба разъема модулятора высококачественные сигналы от источника смещения и генератора модулирующих частот;
- при работе на симметричный выход закоротите один из разъемов вставкой, входящей в комплект прибора, а на второй подайте высококачественный сигнал;
- зарисуйте полученные осциллограммы;
- измерьте глубину модуляции;
- оцените погрешность измерения глубины модуляции.

2.5.5 Подготовьте к работе модулятор МЛ-5.

Повторите действия, описанные в подпунктах 2.5.4.1 и 2.5.4.2.

## **2.6 Контрольные вопросы**

- 1 Что такое модуляция сигнала?
- 2 В чем особенности модуляции оптического сигнала?
- 3 Что собой представляет электрооптическая модуляция?
- 4 В чем суть электроабсорбционной модуляции?
- 5 Как осуществляется акустооптическая модуляция?
- 6 Перечислите методы модуляции оптического излучения по интенсивности. В чем их различие?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА ЛИ-3 ИЗМЕРЕНИЕ ДЛИНЫ ВОЛНЫ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

### 3.1 Цель работы

- 1 Изучение свойств лазерного излучения.
- 2 Изучение спектроскопических методов измерения параметров лазерного излучения.
- 3 Измерение длины волны лазерного излучения с помощью спектрометра SHR.

### 3.2 Краткие теоретические сведения

Лазер (оптический квантовый генератор) – устройство, генерирующее когерентные электромагнитные волны за счет вынужденного испускания или вынужденного рассеяния света активной средой, находящейся в оптическом резонаторе.

Основными характеристиками лазеров являются когерентность и направленность, а главными процессами, приводящими к генерации, – вынужденное излучение и обратная связь. До создания лазеров в оптическом диапазоне имелись лишь некогерентные источники, излучение которых представляло собой суперпозицию волн, испускаемых множеством независимых микроскопических излучателей. В этом случае фаза результирующего колебания изменяется хаотически, излучение занимает значительный диапазон длин волн и обычно не имеет определенного направления в пространстве.

Действие лазеров основано на вынужденном испускании фотонов под действием внешнего электромагнитного поля.

Электромагнитные волны могут испускаться атомами, молекулами и другими квантовыми системами, обладающими некоторой избыточной внутренней энергией (возбужденными). Переход атома с более высокого уровня энергии  $E_2$  на более низкий  $E_1$  может сопровождаться испусканием кванта излучения с частотой  $\omega$ , определяемой соотношением

$$\omega = (E_2 - E_1) / \hbar, \quad (3.1)$$

где  $\hbar$  – постоянная Планка.

Переход с нижнего уровня на верхний может происходить при поглощении кванта этой частоты.

Вероятность вынужденного испускания для системы, находящейся в возбужденном состоянии  $E_2$ , пропорциональна спектральной плотности излучения  $\rho(\omega)$  действующей волны и равна вероятности поглощения для системы, находящейся в нижнем состоянии  $E_1$ .

Возбужденные частицы могут отдавать свою энергию в виде электромагнитных квантов двумя способами: самопроизвольно (спонтанное излучение)

и под воздействием внешнего излучения, если его частота удовлетворяет условию (3.1).

Кванты вынужденного излучения неотличимы от первичных. Они обладают такой же частотой, фазой, поляризацией и направлением распространения. Следовательно, формируется электромагнитная волна, являющаяся точной копией исходной волны, только усиленной. С ростом числа актов вынужденного испускания интенсивность волны возрастает, а ее частота, фаза, поляризация и направление распространения остаются неизменными. Происходит когерентное усиление электромагнитного излучения. Для одной частицы вынужденные переходы с верхнего уровня на нижний и наоборот равновероятны. Поэтому когерентное усиление волны возможно только при превышении числа возбужденных частиц над невозбужденными.

В условиях термодинамического равновесия верхние уровни энергии населены частицами меньше, чем нижние, в соответствии с распределением Больцмана, причем число частиц, находящихся на верхнем уровне, меньше числа частиц, находящихся на нижнем уровне. Поэтому в обычных (равновесных) условиях вещество поглощает электромагнитные волны.

Поглощение может уступить место усилению электромагнитной волны при ее распространении через вещество, если  $N_2 > N_1$ . Состояние вещества, при котором хотя бы для двух уровней энергии частиц верхний уровень оказался населенным сильнее, чем нижний, называется инверсией населенностей, а само вещество – активной средой. Такое состояние не является равновесным.

Необходимую для возбуждения генерации обратную связь осуществляет объемный резонатор, в который помещается активная среда. В какой-то точке резонатора неизбежно происходит спонтанный переход частицы активной среды с верхнего уровня на нижний, т. е. самопроизвольно испускается фотон. Если резонатор настроен на частоту этого фотона, то фотон не выйдет из резонатора, а, многократно отражаясь от его стенок, в свою очередь, будет воздействовать на активное вещество, вызывая все новые акты вынужденного испускания таких же фотонов (обратная связь). В результате в резонаторе накапливается электромагнитная энергия, часть которой можно вывести наружу. Если в какой-то момент мощность вынужденного излучения превысит мощность потерь энергии, затраченной на нагрев стенок резонатора, рассеяние излучения и т. п., а также на полезное излучение во внешнее пространство, то в резонаторе возбуждается генерация.

Частота колебаний с высокой степенью точности совпадает с частотой  $\omega$  перехода возбужденных частиц. Интенсивность генерации определяется числом возбужденных частиц за 1 с в каждом кубическом сантиметре активной среды. Если скорость образования таких частиц  $\Lambda \text{ см}^{-3}\text{с}^{-1}$ , то максимальная возможная мощность излучения в  $1 \text{ см}^3$  среды в непрерывном режиме равна

$$P = \Lambda \hbar \omega. \quad (3.2)$$

Усиление электромагнитной волны за счет вынужденного испускания приводит к экспоненциальному закону роста ее интенсивности по мере увеличения длины пути  $z$ , пройденного волной в веществе:

$$I = I_0 \cdot \exp(\alpha z), \quad (3.3)$$

где  $I_0$  – интенсивность входящей волны;

$\alpha \sim N_2 - N_1$  – коэффициент квантового усиления.

Монохроматичность и высокая направленность излучения позволяют сфокусировать всю энергию лазерного излучения в пятно с размерами, близкими к длине волны излучения. В этом случае электрическое поле световой волны достигает значений, близких к внутриатомным полям.

В начале возникновения генерации в лазере одновременно и независимо усиливается множество волн, порожденных отдельными фотонами, испущенными спонтанно вдоль оси резонатора. Фазы этих волн независимы между собой, но когерентность каждой из них и их интенсивность постоянно увеличиваются за счет процессов вынужденного испускания. В ходе взаимной конкуренции этих волн решающую роль приобретает соотношение между длиной волны и размерами резонатора. Во время первого пролета усиливаются все фотоны, испущенные в результате спонтанных процессов. Однако после отражения от зеркал в преимущественном положении оказываются лишь те фотоны, для которых выполняется условие возникновения стоячих волн. Их длины волн соответствуют нормальным колебаниям резонатора – модам, интенсивность которых быстро увеличивается.

В наиболее благоприятных условиях оказываются те из мод резонатора, для которых длина волны совпадает с вершиной спектральной линии активной среды или расположена вблизи ее вершины. Интенсивность таких волн возрастает лавинообразно (вероятность вынужденного испускания пропорциональна интенсивности вынуждающей волны), подавляя усиление волн, удаленных от вершин спектральных линий. В результате возникает когерентное излучение, направленное вдоль оси резонатора и содержащее лишь небольшое количество мод резонатора (рисунок 3.1).

Для достижения наивысшей когерентности излучения стремятся к одномодовому режиму генерации, при котором в пределах спектральной линии активной среды оказывается лишь одна из мод резонатора. Для этого в резонатор обычно вводят дополнительный селектирующий элемент (оптическую призму или дифракционную решетку), выделяющий одну из мод резонатора и подавляющий остальные. В длинноволновой части ИК-диапазона одномодовую генерацию можно получить уменьшением длины резонатора.

Определенным излучательным квантовым переходам соответствуют линии в спектрах испускания или поглощения любой квантовой системы.

Минимальная ширина спектральной линии называется естественной (или радиационной). Она отвечает переходу в изолированном атоме. Спектральные линии приближенно можно считать монохроматическими с длиной волны, отвечающей максимуму интенсивности спектральной линии испускания (или минимуму спектральной линии поглощения).

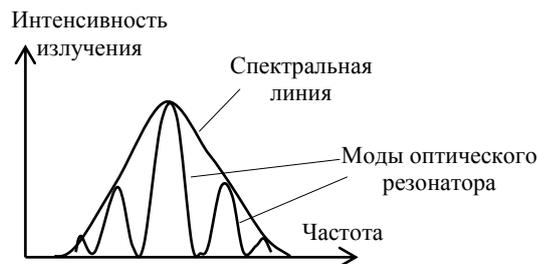


Рисунок 3.1 – Структура спектральной линии лазерного излучения

Спектральные линии дополнительно уширяются вследствие хаотического теплового движения атомов или молекул (так называемое доплеровское уширение), эффекта Штарка (расщепление спектральных линий в электрическом поле) или любого другого взаимодействия квантовой системы.

Измерить длину волны излучения лазера и исследовать его спектральные составляющие позволяют спектрометры.

Принцип действия большинства спектрометров заключается в выделении из светового потока узких участков длин волн  $\delta\lambda$  в окрестности каждой  $\lambda$ . Эта способность называется функцией пропускания, или аппаратной функцией. Результат  $F(\lambda)$  измерений исследуемого спектра  $f(\lambda)$  прибором с аппаратной функцией  $a(\lambda - \lambda')$  описывается следующей формулой:

$$F(\lambda) = \int a(\lambda - \lambda') f(\lambda) d\lambda, \quad (3.4)$$

где  $a$  – ширина щели спектрометра.

Чем меньше ширина линий  $\delta\lambda$ , тем точнее прибор передает истинный контур линии.

Ширина аппаратной функции наряду с рабочим диапазоном длин волн является основной характеристикой спектрального прибора и определяет спектральное разрешение  $\delta\lambda$  и спектральную разрешающую способность:

$$R = \lambda / \delta\lambda. \quad (3.5)$$

Основные виды спектрометров строятся как одноканальные либо многоканальные. В одноканальных приборах используются классические методы селективной фильтрации (спектрометры с клиновыми фильтрами, спектрометры с монохроматорами, спектрометры Фабри – Перо) и селективной модуляции (растровые спектрометры и спектрометры интерференционные с селективной амплитудной модуляцией – сисам-спектрометры). В многоканальных спектрометрах селективная фильтрация осуществляется с помощью наборов фильтров либо полихроматоров, а селективная модуляция реализуется в мультиплекс-спектрометрах, адамар-спектрометрах и фурье-спектрометрах.

Основной функцией современного спектрометра является регистрация и накопление спектра света, оцифровка полученного сигнала в зависимости от длины волны и последующий анализ с помощью персонального компьютера.

Спектрометр представляет собой прибор, разлагающий видимое излучение в спектр и распределяющий множество монохроматических изображений в

плоскости детектора через входную щель. От параметров щели зависят рабочие характеристики спектрометра, поскольку она задает размер светового потока, попадающего на оптическую часть, а также спектральное разрешение, частота штрихов дифракционной решетки и размер пикселей детектора.

### 3.3 Описание лабораторной установки

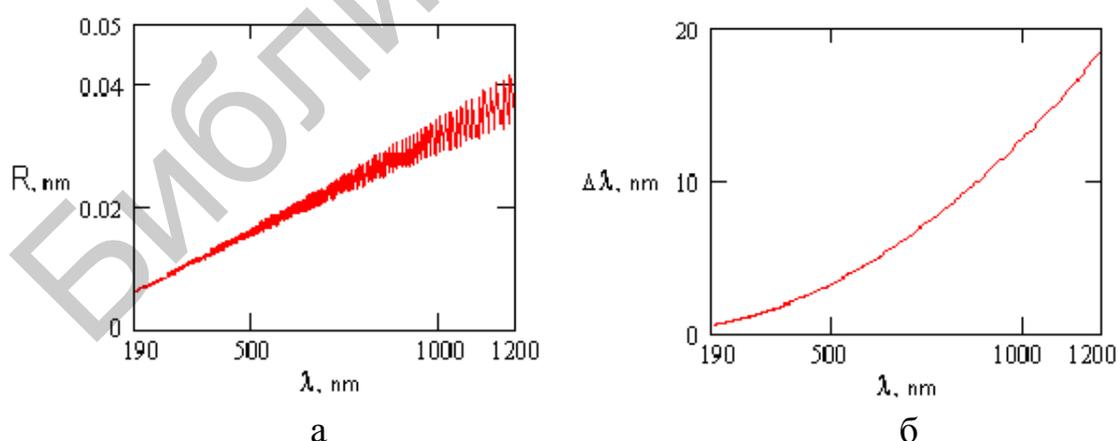
#### 3.3.1 Устройство и принцип действия спектрометра SHR

Спектрометр SHR обеспечивает возможность получения узких спектральных линий в широком спектральном диапазоне с высоким разрешением в реальном масштабе времени; позволяет измерять абсолютное значение длины волны излучения непрерывных и импульсных лазеров с точностью  $\pm 3$  нм в спектральном диапазоне от 190 до 1200 нм со спектральным разрешением 30 000, что составляет от 6 нм для ультрафиолетовой (УФ) области до 40 нм для инфракрасного (ИК) диапазона.

