# МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «УЛЬЯНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

Ульянов Александр Викторович

# ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ДВУХКАНАЛЬНЫХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СПЕКТРА ОПТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

Специальность: 05.11.01 – Приборы и методы измерения по видам измерения (электрические измерения)

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

> Научный руководитель – кандидат технических наук, доцент Рогов Виктор Николаевич

Ульяновск – 2016

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение
Глава 1 Методы и средства измерения параметров спектра оптического
излучения12
1.1 Спектральные параметры оптического излучения 12
1.2 Средства измерения параметров спектра оптического излучения 15
1.3 Задачи оперативного контроля параметров спектра узкополосного
оптического излучения
1.3.1 Источники узкополосного оптического излучения
1.3.3 Задачи контроля параметров узкополосного оптического излучения 27
в условиях реального времени
1.4 Измерение центральной длины волны узкополосного оптического излучения
двухканальным фотоэлектрическим преобразователем
Выводы
Глава 2 Измерение параметров спектра оптического излучения
двухканальными фотоэлектрическими преобразователями
2.1 Постановка задачи
2.3 Методическая погрешность определения центральной длины волны оптического
излучения двухканальным фотоэлектрическим преобразователем 40
с гауссовыми спектральными характеристиками фотоприемников 40
2.4 Измерение параметров спектра узкополосного оптического излучения
двухканального фотоэлектрического преобразователя с линейными
спектральными характеристиками фотоприемников 44

2.5 Погрешность измерения параметров узкополосного оптического излучения преобразователем двухканальным фотоэлектрическим С линейными 2.8 Влияние шума на результат измерения параметров спектра оптического Глава 3 Экспериментальная установка для измерения параметров спектра узкополосных оптических сигналов ...... 55 3.1 Экспериментальная установка на основе двухканального фотоэлектрического преобразователя с линзовой оптической схемой ...... 55 3.2 Экспериментальная установка с оптоволоконной схемой деления 3.4 Алгоритм работы микроконтроллера и калибровка экспериментальной 3.5 Инструментальная погрешность экспериментальной установки с Глава 4 Исследование метрологических характеристик экспериментальной двухканальным фотоэлектрическим преобразователем установки С И 4.1 Результаты сравнительных измерений параметров спектра излучения 4.3 Погрешность аппроксимации спектра СИД функциями различного вида ...... 77

4.2	Исследование	характеристик	экспериментальной	установки	c
опт	оволоконной схемо	ой деления оптиче	еского излучения	8	30
4.3	Исследование сдви	ига центральной д	ілины волны излучения	светодиода п	іри
ИЗМ	енении температур	ы кристалла в дин	амическом режиме рабо	оты 8	36
4.5	Применение измер	ителей параметро	в узкополосного оптиче	ского излучен	łИЯ
с де	ухканальным фото	электрическим пр	еобразователем	ç	96
Вы	зоды			ç	<del>)</del> 8
Зак	лючение				)0
СП	ИСОК ЛИТЕРАТУР	ЪІ			)1
При	иложение А				13
При	иложение Б				15

#### Введение

Актуальность проблемы. В различных областях науки, техники и технологий в качестве технологического воздействия и носителя информации широко используется оптическое излучение. Контроль параметров спектра излучения, таких как центральная длина волны и ширина спектра, представляет важную и довольно сложную техническую задачу. Такую задачу необходимо решать, например, при контроле светотехнических характеристик источников оптического излучения, в системах оптической связи для контроля центральной длины волны оптического передатчика; в системах индикации и отображения информации для контроля цветности источников светового сигнала; в медицине при определении параметров люминесцентного свечения биологических тканей и в других областях.

Параметры спектра оптического излучения ИХ изменение И под воздействием различных факторов содержат в себе важную информацию о свойствах и параметрах источника излучения и исследуемого объекта. Например, по изменению спектра светоизлучающих диодов и полупроводниковых лазеров, можно не только проводить отбраковку изделий, но и получить информацию о качестве температуре кристалла, материалов И элементов конструкций, использованных при производстве контролируемых образцов.

Во многих технических и технологических приложениях используются узкополосное оптическое излучение. Для определения параметров такого излучения необходима прецизионная аппаратура. В настоящее время для целей измерения параметров узкополосного оптического излучения используют спектральные методы с использованием дисперсионных элементов, как наиболее точные. Быстродействие приборов на основе спектрального метода, как правило, не превышает 10<sup>3</sup> измерений в секунду. Кроме того, спектральные приборы являются дорогостоящими и довольно сложными в настройке и эксплуатации; вес и габариты спектральных приборов ограничивают их применение в мобильных измерительных системах.

В большинстве практических приложений необходимо контролировать параметры спектра оптического излучения в динамическом режиме, при быстропротекающих процессах. Такие задачи возникают, например, в системах оптической связи со спектральным уплотнением, при работе источников оптического излучения в импульсных режимах и измерении параметров коротких импульсов оптического излучения, при кратковременном воздействии на источник оптического излучения внешних факторов и др. При этом требования к быстродействию точности измерения параметров постоянно И спектра построенных Низкое быстродействие приборов, возрастают. на основе спектрального метода, ограничивает возможность применения этих средств для решения таких задач.

Методы и средства измерения параметров спектра оптического излучения в динамических режимах, с применением многоэлементных фотоприемников, таких как ПЗС- и КМОП-линейки и матрицы, развиты в работах А.А. Вилисова, А.М.Филачева, Г.И. Леоновича, В.М. Смелкова, R. Willsch, W. Ecke и др. Однако достигнутый уровень быстродействия таких средств с учетом времени считывания и обработки сигналов фотоприемников составляет в лучшем случае десятки микросекунд.

В последние годы в работах А.В. Крайского, Т.Т. Султанова, Т.В. Мироновой И других авторов [45,46,71] активно разрабатываются быстродействующие методы и средства измерения параметров спектра с использованием двух фотоприемников с различающимися спектральными характеристиками. Однако, в известных устройствах, основанных на этом принципе, реализуется алгоритм измерения только центральной длины волны излучения [71]. Результаты исследований влияния электрических шумов фотоприемников и отклонения их спектральных характеристик от заданной формы на точность измерения параметров спектра в литературе не приводятся. Оценки инструментальной погрешности разработанных устройств отсутствуют. Вместе с тем такие устройства находят все более широкое применение.

Таким образом, повышение точности быстродействующих двухканальных фотоэлектрических преобразователей для измерения параметров спектра оптического излучения, обладающих приемлемой точностью в широком диапазоне параметров оптического излучения, является актуальной задачей.

**Цель исследования** – повышение точности и расширение функциональных возможностей двухканальных фотоэлектрических преобразователей (ДФЭП) для измерения параметров спектра узкополосного оптического излучения.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие основные задачи:

1. Разработать и исследовать алгоритмы определения в едином измерительном цикле центральной длины волны и ширины спектра оптического излучения по сигналам двух фотоприемников с различающимися спектральными характеристиками.

2. Оценить погрешности измерения параметров спектра оптического излучения двухканальным фотоэлектрическим преобразователем при различных способах аппроксимации спектральных характеристик фотоприемников.

3. Методами компьютерного моделирования оценить влияние аддитивных и мультипликативных электрических шумов фотоприемников и измерительных каналов двухканальных фотоэлектрических преобразователей на погрешность определения параметров спектра оптического излучения.

4. Разработать экспериментальную установку на основе двухканального фотоэлектрического преобразователя для измерения параметров спектров оптических сигналов в динамическом режиме и исследовать ее метрологические характеристики.

5. Провести экспериментальное исследование и оценку метрологических характеристик разработанной установки на примере измерения параметров спектра светодиодов в динамических режимах их работы.

Методы исследований. При решении поставленных задач использовались методы теории электрических цепей, методы обработки электрических сигналов,

теории случайных процессов, теории погрешностей, теории вероятности и математической статистики, численные методы с применением ЭВМ, методы компьютерного моделирования.

#### Научная новизна.

1. Впервые предложены и исследованы оригинальные алгоритмы измерения в едином измерительном цикле центральной длины волны и ширины спектра оптического излучения по сигналам двух фотоприемников с различающимися гауссовыми и линейными спектральными характеристиками.

2. Проведена оценка методической погрешности измерения длины волны монохроматического оптического излучения двухканальным фотоэлектрическим преобразователем с различающимися гауссовыми и линейными спектральными характеристиками фотоприемников.

3. Проведен анализ точности аппроксимации спектральных характеристик реальных оптических фильтров различными функциями. Показано, что, среднеквадратическое отклонение (СКО) аппроксимации спектральных характеристик реальных светофильтров сплайнами третьего порядка в 2,2 раза меньше по сравнению с СКО аппроксимации гауссовой функцией.

4. Методами компьютерного моделирования исследовано влияние мультипликативных и аддитивных составляющих шума фотоприемников и измерительных каналов на погрешность измерения центральной длины волны и ширины спектра. Установлено, что погрешность измерения параметров спектра излучения, обусловленная аддитивными шумами, минимальна при центральной длине волны излучения, лежащей в середине между максимумами спектральных характеристик фотоприемников.

5. Показано, что спектр излучения светодиодов (СИД) более точно описывается суперпозицией двух гауссовых функций; такая аппроксимация позволяет уменьшить погрешность измерения параметров спектра светодиодов двухканальным фотоэлектрическим преобразователем в 3 раза по сравнению с аппроксимацией спектра СИД одной гауссианой.

6. Предложен способ измерения теплового импеданса СИД по изменению спектра излучения при импульсной модуляции рабочего тока СИД.

#### Практическая ценность и реализация результатов работы.

Проведенные исследования позволили повысить точность измерения центральной длины волны и ширины спектра узкополосного оптического излучения двухканальным фотоэлектрическим преобразователем со спектральными характеристиками гауссовой формы. На основе проведенных исследований:

- разработана экспериментальная установка на основе ДФЭП для измерения параметров спектра оптического излучения СИД в динамическом режиме;
- предложен способ измерения теплового импеданса СИД на основе изменения спектра излучения СИД при импульсной модуляции рабочего тока СИД;
- получены переходные тепловые характеристики и определены тепловые параметры СИД по сдвигу их спектра в импульсном режиме работы;

Результаты, полученные в диссертационной работе, могут быть полезны при разработке оптоэлектронных средств, предназначенных для оперативного контроля параметров спектра узкополосного излучения (например, на выходном контроле качества светодиодов).

#### На защиту выносятся:

1. Алгоритмы измерения центральной длины волны и ширины спектра узкополосного оптического излучения, аппроксимируемого гауссовой функцией, двумя фотоприемниками с гауссовыми и линейными спектральными характеристиками.

2. Оценки методической погрешности измерения центральной длины волны монохроматического оптического излучения двухканальным фотоэлектрическим преобразователем с гауссовыми и линейными спектральными характеристиками фотоприемников.

3. Результаты математического моделирования влияния аддитивных и мультипликативных электрических шумов измерительных каналов двухканального

фотоэлектрического преобразователя со спектральными характеристиками фотоприемников гауссовой формы на точность измерения параметров спектра оптического излучения.

4. Рекомендации по повышению точности двухканальных фотоэлектрических преобразователей путем выбора функции, аппроксимирующей спектральные характеристики реальных оптических фильтров с минимальной погрешностью.

5. Рекомендации по снижению погрешности измерения параметров спектра СИД двухканальным фотоэлектрическим преобразователем путем выбора комбинации функций, аппроксимирующей спектры СИД с минимальным СКО.

6.Способ измерения теплового импеданса светодиодов по амплитуде изменения центральной длины волны излучения при импульсной модуляции рабочего тока светодиода.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на Всероссийской (до 2014 года – региональной) школе-семинаре «Актуальные проблемы физической и функциональной электроники» (г. Ульяновск, 2010 г., 2011 г., 2013 г., 2014 г., 2015 г.), на Всероссийской конференции молодых ученых «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика» (г. Саратов, 2012 г., 2013 г., 2014 г.), Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы создания и эксплуатации радиотехнических систем» (г. Ульяновск, 2010 г., 2011 г., 2013 г., 2015 г.), Международной научнотехнической конференции «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения» (г. Москва, INTERMATIC-2013 г., 2014 г., 2015 г.).

#### Реализация и внедрение результатов работы.

Разработанные алгоритмы и быстродействующие средства измерения параметров спектра узкополосного оптического излучения использованы при выполнении проекта №1514 «Моделирование и исследование теплоэлектрических процессов в гетероструктурах светоизлучающих приборов при их работе в динамических режимах» базовой части государственного задания в части научной деятельности Задания 2014/232 Ульяновского государственного технического

университета, а также в УФИРЭ им. В. А. Котельникова РАН при выполнении НИР по договору № И2014-15 от 02 июля 2014 г. на выполнение составной части прикладных научных исследований (проекта) по соглашению о предоставлении субсидии от 05.06.2014 г. 14.607.21.0010 (уникальный идентификатор RFMEFI60714X0010) между Минобрнауки РФ и НТЦ микроэлектроники РАН по ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» (мероприятие 1.3).

Личный вклад автора. Основные научные результаты получены автором лично. Реализация ряда экспериментов осуществлялась при содействии сотрудников кафедр «Радиотехника» и «Радиотехника, опто- и наноэлектроника» Ульяновского государственного технического университета.

**Публикации.** По теме диссертационной работы опубликовано 26 научных работы, включая 10 научных статей (в том числе 6 статей в изданиях из перечня ВАК), 16 тезисов докладов на научно-технических конференциях и семинарах.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 154 наименования. Общий объем диссертации составляет 115 страниц и содержит 9 таблиц, 42 рисунка, 2 приложения.

# Глава 1 Методы и средства измерения параметров спектра оптического излучения

#### 1.1 Спектральные параметры оптического излучения

Согласно определению оптическое излучение это электромагнитное излучение с длиной волны в диапазоне от 1 нм до 1 мм. К оптическому излучению, помимо воспринимаемого человеческим глазом видимого излучения, относятся инфракрасное излучение и ультрафиолетовое излучение. Термином «свет» зачастую обозначают лишь видимый поддиапазон оптического излучения.