Спектрометр SHR подсоединяется к порту Full Speed USB любой персональной ЭВМ и не требует дополнительного источника питания, т. к. потребляет питание от компьютера.

Спектрометр SHR применяется для контроля длины волны лазерного излучения в лазерной спектроскопии, лазерном разделении изотопов, при юстировке, наладке и тестировании лазерных систем. Он позволяет анализировать форму линий излучения диодных лазеров и перестраиваемых лазерных систем: твердотельных лазеров, лазеров на красителях и оптических параметрических генераторов. Также его можно использовать для текущего контроля выходного излучения лазеров с узкой линией в процессе перестройки длины волны.

Зависимость спектрального разрешения спектрометра SHR от длины волны анализируемого излучения представлена на рисунке 3.2, а.



а – зависимость спектрального разрешения спектрометра SHR от длины волны анализируемого излучения; б – зависимость предельно допустимой ширины спектрального интервала анализируемого излучения от длины волны

Рисунок 3.2 – Спектральные характеристики спектрометра SHR

Спектрометр SHR может быть применен для анализа любых спектральных интервалов в пределах спектральной ширины порядка Эшелле от 0,5 нм для УФ-области спектра (190 нм) до 18 нм в ИК-области (1200 нм), предварительно выделенных с помощью фильтра или другого спектрального прибора.

Технические и метрологические характеристики спектрометра SHR представлены в таблице 3.1, внешний вид – на рисунке 3.3.

Таблица 3.1

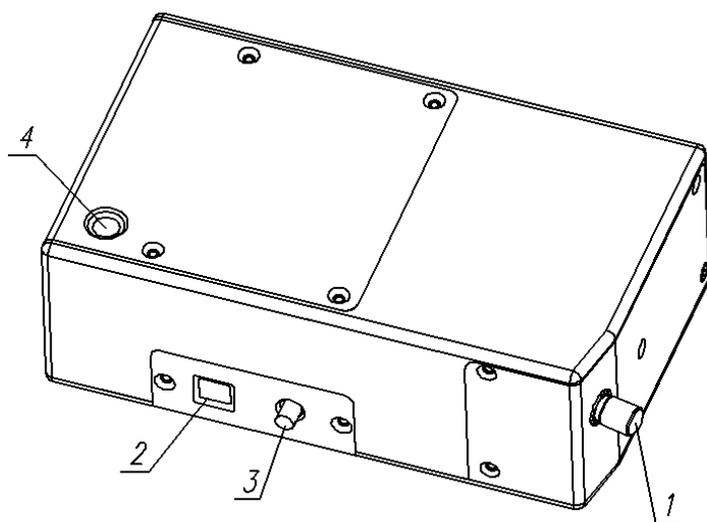
Характеристика	Параметры
Оптическая схема	Черни – Тернера
Фокусное расстояние, мм	150
Относительное отверстие	1:12
Спектральный диапазон, нм	190–1200
Основная абсолютная погрешность определения длины волны, пм	±3
Разрешение ( $\lambda/\Delta\lambda$ <i>FWHM</i> )	30 000 от 6 пм для $\lambda = 193$ нм до 40 пм для $\lambda = 1200$ нм
Ширина линии источника излучения, не более	$125 \text{ см}^{-1}$ от 0,5 нм для $\lambda = 193$ нм до 18 нм для $\lambda = 1200$ нм
Волокно оптическое кварцевое УФ: - диаметр, мм - длина, мм - разъем	UV Silica UV400/440P 0,4 1000 SMA-905
Интерфейс	Full Speed USB
Синхронизация	Внутренняя, внешняя
Размеры, мм	113 × 190 × 72,5
Масса, кг	2,6

Оптоволокно подсоединяется ко входной щели 1 спектрометра с помощью стандартного разъема SMA-905. Разъемы 2 и 3 соответственно предназначены для присоединения кабеля USB для связи с компьютером и кабеля синхронизации спектрометра с источником излучения.

**ВНИМАНИЕ!** Спектрометр был откалиброван производителем и в дополнительной калибровке не нуждается.

Прибор рассчитан на эксплуатацию при следующих условиях окружающей среды:

- температура окружающей среды 15–35 °С;
- относительная влажность воздуха 25–80 %;
- атмосферное давление 96–104 кПа.

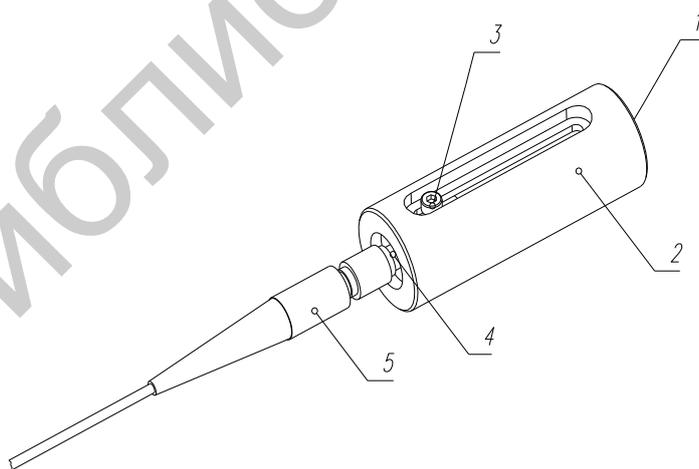


1 – входная щель спектрометра с разъемом SMA-905 для подсоединения волокна с защитной крышкой; 2 – разъем для подключения USB-кабеля; 3 – разъем для кабеля синхронизации; 4 – положение установки крышки соединителя оптических волокон

Рисунок 3.3 – Внешний вид спектрометра SHR

Рекомендуется регулярно корректировать сдвиг калибровочной кривой, который может произойти вследствие изменения температуры окружающей среды. Анализ необходимости коррекции и сама процедура производится с помощью *He-Ne* лазера.

Для приема оптического излучения в спектрометре используется оптический приемник. Внешний вид узла ввода представлен на рисунке 3.4.



1 – матовое стекло КУ-1; 2 – корпус; 3 – зажимный винт; 4 – адаптер SMA-905; 5 – оптическое волокно

Рисунок 3.4 – Внешний вид узла ввода излучения в волокно

Излучение лазера направляется на матовое стекло узла ввода и по оптоволокну поступает в спектрометр. Узел ввода может быть закреплен в любом держателе. Для регулировки степени ослабления излучения существует возможность перемещения торца волокна относительно матового стекла 1 при ослабленном винте 3.

Оптическая часть спектрометра представляет собой схему Черни – Тернера (рисунок 3.5).

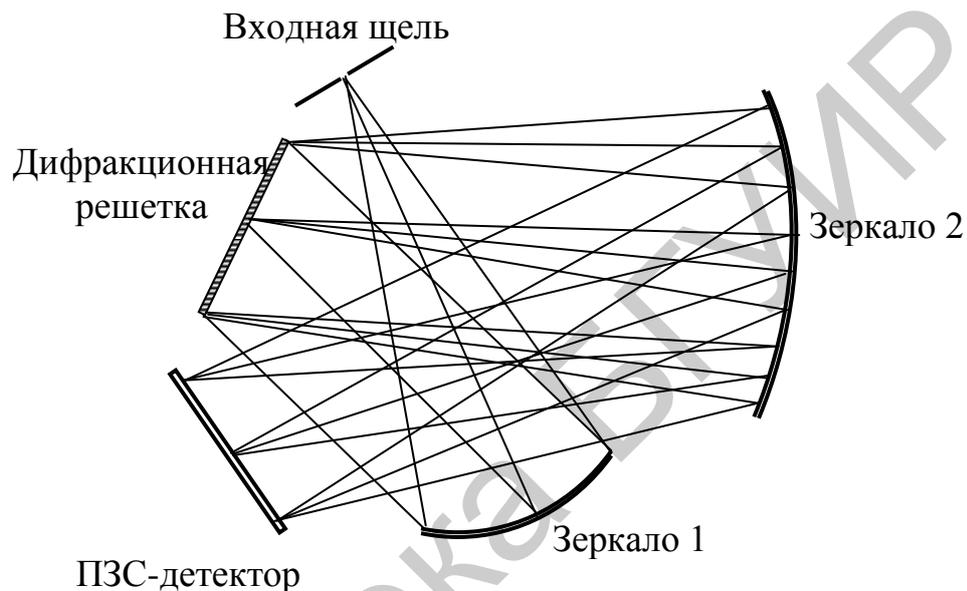


Рисунок 3.5 – Схема Черни – Тернера

В схеме Черни – Тернера изменение рабочего спектрального диапазона производится путем поворота дифракционной решетки.

Решетка рассеивает компоненты спектра под разными углами, которые затем фокусируются вогнутым зеркалом на детекторе. В качестве альтернативы можно использовать вогнутую голографическую решетку.

Отраженное от поверхности линейки фотодиодов излучение попадает на выходное зеркало и, отразившись от него, возвращается и регистрируется линейкой фотодиодов, внося вклад в уровень фонового излучения. Устранить влияние окружающей среды на детектор можно, сделав корпус спектрометра герметичным и заполнив его инертным газом.

В детекторе фотоны спектра преобразуются в электрический сигнал, который затем обрабатывается в ПК.

Оптическое разрешение и пропускная способность спектрометра зависят от параметров входной щели. В основном в спектрометрах применяются щели шириной 10, 25, 50, 100, 200 мкм.

Ширину изображения входной щели  $W_i$  можно рассчитать по формуле

$$W_i = (M^2 \cdot W_s^2 + W_0^2)^{1/2}, \quad (3.6)$$

где  $M$  – увеличение оптического стола в зависимости от соотношения фокусного расстояния фокусирующего зеркала и фокусной длины коллимирующего зеркала;

$W_s$  – ширина входной щели;

$W_0$  – увеличение изображения оптической частью.

При соответствующем разрешении ширина входной щели должна быть как можно больше для увеличения пропускной способности спектрометра. Для стандартной оптической схемы Черни – Тернера увеличение изображения составляет несколько десятков микрометров.

Дифракционная решетка формирует спектр и частично влияет на оптическое разрешение спектрометра. Она имеет два параметра: частоту штрихов решетки (или плотность решетки) и угол блеска. Диапазон длин волн спектрометра обратно пропорционален дисперсии решетки.

В спектрометрах со штриховой дифракционной решеткой (рисунок 3.6) угловая дисперсия решетки описывается формулой

$$\frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{m}{10^6 d \cos\beta}, \quad (3.7)$$

где  $\beta$  – угол дифракции;

$d$  – период решетки, равный инверсии плотности штрихов;

$m$  – дифракционный порядок.

Форма дифракционной кривой зависит в основном от угла решетки (угла блеска).

В современных спектрометрах чаще всего применяются детекторы на линейных и ПЗС-матрицах. При подборе спектрометра важно выбрать правильный материал детектора, т. к. ширина запрещенной энергетической зоны  $E_{gap}$  полупроводника определяет верхний предел длины волны  $\lambda_{max}$ :

$$\lambda_{max} = \frac{hc}{E_{gap}}. \quad (3.8)$$

Нижний предел длины волны  $\lambda_{min}$  зависит от особенности поглощения света полупроводниковым материалом и может варьироваться в широких пределах в зависимости от толщины детектора.

Чаще всего применяются два наиболее распространенных полупроводниковых материала: Si и InGaAs.

Программное обеспечение спектрометра SHR представляет собой набор окон управления и визуализации.

Все текущие измерения и загружаемые файлы отображаются в виде списка. Каждое измерение или файл может содержать в себе от одного до нескольких спектров.

Для работы достаточно одного массива в буфере. Увеличение без необходимости числа массивов в буфере свыше одного не рекомендуется изготовителем.