Существует несколько подходов к описанию свойств оптического излучения: на основе энергетического представления, на основе понятия цветности, на основе спектрального описания и др.

В основе понятия цветности лежит идея о представлении спектрального состава оптического излучения в виде трехмерного вектора некоторого цветового пространства [1, 6, 40]. При этом задача определения цвета сводится к нахождению координат вектора цвета в данном цветовом пространстве. Выбор цветового пространства (колориметрической системы) обусловлен конкретными физическими условиями определения цвета.

Наиболее полная информация о цвете излучения заключена в функции его спектрального распределения, однако взаимно однозначного соответствия между цветом излучения и его спектральным составом не существует. По современным представлениям для достаточно полного описания цвета необходимо не менее трех параметров излучений [32, 78]. На основе этих представлений были разработаны различные системы отображения цвета, подробную информацию о которых можно найти в [29, 31, 59, 101, 111, 124, 131, 141]. Одним из наиболее распространенных способов описания цвета является его трехкомпонентное представление, основывающееся на предположении, что любой цвет можно получить смешением в различных пропорциях трех основных цветов:

$$C = R_c \cdot R + G_c \cdot G + B_c \cdot B , \qquad (1.1)$$

где R, G и B – единичные количества основных цветов,  $R_C$ ,  $G_C$  и  $B_C$  – количества основных цветов, необходимые для получения цвета C.

Эта идея явилась основой создания известной цветовой системы ХҮZ [22, 58].

В любой колориметрической системе цветовой треугольник можно строить в трехлинейной или прямоугольной системе координат. Наибольшее применение получил прямоугольный треугольник с координатами цветности X и У.

Система XYZ нашла широкое применение в измерениях цвета. Однако в процессе ее использования были выявлены некоторые недостатки: неточность вычисления цветности некоторых отражающих образцов и несоответствие этих вычислений результатам субъективных измерений цвета.

Существуют и другие системы представления цветов, например, равноконтрастный график Джадда, цветовые модели CIELAB и CIELUV и другие системы, основанные на вышеописанном представлении [58] и [31].

В случае узкополосного или монохроматического излучения использование цветовых систем не всегда целесообразно, поскольку в этом случае доминирует излучение на одной длине волны, и при определении цветовых компонентов появляются значительные погрешностей.

Наряду с цветовыми системами оптическое излучение может быть описано спектральным способом. В этом случае излучение характеризуется формой спектра, длиной волны в максимуме (или центральной длиной волны) и шириной заданному уровню. Для получения функции спектра ПО спектрального распределения, как источника наиболее полной информации об излучении, характеристика быть аппроксимирована математической реальная может функцией, имеющей наименьшее среднеквадратическое отклонение от реальной характеристики. Заметим, что используя полученную математическую функцию спектра можно перейти к координатам цвета в одной из цветовых систем.

Спектры реальных источников оптического излучения, используемых для освещения или для световой обработки материалов в технологических процессах, весьма разнообразны: от широкого спектра ртутных ламп, до спектра

инфракрасного излучения раскаленных металлических нитей. Во многих технических и исследовательских приложениях широкое применение получили источники узкополосного оптического излучения, основная мощность которого сконцентрирована в относительно узкой полосе длин волн излучения.

По определению, сигнал называется узкополосным, если его спектральная плотность значимо отлична от нуля лишь в пределах частотных интервалов шириной  $\Delta f$ , образующих окрестности точек вокруг центральной частоты  $f_0$ , причем должно выполняться условие  $\Delta f/f_0 <<1$ . Данное правило применимо и для оптического излучения. Оптическое излучение можно считать узкополосным, если полоса длин волн оптического излучения много меньше его центральной длины волны, т.е. должно выполняться соотношение  $\Delta\lambda/\lambda_0 <<1$ . Типичный спектр узкополосного оптического излучения представлен на рисунке 1.1.

Как уже отмечалось для описания спектра узкополосного оптического излучения в большинстве практических случаев достаточно задать форму спектральной характеристики (как правило, симметричную) и два параметра: центральную длину волны и ширину спектра излучения. Для более точного описания спектра узкополосного оптического излучения реальных источников необходимо учитывать его асимметрию. При рассмотрении, например, спектра полупроводникового лазерного диода (рисунок 1.1) можно заметить, что правое крыло спектральной характеристики имеет большую крутизну, чем левое.



Рис. 1.1. Спектр узкополосного оптического излучения лазерного диода

Аналогичные отклонения спектральной характеристики наблюдаются и у других источников узкополосного оптического излучения.

#### 1.2 Средства измерения параметров спектра оптического излучения

Современная цветоизмерительная аппаратура строится на базе трехкомпонентной модели распознавания цвета [78]. Ее основу составляет фотоэлектрический преобразователь, состоящий из трех фотоприемников со спектральными характеристиками  $S_i$  ( $\lambda$ ) гауссова вида, максимумы которых лежат в синей, зеленой и красной областях спектра (рис. 1.2),



Рис. 1.2. Измерение параметров спектра трехкомпонентным методом

где  $s_1(\lambda)$ ,  $s_2(\lambda)$  и  $s_3(\lambda)$  – спектральные характеристики фотоприемников,  $I(\lambda)$  – спектральная характеристика излучения.

Излучение  $I(\lambda)$ , попадая в фотоприемники, создает в них сигналы:

$$U_{1} = \int_{\lambda_{MHH}}^{\lambda_{MAKC}} S_{1}(\lambda) I(\lambda) d\lambda,$$

$$U_{2} = \int_{\lambda_{MHH}}^{\lambda_{MAKC}} S_{2}(\lambda) I(\lambda) d\lambda,$$

$$U_{3} = \int_{\lambda_{MHH}}^{\lambda_{MAKC}} S_{3}(\lambda) I(\lambda) d\lambda,$$
(1.2)

где  $\lambda_{MHH}$  и  $\lambda_{MAKC}$  – минимальная и максимальная длины волн спектра излучения.

Трехмерный вектор  $C = \{U_1, U_2, U_3\}$  должен однозначно описывать параметры спектра исследуемых излучений. В зависимости от поставленной задачи сигналы

*U*<sub>1</sub>, *U*<sub>2</sub> и *U*<sub>3</sub> обрабатываются по определенному алгоритму с преобразованием их в компоненты требуемого цветового пространства. Существующие методы измерения параметров спектра можно условно разделить на три вида: спектральный, интегральный и визуальный.

Спектрофотометрический метод заключается в измерении спектрального распределения светового потока и последующем расчете центральной длины волны, ширины спектра и координат цвета путем перемножения функции спектрального распределения на функции сложения и последующем интегрировании.

Для анализа спектрального состава светового потока его необходимо В разложить на спектральные компоненты. качестве разлагающего (диспергирующего) элемента обычно используется призма или дифракционная решетка, которые в совокупности со щелями, объективами и другими оптическим элементами образуют монохроматор. Разложенный на спектральные составляющие световой поток попадает на приемник излучения.

В качестве примера на рис. 1.3 представлена схема однопризменного спектрофотометра. Исследуемый лучистый поток входит в щель, коллимируется линзой в практически параллельный пучок. Этот пучок попадает на призму, в которой происходит его преломление и разложение. После чего разложенный световой поток фокусируется второй линзой в плоскости выходной щели А. Выходная щель служит для выделения определенных узких участков спектра. За щелью находится приемник оптического излучения. Спектрофотометр градуируется таким образом, чтобы можно было непосредственно считывать величину спектральной плотности на заданный интервал длин волн.

Спектральные приборы являются базовыми приборами, как для оценки спектрального состава излучения, так и для исследований в области колориметрии [32, 145, 146]. В настоящее время выпускается множество спектрофотометров. Самые современные из них автоматически регистрируют спектральные характеристики в цифровой форме.



Рис. 1.3. Однопризменный спектрофотометр

Являясь наиболее точными измерительными приборами [29], спектрофотометры имеют и существенные недостатки, такие как высокая стоимость, сложность настройки и градуировки, длительное время измерения спектрального распределения.

Основным способом цветовых измерений на основе кривых сложения является измерение светового потока тремя фотоприемниками, спектральные характеристики которых совпадают с кривыми сложения, либо находятся с ними в линейной зависимости. При попадании излучения на фотоприемник происходит перемножение функций спектрального распределения излучения и спектральной характеристики фотоприемника и последующее их интегрирование [70, 143]. В результате на выходе будут получены координаты цвета исследуемого объекта в одной из цветовых систем. Схема такого колориметра приведена на рис. 1.4.



Рис. 1.4. Схема фотоэлектрического колориметра со спектральными масками

В фотоэлектрических колориметрах координаты цвета исследуемого объекта определяются без участия глаза человека. Действие колориметров

основано использовании оптоэлектронных преобразователей на co светофильтрами, которые преобразуют спектральную характеристику приемного кривым сложения цветов стандартного колориметрического элемента К наблюдателя или являющихся их линейной трансформацией. При этом каждый из приемников оптического излучения должен давать фототок, пропорциональный соответствующей кривой сложения. Чаще всего для корригирования применяются комбинации светофильтров, толщина которых рассчитывается на основе данных спектральной чувствительности используемого оптического преобразователя.

Поскольку колориметр определяет координаты цвета и не оценивает весь спектр излучения, вследствие метамерии возможны ситуации, когда два образца цвета, имеющие разные спектральные распределения излучения, будут определены как одинаковые по цвету [31].

Значительным недостатком объективных колориметров является недостаточная точность формирования кривых сложения. Поэтому колориметры используются, как правило, в более дешевых измерительных системах.

Другой возможностью определения параметров спектра излучения является их прямое (визуальное) определение [40]. В связи с простотой визуальные методы не потеряли своего значения до настоящего времени. Визуальные колориметры обладают высокой точностью измерений, но получаемые результаты действительны для конкретного, а не стандартного наблюдателя, что значительно ограничивает возможность их применения.

В рамках этих методов был создан широкий класс измерительной аппаратуры. Среди измерителей спектрального типа отметим следующие.

Высокая степень автоматизации отличает спектроколориметры Color Eye фирмы Gretag Macbeth типов XTH, 2180UV и 7000A, которые предназначены для цветовых измерений и цветового анализа отражающих материалов. Принцип работы этих приборов основан на двухлучевой оптической схеме с интегрирующей сферой в сочетании с ксеноновой лампой-вспышкой [70]. Система для измерений радиометрических и фотометрических характеристик СИД [54] состоит из двух составляющих, которые позволяют измерить спектр излучения СИД и фотометрические характеристики. В зависимости от источников освещения полное время измерений колеблется в пределах от одной до пяти секунд. При этом спектральные измерения выполняются с шагом 4–5 нм и с точностью установки 0,5 нм. Расчеты цветовых характеристик выполняются в системе MKOXY и MKOLUV величин. Точность определения координат цветности составляет  $\Delta x = \pm 0,002$ ,  $\Delta y = \pm 0,0015$ .

Спектрофотоколориметр «ТКА ВД» [47] предназначен для определения спектрального состава излучения источника света и последующего расчета его цветности. Диспергирующий элемент – полихроматор – имеет следующие характеристики: рабочая спектральная область – 390 – 740 нм, спектральное разрешение при длине спектра порядка 7 мм – 5 нм. Блок обработки данных рассчитывает координаты цветности любых источников света для стандартного наблюдателя МКО 1931 с полем зрения 2° и для стандартного наблюдателя МКО 1964 г. Спектральное разрешение прибора не превышает 3 нм.

Яркомер-колориметр CS200 [121] представляет собой спектральный измерительный прибор, предназначенный для измерения яркости и цвета светоизлучающих устройств, таких, как светодиодные модули, газоразрядные источники света, ЖК-дисплеи и другие источника света. Прибор способен производить измерения в следующих цветовых пространствах: XYZ, Lvxy, LvT∆uv, Lvu'v', а также измерять преобладающую длину волны. Абсолютная погрешность измерения координат цветности – не выше ±0,007.

Автоматизированная система измерения параметров СИД НР8000 и НР9000 фирмы Hopu Optics Technology Co [134] может быть использована как эталон для фотометрических, колориметрических и радиометрических измерений. Система способна измерять следующие параметры: общий световой поток, светоотдачу, интенсивность излучения, доминирующую и пиковую длины волн, коррелированную цветовую температуру, координаты цвета, индекс цветопередачи, цветовые различия и цветность. Время измерения составляет менее 5 секунд. Диапазоны измерений: 200 нм – 780 нм; 380 нм – 780 нм; 380 нм – 1050 нм. Спектральное разрешение составляет 0,2 нм, а воспроизводимость – ±0,5 нм. Точность определения координат цветности ±0,003.

Спектрометр для измерения параметров СИД фирмы Gamma-Scientific RadOMA lite [144]. В состав спектрометра входит ПЗС-линейка из 2048 элементов с 16-битным разрешением. Диапазон измерений составляет 380 - 780 нм, разрешение 0,2 нм/пиксель. Абсолютная погрешность измерения пиковой длины волны ±0,5 нм, доминирующей длины волны ±0,5 нм, координат цвета CIE1931 ±0,003.

Среди измерителей интегрального типа [17, 70, 137, 147] отметим следующие.

Наилучшими метрологическими характеристиками обладают трехзональные колориметры фирмы LMT C1210 и C2210 [69]. Измерительным преобразователем в обоих случаях служит колориметрическая головка типа CH60, содержащая три независимых канала, в каждом из которых расположены светофильтр и кремниевый фотоэлемент. Суммарная погрешность измерений не превышает 3%.

Интегральный колориметр на основе колориметрической системы КЗФ. Данный колориметр предназначен для измерения очень слабых потоков цветного излучения с абсолютной погрешностью определения координат цветности до 0,02. Основная относительная погрешность колориметра составляет 8%. Абсолютная погрешность измерения координат цветности не выше ±0,003 [34].

Фотоэлектрический колориметр интегрального типа «ТКА-ИЦТ» предназначен для измерения координат цветности х и у, коррелированной цветовой температуры и яркости источников света. Погрешность измерения координат цвета источника света с непрерывным спектром не превышает  $\pm 0,005$ , а погрешность и измерения яркости и освещенности –  $\pm 8\%$  [43].

Трехкомпонентный колориметр SLS 9400-FC компании Gamma-Scientific. Колориметр состоит из датчика цвета и дисплея. Датчика цвета включают в себя четыре высокостабильных светофильтра и кремниевых фотодиода. Точность измерения координат цвета составляет  $\pm 0,002$ , а стабильность –  $\pm 0,001$ .

Яркомер, колориметр XYL-VI фирмы Lisun Group [138]. Колориметр XYL-VI – это фотоэлектрический колориметр с цифровыми датчиками цветности X ( $\lambda$ ), Y ( $\lambda$ ), Z ( $\lambda$ ). Параметры колориметра: диапазон измерения яркости 10 ~ 1 000 000 кд/м<sup>2</sup>, точность измерения яркости ±5%, погрешность измерения координат цвета с использованием стандартного источника света А яркостью 100 кд/м<sup>2</sup> ±0,002.

В настоящее время отечественная промышленность практически не выпускает колориметров, хотя ранее серийно выпускались компараторы цвета типа ЭКЦ-1, КЦ-2, КЦ-3, фотоэлектрические колориметры КНО-3, спектроколориметры «Спектрон» и «Пульсар». Некоторые из этих приборов, выпущенные десять и более лет назад, еще продолжают использоваться.

Рассмотренные выше приборы плохо подходят для задачи контроля параметров узкополосного оптического излучения в динамических условиях, т.к. приборы спектрального типа обладают низким быстродействием, а серийно выпускаемые приборы интегрального типа, основанные на трехкомпонентной модели, имеют значительную погрешность измерений особенно в области красного синего ивета. Таким образом, существующая серийно И выпускаемая измерительная аппаратура не позволяет измерять параметры узкополосного оптического излучения в условиях реального времени с приемлемой точностью при шаге дискретизации менее нескольких миллисекунд.

Для измерения параметров спектра излучения в узкополосном спектральном диапазоне может быть использована модель, состоящая из двух фотоприемников, максимумы спектральных характеристик которых располагаются по разные стороны от диапазона спектра исследуемого оптического излучения [71]. При этом желательно, чтобы полоса спектра исследуемого оптического излучения была уже ширины полосы пропускания фотодатчика. Более подробно модель описывается во 2 главе диссертационной работы.

# 1.3 Задачи оперативного контроля параметров спектра узкополосного оптического излучения

#### 1.3.1 Источники узкополосного оптического излучения

Наиболее распространенным видом источников узкополосного оптического полупроводниковые излучения являются светоизлучающие приборы: обычные полупроводниковые лазеры, суперлюминесцентные диоды И светодиоды. Подробное описание полупроводниковых источников оптического излучения можно найти в [9, 30, 70, 101], поэтому здесь приведем лишь краткое описание, принцип работы и характеристики светодиодов, как наиболее распространенных И доступных источников узкополосного оптического излучения.

Светоизлучающий диод – это полупроводниковый прибор, преобразующий электрическую энергию в энергию оптического излучения на основе явления электролюминесценции, происходящей в полупроводниковом кристалле [98]. На практике используется два механизма возбуждения: инжекция носителей заряда в активную область *p*-*n*-перехода и ударная ионизация (лавинный пробой) [105].

Чистота цвета излучения светодиодов превышает 98% [41]. Цвет свечения светодиода характеризуется длиной волны в максимуме спектральной полосы λ<sub>макс</sub> или доминирующей длиной волны λ<sub>D</sub>.

Светодиоды характеризуются высокой яркостью (до 10<sup>5</sup> Кд/м<sup>2</sup>), силой излучения (сотни мВт/ср), высоким внешним квантовым выходом излучения (до 50%), высоким быстродействием (до единиц наносекунд), большой надежностью и длительным сроком службы. Световая эффективность белых светодиодов стремиться к 200 лм/Вт, а теоретический предел составляет 300 лм/Вт.

Источником узкополосного оптического излучения являются лазеры. Условно конструкцию лазеры можно разделить на три основные части: активная среда, система накачки и оптический резонатор. Спектральный состав лазерного излучения зависит от используемой активной среды и у современных лазеров находится в пределах от УФ излучения до дальнего ИК излучения. Особые характеристики лазерного излучения: малая расходимость излучения, возможность концентрировать излучения на малой площади поверхности – позволили применить их в различных областях науки и техники.

Узкополосное оптическое излучение возникает при различных видах люминесценции. Под люминесценцией понимается излучение, возникающее в веществе под действием предварительного возбуждения без воздействия тепловой энергии [80]. В зависимости от внешнего воздействия различают следующие виды люминесценции: радиолюминесценция, электролюминесценция, биолюминесценция, фотолюминесценция, триболюминесценция и др.

Биолюминесценция – излучение света биологическими тканями, вследствие протекающих в них химических реакций. Доказано, что все живые клетки и биологические жидкости излучают свет. Наиболее известными источниками биолюминесценции являются светлячки. При воздействии на биологические материалы внешним воздействием, например ультрафиолетовым излучением, исследуемые образцы начинают излучить свет определенного спектрального диапазона.

В работе [16] показана актуальность исследования процессов свечения биологических тканей как при действии на них внешнего возбуждения, так и в его отсутствии. В зависимости от вида исследуемого образца и метода воздействия на него длительность свечения биологических тканей и изменение спектра свечения может меняться медленно и за очень короткие промежутки времени. Таким образом, при исследовании биолюминесценции возникает необходимость измерять параметры спектра источников люминесцентного излучения быстро и с высокой точностью с минимальными затратами вычислительных ресурсов.

При триболюминесценции возникает свечение твердотельных материалов при разрушении их кристаллической решетки. Эффект триболюминесценции можно использовать для выявления дефектов в ответственных деталях самолетов, автомобилей, мостов и других конструкций. Свечение при триболюминесценции

характеризуется короткой длительностью импульса. Поэтому при исследовании таких явлений также требуется высокое быстродействие измерительной аппаратуры [10].

Широко распространенными источниками узкополосного оптического излучения являются также системы, состоящие из широкополосного источника света, например, галогеновой лампы, и светофильтра [30, 70, 101].

# 1.3.2 Измерение параметров спектра узкополосного оптического излучения в динамическом режиме

Как уже отмечалось любой источник узкополосного оптического излучения можно охарактеризовать мощностью оптического излучения, центральной длиной волны, шириной и асимметрией спектра. Изменение параметров спектра излучения несет в себе важную информацию об исследуемом объекте, например, по изменению спектрального состава оптического излучения светодиодов можно судить о температуре кристалла, степени его деградации, наличию посторонних примесей и неоднородностей в структуре. А в ряде случаев, например, в системах связи, необходимо оперативно контролировать непосредственно центральную длину волны оптического излучения.

Задачи измерения параметров спектра в динамических режимах возникают в различных областях, например, контроль излучения оптических передатчиков в системах связи, контроль цветности в системах освещения и индикации, в том числе и информационных табло; при цифровой обработке изображений; в медицине для контроля излучения биологических тканей и биочипов и т.п.

Одной из областей применения источников оптического излучения, где предъявляются жесткие требования к изменению их цветности, является производство полноцветных мультимедийных экранов [61, 101]. Экраны могут применяться как для работы внутри помещений, так и за их пределами, подвергаясь значительным температурным перепадам, что сказывается на колориметрических параметрах экрана. Еще одним важным фактором является

импульсный режим работы светоизлучающих элементов в составе экрана, что приводит к изменению его цветности и яркости свечения при саморазогреве. Контроль светоизлучающих кластеров во время работы экрана является сложной задачей из-за большого числа излучающих элементов. Поэтому светоизлучающие компоненты должны проходить предварительную проверку колориметрических параметров на соответствие заданным требованиям.

Важную роль полупроводниковые источники оптического излучения играют в системах беспроводной связи [18]. Наиболее яркий пример – это использование светодиодов для дистанционного управления бытовыми приборами и обеспечения связи между компьютером и периферийными устройствами. При этом приемное и передающее устройства должны находиться в зоне прямой видимости, либо в области прохождения отраженных лучей. Беспроводные системы связи, как правило, работают в ИК диапазоне.

На коротких расстояниях воздух можно считать средой, не вносящей затухания, но на больших расстояниях интенсивность излучения падает пропорционально квадрату расстояния. Решающим параметром для определения дальности связи и скорости передачи данных является отношение сигнала к шуму (С/Ш). Для увеличения параметра С/Ш целесообразно использовать оптический фильтр. Чем уже полоса излучения и соответствующая ей полоса пропускания оптического фильтра приемного устройства при том же уровне мощности излучения, можно получить тем выше отношение сигнала к шуму. Полупроводниковые лазеры, которые наиболее часто используются ДЛЯ беспроводной передачи данных на большие расстояния, имеют достаточно узкую полосу излучения и сильную зависимость от температуры. Изменение внешних условий может привести к значительному снижению качества сигнала на входе фотоприемника из-за смещения центральной длины волны оптического передатчика и ухудшению параметров системы связи. Таким образом, возникает необходимость контролировать спектральные параметры излучения лазера и его температуру и поддерживать их в заданных пределах.

Полупроводниковые лазерные диоды находят применение в системах волоконно-оптической связи [18, 38]. Поскольку время жизни спонтанного излучения в сильно возбужденных полупроводниках около 1 нс, максимально достижимые скорости передачи данных в системах ограничены 1 Гбит/с. Для увеличения скорости передачи данных используют многоканальные системы связи со спектральным уплотнением каналов (WDM) [8, 38, 115]. Современные WDM системы можно разделить на 3 группы:

Грубые (CWDM) с частотным разносом 200 ГГц (20 нм), позволяющие мультиплексировать до 18 каналов по одному волокну (45 Гбит/с);

Плотные (DWDM) с частотным разносом 100 ГГц (0,8 нм), позволяющие мультиплексировать до 40 каналов по одному волокну (100 Гбит/с);

Высокоплотные (HDWDM) с частотным разносом 50 ГГц (0,4 нм), позволяющие мультиплексировать до 64 каналов по одному волокну (160 Гбит/с);

При работе источников оптического излучения в импульсном режиме возникает периодическое колебание температуры светоизлучающего элемента, приводящее к нестабильности центральной длины волны излучения. При этом наибольшее смещение спектра излучения происходит в промежутке времени менее 1 – 3 мс [110] и может приводить к смещению спектра за этот промежуток времени до нескольких нанометров, что неприемлемо для систем оптоволоконной связи с уплотнением каналов.

Таким образом, при увеличении скорости передачи данных за счет спектрального уплотнения каналов необходимо контролировать центральную длину волны передающего устройства, жестко ограничивая ее смещение, особенно в системах DWDM и HDWDM, где даже незначительное изменение температуры передающего устройства может привести к значительному росту ошибок в передачи данных.

Оперативный контроль параметров узкополосного оптического излучение находит широкое применение в области фотохромотерапии. В работе [14] сказано, что оптическое излучение различных длин волн оказывает различное влияние на течение патологических процессов при низкоэнергетическом воздействии. При разработке подобной аппаратуры возникает задача управления параметрами и режимами излучения, т.к. правильный выбор длины волны излучения приводит к уменьшению необходимых доз, что минимизирует длительность процедур и снижению негативного воздействия на объект.

Применение средств оперативного контроля параметров спектра оптического излучения при измерении параметров оптических фильтров и иных оптических систем, например, светофоров [52], позволит значительно сократить временные и вычислительные ресурсы на измерение и при сохранении приемлемой точности измерений получать результаты измерений в режиме реального времени.

Таким образом, задача разработки и исследования быстродействующих способов и средств измерения и контроля оптического излучения с относительно узким спектром является актуальной.

# 1.3.3 Задачи контроля параметров узкополосного оптического излучения в условиях реального времени

В отдельную группу можно выделить задачи измерения узкополосного оптического излучения в условиях реального времени. Решения подобных задач могут найти широкую сферу применения в прикладных областях, таких как системы связи, авиационные комплексы, интеллектуальные робототехнические комплексы, комплексы дистанционного зондирования, анализ надежности и мониторинг параметров электронных светоизлучающих элементов и т.п.

Одной из таких задач является изучение турбулентных ветровых полей [7]. Методы их исследования основаны на доплеровском смещении спектра оптического излучения, рассеянного движущимися под действием ветра рассеивателями. Для получения информации о скорости ветра измерения осуществляется под различными углами. Таким образом, применение быстродействующих измерителей смещения спектра позволит анализировать не

только скорость турбулентных потоков, но и иных объектов, где может быть использован доплеровский метод определения скорости.

Быстродействующие методы измерения спектра узкополосного излучения в условиях реального времени могут быть использованы для регистрации сигналов оптоволоконных датчиков, основанных, например, на брэгговских решетках. Такие датчики позволяют с высокой точностью измерять сжатие и растяжение материалов [99], концентрации веществ в частности концентрации свободного кислорода в промышленных рабочих зонах [50] и др.

При работе полупроводниковых источников оптического излучения в импульсном режиме происходит периодическое изменение температуры кристалла, которое приводит к смещению спектра и изменению его ширины, что может привести к негативным последствиям, например, в системах связи, т.к. высокоскоростные оптоволоконные системы связи весьма восприимчивы к смещению спектра. Поэтому для корректной работы таких систем необходимо контролировать центральную длину волны излучения в условиях реального времени [35, 38], при этом частота измерений параметров спектра излучения может достигать нескольких миллионов измерений в секунду.

# 1.4 Измерение центральной длины волны узкополосного оптического излучения двухканальным фотоэлектрическим преобразователем.