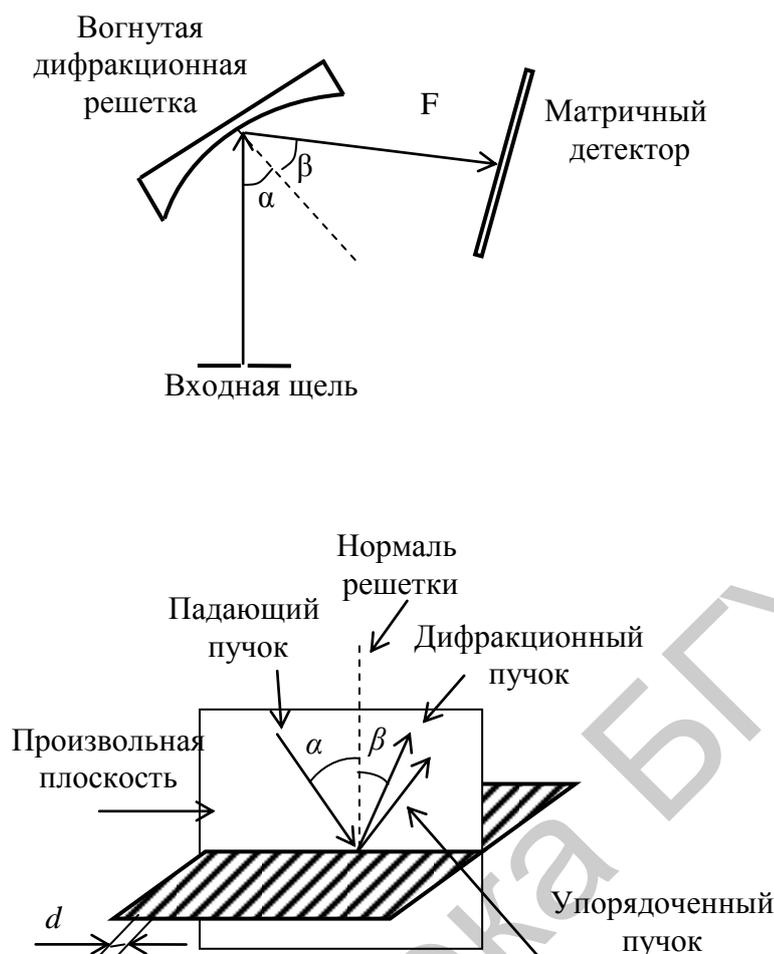
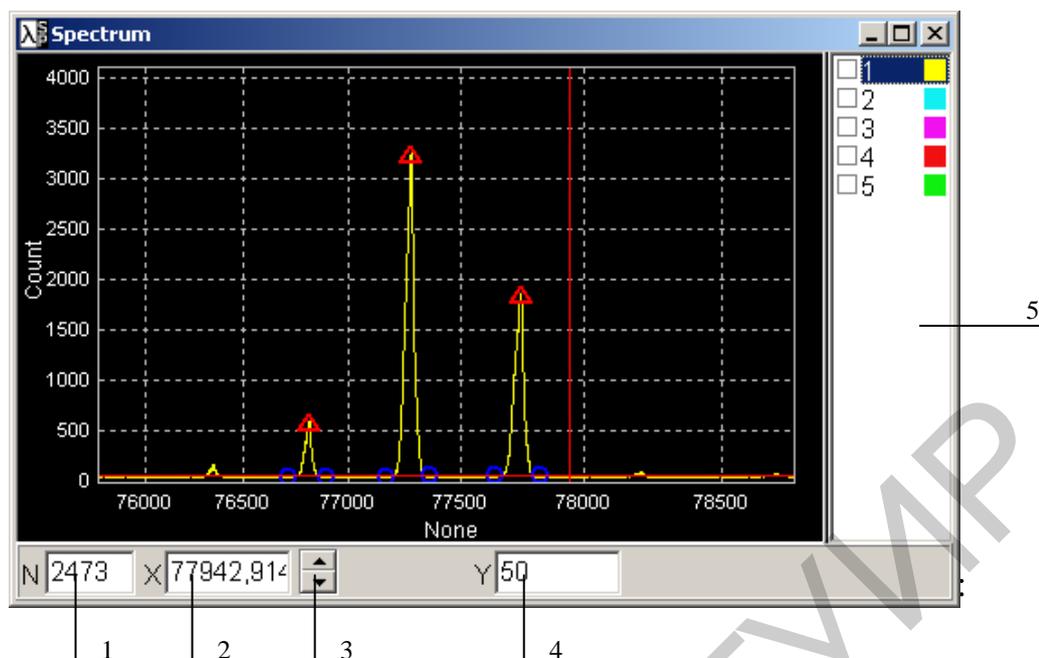


Рисунок 3.6 – Геометрия дифракции для плоской и вогнутой решеток

На рисунке 3.7 представлено окно визуализации спектров Spectrum. Оно предназначено для просмотра непосредственно регистрируемых и ранее зарегистрированных и сохраненных спектров. Это окно является базовым для расчета центральной длины волны и полуширины анализируемой спектральной линии.

Координатное пространство окна Spectrum содержит изображение нескольких порядков одной и той же определяемой спектральной линии. По оси  $y$  отложена интенсивность линии конкретного порядка, по оси  $x$  – координата каждого порядка в фокальной плоскости спектрографа (порядковый номер пикселя линейного датчика изображения). Предусмотрена возможность масштабировать спектр в направлении любой из осей.



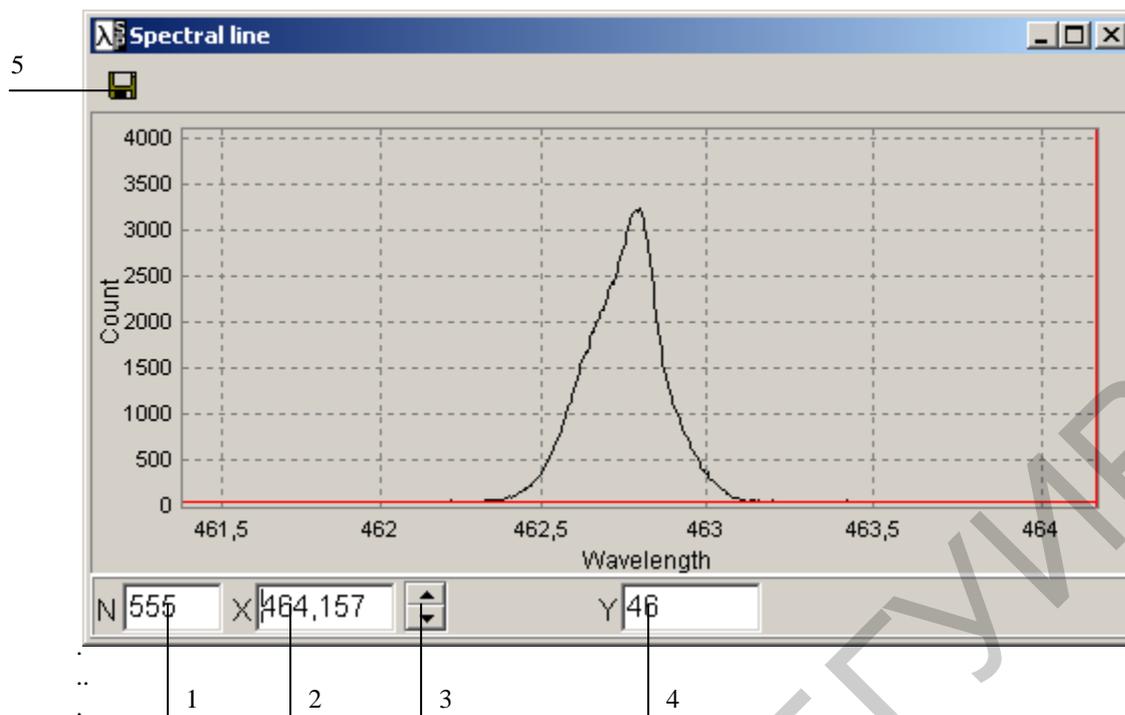
1 – порядковый номер элемента детектора, соответствующий текущему положению курсора; 2 – положение курсора по оси  $x$ ; 3 – кнопки пошагового перемещения курсора по спектру; 4 – положение курсора по оси  $y$ ; 5 – перечень спектров (массивов) в буфере (используется при наладке прибора изготовителем, когда в поле Length указано число спектров более одного)  
 Рисунок 3.7 – Окно визуализации спектров Spectrum

Чтобы отметить несколько порядков спектральной линии в окне визуализации спектров для расчета длины волны и полуширины спектральной линии, в программном обеспечении спектрометра имеется окно **WL Calculation**.

С помощью окна **WL Units** можно выбрать единицы отображения результата измерения (нанометр в воздухе или нанометр в вакууме, сантиметр в минус первой степени, гигагерц).

Окно **Enlarged Indication** позволяет показать значения длины волны и полуширины спектральной линии на экране в укрупненном виде (в нанометрах).

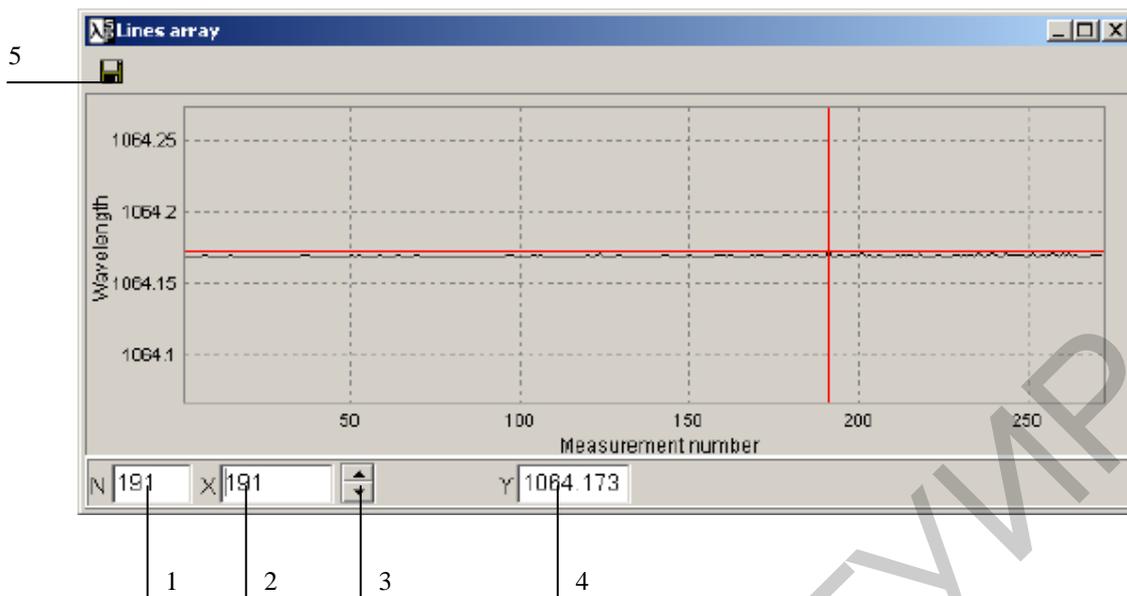
Окно **Spectral Line** (рисунок 3.8) отражает спектральный состав анализируемого излучения.



- 1 – порядковый номер элемента детектора, соответствующий текущему положению курсора; 2 – значение длины волны в нанометрах, соответствующее текущему положению курсора; 3 – кнопки пошагового перемещения курсора по спектру вперед и назад; 4 – положение курсора по оси y;
- 5 – записать спектр из окна **Spectral Line** в файл; 6 – записать все спектры из окна **Spectral Line** в файл

Рисунок 3.8 – Внешний вид окна **Spectral Line**

Окно **Lines Array** (рисунок 3.9) позволяет наблюдать изменение длины волны анализируемого излучения от измерения к измерению при работе в режиме **Nonstop** (непрерывный), а также запоминать полученный массив данных в файл. По оси y отложена длина волны, по оси x – порядковый номер скана, начиная от нажатия кнопки  (Старт).



1 – порядковый номер скана; 2 – порядковый номер скана в пределах окна визуализации; 3 – кнопки пошагового перемещения курсора по графику вперед и назад; 4 – значение длины волны в нанометрах; 5 – функция записи спектра из окна Lines Array в файл

Рисунок 3.9 – Внешний вид окна Lines Array

### 3.4 Лабораторное задание

- 3.4.1 Исследовать спектральный состав излучения твердотельного лазера.
- 3.4.2 Получить изображение спектра с помощью спектрометра.
- 3.4.3 Измерить длины волн спектральных составляющих.
- 3.4.4 Оценить погрешность измерения длины волны лазерного излучения.

### 3.5 Порядок выполнения работы

3.5.1 Подготовьте спектрометр SHR к работе согласно требованиям Руководства по эксплуатации.

3.5.2 Работа со спектрометром SHR предполагает выполнение следующих процедур.

3.5.2.1 Оценка необходимости процедуры коррекции и коррекция возможного сдвига калибровочной кривой прибора, обусловленного изменением температуры окружающей среды, с помощью *He-Ne* лазера (632,816 нм). Для этого следует зарегистрировать спектр *He-Ne* лазера и определить его длину волны. Если результат отличается от табличного значения (632,816 нм) более чем на  $\pm 3$  пм, целесообразно проведение процедуры коррекции.

3.5.2.2 Задание параметров регистрации и регистрация нескольких порядков исследуемой спектральной линии.

3.5.2.3 Определение центральной длины волны и полуширины исследуемой спектральной линии с прорисовкой ее формы, а также анализ изменения центральной длины волны от измерения к измерению.

3.5.3 Результат сканирования отображается в окне **Spectrum**. Координатное пространство окна **Spectrum** содержит изображение нескольких порядков одной и той же определяемой спектральной линии, которые служат исходным материалом для определения центральной длины волны, полуширины и формы спектральной линии.

3.5.4 Для измерения длины волны выполните следующие операции:

3.5.4.1 Откройте спектр оптического параметрического генератора – 979 из программы измерителя длины волны. Спектр состоит из трех спектральных порядков одной и той же линии.

3.5.4.2 Введите *min. level value* (минимальное значение уровня) в окне **WL calculation** (Вычисление длины волны). Минимальное значение уровня должно превосходить максимальную интенсивность помех, наблюдаемую вдоль оси *y*. Допускаемое значение составляет 500.