Одним из способов контроля узкополосного оптического излучения является способ, описанный в работах [45, 46, 71]. Способ предполагает измерение пространственного распределения средней длины волны узкополосного оптического излучения в широком диапазоне длин волн. Суть способа заключается в следующем.

Измеряемый световой поток направляется не менее чем на два измерительных канала с различающимися спектральными характеристиками. При этом спектральные характеристики измерительных каналов должны быть определены предварительно. Если в части измеряемого диапазона отношение чувствительностей не менее двух измерительных каналов носит монотонный характер, то по отношению величин сигналов можно определить среднюю длину волны оптического изучения. Для случая источника излучения с б-образной спектральной характеристикой, т.е. монохроматического излучения, средняя длина волны определяется как решение уравнения вида:

$$\lambda_{r} = \alpha^{-1} (I_{1} / I_{2}), \qquad (1.4)$$

где  $I_1$  и  $I_2$  – сигналы в измерительном канале,  $\alpha^{-1}$  – функция, обратная  $\alpha(\lambda_x) = I_1/I_2$ .

В случае если измеряемая величина выходит за предел диапазона с монотонной чувствительностью, то для однозначного определения средней длины волны необходимо использовать третий измерительный канал. Критерием допустимого изменения ширины спектра излучения следует считать допустимое отличие определяемого значения средней длины волны от реального ее значения.

В случае измерения немонохроматического излучения решаемая задача усложняется, дополнительной несколько что приводит К появлению систематической погрешности, величина которой будет зависеть от формы спектральной характеристики измеряемого сигнала И изменения ширины оптического излучения от измерения к измерению. Т.е., если в пределах ширины линии излучения чувствительность сенсоров практически не меняется, то излучение фактически действует как монохроматическое. При нарушении этого условия определяемое значение длины волны будет отклоняться от среднего.

Для оценки точности данного способа авторы в качестве регистрирующего прибора использовали цифровой фотоаппарат Sony F717, а в качестве источника оптического излучения ртутную лампу (рис. 1.5). По цифровому изображению ртутного спектра для обеих линий желтого дублета было определено среднеквадратичное отклонение восстановленной длины волны в пределах узкого окна, ориентированного вдоль центральной (по спектру) части линии ртути. Для линий ртутного дублета получены длины волн 577 нм (среднеквадратичное отклонение 0.16) и 579 нм (среднеквадратичное отклонение 0.19).



Рис. 1.5. Спектральные характеристики фотоаппарата Sony F717 (снизу) и ртутной лампы (сверху)

Рассмотренный способ позволяет достаточно просто получить распределение средней длины волны узкополосного оптического излучения по плоскости с точностью не менее 1 нм. Но рассмотренный способ имеет существенные недостатки. Данный способ не позволяет оценить ширину спектра излучения, также не приводятся оценки погрешности измерения вызванной изменением ширины спектрального состава, что осложняет применение способа на практике. В виду специфики применения данного способа авторами не проведена оценка быстродействия данного способа.

#### Выводы

Быстродействующие методы измерения и контроля параметров узкополосного оптического излучения находят применение в различных областях, например, для контроля излучения оптических передатчиков в системах связи, контроля цветности в системах освещения и индикации, в том числе и информационных табло; при цифровой обработке изображений; в медицине для контроля излучения аппаратуры фотохромотерапии и т.п. Источниками узкополосного оптического излучения являются люминофоры, полупроводниковые светоизлучающие диоды (СИД), лазеры, суперлюминесцентные диоды, химические источники и др. Одним из наиболее распространенных и источников узкополосного оптического излучения является СИД, на параметры спектра которого влияет множество различных факторов: температура, технология изготовления, сила тока и ряд других факторов.

Существуют различные способы и методы измерения параметров узкополосного оптического излучения: спектральный, фотоэлектрический, визуальный и др. Для целей оперативного контроля параметров спектра узкополосного оптического излучения, с точки зрения высокого быстродействия и приемлемой точности, наиболее подходящим является интегральный метод.

Большинство современных приборов имеют погрешность измерения координат цвета порядка ±0,001 – ±0,003, а абсолютная погрешность определения доминирующей длины волны приборами спектрального типа составляет порядка 0,2 – 0,5 нм.

Современные спектральные приборы не способы производить оценку параметров спектра за короткие промежутки времени менее 1–2 мс с высокой точностью. В свою очередь трехкомпонентные колориметры имеют значительную погрешность в области синих и красных цветов, а также не позволяют одновременно контролировать несколько параметров спектра излучения.

Основными проблемами при измерении параметров спектра узкополосного оптического излучения в реальном масштабе времени являются низкое быстродействие приборов спектрального типа, не позволяющих получать результат в реальном времени при быстропротекающих процессах, низкая точность колориметрических измерителей и большой объем информации при проведении измерений спектральным методом. Все это приводит к значительному обработки наращиванию вычислительных ресурсов для измерительной информации или к снижению шага дискретизации при проведении измерений, т.е. потери части информации между измерениями.

Одним из перспективных направлений разработки быстродействующих методов и средств измерения параметров спектра узкополосных оптических сигналов является применение двухканальных фотоэлектрических преобразователей с двумя фотоприемниками (чувствительными элементами) с различающимися спектральными характеристиками. Для оценки возможностей применения указанных методов и средств в практических приложениях необходимы исследования реально достижимых метрологических ИХ характеристик по точности и быстродействию

# Глава 2 Измерение параметров спектра оптического излучения двухканальными фотоэлектрическими преобразователями

#### 2.1 Постановка задачи

Bo технических приложениях необходимо многих решать задачи оперативной оценки параметров спектра в реальном масштабе времени, например, при воздействии на источник излучения или среду распространения оптического излучения быстропеременного внешнего фактора. Современные средства измерения параметров спектра источников излучения, построенные на фотоэлектрических спектральных методах И на многоэлементных преобразователях, имеют недостаточное быстродействие и не пригодны для 1 регистрации изменения спектров за время MC. Известные менее быстродействующие методы измерения И контроля на основе **ДВУХ** фотоприемников с различающимися спектральными характеристиками, как показано в главе 1, позволяют измерять один параметр – центральную длину волны излучения.

Задача совершенствования средств измерения состоит в возможности быстрого определения нескольких параметров спектра узкополосного оптического излучения, таких как центральная длина волны, ширина спектра, амплитуда, асимметрия спектра. В данной главе диссертационной работы показана возможность определения нескольких параметров спектра узкополосного оптического излучения с применением двух фотоэлектрических преобразователей с известными спектральными характеристиками [86, 87, 89].

# 2.2 Алгоритм определения параметров спектра узкополосного оптического излучения двумя фотоприемниками с гауссовыми спектральными характеристиками

При проектировании измерительной аппаратуры основным является вопрос об однозначности определения параметров оптического излучения. Формально задача определения параметров спектра узкополосного оптического излучения,

спектральная характеристика которого может быть описана гауссовой функцией с тремя неизвестными параметрами: центральная длина волны  $\lambda_x$ , ширина спектра  $\sigma_x$  и амплитуда  $A_x$  – может быть решена на основе системы трех уравнений вида (1.2) [92].

Задачу можно упростить, если учесть особенности узкополосного излучения и использовать двухканальный фотоэлектрический преобразователь (ДФЭП), состоящий из двух фотоприемников с идентичными по форме спектральными характеристиками гауссова вида, смещенными относительно друг друга:

$$S_{1}(\lambda) = \frac{A_{10}}{\sqrt{2\pi\sigma_{1}}} e^{-\frac{(\lambda - \lambda_{1})^{2}}{2\sigma_{1}^{2}}},$$

$$S_{2}(\lambda) = \frac{A_{20}}{\sqrt{2\pi\sigma_{2}}} e^{-\frac{(\lambda - \lambda_{2})^{2}}{2\sigma_{2}^{2}}},$$
(2.1)

где  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  — длины волн, соответствующие максимуму функций  $s_1(\lambda)$  и  $s_2(\lambda)$  соответственно, а  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  — параметры этих функций, характеризующие их ширину,  $A_{10}$  и  $A_{20}$  — параметр, определяющий чувствительность фотоприемников (рис. 2.1). Характеристики вида (2.1) легко реализуются путем применения широкополосных фотоприемников и полосовых фильтров с гауссовыми характеристиками пропускания [90, 125]. С помощью нейтральных фильтров интегральную чувствительность обоих фотоприемников ДФП можно сделать одинаковой и без ограничения общности дальнейшего рассмотрения можно положить  $A_{10}=A_{20}=A_0$ .



Рис. 2.1. Измерение светового потока двумя фоточувствительными элементами Спектр излучения по аналогии с [90] представим также гауссовой функцией:

$$Y_{x}(\lambda) = \frac{A_{x}}{\sqrt{2\pi\sigma_{x}}} e^{-\frac{(\lambda-\lambda_{x})^{2}}{2\sigma_{x}^{2}}},$$
(2.2)

где  $\lambda_x$  — длина волны, соответствующая максимуму функции спектрального распределения излучения  $Y_x(\lambda)$ ,  $A_x$  — параметр, определяющий интенсивность излучения,  $\sigma_x$  — параметр функции, характеризующий ширину спектра.

При попадании светового потока на *i*-й фотоприемник возникает сигнал, величину которого можно описать выражением:

$$U_{i} = \int_{-\infty}^{+\infty} S_{i}(\lambda) Y_{x}(\lambda) d\lambda, \qquad (2.3)$$

где *i* – номер фотоприемника,  $S_i(\lambda)Y_x(\lambda) = \frac{A_0A_x}{2\pi\sigma_i\sigma_x}e^{-\left[\frac{(\lambda-\lambda_i)^2}{2\sigma_i^2} + \frac{(\lambda-\lambda_x)^2}{2\sigma_x^2}\right]}$ 

Преобразовав выражение в квадратных скобках, и введя безразмерные величины, получаем:

$$\frac{(\lambda - \lambda_i)^2}{2\sigma_i^2} + \frac{(\lambda - \lambda_x)^2}{2\sigma_x^2} = \frac{\lambda_i^2}{2\sigma_i^2} \Big[ (t - 1)^2 + \xi (t - a)^2 \Big],$$
(2.4)

 $\Gamma \mathcal{A} \mathbf{e} \ \xi_{i} = \frac{\sigma_{i}^{2}}{\sigma_{x}^{2}}, \ a_{i} = \frac{\lambda_{x}}{\lambda_{i}}, \ t_{i} = \frac{\lambda_{x}}{\lambda_{i}}.$   $\frac{\lambda_{i}^{2}}{2\sigma_{i}^{2}} \Big[ t_{i}^{2} - 2t_{i} + 1 + \xi_{i} (t_{i}^{2} - 2a_{i}t_{i} + a_{i}^{2}) \Big] = \frac{\lambda_{i}^{2}}{2\sigma_{i}^{2}} \Big[ t_{i}^{2} - 2 \Big( \frac{1 + \xi_{i}a_{i}}{1 + \xi_{i}} \Big) t_{i} + \frac{1 + \xi_{i}a_{i}^{2}}{1 + \xi_{i}} \Big] =$   $= \frac{\lambda_{i}^{2} (1 + \xi_{i})}{2\sigma_{i}^{2}} \Big[ \Big( t - \frac{1 + \xi_{i}a_{i}}{1 + \xi_{i}} \Big)^{2} + \frac{1 + \xi_{i}a_{i}^{2}}{1 + \xi_{i}} - \Big( \frac{1 + \xi_{i}a_{i}}{1 + \xi_{i}} \Big)^{2} \Big]. \tag{2.5}$ 

Упрощая выражение в квадратных скобках, получаем:

$$\frac{1+\xi_i a_i^2}{1+\xi_i} - \left(\frac{1+\xi_i a_i}{1+\xi_i}\right)^2 = \frac{\xi_i (a_i - 1)^2}{(1+\xi_i)^2},$$
(2.6)

$$\frac{\lambda_{i}^{2}(1+\xi_{i})}{2\sigma_{i}^{2}}\left[\left(t_{i}-\frac{1+\xi_{i}a_{i}}{1+\xi_{i}}\right)^{2}+\frac{1+\xi_{i}a_{i}^{2}}{1+\xi_{i}}-\left(\frac{1+\xi_{i}a_{i}}{1+\xi_{i}}\right)^{2}\right]=\frac{\lambda_{i}^{2}\xi_{i}(a_{i}-1)^{2}}{2\sigma_{i}^{2}(1+\xi_{i})}+\frac{\lambda_{i}^{2}(1+\xi_{i})}{2\sigma_{i}^{2}}\left(t_{i}-\frac{1+\xi_{i}a_{i}}{1+\xi_{i}}\right)^{2}.$$
 (2.7)

Подставляя полученные выражения в (2.3), мы приходим к выражению, описывающему сигнал на фотоприемнике:

$$U_{i} = \int_{-\infty}^{+\infty} S_{i}(\lambda) Y_{x}(\lambda) d\lambda = \frac{A_{0}A_{x}}{2\pi\sigma_{i}\sigma_{x}} e^{-\frac{\lambda_{i}^{2}\xi(a_{i}-1)^{2}}{2\sigma_{i}^{2}(1+\xi_{i})}} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{\frac{\lambda_{i}^{2}(1+\xi_{i})}{2\sigma_{i}^{2}}} d\lambda = \frac{\lambda_{i}A_{0}A_{x}}{2\pi\sigma_{i}\sigma_{x}} e^{-\frac{\lambda_{i}^{2}\xi_{i}(a_{i}-1)^{2}}{2\sigma_{i}^{2}(1+\xi_{i})}} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{\frac{\lambda_{i}^{2}(1+\xi_{i})}{2\sigma_{i}^{2}}} dt , \qquad (2.8)$$

ГДС  $b_i = \frac{1 + \xi_i a_i}{1 + \xi_i}.$ 

Учитывая, что  $\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{(t-m)^2}{2\sigma^2}} dt = 1$ , преобразуем выражение (2.4) к виду:  $U_i = \frac{A_0 A_x}{\sqrt{2\pi\sigma}_x \sqrt{1+\xi_i}} e^{-\frac{\lambda_i^2 \xi_i (a_i-1)^2}{2\sigma_i^2 (1+\xi_i)}} \left( \frac{\lambda_i \sqrt{1+\xi_i}}{\sqrt{2\pi\sigma}_i} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{\lambda_i^2 (1+\xi_i)}{2\sigma_i^2} (t_i-b_i)^2}} dt \right) = \frac{A_0 A_x}{\sqrt{2\pi\sigma}_x \sqrt{1+\xi_i}} e^{-\frac{\lambda_i^2 \xi_i (a_i-1)^2}{2\sigma_i^2 (1+\xi_i)}}, (2.9)$ 

Окончательные выражения для сигналов принимают вид:

$$U_{1} = \frac{A_{0}A_{x}}{\sqrt{2\pi}\sqrt{\sigma_{1}^{2} + \sigma_{x}^{2}}} e^{-\frac{(\lambda_{x} - \lambda_{1})^{2}}{2(\sigma_{1}^{2} + \sigma_{x}^{2})}};$$

$$U_{2} = \frac{A_{0}A_{x}}{\sqrt{2\pi}\sqrt{\sigma_{2}^{2} + \sigma_{x}^{2}}} e^{-\frac{(\lambda_{x} - \lambda_{2})^{2}}{2(\sigma_{2}^{2} + \sigma_{x}^{2})}}.$$
(2.10)

Для нахождения трех неизвестных  $A_x$ ,  $\sigma_x$ ,  $\lambda_x$  в общем случае необходима система из трех уравнений. Для определения интенсивности излучения можно использовать третий калибровочный фотоприемник с равномерной спектральной чувствительностью  $S_3(\lambda) = A_0 / \Delta \lambda_\kappa$  в диапазоне длин волн  $\Delta \lambda_\kappa >> \sigma_x$ . Величина сигнала  $U_3$  фотоприемника определяется интегрированием по полосе, равна  $U_3 = A_0 A_x / \Delta \lambda_\kappa$  и может быть использована для нормирования сигналов  $U_1$  и  $U_2$ .