3.5.4.3 При помощи кнопки **Find** (Искать) инициируйте автопоиск и маркировку нескольких порядков анализируемой спектральной линии. Если опция **Filter** (Фильтр) не активирована, результат будет иметь вид, представленный на рисунке 3.10. Такой результат поиска пика является неприемлемым для правильного расчета длины волны, поскольку каждый спектральный порядок должен быть маркирован символом  $\Delta$ , обозначающим этот пик, и двумя символами  $O$ , обозначающими его края.

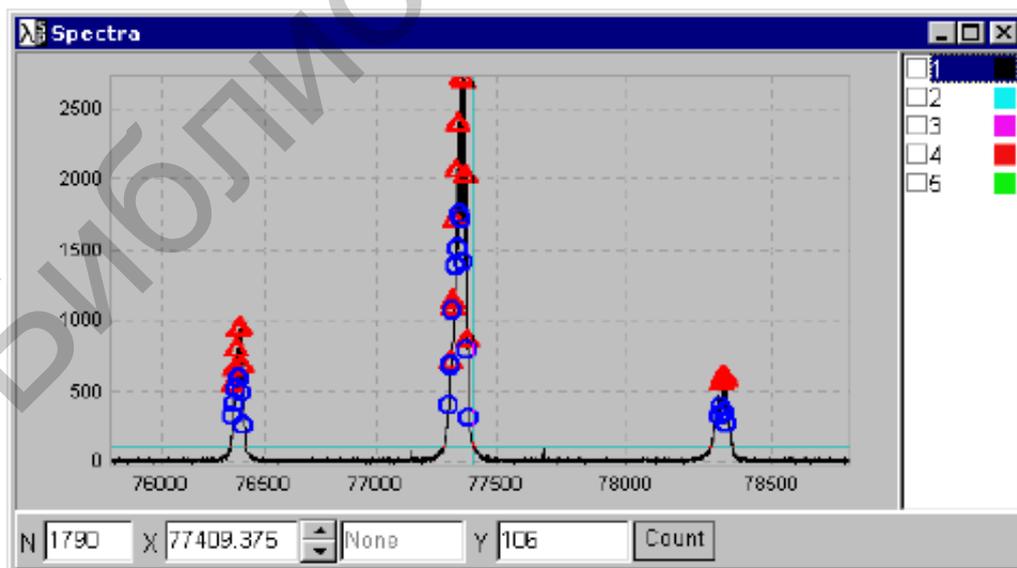


Рисунок 3.10 – Изображение спектра в отсутствие фильтрации

3.5.4.4 Сотрите все метки кнопкой **Clear**, вызовите окно **Filter**. Задайте произвольные параметры фильтра (апертуру и число итераций фильтрации), проверьте окно (блок управляющей программы) **Use the filter for searching of peak** (Используйте фильтр для поиска пика).

3.5.4.5 Повторяйте процедуру поиска пика при помощи кнопки **Find** до тех пор, пока не найдете такие параметры фильтра, при которых каждый спектральный порядок (не ниже второго) не будет уникальным образом помечен. Чтобы упростить процедуру выбора, используйте кнопку **Look** – белая линия на рисунке 3.11.

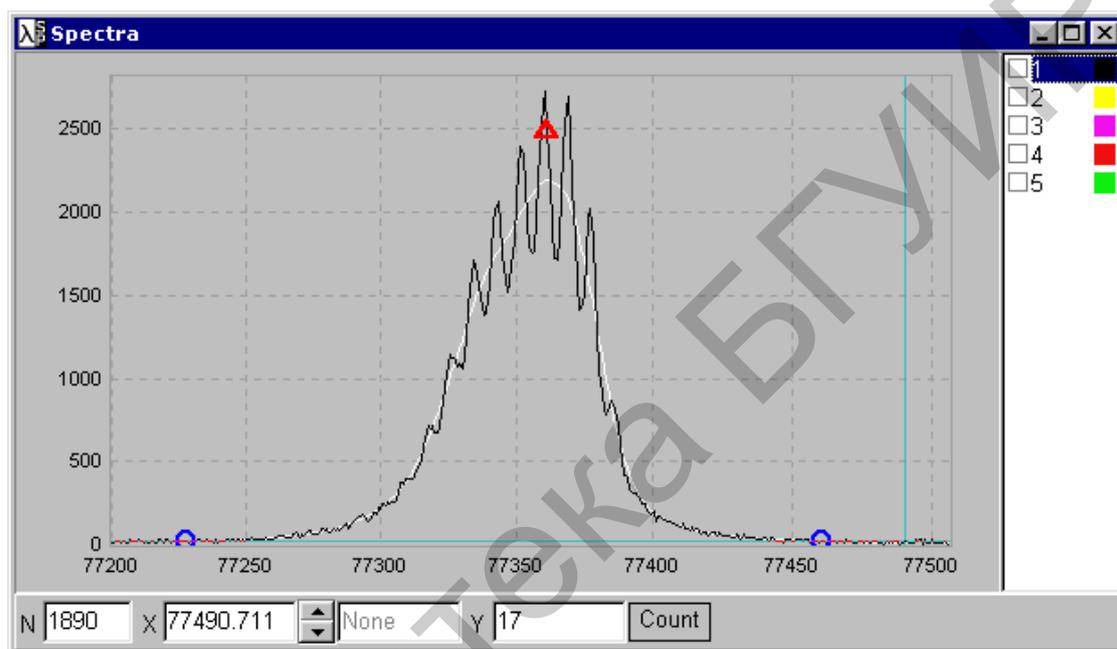


Рисунок 3.11 – Результат правильной настройки фильтра

3.5.4.6 Нажмите кнопку **Clear** (Сброс), а затем кнопку **Spectrum** (Спектр). Вновь появившееся окно **Spectral Line** содержит изображение анализируемой спектральной линии с масштабированием горизонтальной оси в нанометрах, а также длину волны, соответствующую центру анализируемой спектральной линии и ее FWHM (полную ширину на уровне полумаксимума) (рисунок 3.12).

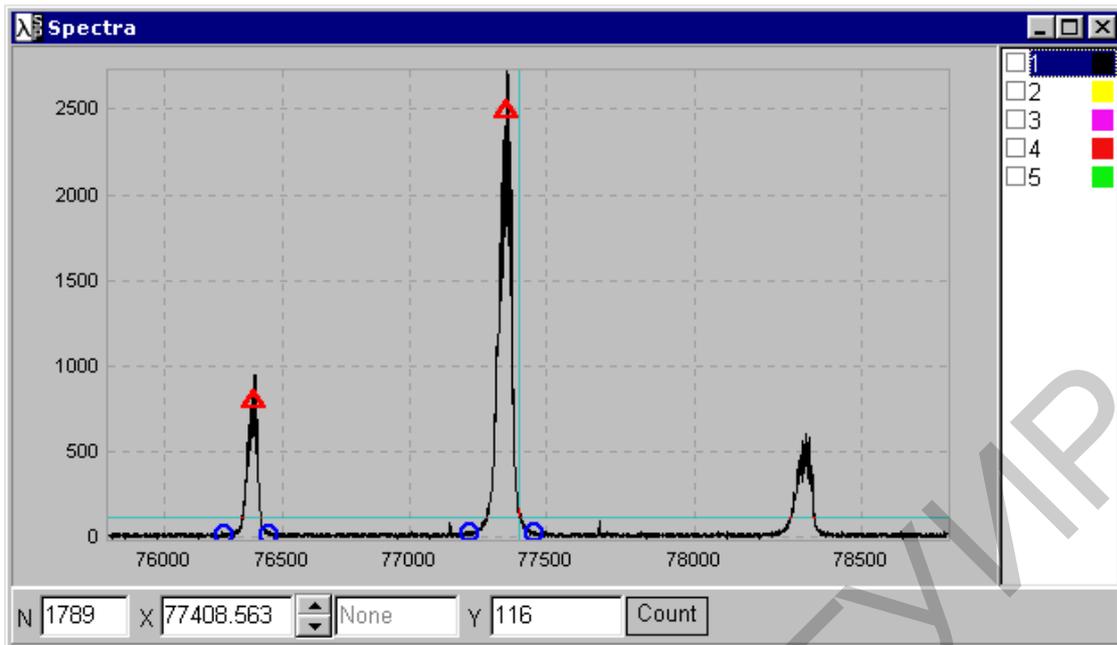


Рисунок 3.12 – Изображение спектра при правильной настройке спектрометра

### 3.6 Контрольные вопросы

- 1 Что такое спектр колебаний?
- 2 В чем причина уширения спектральной линии?
- 3 В чем разница одномодового и многомодового режима работы лазера?
- 4 Поясните принцип действия спектральных приборов.
- 5 Перечислите способы разделения длин волн.
- 6 Поясните принцип получения спектра с помощью схемы Черни – Тернера.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА ЛИ-4 ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

### 4.1 Цель работы

- 1 Изучение интерферометрических методов исследований.
- 2 Изучение принципа действия интерферометра.
- 3 Проверка плоскостности поверхности заданных объектов.

### 4.2 Краткие теоретические сведения

Интерферометр представляет собой измерительный прибор, основанный на интерференции волн.

Оптические интерферометры применяются для измерения оптических длин волн спектральных линий, показателей преломления прозрачных сред, абсолютных и относительных длин объектов, угловых размеров звезд, а также для контроля качества оптических деталей и их поверхностей.

Принцип действия всех интерферометров одинаков. Различаются они лишь методами получения когерентных волн и тем, какая величина измеряется.

Пучок света с помощью того или иного устройства разделяется на два или большее число когерентных пучков, которые проходят различные оптические пути, а затем сводятся вместе, и наблюдается результат их интерференции. Вид интерференционной картины зависит от способа разделения пучка света на когерентные пучки, числа интерферирующих пучков, оптической разности хода, относительной интенсивности, размеров источника, спектрального состава света.

По числу интерферирующих пучков света оптические интерферометры можно разделить на двухлучевые и многолучевые. Многолучевые используются в основном как интерференционные спектральные приборы для исследования спектрального состава света. Двухлучевые используются и как спектральные приборы, и как приборы для физических и технических измерений.

Примером двухлучевого интерферометра может служить интерферометр Майкельсона (рисунок 4.1).

Параллельный пучок света от источника  $L$ , проходя через объектив  $O_1$  и попадая на полупрозрачную пластинку  $P_1$ , разделяется на два когерентных пучка 1 и 2. После отражения от зеркал  $M_1$  и  $M_2$  и повторного прохождения луча 2 через пластинку  $P_1$  оба пучка проходят в направлении  $AO$  через объектив  $O_2$  и интерферируют в его фокальной плоскости  $D$ .

Наблюдаемая интерференционная картина соответствует интерференции в воздушном слое, образованном зеркалом  $M_2$  и мнимым изображением  $M_1$  зеркала  $M_1$  в пластинке  $P_1$ . Оптическая разность хода при этом равна

$$\Delta = 2(AC - AB) = 2l, \tag{4.1}$$

где  $l$  – расстояние между зеркалами  $M_2$  и  $M_1$ .

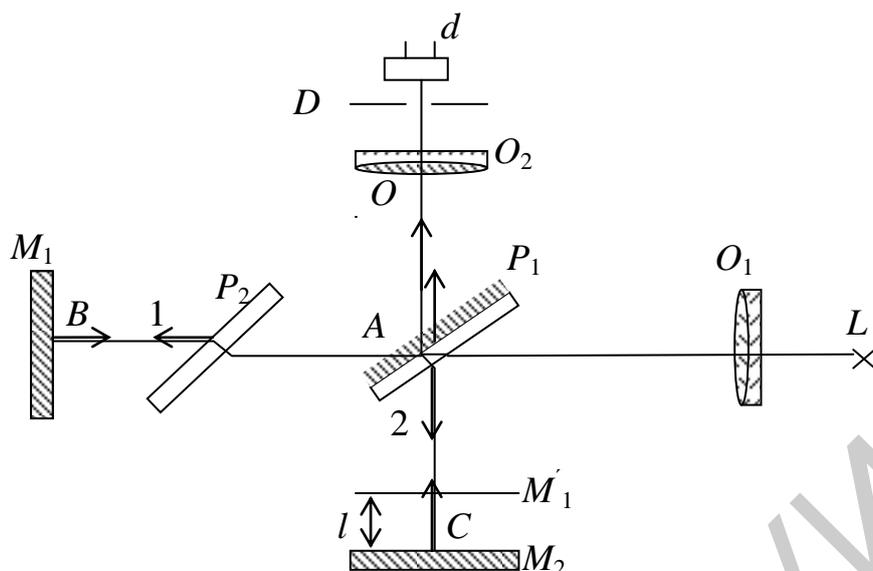


Рисунок 4.1 – Схема интерферометра Майкельсона

Если зеркала  $M_1'$  и  $M_2$  параллельны, то в фокальной плоскости объектива  $O_2$  образуются полосы равного наклона, имеющие форму концентрических колец.

Если же зеркала  $M_2$  и  $M_1'$  образуют воздушный клин, то возникают полосы равной толщины, локализованные в плоскости клина  $M_2-M_1'$  и представляющие собой параллельные линии.