Для дальнейшего анализа алгоритма преобразования сигналов введем безразмерные параметры  $\tilde{\lambda}_x = (\lambda_x - \lambda_{cp})/\sigma_1$ ;  $\tilde{\sigma}_x = \sigma_x/\sigma_1$ , где  $\lambda_{cp} = (\lambda_1 + \lambda_2)/2$ .
Тогда, систему (2.10) после несложных преобразований запишем для безразмерных величин в следующем виде:

$$\tilde{U}_{1} = \frac{1}{\sqrt{1 + \tilde{\sigma}_{x}^{2}}} e^{-\frac{\left(\tilde{\lambda}_{x} + \frac{\Delta \tilde{\lambda}_{\phi}}{2}\right)^{2}}{2(1 + \tilde{\sigma}_{x}^{2})}}; \qquad (2.11 a)$$

$$\tilde{U}_{2} = \frac{1}{\sqrt{1 + v^{2}\tilde{\sigma}_{x}^{2}}} e^{-\frac{v^{2} \left(\tilde{\lambda}_{x} - \frac{\Delta \tilde{\lambda}_{\phi}}{2}\right)^{2}}{2(1 + v^{2}\tilde{\sigma}_{x}^{2})}},$$
(2.11 б)

ГДе  $\tilde{U}_1 = \sqrt{2\pi} U_1 \sigma_1 / U_3 \Delta \lambda_{\kappa}$ , a  $\tilde{U}_2 = \sqrt{2\pi} U_2 \sigma_2 / U_3 \Delta \lambda_{\kappa}$ ,  $\nu = \sigma_1 / \sigma_2$ ,  $\Delta \tilde{\lambda}_{\phi} = (\lambda_2 - \lambda_1) / \sigma_1$ .

Вычитая одно уравнение из другого получим общее выражение для  $\tilde{\lambda}_x$ :

$$\widetilde{\lambda}_{x} = \frac{ln \left[ \frac{\left( \widetilde{U}_{2} \sqrt{1 + \widetilde{\sigma}_{X}^{2}} \right)^{1 + v^{2} \widetilde{\sigma}_{X}^{2}}}{\left( \widetilde{U}_{1} \sqrt{1 + v^{2} \widetilde{\sigma}_{X}^{2}} \right)^{v^{2} (1 + \widetilde{\sigma}_{X}^{2})}} \right]}{\widetilde{\lambda}_{\phi} v^{2}}, \qquad (2.12)$$

откуда,

$$\lambda_{x} = \lambda_{cp} + \frac{\sigma_{1} \ln \left[ \frac{\left( \tilde{U}_{2} \sqrt{1 + \tilde{\sigma}_{x}^{2}} \right)^{1 + v^{2} \tilde{\sigma}_{x}^{2}}}{\left( \tilde{U}_{1} \sqrt{1 + v^{2} \tilde{\sigma}_{x}^{2}} \right)^{v^{2} (1 + \tilde{\sigma}_{x}^{2})}} \right]}{\tilde{\lambda}_{\phi} v^{2}}, \qquad (2.13)$$

Для нахождения последнего неизвестного параметра излучения –  $\sigma_x^2$ , который характеризует ширину спектра излучения, необходимо полученное выражение подставить в одно из выражений, описывающих величину сигнала фотоприемника (2.12). Данное уравнение возможно решить численным методом.

Полагая спектральные характеристики фотоприемников ДФЭП идентичными по форме ( $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma^2$ ), что вполне достижимо на практике, например, путем подбора фильтров, получаем параметр v = 1. В этом случае выражение (2.13) примет вид:

$$\lambda_{x} = \lambda_{cp} + \frac{\sigma^{2}(1 + \tilde{\sigma}_{x}^{2}) \ln\left[\frac{\tilde{U}_{2}}{\tilde{U}_{1}}\right]}{(\lambda_{2} - \lambda_{1})}, \qquad (2.14)$$

Заметим, что при  $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma$  в выражение для  $\tilde{\lambda}_x$  входит только отношение приведенных сигналов фотоэлектрического преобразователя, причем  $(\tilde{U}_2/\tilde{U}_1) = (U_2/U_1)$ , то есть не требуется нормировка. Однако при этом в выражение для  $\tilde{\lambda}_x$  входит второй неизвестный параметр оптического излучения –  $\tilde{\sigma}_x = \sigma_x/\sigma$ , причем, во второй степени. В зависимости от величины  $\tilde{\sigma}_x$  возможно несколько вариантов обработки сигналов.

В самом простом случае для монохроматического источника излучения  $\tilde{\sigma}_x \to 0$  для неизвестной длины волны излучения получаем простую формулу:

$$\lambda_x = \lambda_{cp} + C \ln \frac{U_2}{U_1}, \qquad (2.15)$$

где  $c = \sigma / \Delta \tilde{\lambda}_{\phi}$  – постоянная величина. Выражение (2.15) представляют собой монотонную линейную функцию отношения сигналов. Это означает, что для монохроматического источника длина волны будет определяться однозначно.

У современных источников оптического излучения, таких как полупроводниковые лазеры, СИД и др., относительный разброс длины волны излучения в максимуме спектра от образца к образцу оставляет (0,2...0,5) процента. Это значение и определяет верхний предел допустимой погрешности измерения параметров узкополосного оптического излучения.

Для реальных источников приближение монохроматического излучения, очевидно, приводит к погрешности. Относительная погрешность определения величины  $\tilde{\lambda}_x$  согласно (2.14) равна  $\tilde{\sigma}_x^2$ . Заметим, что величину  $\tilde{\sigma}_x$  можно уменьшать путем увеличения ширины функции спектральной чувствительности фотоприемников.

Для источников с малой, но не нулевой шириной спектра, учесть влияние конечной ширины спектра можно введением поправочного коэффициента путем

калибровки на одном или нескольких образцах с точно известной длиной волны излучения в максимуме спектра. При последующих измерениях однотипных источников излучения будет проявляться неисключенная часть систематической

погрешности, величину которой можно оценить по формуле  $\theta_{\sigma} = \frac{2\tilde{\sigma}_x^2 \varepsilon}{1+\tilde{\sigma}_x^2}$ , где  $\varepsilon$ -

оценка среднего относительного разброса ширины спектра однотипных источников узкополосного оптического излучения от образца к образцу. Например, у современных СИД средняя ширина спектра по уровню 0,606 (что соответствует значению  $\sigma_x$ ) составляет не более 10-15 нм и относительное СКО  $\sigma_x$  от образца к образцу не превышает 0,2. Зависимость этой погрешности от относительной ширины спектра приведены на рисунке 2.2. Уже при  $\tilde{\sigma}_x \approx 0.1$ . относительная погрешность, обусловленная разбросом ширины спектра СИД, приближается к предельно допустимой. Для повышения точности требуется определение ширины спектра каждого образца контролируемых излучателей.



Рис. 2.2 – Зависимость неисключенной части систематической погрешности измерения центральной длины волны СИД от его ширины при среднем относительном ее разбросе є=0,5

В общем случае значение  $\tilde{\sigma}_x^2$  может быть найдено из решения системы уравнений (2.11) после подстановки выражения (2.13) для  $\tilde{\lambda}_x$ . Это решение может быть получено численными методами при компьютерной обработке результатов измерений. В приближении  $\tilde{\sigma}_x^2 \ll 1$ , которое практически, безусловно, выполняется

для всех типов источников узкополосного оптического излучения, возможно аналитическое решение (2.11), которое приводит к следующему выражению:

$$\tilde{\sigma}_{x}^{2} = -\frac{b+a^{2}+(\Delta \tilde{\lambda}_{\phi}^{2}/4)}{b+2a^{2}+1},$$
(2.16)

где 
$$a^{2} = \left[\frac{\ln\left(\widetilde{U}_{2}/\widetilde{U}_{1}\right)}{2\,\Delta\widetilde{\lambda}_{\Phi}}\right], a \ b = \ln\left(\widetilde{U}_{1}\cdot\widetilde{U}_{2}\right).$$

При известных значениях  $\tilde{U}_1$ ,  $\tilde{U}_2$  и  $\Delta \tilde{\lambda}_{\phi}$  значение  $\tilde{\sigma}_x^2$  легко вычисляется по формуле (2.16) микроконтроллером или компьютером.

## 2.3 Методическая погрешность определения центральной длины волны оптического излучения двухканальным фотоэлектрическим преобразователем

#### с гауссовыми спектральными характеристиками фотоприемников

Погрешность измерения центральной длины волны излучения, обусловленную случайным изменением параметров фотоприемников ДФЭП, оценим в приближении монохроматического источника. Подставляя в полный дифференциал  $\lambda_x - \Delta \lambda_x = \frac{\partial \lambda_x}{\partial U_1} \Delta U_1 + \frac{\partial \lambda_x}{\partial U_2} \Delta U_2$  производные для  $\frac{\partial \lambda_x}{\partial U_1}$  и  $\frac{\partial \lambda_x}{\partial U_2}$  из (2.15) получим выражение для систематической погрешности измерения  $\lambda_x$ :

$$\Delta \lambda_{xC} = C \left[ \left( \frac{\Delta U_{2C}}{U_2} \right) - \left( \frac{\Delta U_{1C}}{U_1} \right) \right] = \frac{\sigma}{\Delta \tilde{\lambda}_{\Phi}} \left[ \delta U_{2C} - \delta U_{1C} \right], \qquad (2.17)$$

где  $\Delta U_{1C}$  и  $\Delta U_{2C}$  – абсолютные, а  $\delta U_{1C}$  и  $\delta U_{2C}$  – относительные составляющие систематических погрешностей сигналов.

Для относительной случайной погрешности измерения  $\lambda_x$  запишем

$$\hat{\delta}_{\lambda} = \frac{1}{\left[\ln\left(U_{1}/U_{2}\right) + \left(\lambda_{2}^{2} - \lambda_{1}^{2}\right)/2\sigma^{2}\right]}\sqrt{\delta \hat{U}_{1}^{2} + \delta \hat{U}_{2}^{2}}.$$
(2.18)

Изменение сигналов фотоприемников ДФЭП вследствие изменения положения максимума и ширины спектральных характеристик фотоприемников запишем в форме полных дифференциалов:

$$\Delta U_{1} = \frac{A_{x}(\lambda_{1} - \lambda_{x})}{\sqrt{2\pi\sigma^{3}}}e^{-\frac{(\lambda_{x} - \lambda_{1})^{2}}{2\sigma^{2}}}\Delta\lambda_{1} + \frac{A_{x}}{\sqrt{2\pi\sigma^{2}}}\left(\frac{(\lambda_{x} - \lambda_{1})^{2}}{2\sigma^{2}} - 1\right)e^{-\frac{(\lambda_{x} - \lambda_{1})^{2}}{2\sigma^{2}}}\Delta\sigma_{1}, (2.19 \text{ a})$$
$$\Delta U_{2} = \frac{A_{x}(\lambda_{2} - \lambda_{x})}{\sqrt{2\pi\sigma^{3}}}e^{-\frac{(\lambda_{x} - \lambda_{2})^{2}}{2\sigma^{2}}}\Delta\lambda_{2} + \frac{A_{x}}{\sqrt{2\pi\sigma^{2}}}\left(\frac{(\lambda_{x} - \lambda_{2})^{2}}{\sigma^{2}} - 1\right)e^{-\frac{(\lambda_{x} - \lambda_{2})^{2}}{2\sigma^{2}}}\Delta\sigma_{2}. \quad (2.19 \text{ b})$$

Если отклонения параметров фотоприемников являются случайными и независимыми, тогда формула (2.18) для случайной погрешности принимает вид:

$$\hat{\delta}_{\lambda} = B \sqrt{\left(\frac{\lambda_1 \Lambda_1}{\sigma^2} \hat{\delta} \lambda_1\right)^2 + \left(\left(\frac{\Lambda_1^2}{2\sigma^2} - 1\right) \cdot \hat{\delta} \sigma_1\right)^2 + \left(\frac{\lambda_2 \Lambda_2}{\sigma^2} \hat{\delta} \lambda_2\right)^2 + \left(\left(\frac{\Lambda_2^2}{2\sigma^2} - 1\right) \cdot \hat{\delta} \sigma_2\right)^2 \quad (2.20)$$

где 
$$B = \frac{1}{\left(\ln \left(U_1/U_2\right) + \left(\lambda_2^2 - \lambda_1^2\right)/2\sigma^2\right)}, \Lambda_1 = \lambda_x - \lambda_1 \, \text{и} \, \Lambda_2 = \lambda_x - \lambda_2.$$

График зависимости случайной погрешности от  $\lambda_x$  при значениях  $\lambda_I$ =594,9 нм и  $\lambda_2$  = 662,5 нм,  $\sigma$  =30 нм,  $U_I$ =3 В,  $U_2$  = 3 В и относительных погрешностях  $\hat{\delta}\lambda_1 = \hat{\delta}\lambda_2 = 0.25\%$  и  $\hat{\delta}\sigma_1 = \hat{\delta}\sigma_2 = 0.13$  представлен на рисунке 2.3.



Рис. 2.3. Зависимость относительной погрешности измерения центральной длины волны от  $\lambda_x$ ДФЭП с гауссовыми спектральными характеристиками фотоприемников при  $\lambda_1$ =594,9 нм,  $\lambda_2$ =662,5 нм,  $\sigma$  = 30 нм

Из рисунка видно, что при одинаковых случайных погрешностях параметров фотоприемников ДФЭП погрешность измерения будет минимальной для длины волны излучения, равной среднему значению  $\lambda_x = \lambda_{cp} = (\lambda_1 + \lambda_2)/2$ . Далее при отклонении длины волны излучения в пределах рабочего диапазона от среднего значения погрешность начинает возрастать. Анализ выражения (2.20) показал, что на точность определения центральной длины волны излучения в

наибольшей степени оказывают влияние погрешности, вызывающие смещение положение спектра фотоприемников ДФЭП, например, изменение положения интерференционных фильтров за счет механических вибраций.

На рисунках 2.4 и 2.5 показаны функции относительной случайной погрешности измерения ДФЭП центральной длины волны при различных параметрах светофильтров.



Рис. 2.4. Зависимости относительной погрешности измерения центральной длины волны от разноса максимумов гауссовых спектральных характеристик фотоприемников ДФЭП при различных значениях полосы пропускания светофильтров



Рис. 2.5. Зависимости относительной погрешности измерения центральной длины волны от полосы пропускания светофильтров при различном разносе положения максимумов гауссовых спектральных характеристик фотоприемников ДФЭП

Из графиков на рис. 2.4 и рис. 2.5 видно, что при определенном соотношении расстояния между максимумами спектральных характеристик фотоприемников ДФЭП и полосы пропускания фильтров наблюдается полный минимума относительной случайной погрешности измерения центральной длины

волны. Для обеспечения минимума относительной погрешности измерения центральной длины волны соотношение расстояния между максимумами спектральных характеристик и полосы пропускания должно соответствовать соотношению:

$$\frac{\Delta\lambda}{\sigma} \approx 1.4 . \tag{2.21}$$

Таким образом, для минимизации случайной погрешности при заданной рабочей полосе необходимо подбирать расстояние между максимумами спектральных характеристик ДФЭП в соответствии с выражением (2.21).

Оценка погрешности измерения параметров спектра оптического излучения при заданной ширине спектра проведена на примере СИД типа L-52SRCDW красного свечения. Результаты измерения спектров у 50 штук СИД показали, что центральная длина волны исследованных СИД находится в пределах 634 – 645 нм, ширина спектра СИД по уровню 0,5 – в пределах 18–31 нм. Разброс значений ширины спектра СИД представлен на гистограмме (рис. 2.6); математическое ожидание составило 24,3 нм, дисперсия –СКО<sub>4</sub>=5,3 нм.



Рис. 2.6 Гистограмма распределения СИД типа L-52SRCDW по ширине спектра

Расчет показал, что наибольшее значение абсолютной погрешности определения центральной длины волны наблюдается при ширине спектра СИД 13 нм, при центральной длине волны излучения 600 нм и 660 нм, т.е. в крайних точках рабочего диапазона ДФЭП, и составила 1,6 нм, а относительная – 0,24% и 0,25% соответственно. Графики зависимостей погрешности от центральной длины волны и ширины спектра излучения СИД представлены на рисунке 2.7.



Рис. 2.7. Графики зависимости абсолютной (а) и относительной (б) погрешностей в зависимости от длины волны излучения и ширины спектра СИД

## 2.4 Измерение параметров спектра узкополосного оптического излучения двухканального фотоэлектрического преобразователя с линейными спектральными характеристиками фотоприемников

Рассмотрим задачу измерения параметров спектра узкополосного оптического излучения ДФЭП для случая, когда вместо фотоприемников с гауссовыми спектральными характеристиками используются фотоприемники с линейными спектральными характеристиками. Решение задачи аналогично решению, описанному в разделе 2.2.

Пусть спектральные характеристики фотоприемников имеют кусочнолинейную функцию в диапазоне  $\lambda_{MIN} \le \lambda \le \lambda_{MAX}$  вида (рис. 2.8):

$$S_{1}(\lambda) = K_{1}(\lambda_{MAX} - \lambda)$$
  

$$S_{2}(\lambda) = K_{2}(\lambda - \lambda_{MIN})$$
(2.22)

где  $\lambda_{MIN}$  и  $\lambda_{MAX}$  — длины волн, соответствующие точкам излома функций  $s_1(\lambda)$  и  $s_2(\lambda)$ , а  $K_1$  и  $K_2$  — параметры функций, характеризующие их крутизну.

Спектр излучения также будем описывать гауссовой функцией (2.2).

Рассмотрим решение задачи измерения параметров спектра вида (2.2) с помощью ДФЭП при условии использования фотоприемников со спектральных

характеристик вида (2.22) и при условии, что спектр узкополосного излучения не выходит за границы диапазона  $\lambda_{MIN} \leq \lambda \leq \lambda_{MAX}$ , а полоса частот рабочего диапазона много больше ширины спектра излучения  $\lambda_{MAX} - \lambda_{MIN} \gg \sigma_x$ .



Рис. 2.8. Линейные спектральные характеристики фотоприемников S<sub>1</sub> и S<sub>2</sub> и спектральная характеристика оптического излучения Y<sub>x</sub>.

При попадании светового потока на фотоприемники возникает сигнал, величину которого в общем виде можно описать выражением (2.3). После подстановки (2.22) выражение под знаком интеграла можно записать в виде:

$$S_{1}(\lambda)Y_{x}(\lambda) = K_{1}(\lambda_{MAX} - \lambda)\frac{A_{x}}{\sqrt{2\pi\sigma_{x}}}e^{-\frac{(\lambda - \lambda_{x})^{2}}{2\sigma_{x}^{2}}};$$
$$S_{2}(\lambda)Y_{x}(\lambda) = K_{2}(\lambda - \lambda_{MIN})\frac{A_{x}}{\sqrt{2\pi\sigma_{x}}}e^{-\frac{(\lambda - \lambda_{x})^{2}}{2\sigma_{x}^{2}}}.$$

Подставляя полученные выражение в (2.4), мы приходим к выражению, описывающему сигнал на выходе фотоприемников ДФЭП:

$$U_{1} = C_{1} \begin{bmatrix} \lambda_{MAX} & \int_{MAX} e^{-at^{2}} dt - \int_{\lambda_{MIN}}^{\lambda_{MAX}} \lambda e^{-a(\lambda - \lambda_{x})^{2}} d\lambda \end{bmatrix};$$

$$U_{2} = C_{2} \begin{bmatrix} \lambda_{MAX} & \lambda e^{-a(\lambda - \lambda_{x})^{2}} d\lambda - \lambda_{MIN} & \int_{\lambda_{MIN}}^{\lambda_{MAX}} e^{-at^{2}} dt \end{bmatrix},$$
(2.23)

ГДе  $C_i = \frac{A_x K_i}{\sqrt{2\pi\sigma_x}}, a = \frac{1}{2\sigma_x^2}, t = \lambda - \lambda_x.$ 

Учитывая, что спектр излучения не выходит за границы диапазона  $\lambda_{MIN} \leq \lambda \leq \lambda_{MAX}$ , т.е. центральная длина волны оптического излучения находится на расстоянии не менее  $\pm 2\sigma_x$  от границ диапазона измерений, то

$$\sum_{\substack{\lambda \text{ MAX} \\ \lambda \text{ MIN}}}^{\lambda \text{ MAX}} \lambda e^{-a(\lambda-\lambda_x)^2} d\lambda \approx \int_{-\infty}^{+\infty} \lambda e^{-a(\lambda-\lambda_x)^2} d\lambda = \lambda_x \sqrt{\frac{\pi}{a}}, \int_{\lambda \text{ MIN}}^{\lambda \text{ MAX}} e^{-at^2} dt \approx \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-at^2} dt = \sqrt{\frac{\pi}{a}}$$

Тогда:

$$U_{1} = C_{1} \left[ \lambda_{MAX} \sqrt{\frac{\pi}{a}} - \lambda_{x} \sqrt{\frac{\pi}{a}} \right];$$

$$U_{2} = C_{2} \left[ \lambda_{x} \sqrt{\frac{\pi}{a}} - \lambda_{MIN} \sqrt{\frac{\pi}{a}} \right].$$
(2.24)

Окончательные выражения для сигналов, после упрощения выражений (2.24), принимает вид:

$$U_{1} = A_{x}K_{1}[\lambda_{MAX} - \lambda_{x}];$$
  

$$U_{2} = A_{x}K_{2}[\lambda_{x} - \lambda_{MIN}].$$
(2.25)

Выражение для A<sub>x</sub> находится путем сложения уравнений (2.25):

$$A_{x} = \frac{U_{1}/K_{1} + U_{2}/K_{2}}{(\lambda_{MAX} - \lambda_{MIN})}.$$
 (2.26)

Для нахождения центральной длины волны излучения разделим уравнения (2.25) одно на другое и после преобразований получим:

$$\lambda_{x} = \frac{U_{1}\lambda_{MIN}K_{2} + U_{2}\lambda_{MAX}K_{1}}{U_{1}K_{2} + U_{2}K_{1}}.$$
(2.27)

Заметим, что в выражения (2.25) не входит параметр ширины спектра излучения. Для определения ширины спектра излучения может быть использован третий фотоприемник со спектральной характеристикой гауссова вида. Величина сигнала U<sub>3</sub> фотоприемника определяется интегрированием по полосе, равна

$$U_{3} = \frac{S_{3}A_{x}}{\sqrt{2\pi}\sqrt{\sigma_{3}^{2} + \sigma_{x}^{2}}}e^{-\frac{(\lambda_{x} - \lambda_{3})^{2}}{2(\sigma_{3}^{2} + \sigma_{x}^{2})}}.$$
(2.28)

Данное уравнение можно решить относительно  $\sigma_x$  численным методом.

# 2.5 Погрешность измерения параметров узкополосного оптического излучения двухканальным фотоэлектрическим преобразователем с линейными спектральными характеристиками фотоприемников

Для оценки погрешности измерения длины волны излучения, обусловленной отклонением параметров фотоприемников ДФЭП от номинальных подставим в полный дифференциал  $\lambda_x \quad \Delta \lambda_x = \frac{\partial \lambda_x}{\partial U_1} \Delta U_1 + \frac{\partial \lambda_x}{\partial U_2} \Delta U_2$  производные для  $\frac{\partial \lambda_x}{\partial U_1}$  и

 $\frac{\partial \lambda_x}{\partial U_2}$  из (2.27) получим выражение для систематической погрешности измерения  $\lambda_x$ 

$$\Delta \lambda_{xC} = \frac{K_{1}K_{2}}{\left(U_{1}K_{2} + U_{2}K_{1}\right)^{2}} \left[ \left( \frac{U_{2}K_{1}\lambda_{MIN} - U_{2}K_{1}\lambda_{MAX}}{K_{1}} \right) \Delta U_{1C} + \left( \frac{U_{1}K_{2}\lambda_{MAX} - U_{1}K_{2}\lambda_{MIN}}{K_{2}} \right) \Delta U_{2C} \right], \quad (2.29)$$

где  $\Delta U_{1C}$  и  $\Delta U_{2C}$  – абсолютные составляющие систематических погрешностей сигналов.