С помощью интерферометра Майкельсона впервые была измерена абсолютная величина длины волны света и доказана независимость скорости света от движения источника (опыт Майкельсона). Он используется и как спектральный прибор, позволяющий анализировать спектры излучения с высоким разрешением, достигающим до 0,005 мкм (Фурье-спектроскопия). Также он применяется для измерения длин эталонных пластинок с точностью до 0,005 мкм. В сочетании с микроскопом он позволяет по виду интерференционной картины измерять величину отступлений от плоскости и величину микронеровностей металлических поверхностей.

Еще одна разновидность двухлучевых интерферометров – интерференционные рефрактометры – применяется для измерения показателей преломления газов и жидкостей. Один из них – интерферометр Жамена (рисунок 4.2).

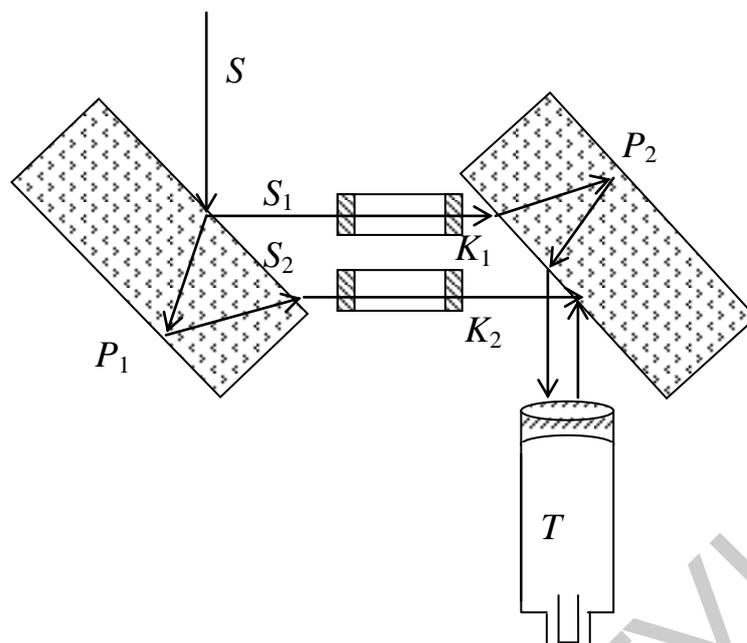


Рисунок 4.2 – Схема интерферометра Жамена

Пучок монохроматического света  $S$  после отражения от передней и задней поверхностей первой стеклянной пластинки  $P_1$  разделяется на два пучка  $S_1$  и  $S_2$ . Пройдя через кюветы  $K_1$  и  $K_2$  и отразившись от поверхностей стеклянной пластинки  $P_2$ , слегка повернутой относительно  $P_1$ , пучки попадают в зрительную трубу  $T$ , где интерферируют, образуя прямые полосы равного наклона. Если одна из кювет заполнена веществом с показателем преломления  $n_1$ , а другая – с  $n_2$ , то по смещению интерференционной картины на число полос  $m$ , по сравнению со случаем, когда обе кюветы наполнены одним и тем же веществом, можно найти разность показателей преломления жидкостей в кюветах как

$$\Delta n = n_1 - n_2 = m\lambda/l, \quad (4.2)$$

где  $\lambda$  – длина волны света;

$l$  – длина кюветы.

Относительная погрешность измерения  $\Delta n$  достигает  $10^{-8}$ .

Разновидностью многолучевого интерферометра является интерферометр Фабри – Перо (рисунок 4.3).

Он состоит из двух параллельных стеклянных или кварцевых пластинок  $P_1$  и  $P_2$ , на обращенные друг к другу поверхности которых нанесены зеркальные покрытия с высоким коэффициентом отражения. Параллельный пучок света, падающий из объектива  $O_1$ , в результате многократного отражения от зеркал образует большое число параллельных когерентных пучков с постоянной разностью хода  $\Delta$  между соседними пучками (формула (4.3)), но различной интенсивности.

$$\Delta = 2nh \cdot \cos\Theta, \quad (4.3)$$

где  $h$  – расстояние между зеркалами;

$n$  – количество отражений;

$\Theta$  – угол отражения пучка от зеркала.

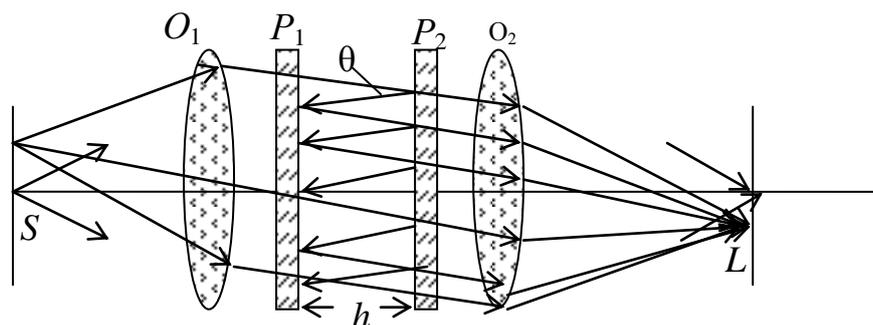


Рисунок 4.3 – Интерферометр Фабри – Перо

В результате многолучевой интерференции в фокальной плоскости  $L$  объектива  $O_2$  образуется интерференционная картина, имеющая форму концентрических колец с резкими интенсивными максимумами, положение которых определяется из условия

$$\Delta = m\lambda, \quad (4.4)$$

где  $m$  – целое число;

$\lambda$  – длина волны излучения.

Следовательно, с помощью интерферометра Фабри – Перо можно разложить сложное излучение в спектр.

Такой интерферометр применяется как интерференционный спектральный прибор высокой разрешающей силы, которая зависит от коэффициента отражения зеркал  $\rho$  от расстояния  $h$  между пластинками, возрастая с их увеличением.

Специальные сканирующие интерферометры Фабри – Перо используются для исследования спектров в видимой, ИК и сантиметровых областях длин волн.

Разновидностью интерферометров Фабри – Перо являются оптические резонаторы лазеров, излучающая среда которых располагается между зеркалами интерферометра. Если допустить, что между этими зеркалами нормально к ним распространяется электромагнитная плоская волна, то в результате ее отражения от зеркал в пространстве между ними образуются стоячие волны. Условие резонанса имеет вид

$$h = q\lambda/2, \quad (4.5)$$

где  $q$  – целое число, называемое продольным индексом колебания (продольные моды).

Собственные частоты оптического резонатора образуют арифметическую прогрессию с разностью  $c/2h$  (так называемый эквидистантный спектр).

На регистрации интерференционной картины, которая образована волной, отраженной предметом, освещаемым источником света (предметная вол-

на), и когерентной с ней волной, идущей непосредственно от источника света (опорная волна), основаны голографические методы исследований.

Голография (греч. *hólos* – весь, полный и *gráphó* – пишу) – способ записи и восстановления волнового поля, основанный на регистрации интерференционной картины, которая образована волной, отраженной предметом, освещаемым источником света, и когерентной с ней волной, идущей непосредственно от источника света.

В отличие от обычной фотографии, на фотопластинке (голограмме) записывается не изображение объекта, а волновая картина рассеянного объектом света.

Голограмма получается в результате интерференции разделенного на две части монохроматического потока излучения, рассеянного голографическим объектом, и прямого (опорного) пучка, падающего на голограмму, минуя объект. Зарегистрированная интерференционная картина отображается в виде совокупности интерференционных полос с различной плотностью почернения. Наибольшая плотность почернения соответствует волновым фронтам, пришедшим в фазе (где поля складываются), а наименьшая – волновым фронтам, пришедшим в противофазе. Таким образом, отображаемая на голограмме картина волновых фронтов в общем случае не имеет сходства с реальным объектом, но тем не менее содержит информацию об объекте.

#### **4.3 Устройство и принцип действия интерферометра EDU-ВТ/М**

Лабораторная установка (рисунок 4.4) включает узлы, необходимые для создания интерферометра Майкельсона, проекционный экран для наблюдения интерференционных полос и детектор для измерения изменения интенсивности света, выходящего из интерферометра.

На выходе установки расположен фотодетектор, преобразующий световой поток в напряжение, измеряемое вольтметром или универсальным измерительным прибором.

В интерферометре Майкельсона свет выходит из лазера и расщепляется на два пучка делителем света. В результате деления получаются два перпендикулярных пучка различной длины. Далее каждый пучок попадает на зеркало, отражающее его назад к делителю, где пучки объединяются (смешиваются). Если длины пробега будут отличаться на целое число длин волн, то объединяемые пучки интерферируют друг с другом, создавая яркое пятно на экране, помещенном за пределами делителя. Если разность длин пути будет кратна нечетному числу длин полуволн, то два пучка погасят друг друга.

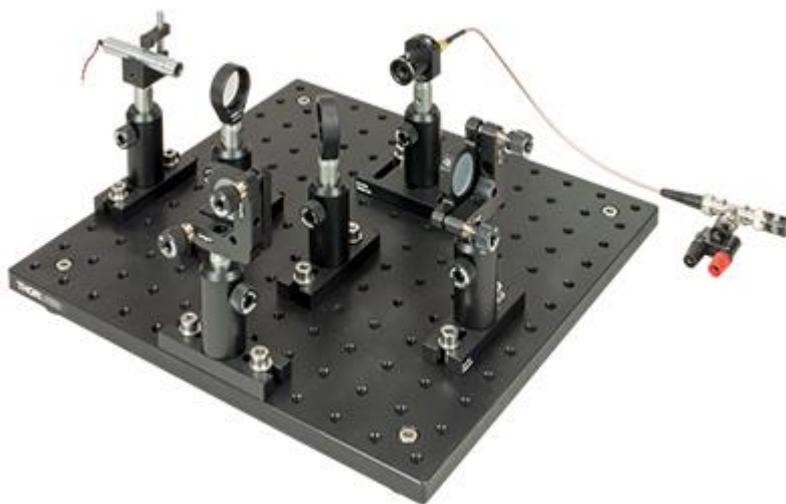


Рисунок 4.4 – Внешний вид оптической схемы интерферометра Майкельсона

В состав лабораторной установки входят следующие компоненты:

- блок зеленого лазера;
- источник питания постоянного тока для запитывания лазера;
- двояковыпуклая линза диаметром 25,4 мм с фокусным расстоянием 75 мм;
- V-образный зажим;
- фиксированная оправа линзы диаметром 25,4 мм;
- стопорное кольцо;
- делитель света диаметром 25,4 мм;
- алюминиевое зеркало диаметром 25,4 мм;
- регулируемый держатель зеркала диаметром 25,4 мм;
- проекционный экран;
- рычаг регулировки зрачка диафрагмы;
- тубус объектива длиной 25,4 мм;
- кремниевый фотодиод 350–1100 нм (внутри тубуса объектива);
- тонкое контактное кольцо диаметром 12,7 мм;
- коаксиальный кабель длиной 304,8 мм;
- комплект разъемов и соединителей.

Интерферометр позволяет измерять точность линейного позиционирования и повторяемость станка путем сравнения координаты перемещения, определенной системой измерения станка, с фактическим перемещением, измеренным с помощью лазерного интерферометра.

Преимуществами измерений с помощью интерферометра являются длительный срок службы оптических элементов; улучшенная динамическая чувствительность; быстрая тепловая акклиматизация; отсутствие теплового дрейфа; простота установки.

#### **4.4 Лабораторное задание**

4.4.1 Изучить устройство и принцип действия интерферометра EDU-BT/M.

4.4.2 Измерить параметры объектов, заданных преподавателем.

#### **4.5 Порядок выполнения работы**

4.5.1 Подготовьте к работе интерферометр EDU-BT/M согласно инструкции по эксплуатации.

4.5.2 Руководствуясь положениями Руководства по эксплуатации интерферометра, измерьте параметры объектов, заданных преподавателем.

4.5.3 Оцените погрешность измерения определяемых параметров.

#### **4.6 Контрольные вопросы**

1 В чем состоит сущность лазерной интерферометрии?

2 Поясните назначение, устройство и принцип действия интерферометра Майкельсона.

3 Поясните назначение, устройство и принцип действия интерферометра Жамена.

4 Поясните назначение, устройство и принцип действия интерферометра Фабри – Перо.

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА ЛИ-5 ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ СВЕТА В ДИЭЛЕКТРИКЕ**

### **5.1 Цель работы**

- 1 Изучение методов измерения скорости света.
- 2 Изучение устройства и принципа действия оптического рефлектометра.
- 3 Измерение скорости распространения оптического сигнала в оптоволокне.

### **5.2 Краткие теоретические сведения**

В основе функционирования оптических волоконных сетей лежит принцип распространения световых волн по оптическим световодам на большие расстояния. При этом электрические сигналы, несущие информацию, преобразуются в световые импульсы, которые с минимальными искажениями и затуханием должны передаваться по волоконно-оптическим линиям связи (ВОЛС).

В общем случае затухание – это ослабление светового потока в оптоволокне.

Одной из причин ослабления светового потока является затухание света в оптическом волокне, вызванное поглощением света. Поглощение определяется как превращение мощности светового импульса в тепло и связано с резонансом в материале волокна. Существуют внутренние поглощения, связанные со свойствами материала волокна и молекулярным резонансом, и внешние поглощения, определяемые наличием микропримесей в материале волокна (например, ОН-ионов). Современные оптические волокна имеют очень небольшое количество микропримесей, поэтому величина внешнего поглощения минимальна и может не приниматься в расчет.

Второй причиной затухания света в оптическом волокне является рассеивание излучения. Наличие этого типа затухания связано прежде всего с дефектами сердцевины оптического волокна, а также с наличием посторонних вкраплений и примесей в оптическом волокне. Подобные посторонние включения значительно влияют на возможность прохождения светового потока по правильной траектории, приводят к его отклонению и, как следствие, превышению угла преломления и выходу части светового луча через оболочку. Кроме того, наличие неоднородностей волокна приводит к отражению части светового потока в обратную сторону, так называемое обратное рассеивание.

В связи с этим становится актуальной задача определения наличия неоднородностей в оптоволокне.

Известны следующие методы определения неоднородностей в линиях передачи:

- метод измерения КСВН линии в широком диапазоне частот;
- метод измерения переходных характеристик;
- метод импульсной рефлектометрии.

Методы измерения КСВН и переходных характеристик позволяют оценить суммарный эффект влияния неоднородностей линии на ее характеристики, однако при наличии нескольких неоднородностей этими методами практически невозможно определять расположение и характер каждой неоднородности, причиной которых могут быть, например, обрыв кабеля, короткое замыкание, уменьшение сопротивления изоляции и т. д.

Метод импульсной рефлектометрии (рефлектометрии во временной области) позволяет определять местоположение каждой неоднородности, а также оценивать ее характер и величину. Кроме того, данный метод позволяет измерить скорость распространения света в оптоволокне.

Сущность метода заключается в получении сведений о неоднородности по характеру импульсного сигнала, отраженного от нее. Метод основан на явлении отражения электромагнитных волн в местах изменения волнового сопротивления линии, причиной которого являются различные виды неоднородностей.

В исследуемую линию подаются короткие зондирующие импульсы напряжения, которые при распространении по линии частично или полностью отражаются от неоднородностей, а затем возвращаются к источнику и наблюдаются на экране электронно-лучевой трубки (ЭЛТ). Вид полученной рефлектограммы зависит от характера неоднородности. Например, обрывы линии передачи вызывают увеличение амплитуды отраженного импульса, а короткие замыкания – наоборот, уменьшение. Рефлектограммы простейших неоднородностей представлены на рисунках 5.1–5.4.

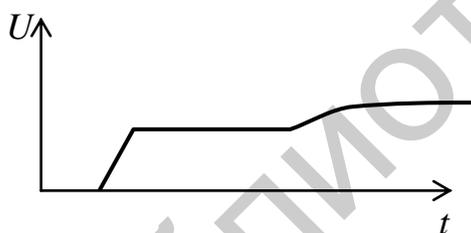


Рисунок 5.1 – Обрыв

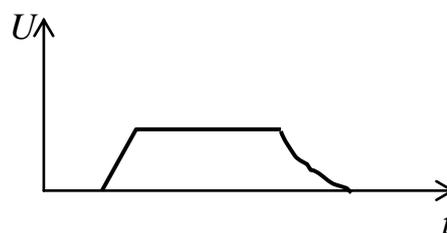


Рисунок 5.2 – Короткое замыкание

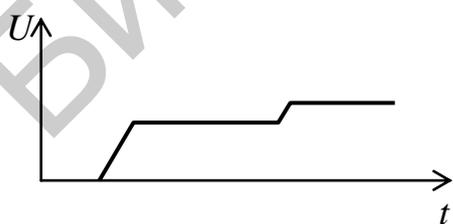


Рисунок 5.3 – Плохой контакт

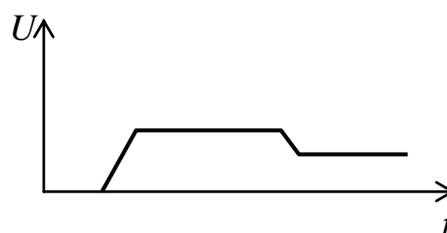


Рисунок 5.4 – Плохая изоляция

На рисунке 5.5 представлена обобщенная структурная схема оптического рефлектометра.

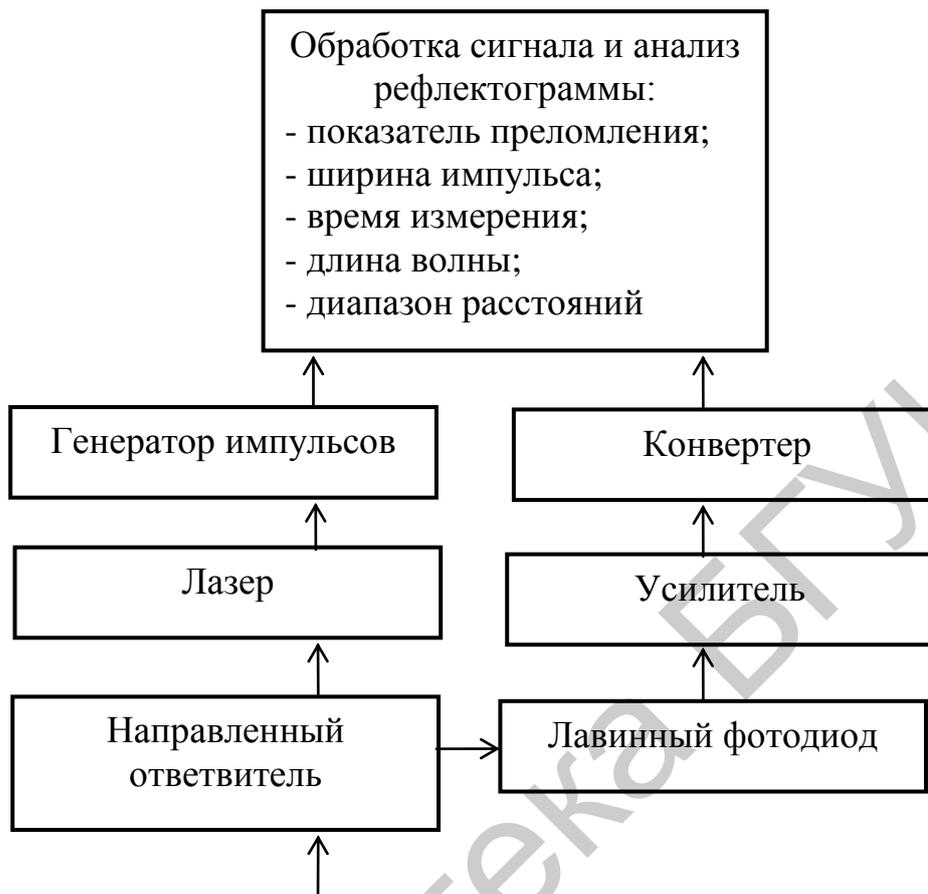


Рисунок 5.5 – Структурная схема оптического рефлектометра

Рефлектометр позволяет получить графическое представление волоконно-оптической линии путем измерения уровня излучения, отраженного от неоднородности.

Рассеянное излучение может быть двух типов: рэлеевское рассеяние, имеющее постоянный низкий уровень, и френелевское отражение – пиковое отражение высокой мощности в точках соединения оптоволокна.

Рэлеевское рассеяние – когерентное рассеяние света на оптических неоднородностях, размеры которых значительно меньше длины волны возбуждающего света. Оно возникает по причине естественного отражения и поглощения излучения на неоднородностях волокна и используется для расчета уровня затухания в волокне в виде функции от расстояния (выражается в децибелах на километр (дБ/км)). При попадании на неоднородность происходит рассеяние излучения в различных направлениях, что создает затухание сигнала и обратное рассеяние (рисунок 5.6).

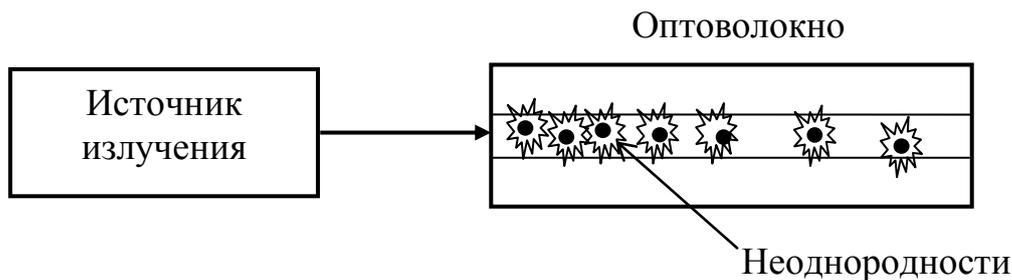


Рисунок 5.6 – Рэлеевское рассеяние

При наличии физических дефектов в линии возникает френелевское отражение. При резком изменении показателя преломления волокна (например, переход стекло – воздух при обрыве волокна) большое количество излучения отражается обратно. Такое отражение отображается пиковым изменением уровня мощности на рефлектограмме линии (рисунок 5.7).

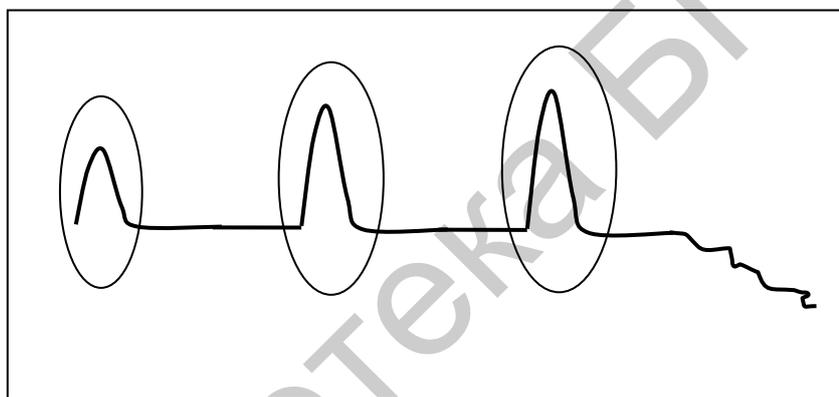


Рисунок 5.7 – Френелевское отражение

При попадании большого уровня отраженного излучения в детектор возникает так называемая «мертвая зона», когда детектор некоторое время не может зафиксировать уровень излучения. Большой уровень отражений приводит к более длительному времени восстановления детектора и более протяженной «мертвой зоне». «Мертвая зона» для отражений представляет собой минимальное расстояние после френелевского отражения, на котором рефлектометр сможет обнаружить другое отражение. Другими словами, это минимальное расстояние между двумя отражениями в волокне.

В большинстве рефлектометров «мертвые зоны» вызывают ослабление сигнала для самого короткого доступного импульса и для отражения минус 45 дБ в случае одномодового волокна или минус 35 дБ для многомодового волокна. При большем коэффициенте отражения детектор «восстанавливается» быстрее.

Минимизация «мертвой зоны» для отражений обеспечивает возможность обнаруживать близко расположенные неоднородности в волокне.

Для определения характеристик наиболее часто используемым методом является измерение расстояния на минус 1,5 дБ с каждой стороны пика отражения (рисунок 5.8).

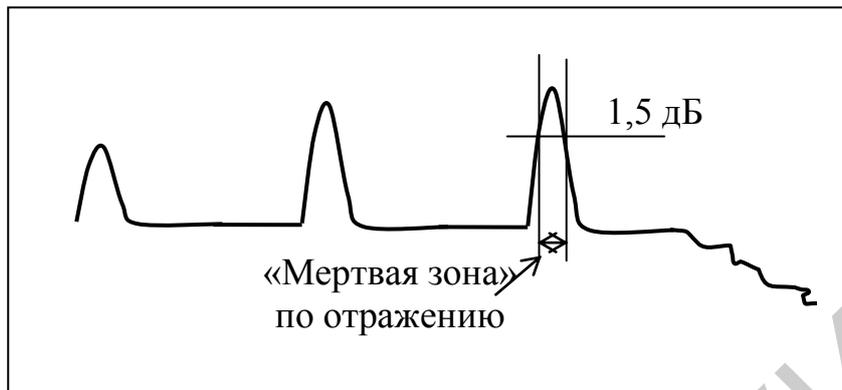


Рисунок 5.8 – Измерение «мертвой зоны» для отражений

«Мертвая зона» для затуханий представляет собой минимальное расстояние после френелевского отражения, где рефлектометр сможет точно измерить потери следующего за отражением дефекта. Детектор будет иметь достаточно времени для восстановления и, таким образом, сможет обнаружить и измерить потери на следующей неоднородности. Минимальное необходимое расстояние между неоднородностями, которое может зафиксировать детектор, измеряется от начала отражения до момента падения уровня отражения до 0,5 дБ выше уровня обратного рассеяния (рисунок 5.9).