Изменение сигналов фотоприемников ДФЭП из-за изменения положения максимума и ширины спектральных характеристик фотоприемников запишем в форме полных дифференциалов:

$$\Delta U_{1} = A_{x}K_{1}\lambda_{MAX} \left[ \frac{\Delta\lambda_{MAX}}{\lambda_{MAX}} - \left( \frac{\lambda_{x}}{\lambda_{MAX}} - 1 \right) \frac{\Delta K_{1}}{K_{1}} \right] = A_{x}K_{1}\lambda_{MAX} \left[ \delta\lambda_{MAX} - \left( \frac{\lambda_{x}}{\lambda_{MAX}} - 1 \right) \delta K_{1} \right], (2.30 \text{ a})$$

$$\Delta U_{2} = A_{x}K_{2}\lambda_{MIN} \left[ -\frac{\Delta\lambda_{MIN}}{\lambda_{MIN}} + \left( \frac{\lambda_{x}}{\lambda_{MIN}} - 1 \right) \frac{\Delta K_{2}}{K_{2}} \right] = A_{x}K_{2}\lambda_{MIN} \left[ -\delta\lambda_{MIN} + \left( \frac{\lambda_{x}}{\lambda_{MIN}} - 1 \right) \delta K_{2} \right]. (2.30 \text{ b})$$

Если изменение параметров являются случайными и независимыми, тогда формула для случайной погрешности принимает вид:

$$\hat{\delta}_{\lambda} = D \sqrt{\tilde{U}_{2}^{2} \left(1 - \frac{1}{\psi}\right)^{2}} \left(\delta \lambda_{MAX} + \left(\frac{\lambda_{x}}{\lambda_{MAX}} - 1\right) \cdot \delta K_{1}\right)^{2} + \tilde{U}_{1}^{2} \left(1 - \psi\right)^{2} \left(\delta \lambda_{MIN} + \left(\frac{\lambda_{x}}{\lambda_{MIN}} - 1\right) \cdot \delta K_{2}\right)^{2}$$
(2.31)

ГДЕ 
$$D = \frac{A_x K_1 K_2 \lambda_{MAX} \lambda_{MIN}}{(U_1 K_2 + U_2 K_1)(U_1 K_2 \lambda_{MIN} + U_2 K_1 \lambda_{MAX})}, \tilde{U}_1 = U_1 K_2 \mathbf{H} \tilde{U}_2 = U_2 K_1, \Psi = \frac{\lambda_{MIN}}{\lambda_{MAX}}.$$

График функции  $\hat{\delta}_{\lambda}(\lambda_{x})$  при значениях  $\lambda_{MAX}$ =662,5 нм и  $\lambda_{MIN}$ =594,9 нм,  $K_{I}=K_{2}$ =0,015,  $U_{I}$ =3 B,  $U_{2}$ =3 B и относительных погрешностях  $\hat{\delta}\lambda_{MAX} = \hat{\delta}\lambda_{MIN} = 0.25\%$  и  $\hat{\delta K}_1 = \hat{\delta K}_2 = 0.13$  представлен на рисунке 2.7. Из рисунка 2.7 видно, что при одинаковых случайных погрешностях параметров фотоприемников погрешность измерения будет минимальной для длины волны излучения, равной среднему значению диапазона измерения  $\lambda_x = \lambda_{cp} = (\lambda_{MIN} + \lambda_{MAX})/2$ .



Рис. 2.9. Зависимость относительной погрешности измерения центральной длины волны оптического излучения ДФЭП с линейными спектральными характеристиками фотоприемников от λ <sub>x</sub> при λ<sub>MIN</sub>=594,9 нм и λ<sub>MAX</sub>=662,5 нм, K<sub>1</sub>=K<sub>2</sub>=0,015 нм

Заметим, у ДФЭП с нормированными гауссовыми спектральными характеристиками фотоприемников и тем же рабочим диапазоном длин волн погрешность измерения центральной длины волны будет примерно в три раза меньше (см. рис. 2.3). Следовательно, использование в ДФЭП фотоприемников с гауссовыми спектральными характеристиками является предпочтительным.

#### 2.8 Влияние шума на результат измерения параметров спектра оптического излучения двухканальным фотоэлектрическим преобразователем

При проведении измерений параметров спектра узкополосного оптического излучения в реальных условиях необходимо учитывать влияние мультипликативных и аддитивных составляющих шума возникающие в каналах ДФЭП, таких как дробовые шумы, шумы вызванные засветкой, а также шумы усилителя и др. [11, 12, 13].

Для оценки влияния шума на результат определения центральной длины волны и ширины спектра узкополосного оптического излучения представим шум в виде аддитивной и мультипликативной составляющих. Анализ проведем путем компьютерного моделирования с использованием стандартных генераторов случайных чисел.

Рассмотрим случай измерения параметров спектра излучения с гауссовым спектром с помощью ДФЭП со спектральными характеристиками фотоприемников гауссова вида одинаковой ширины. В этом случае параметры спектра излучения определяются из решения системы уравнений (2.10).

Аддитивная составляющая шума U<sub>ш</sub> не зависит от величины принимаемого сигнала [81]. Пусть на выходе фотоприемника, наряду с измеряемым сигналом присутствует шум, равномерно распределенный по частотной области. Тогда выражение (2.3) примет вид:

$$U_{n} = \int_{0}^{1000} S_{n} Y_{x} d\lambda + U_{u} K_{u}, \qquad (2.32)$$

где  $K_{m} = rnorm$  (N, M, D) — вектор случайных чисел с нормальным законом распределения, N=100 — количество случайных чисел, M = 0 — математическое ожидание случайной величины, D — дисперсия шума,  $U_{m}$  — уровень шумового сигнала, n — номер фотоприемника.

Проведенный анализ решения системы уравнений для зашумленного сигнала показал, что уровень шума в наибольшей степени влияет на точность измерения ширины спектра излучения, что в свою очередь несколько увеличивает погрешность определения центральной длины волны излучения. На рисунках 2.10–2.13 показаны графики зависимости СКО ширины спектра и центральной длины волны излучения в зависимости от отношения сигнал/шум при различных значениях центральной длины волны и ширины спектра излучения, где СКО рассчитано по формулам:

$$\delta_{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum\limits_{i=0}^{N} (\sigma_{i_{u_{3M}}} - \sigma_{x})^{2}}{N - 2}},$$

$$\delta_{\lambda} = \sqrt{\frac{\sum\limits_{i=0}^{N} (\lambda_{i_{u_{3M}}} - \lambda_{x})^{2}}{N - 2}},$$
(2.33)

где *N*=100 – количество проведенных решений системы уравнения,  $\sigma_{i_{u3M}}$ ,  $\lambda_{i_{u3M}}$  – расчетные значения соответственно ширины спектра и длины волны излучения, отношение сигнал/шум рассчитано по формуле:



Рис. 2.10. Зависимость значения СКО длины волны от отношения сигнал/шум при аддитивном шумовом воздействии для различных значений ширины спектра оптического излучения



Рис. 2.11. Зависимость значения СКО ширины спектра от отношения сигнал/шум при аддитивном шуме для различных значений ширины спектра оптического излучения



Рис. 2.12. Зависимость значения СКО длины волны от отношения сигнал/шум при аддитивном шумовом воздействии для различных значений центральной длины волны оптического излучения



Рис. 2.13. Зависимость значения СКО ширины спектра от отношения сигнал/шум при аддитивном шумовом воздействии для различных значений центральной длины волны оптического излучения

Из рисунка 2.12 видно, что при отношении сигнала к шуму менее 60 дБ СКО ширины спектра начинает резко возрастать и при 45 дБ ширину спектра определить не удается. Влияние шумов на результат измерения центральной длины волны сказывается значительно меньше. Допустимое значение отношения сигнала к шуму при измерении центральной длины волны – 40 дБ.

Из графиков на рисунках 2.10 – 2.13 также видно, что при отклонении центральной длины волны излучения от середины рабочего диапазона (628,7 нм) наблюдается повышение точности измерения ширины спектра и снижение точности измерения центральной длины волны. При увеличении ширины спектра оптического излучения увеличивается точность определения ширины спектра и снижается точность измерения центральной длины волны.

При наличии мультипликативной составляющей шума [106] измеряемый сигнал на выходе *n*-го фотоприемника принимает вид:

$$U_{n} = (1 + K_{u}) \int_{0}^{1000} S_{n} Y_{x} d\lambda$$
 (2.34)

Шум задан с нормальной плотностью распределения. Графики зависимости СКО центральной длины волны и ширины спектра СИД в зависимости от отношения сигнал/шум (*SNR*) для различных значений центральной длины волны и ширины спектра излучения СИД представлены на рисунках 2.14 – 2.17, при этом отношение сигнала к шуму рассчитывалось по формуле:



Рис. 2.14. Зависимость значения СКО длины волны от отношения сигнала к шуму при аддитивном шуме для различных значений ширины спектра оптического излучения



Рис. 2.15. Зависимость значения СКО ширины спектра от отношения сигнал/шум при аддитивном шуме для различных значений ширины спектра оптического излучения



Рис. 2.16 – Зависимость значения СКО длины волны от отношения сигнал/шум при аддитивном шуме для различных значений центральной длины волны оптического излучения

(2.42)



Рис. 2.17. Зависимость значения СКО ширины спектра от отношения сигнал/шум при аддитивном шуме для различных значений центральной длины волны оптического излучения

Результаты моделирования и проведенный анализ показали, что воздействие мультипликативной составляющей шума на результат измерения параметров спектра узкополосного оптического излучения аналогично воздействию аддитивного шума.

Проведенный анализ показал, что при измерении параметров узкополосного оптического излучения, где не требуется высокая точность, можно принять ширину спектра источника излучения неизменной и равной среднему значению ширины спектра однотипных источников узкополосного излучения.

На точность измерения параметров спектра значительное влияние оказывает шум. Наименьшее влияние шума на точность измерения центральной длины волны наблюдается в области пересечения спектральных характеристик фотоприемников, как для аддитивной, так и для мультипликативной составляющих. Отношение сигнал/шум SNR при измерении центральной длины волны оптического излучения не должно превышать 40 дБ, ширины спектра – 60 дБ.

#### Выводы

Получены выражения и разработаны алгоритмы определения центральной длины волны и ширины спектра узкополосного оптического излучения в едином измерительном цикле по сигналам двухканальных фотоэлектрических преобразователей с различающимися гауссовыми и линейными спектральными характеристиками фотоприемников. Получены выражения для методических погрешностей указанных способов. Показано, что при одинаковых отклонениях параметров фотоприемников от номинальных погрешность измерения центральной длины волны будет минимальной при значении длины волны излучения, равном среднему значению диапазона измерения  $\lambda_x = \lambda_{cp} = (\lambda_1 + \lambda_2)/2$ . При этом минимальная погрешность измерения центральной длины волны ДФЭП с гауссовыми спектральными характеристиками фотоприемников примерно в три раза меньше, чем для ДФЭП с линейными спектральными характеристиками фотоприемников при равном рабочем диапазоне.

Исследовано влияние аддитивного и мультипликативного шумов ДФЭП на погрешность измерения параметров спектра излучения. Установлено, что наименьшее влияние как аддитивной, так и мультипликативной составляющих шума на погрешность измерения центральной длины волны наблюдается в области пересечения спектральных характеристик фотоприемников. Отношение сигнала к шуму SNR при измерении центральной длины волны оптического излучения не должно превышать 40 дБ, ширины спектра – 60 дБ

## Глава 3 Экспериментальная установка для измерения параметров спектра узкополосных оптических сигналов

### 3.1 Экспериментальная установка на основе двухканального фотоэлектрического преобразователя с линзовой оптической схемой

Для экспериментальной апробации алгоритмов измерений описанных в Главе 1 была разработана установка, структурная схема которой представлена на рис. 3.1. В ней использовалась упрощенная модель, позволившая подтвердить функциональные возможности алгоритмов и получить предварительные результаты по оценке инструментальной погрешности [89, 97, 110].

Устройство спроектировано на основе способа измерения параметров спектра оптического излучения ДФЭП, позволяющего быстро и достаточно точно измерить центральную длину волны и ширину спектра узкополосного оптического излучения в едином измерительном цикле. Алгоритм обработки сигналов с фотоприемников при определении центральной длины волны организован в соответствии с выражением (2.15).

Рассмотрим техническую реализацию способа. Для этого выражение (2.15) перепишем в виде:

$$\lambda_{x} = \frac{1}{C} (\ln U_{1} - \ln U_{2}) + D . \qquad (3.1)$$

Структурная схема устройства, реализующего алгоритм обработки сигналов фотоприемников, представлена на рисунке 3.1.

В состав устройства входят: два фотоприемника (ФП), Операционный усилитель (ОУ), микроконтроллер (МК), индикатор (И), коммутирующий ключ (КК) и СИД. В МК реализованы: аналогово-цифровой преобразователь (АЦП), логарифмирующий преобразователь (ЛП), вычитающее устройство (ВУ), преобразователь кода (ПК) и устройство управления (УУ).

На рис. 3.2 представлена оптическая схема устройства. В ее состав входят: 1 – источник контролируемого излучения (например, СИД), 2 – конденсор,

построенный на основе двух линз, одна из которых матовая, 3 – диафрагма, 4 – фокусирующая линза, 5 – делитель оптического сигнала и 6 – два фотоприемника.



Рис. 3.1. Структурная схема устройства для измерения центральной длины волны узкополосного оптического излучения



Рис. 3.2. Оптическая схема экспериментальной установки

При подаче команды «Пуск» оператором либо в автоматическом режиме устройство управления подает сигнал на коммутирующий каскад, включая СИД. Время свечения СИД задается оператором. По окончании времени свечения СИД устройство включает АЦП, управления В емкости которого начинает накапливаться усиленный сигнал с первого фотоприемника. После заряда емкости происходит отключение АЦП и СИД. Далее сигнал в цифровой форме поступает на логарифмический преобразователь, а результат сохраняется в памяти микроконтроллера. Затем по описанному выше порядку происходит измерение сигнала со второго фотоприемника. После окончания измерения сигнал со

второго фотоприемника в цифровой форме поступают на вычитающее устройство. Результат вычислений выводится на индикатор.

В качестве фотоприемников используются фотодиоды BPW21R [127] и ФД256К [2], склоны спектральных характеристик которых пересекаются в области красного цвета. Усилитель выполнен на микросхеме малошумящего операционного усилителя К157УД2 и работает по принципу преобразователя тока в напряжение. Питание на операционные усилители подается от стабилизированного источника питания со средней точкой на 12В.

В качестве микроконтроллера используется микросхема PIC18F187A [142]. Микросхема имеет встроенный десятиразрядный АЦП. Задающий тактовый генератор выполнен на кварцевом резонаторе и имеет тактовую частоту 8 МГц. Кварцевая стабилизация обеспечивает высокую стабильность частоты и высокое быстродействие микроконтроллера. Быстродействие прибора ограничено процессом преобразования АЦП, длительность которого по предварительной оценке составила около 20 мкс.