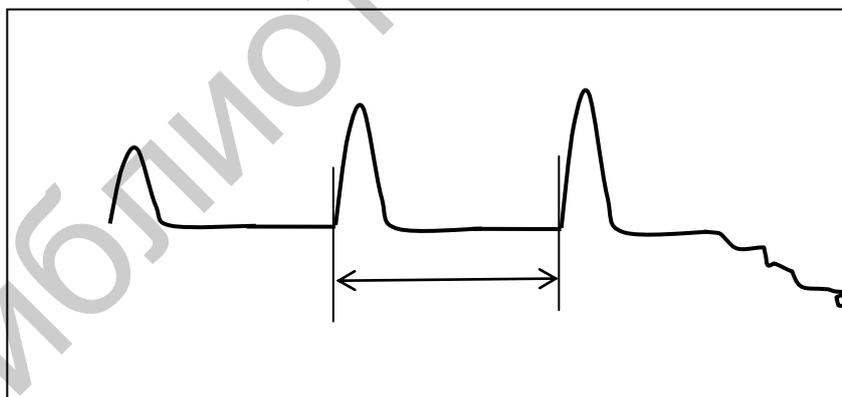


Рисунок 5.9 – Мертвая зона по затуханию

Одним из наиболее важных параметров рефлектометра является динамический диапазон. Он характеризует максимальный уровень потерь, который может проанализировать рефлектометр от уровня обратного рассеяния до указанного уровня шумов. Динамический диапазон связан с максимальной длиной волокна, которую можно измерить с помощью максимального импульса. Чем

больше динамический диапазон (в децибелах), тем большее расстояние может быть измерено.

На диапазон измеряемых расстояний оказывает влияние ширина зондирующего импульса. Чем уже импульс, тем меньше энергии он переносит и тем на меньшее расстояние он распространяется из-за потерь, присутствующих в тестируемом волокне (т. е. затуханий, коннекторов, сварок и т. п.). Импульс большой длительности используется для измерений параметров волокон большой протяженности.

Метод импульсной рефлектометрии реализуется следующими способами зондирования:

- коротким видеоимпульсом (микросекундная импульсная рефлектометрия);
- единичным перепадом напряжения (нано-, пикосекундная импульсная рефлектометрия).

Расстояние до неоднородности определяется по времени запаздывания отраженного сигнала ( $t_3$ ) относительно фронта зондирующего сигнала:

$$l_x = \frac{1}{2} V \cdot t_3 = \frac{1}{2} \frac{c}{\gamma} \cdot t_3, \quad (5.1)$$

где  $l_x$  – расстояние до неоднородности;

$V$  – скорость распространения электромагнитной волны в линии;

$c$  – скорость распространения электромагнитной волны в свободном пространстве;

$\gamma = c/V$  – коэффициент укорочения электромагнитной волны в линии.

Отсутствие отраженного сигнала свидетельствует о согласовании линии по волновому сопротивлению.

Характер и величина неоднородности определяются по форме отраженного сигнала в общем случае следующим образом:

$$\Gamma = \frac{\rho_x - \rho_0}{\rho_x + \rho_0} = -\frac{U_{\text{отр}}}{U_{\text{зонд}}}. \quad (5.2)$$

где  $\Gamma$  – коэффициент отражения;

$\rho_x$  – волновое сопротивление линии в месте неоднородности;

$\rho_0$  – волновое сопротивление линии;

$U_{\text{отр}}$ ,  $U_{\text{зонд}}$  – напряжения отраженного и зондирующего сигналов.

### 5.3 Описание лабораторного макета

Лабораторная установка (рисунок 5.10) состоит из блока рефлектометра, сменных оптических блоков, источника питания, соединительных кабелей и ПК.

В блоке рефлектометра расположены аккумуляторная батарея, импульсный преобразователь напряжения и электронные узлы для управления процессом измерения и накопления информации, а также сменный оптический блок, который крепится к корпусу блока рефлектометра.

Сменный оптический блок включает в себя оптическое приемное устройство, оптическое передающее устройство и оптический разветвитель. На передней панели сменного оптического блока установлен оптический разъем для подключения измеряемого оптического волокна.

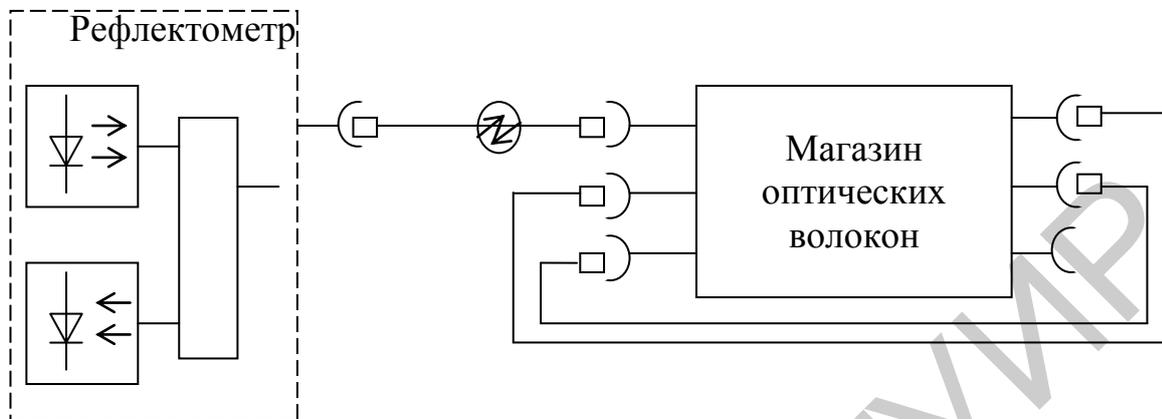


Рисунок 5.10 – Схема лабораторного макета

Принцип работы оптического рефлектометра основан на измерении сигнала обратного рэлеевского рассеяния при прохождении по оптическому волокну мощного одиночного оптического импульса. Слабый сигнал обратного рассеяния регистрируется чувствительным оптическим приемником, преобразуется в цифровую форму и многократно усредняется.

Структурная схема рефлектометра представлена на рисунке 5.11. В его состав входят:

- регистр Р для считывания данных с выхода аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и передачи их в процессор;
- АЦП для преобразования аналогового сигнала с выхода согласующего усилителя в цифровую форму;
- согласующий усилитель (СУ) для согласования уровней сигналов оптического приемного устройства и АЦП;
- устройство сдвига (УС) для увеличения пространственного разрешения рефлектометра путем создания дополнительного сдвига лазерного импульса относительно управляющего сигнала процессора;
- формирователь (Ф) для формирования сигнала запуска оптического передающего устройства;
- оперативное запоминающее устройство (ОЗУ);
- постоянное запоминающее устройство (ПЗУ);
- генератор (Г), формирующий тактовые сигналы процессора;
- устройство ввода-вывода (УВВ) для связи процессора с ПК;
- процессор, вырабатывающий сигналы управления блоками рефлектометра;

- сменный оптический блок (СОБ), состоящий из оптического передающего устройства (ОПДУ), оптического приемного устройства (ОПрУ) и оптического разветвителя (ОР).

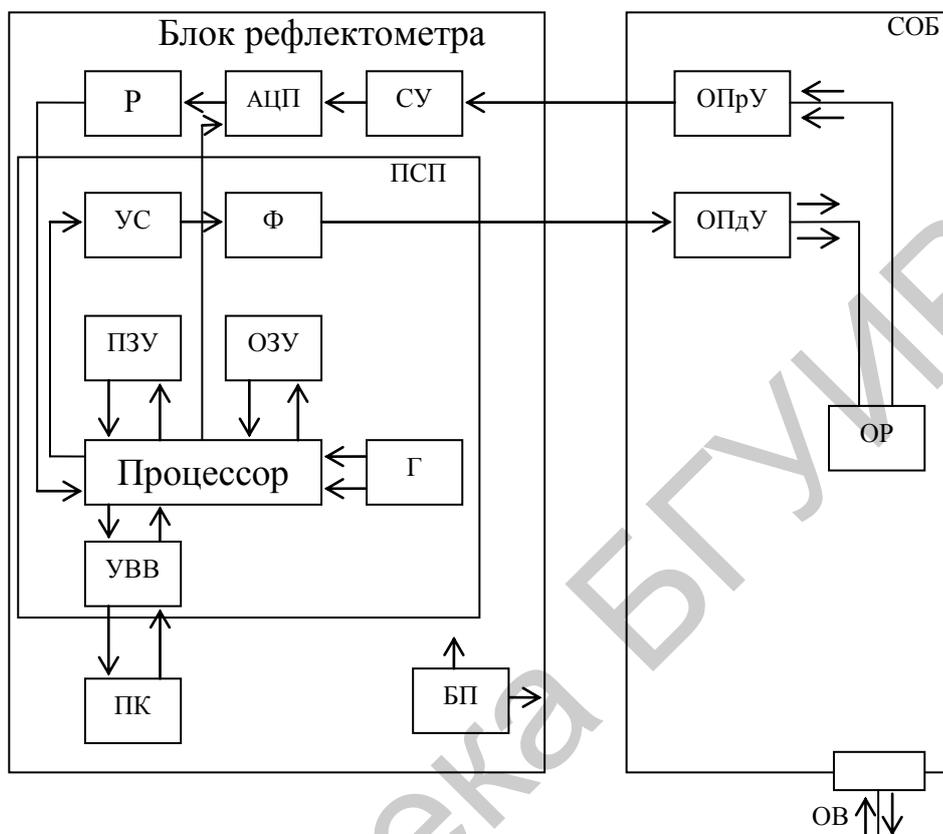


Рисунок 5.11 – Структурная схема рефлектометра

Оптическое передающее устройство содержит мощный лазерный диод и генерирует оптические импульсы заданной длительности. Оптическое приемное устройство регистрирует и усиливает рассеянный сигнал. Оптический разветвитель предназначен для ввода импульсов в исследуемое оптическое волокно и подачи сигнала обратного рассеяния в ОПрУ.

В соответствии с командами управляющей программы процессор вырабатывает код для запуска оптических импульсов с помощью блоков УС, Ф и ОПДУ. При прохождении импульса по оптическому волокну часть его энергии рассеивается назад и поступает на ОПрУ, в котором преобразуется в электрический сигнал и усиливается. Длительность сигнала обратного рассеяния на выходе ОПрУ  $\tau$  равняется двойному времени прохождения света по оптическому волокну  $t$ . Этот сигнал через согласующий усилитель СУ поступает на вход АЦП и преобразуется в цифровую форму. За один период запуска оптических импульсов АЦП считывает 16 384 отсчета измеряемого сигнала. Отсчет, взятый в момент времени  $t$  относительно момента запуска оптического импульса, соответствует сигналу, рассеянному от точки ОВ, находящейся на расстоянии

$$z = \frac{ct}{2n}, \quad (5.3)$$

где  $c$  – скорость света в вакууме;

$n$  – показатель преломления сердцевины оптического волокна.

Затухание, обусловленное рассеянием, можно определить с помощью следующего выражения:

$$\alpha_p = 4,34 \frac{8\pi^3 (n_1 - 1)}{3\lambda^4} \cdot k\beta T 10^3, \quad (5.4)$$

где  $T = 1500$  К – температура затвердевания стекла при вытяжке;

$k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – постоянная Больцмана;

$\beta = 8,1 \cdot 10^{-11}$  м<sup>2</sup>/Н – коэффициент сжимаемости кварца;

$n_1$  – показатель преломления сердцевины волокна.

Таким образом, за один период запуска оптического импульса измеряются сигналы, пришедшие от большого числа точек оптического волокна. Для точного измерения сигнала обратного рассеяния осуществляется многократный запуск оптического импульса. Процессор усредняет отсчеты, соответствующие одинаковым точкам оптического волокна, что приводит к увеличению отношения сигнал/шум. После нескольких таких циклов полученные значения сигнала из ОЗУ передаются в ПК, запоминаются и отображаются на экране. Затем процесс измерения, усреднения и очищения регистров ОЗУ повторяется вновь. Таким образом, отображается вся рефлектограмма оптического волокна.

Для увеличения точности и динамического диапазона измерения можно увеличить число усреднений, установив в режиме измерения с усреднением величину  $N_{av} > 1$ . Эта величина может быть выбрана равной 1, 2, 4, 8 и так далее до 1024. При этом время измерения пропорционально увеличивается.

С помощью рефлектометра можно получить графическое представление линии, измерив уровень излучения, которое вернулось после отправления импульса.

Излучение имеет два типа: постоянный низкий уровень, возникающий в волокне вследствие рэлеевского рассеяния, и пиковое отражение высокой мощности в точках соединения, вызванное френелевским отражением. Рэлеевское рассеяние используется для расчета уровня затухания в волокне в виде функции от расстояния (выражается в децибелах на километр (дБ/км)). Френелевское отражение позволяет обнаружить физические дефекты в линии.

## 5.4 Лабораторное задание

5.4.1 Изучить устройство и принцип действия оптического рефлектометра.

5.4.2 Измерить скорость распространения света в оптоволокне.

## 5.5 Порядок выполнения работы

### 5.5.1 Подготовка рефлектометра к работе

На передней панели блока рефлектометра находится выключатель СЕТЬ с индикаторным светодиодом. Зеленый индикаторный светодиод ЗР БАТ показывает заряд аккумуляторной батареи, горящий красный индикаторный светодиод РР БАТ свидетельствует о том, что аккумуляторная батарея разряжена.

Справа расположен сменный оптический блок (СОБ).

На задней панели расположены разъем  $=12\text{ V}$  для подключения кабеля питания рефлектометра; разъем RS232 для подключения интерфейсного кабеля для соединения с ПК; крышка гнезда аккумуляторной батареи БАТ.

5.5.1.1 Соедините рефлектометр с ПК. Для этого соедините блок рефлектометра интерфейсным кабелем, подключив его к разъему RS232 на задней панели рефлектометра и к разъему RS232 на ПК (порт COM-1 или COM-2).

5.5.1.2 Подключите к рефлектометру измеряемое оптическое волокно через оптический разъем на передней панели сменного оптического блока.

5.5.1.3 Включите рефлектометр с помощью выключателя на передней панели блока рефлектометра; при этом должен загореться индикаторный светодиод СЕТЬ.

Горящий зеленый светодиод ЗР БАТ свидетельствует о процессе заряда аккумуляторной батареи, встроенной в блок рефлектометра. После заряда батареи светодиод погаснет.

При питании рефлектометра от встроенной аккумуляторной батареи ее разряд показывает светодиод РР БАТ.

### 5.5.2 Проведение измерений

5.5.2.1 Включите рефлектометр.

5.5.2.2 Включите программу: ПУСК → Все программы → *Oracle VM VirtualBox* → *Oracle VM VirtualBox*.

5.5.2.3 Нажмите кнопку СТАРТ (стрелка зеленого цвета). Произойдет загрузка виртуальной системы.

5.5.2.4 После загрузки виртуальной системы *XP* выберите в нижнем левом углу ярлык *OP-2-2* и активируйте данное приложение с помощью мыши.

5.5.2.5 Подключите рефлектометр.

5.5.2.6 Установите параметры измерения. Для этого выберите пункт меню *Измерение* → *Параметры*. На экране появится окно, в котором необходимо установить численные значения соответствующих параметров.

**Тип оптоволокна (ОВ) – длина волны:** указывается тип сменного оптического блока (СОБ), установленного в рефлектометре. Определение типа блока производится программой при инициализации рефлектометра и отображается автоматически. При этом для СОБ *ММ-0,85* мкм, *ММ-1,31* мкм, *ОМ-1,31* мкм и *ОМ-0,55* мкм эта строка недоступна. Если установлен СОБ на две длины волны, то отображается *SMD-1,31* или *SMD-1,55* для ОМ СОБ и *MMD-0,85* или *MMD-1,31* для ММ СОБ, и оператор выбирает в этой строке длину волны.

**Коэффициент обратного рассеяния (ВС)** – доля мощности оптического импульса в децибелах, рассеиваемая в ОВ и распространяющаяся к его началу.

В программном обеспечении рефлектометра установлены следующие значения коэффициента обратного рассеяния:

- минус 81 дБ для ОМ ОВ и длины волны 1,55 мкм;
- минус 80 дБ для ОМ ОВ и длины волны 1,31 мкм;
- минус 75 дБ для ММ ОВ и длины волны 1,31 мкм;
- минус 72 дБ для ММ ОВ и длины волны 0,85 мкм.

Коэффициент обратного рассеяния можно измерять с шагом 0,1 дБ.

**Показатель преломления ОВ ( $n$ )** – значение показателя преломления ОВ; изменяется с шагом 0,00001.

В программном обеспечении рефлектометра установлены следующие значения показателя преломления:

- 1,4682 для ОМ ОВ и длины волны 1,55 мкм;
- 1,4675 для ОМ ОВ и длины волны 1,31 мкм;
- 1,486 для ММ ОВ и длины волны 1,31 мкм;
- 1,490 для ММ ОВ и длины волны 0,85 мкм.

**Диапазон расстояний ( $L_{\max}$ )** – максимальное значение измеряемого расстояния; может принимать значения 2, 5, 10, 20, 40, 80, 120, 160, 240 мкм и устанавливается оператором. Этот параметр определяет период запуска зондирующих импульсов, который должен быть больше двойного времени прохождения оптического импульса по оптоволокну. Значение  $L_{\max}$  должно превышать возможную длину измеряемой линии передачи.

**Начало участка ( $L_1$ )** – расстояние от начала оптоволокну до начала измеряемого участка; может принимать любые значения в пределах от 0 до  $L_{\max}$ .

**Конец участка ( $L_2$ )** – расстояние от начала оптоволокну до конца измеряемого участка; может принимать любые значения в пределах от  $L_1$  до  $L_{\max}$ .

**Разрешение ( $dL$ )** – расстояние между двумя отсчетами (интервал дискретизации) рефлектометра.

**Длительность зондирующего импульса ( $T_p$ )** – значение длительности зондирующего импульса; может принимать значения 10, 30, 90, 300, 1000, 3000, 10 000, 20 000 нс. Диапазон допустимых значений  $T_p$  зависит от выбранного значения  $L_{\max}$  и управляется автоматически.

#### 5.5.2.7 Измерение с усреднением.

**Число усреднений рефлектограммы 4096** –  $N_{av}$  определяет общее число усреднений рефлектограммы к памяти ПК в режиме работы с усреднением. Вводимое значение  $N_{av}$  может принимать значения 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256, 512, 1024.

**Длительность измерений (мин:сек)** задает длительность процесса измерения с усреднением.

Если в режиме измерения с усреднением оператор задает число усреднений рефлектограммы, то при этом высвечивается примерная длительность процесса измерения; если оператор задает длительность процесса измерения, то

автоматически определяется, какому количеству усреднения рефлектограммы это соответствует.

#### 5.5.2.8 Измерение без усреднения.

**Период обновления рефлектограмм** определяет период обновления отображения рефлектограммы на экране при измерениях в режиме реального времени; принимает значения 0,2; 0,5; 1,0; 2,0 с.

#### 5.5.2.9 Пороговые значения для автоматического анализа рефлектограммы.

**Затухание в соединении ( $LT$ )** – пороговое значение затухания в неоднородности (измеряется в децибелах).

Неоднородности, затухание в которых превышает заданное пороговое значение, отображаются в таблице отметок при автоматическом анализе рефлектограммы. В программном обеспечении установлено значение 0,1 дБ для одномодовых сменных оптических блоков и значение 0,2 дБ для многомодовых сменных оптических блоков.

**Коэффициент отражения ( $RT$ )** – пороговое значение коэффициента отражения (измеряется в децибелах). Неоднородности с коэффициентом отражения выше этого порогового значения отображаются в виде отметок при автоматическом анализе рефлектограммы. В программном обеспечении установлено значение минус 50 дБ.

**Конец ОВ ( $ET$ )** – пороговое значение затухания (измеряется в децибелах). Первая неоднородность с затуханием, превышающим пороговое значение, определяется при автоматическом анализе рефлектограммы как конец ОВ; все последующие неоднородности игнорируются. В программном обеспечении установлено значение 6 дБ.

**Коэффициент затухания ( $ST$ )** – пороговое значение коэффициента затухания участка (измеряется в децибелах на километр). Превышение порогового значения коэффициента затухания обозначается звездочкой в таблице отметок. В программном обеспечении установлены следующие значения:

- 0,25 дБ/км для ОМ ОВ и длины волны 1,55 мкм;
- 0,4 дБ/км для ОМ ОВ и длины волны 1,31 мкм;
- 1,0 дБ/км для ММ ОВ и длины волны 1,31 мкм;
- 3,0 дБ/км для ММ ОВ и длины волны 0,85 мкм.

#### 5.5.2.10 Высокое разрешение.

В этом режиме увеличена полоса пропускания оптического приемника, что дает возможность уменьшить мертвую зону и лучше различать близко расположенные неоднородности. В этом режиме увеличиваются шумы оптического приемника.

#### 5.5.2.11 Уменьшенная мощность лазера.

Включается режим измерения рефлектограммы с уменьшенной мощностью излучения лазера. Этот режим целесообразно использовать для измерения больших коэффициентов отражения от неоднородностей.

Значения параметров измерения, устанавливаемые оператором, зависят от предполагаемых параметров ОВ: длины и среднего затухания.

При измерении этих характеристик с помощью оптического рефлектометра предельная величина измеряемого полного затухания увеличивается пропорционально длительности оптического импульса, но одновременно ухудшается пространственное разрешение рефлектометра, т. к. пространственная длина оптического импульса связана с его длительностью соотношением

$$L_p = c \frac{T_p}{2n}, \quad (5.5)$$

где  $c$  – скорость света в вакууме.

### 5.5.3 Измерение расстояния до неоднородности

5.5.3.1 Подключите рефлектометр к магазину волоконных световодов.

5.5.3.2 При измерении расстояния до неоднородности маркер устанавливается на ее левый край, и расстояние определяется по соответствующей строке таблицы информационной панели.

Для более точного измерения расстояния рекомендуется растянуть рефлектограмму по горизонтали и вертикали.

Точность определения расстояния по рефлектограмме зависит от правильности установки значения показателя преломления ОВ. Если оно неизвестно, но известна точно длина измеряемого оптоволокна, то можно установить любой маркер на конец ОВ и скорректировать показатель преломления так, чтобы длина ОВ, измеренная на рефлектограмме, совпадала с известной.

5.5.3.3 Для корректировки значения показателя преломления ОВ необходимо выбрать пункт меню **Режим** → **Показатель преломления** или нажать клавишу **N**. На экране появится окно, в котором указываются положения маркеров и предоставляется возможность изменить значение показателя преломления. При изменении показателя преломления происходит перерасчет положения маркеров. Нажатие кнопки **OK** фиксирует новый показатель преломления ОВ для текущей рефлектограммы; нажатие кнопки **Отмена** или клавиши **ESC** возвращает его исходное значение.

### 5.5.4 Измерение затухания по двум точкам

5.5.4.1 При измерении затухания по двум точкам или для возвращения в этот режим измерения выбрать пункт меню **Режим** → **Измерение затухания по двум точкам** или нажать клавишу **P**.

5.5.4.2 Установить маркеры на концах измеряемого участка и прочитать его характеристики в верхней таблице информационной панели: протяженность участка **LB-LA** в километрах, затухание между точками пересечения маркеров с рефлектограммой в децибелах и величину коэффициента затухания в децибелах на километр.

При измерении затухания всего ОВ левый маркер должен быть установлен за пределами мертвой зоны.

5.5.5 Выведение формулы для расчета скорости распространения света в оптоволокне

5.5.6 Расчет скорости распространения света в оптоволокне и оценка погрешности ее измерения

## 5.6 Контрольные вопросы

- 1 Каковы причины затухания оптического излучения в ОВ?
- 2 Какими методами можно измерить затухание в оптоволокне?
- 3 Как связано затухание со скоростью распространения света в оптоволокне?
- 4 Перечислите основные типы отражения, используемые в оптических рефлектометрах.
- 5 Поясните принцип действия оптического рефлектометра.
- 6 В чем причина френелевского рассеяния?
- 7 В чем причина рэлеевского рассеяния?

Библиотека БГУИР

## СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет по лабораторной работе оформляется на стандартных листах бумаги формата А4. Правила оформления отчета приведены в стандарте БГУИР СТП 01-2013 «Дипломные проекты (работы). Общие требования».

Отчет должен содержать титульный лист и основной текст: цель работы, лабораторное задание, информацию о средствах измерений, используемых при выполнении работы (таблица 6.1), структурные схемы приборов, результаты экспериментов и расчетов (в форме таблиц), расчетные формулы и выводы по каждому пункту исследований. Форма таблиц разрабатывается самостоятельно с учетом лабораторного задания. Оценка погрешностей измерения обязательна.

Таблица 6.1

Наименование прибора	Тип прибора	Заводской номер	Основные технические характеристики

## ЛИТЕРАТУРА

1 Субботин, Е. А. Методы и средства измерения параметров оптических телекоммуникационных систем / Е. А. Субботин. – М : Горячая линия – Телеком, 2013.

2 Кирилловский, В. К. Оптические измерения / В. К. Кирилловский. – СПб. : ГИТМО (ТУ), 2003.

3 Красковский, Е. Я. Расчет и конструирование механизмов приборов и вычислительных систем / Е. Я. Красковский, Ю. Л. Дружинин, Е. М. Филатова. – М. : Высш. шк., 1991.

4 Лазерные технологии : учеб. пособие к лабораторным работам / В. Н. Виноградова [и др.]. – СПб. : ИТМО, 2007.

5 ГОСТ 15093–90. Лазеры и устройства управления лазерным излучением. Термины и определения. – Введ. 1992–01–01. – М. : Изд-во стандартов, 1990.

6 ГОСТ ИСО 11145–2007. Оптика и фотоника. Лазеры и лазерное оборудование. Словарь и буквенные обозначения. – Введ. 2007–12–01. – М. : Изд-во стандартов, 2006.

Библиотека БГУИР

*Учебное издание*

**Дерябина** Марина Юрьевна

**ЛАЗЕРНЫЕ И ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ  
ПЕРЕДАЧИ, ЛОКАЦИИ И ИЗМЕРЕНИЯ.  
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

ПОСОБИЕ

Редактор *М. А. Зайцева*

Корректор *Е. И. Герман*

Компьютерная правка, оригинал-макет *А. А. Луцкова*

Подписано в печать 10.05.2017. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».  
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 3,84. Уч.-изд. л. 4,0. Тираж 100 экз. Заказ 270.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования  
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий №1/238 от 24.03.2014,  
№2/113 от 07.04.2014, №3/615 от 07.04.2014.

ЛП №02330/264 от 14.04.2014.

220013, Минск, П. Бровки, 6