С помощью устройства измерялись параметры спектров выборки СИД типа L-52SRCDW в количестве 50 штук. Сравнение полученных результатов на экспериментальной установке с результатами измерения на монохроматоре МДР-3, погрешность которого при определении центральной длины волны составляет 0,1 нм, показало работоспособность и перспективность способа. Коэффициент корреляции для выборки в 50 СИД составил 0,86. Но желаемые результаты по быстродействию и точности измерений на описанном выше устройстве достигнуты не были. По результатам предварительных испытаний устройства были определены возможности и пути повышения быстродействия и точности измерений: улучшение выравнивания светового потока источника, увеличение разрядности АЦП, использование быстродействующих усилителя и АЦП и приближение спектральных характеристик фотоприемников к гауссовой форме.

57

### 3.2 Экспериментальная установка с оптоволоконной схемой деления оптического излучения

Устройство, описанное в п. 3.1, не достигло ожидаемого уровня по точности и быстродействию. Для улучшения метрологических характеристик была разработана установка, структурная схема которой представлена на рисунке 3.3.



Рис. 3.3. Структурная схема экспериментальной установки с оптоволоконной схемой деления оптического излучения

При включении установки происходит настройка микроконтроллером (МК) аналого-цифровых преобразователей АЦП1 и АЦП2, а также интерфейса связи с персональным компьютером (ПК) по специализированной программе, по которой также задается длительность интервала между измерениями (шаг измерения). После инициализации ядра и периферии на МК оператором или автоматически подается команда запуска измерения. МК подает сигнал на коммутирующий ключ, который включает СИД. Световой поток от СИД, выравненный в оптическом волокне (световоде), попадает на оптический коллектор, где происходит деление светового потока на два равных пучка света. На ДФЭП, состоящем из светофильтра, фотоприемника и усилителя преобразователя токнапряжение, формируется электрический сигнал, величина которого зависит от

интенсивности излучения, доминирующей длины волны и ширины спектра излучения. Усиленный электрический сигнал преобразуется АЦП.

Через время, равное шагу измерения, МК запускает преобразование на двух АЦП одновременно. Сигнал в цифровой форме сохраняется в памяти МК. Процесс повторяется в течение заданного промежутка времени (длительности измерений). После окончания измерения параметров спектра СИД, МК выключает СИД и передает данные на ПК, где происходит процесс обработки полученных данных по формулам, которые подробно описаны в разделе 2.2.

Для связи датчиков и ПК был использован МК типа STM32F107 [148], построенный на базе ядра Cortex M3. МК входит в состав отладочной платы SK-MSTM32F107, имеет 64 Кб оперативной памяти, интерфейсы связи с другими устройствами: Ethernet, USB, UART; два независимых 12-разрядных АЦП с быстродействием 1 MSP; максимальная частота работы ядра МК составляет 72 МГц. Время одного преобразования АЦП может составлять менее 1 мкс.

В ДФЭП использованы быстродействующие широкополосные p-i-n фотодиоды BPW34 [128] и интерференционные светофильтры BPF 600\80-G и BPF 660\80-G, форма спектральной характеристики которых имеет вид гауссовой кривой. Выбран фотогальванический режим работы фотодиода. В таком режиме фотодиод генерирует электрический ток, величина которого линейно меняется в зависимости от освещенности:

$$i_{\varphi \overline{\beta}} = S_{I}E \qquad (3.2)$$

Фотогальванический режим работы фотодиода позволяет значительно упростить принципиальную схему

Усилитель построен на операционном усилителе AD820A [122] по схеме преобразователя ток-напряжение (см. раздел 3.2).

Т.к. процесс передачи данных на ПК из памяти МК происходит после процесса измерения, то особых требований к интерфейсу связи не предъявляется. Для простоты реализации был выбран интерфейс RS-232.

#### 3.3 Фотоэлектрический преобразователь.

Наибольшее влияние на быстродействие и точность измерений экспериментальной установки с оптоволоконной схемой деления оказывает фотоэлектрический преобразователь (ФЭП). ФЭП состоит из светофильтра, фотодиода и усилителя сигнала. Для определения параметров излучения СИД по описанному во 2 главе алгоритму, светофильтр должен обладать спектральной характеристикой гауссова вида. Оценка точности аппроксимации характеристик светофильтров подробно описана в [95]. Ниже приведены основные выкладки необходимые для проведения дальнейших расчетов.

Параметры светофильтров BPF 600\80-G и BPF 660\80-G приведены в табл. 3.1. К исследуемым светофильтрам прилагаются акты выходного контроля, в которых приведена спектральная характеристика, измеренная спектрофотометром Cary-50, в табличном и графическом виде (рис. 3.4). Табличные данные светофильтров приведены с шагом по длине волны  $\Delta \lambda$ =5 нм.

Параметр спектральной	Тип светофильтра	
характеристики светофильтра	BPF 600\80-G	BPF 660\80-G
Центральная длина волны CWL, нм	600±6	660±7
Полоса пропускания FWHM, ширина Δλ <sub>0.5</sub> , нм	80±12	80±14
Максимальное значение коэффициента пропускания Т в полосе пропускания, %	>60	>55
Ширина Δλ <sub>0.1</sub> , нм	<152	<213
Ширина Δλ <sub>0.01</sub> , нм	<240	<390
Угол падения луча, градусы	0.0±12	0.0±12
Световая апертура, %	80%	85%

Таблица 3.1 – Параметры светофильтров



Рис. 3.4. Графики спектральных характеристик светофильтров: a) BPF 600\80-G; б) BPF 660\80-G

Анализ реальной спектральной характеристики показал, что ее форма значительно гауссовой. Среднеквадратичное отличается ОТ отклонение характеристики для светофильтра BPF 600\80-G составляет 2,1%, а для светофильтра BPF 660\80-G – 5,6%. Для упрощения арифметических вычислений узкополосного при расчете параметров спектра оптического сигнала спектральные характеристики светофильтров должны иметь идентичную форму, т.е. параметры σ, характеризующие ширину характеристики, должны быть равными для обоих каналов ДФЭП, что еще более увеличивает отклонение реальной характеристики светофильтра от аппроксимированной до 9%.

Для повышения точности математического описания реальных спектральных характеристик светофильтра был аппроксимирован один склон спектральной характеристики. Учитывая, что исследуемые красные СИД излучают свет с доминирующей длиной волны, находящейся в диапазоне от 615 до 640 нм, то в светофильтре BPF 600\80-G был аппроксимирован правый склон характеристики, а BPF 660\80-G – левый склон характеристики. СКО для светофильтров составило 1,2% и 1,5% соответственно.

61

Для повышения точности аппроксимации спектральных характеристик применена кусочная аппроксимация, при которой реальная характеристика была поделена на отдельные пересекающиеся участки по 20 нм. Проведенный анализ кусочной аппроксимации показал, что достигается высокая точность приближения реальных характеристик К математическим функциям. Максимальное значение СКО на участках не будет превышать 0,5%. Но при такой аппроксимации в 2 раза увеличивается количество расчетов для единичного измерения, т.к. сначала необходимо приближенно оценить длину волны излучения, чтобы выбрать нужный участок аппроксимированной характеристики. При многократных измерениях одного образца, например, через определенные интервалы времени, достаточно приближенно оценить центральную длину волны излучения один раз.



Рис. 3.5. Электрическая принципиальная схема фотоэлектрического преобразователя

Схема электрическая принципиальная ФЭП, приведенная на рисунке 3.5, обеспечивает линейную зависимость тока фотодиода от его освещенности [112, 113, 118]. Частотные параметры операционного усилителя и фотодиода позволяют обрабатывать сигнал на выходе со скоростью нарастания не более 0,5 В/мкс. Таким образом, быстродействие схемы определяется постоянной времени RC цепи в обратной связи усилителя ( $\tau_{RC}$ ), для уменьшения постоянной RC цепи нужно уменьшить либо сопротивление, либо емкость конденсатора. Минимальное

значение емкости будет определяться подавлением ВЧ шумов схемы и ее устойчивостью, а минимальное значение сопротивления резистора определяется уровнем необходимого выходного напряжения, обеспечивающего оптимальный режим работы АЦП.

Исследование зависимости выходного напряжения усилителя от входного тока выявили высокую линейность в рабочем диапазоне. Неравномерность характеристики составляет величину не более 0,12%. Таким образом, в погрешность прибора, вызванную неравномерностью характеристик усилителя, включать не имеет смысла.



Рис. 3.6. Эквивалентная шумовая схема фотоэлектрического преобразователя

Шумовые характеристики фотоэлектрического преобразователя. Методы расчета шумовых параметров фотоприемников подробно изложены в [11, 19, 126, 132, 140]. Эквивалентная схема фотопреобразователя для определения шумовых характеристик приведена на рисунке 3.6 [19].

Выходной сигнал фотопреобразователя определяется выражением:

$$U_{n\Sigma} = R_f i_{n\Sigma} , \qquad (3.3)$$

где *i*<sub>*n*Σ</sub> – величина шумового тока в цепи обратной связи, *R*<sub>*f*</sub> – сопротивление цепи обратной связи.

Результирующий шумовой ток, приведенный ко входу усилителя, описывается выражением:

$$i_{n\Sigma} = \sqrt{i_{n\phi\phi}^{2} + i_{nOO}^{2} + i_{R}^{2}}, \qquad (3.4)$$

где  $i_{n\sigma\sigma}$  – шумовой ток фотодиода,  $i_{n\sigma\sigma}$  – токовый шум операционного усилителя приведенный ко входу,  $i_{R}$  – шумовой ток сопротивления цепи обратной связи приведенный ко входу усилителя. В развернутом виде выражение (3.4) выглядит следующим образом:

$$i_{n\Sigma} = \sqrt{i_{n\Phi\Phi}^{2} + i_{nOO}^{2} + \left(\frac{e_{n_{-}oy}}{R_{o}}\right)^{2} + \left(\frac{4kTR_{f}}{R_{f}^{2}}\right)^{2}}, \qquad (3.5)$$

где  $e_{n_oy}$  – собственные шумы усилителя по напряжению,  $R_o$  – активная составляющая сопротивления фотодиода, k – постоянная Больцмана, T – температура.

Т.к. величина  $R_f$  много больше величины  $R_0$ , то последним слагаемым выражения (3.5) можно пренебречь. Учитывая, что операционный усилитель AD820A, входной каскад которого выполнен на полевых транзисторах, обладает минимальным значением токовых шумов, но значительным уровнем шума по напряжению 16 нВ/ $\sqrt{\Gamma_{II}}$ , то выражение (3.5) принимает вид:

$$i_{n\Sigma} = \sqrt{i_{n\phi\phi}^{2} + \left(\frac{e_{n_{o}}}{R_{o}}\right)^{2}}$$
(3.6)

ИЛИ

$$U_{n\Sigma} = \sqrt{\left(i_{n\phi\phi} R_{f}\right)^{2} + \left(\frac{e_{n_{o}\phiy} R_{f}}{R_{o}}\right)^{2}} .$$
(3.7)

Шумовой ток фотодиода определяется из выражения:

$$i^{2}_{n\phi\phi} = \left(NEP \cdot S_{I}\right)^{2}, \qquad (3.8)$$

где *NEP* – минимальная мощность излучения, при которой отношение сигнал/шум на выходе фотодиода равно 1, *S<sub>i</sub>* – токовая чувствительность фотодиода. Подставив (3.8) в выражение (3.7), получим окончательный вид уравнения, описывающего шумы на выходе датчика:

$$U_{n\Sigma} = \sqrt{\left(NEP \cdot S_{I} \cdot R_{f}\right)^{2} + \left(\frac{e_{n_{o}} \cdot R_{f}}{R_{o}}\right)^{2}} \quad . \tag{3.9}$$

Путем подстановки в выражение (3.9) параметров операционного усилителя и фотодиода было получено значение уровня шума на выходе фотоэлектрического преобразователя не более 1,5 мВ/√Гц.

## 3.4 Алгоритм работы микроконтроллера и калибровка экспериментальной установки с оптоволоконной схемой деления оптического излучения

Рассмотрим процесс измерения центральной длины волны светодиода.

При включении МК происходит инициализация используемой периферии: инициализация и настройка тактового генератора МК, блока управления прерываниями, АЦП, используемых портов, UART и блока DMA, который обеспечивает автоматическую передачу данных из регистра АЦП в отведенную память МК без участия ядра контроллера.

Тактовый генератор и шины связи с периферией настраиваются на максимальное быстродействие. Тактовая частота МК выставлена равной 72 МГц.

АЦП также настраивается на максимальное быстродействие. После чего происходит его автоматическая калибровка. Верхнее опорное напряжение для АЦП составляет 3,3 В, что соответствует питающему напряжению МК. Максимальная тактирующая частота, с которой может работать блок АЦП, составляет 14 МГц. Время одного преобразования *t*<sub>s</sub> задано в 1,5 машинных цикла. Время преобразования определяется по формуле:

$$T_{K} = t_{S} + 12,5 (3.10)$$

Таким образом, время преобразования составляет 14 машинных циклов, что на частоте 14 МГц соответствует 1 мкс.

Два АЦП настроены таким образом, что работают в зависимом режиме, т.е. при запуске АЦП1 одновременно запускается и АЦП2. Конвертированные данные сохраняются в общий 32-разрядный регистр.

Работа блока UART на процесс измерения не влияет, т.к. передача данных на ПК происходит после окончания всех измерений. Поэтому параметры настройки UART подробно рассматривать не имеет смысла.

После инициализации описанной выше периферии происходит настройка таймера, период работы которого соответствует шагу измерений. Задается временной диапазон, в течение которого будут выполняться измерения параметров оптического излучения СИД.

Далее МК включает СИД, одновременно запуская первое преобразование АЦП и таймер. При достижении на таймере нулевого значения вызывается прерывание, в ходе которого запускаются повторные преобразования АЦП. После окончания процесса измерения МК останавливает таймер, отключает СИД и запускает передачу данных на ПК по средствам интерфейса UART. На ПК данные проходят дальнейшую обработку по выражениям, приведенным в разделе 2.2.

Т.к. измерительных два канала невозможно сделать полностью идентичными по всем параметрам, то в расчет введен поправочный коэффициент, который учитывает следующие факторы: неточность деления светового потока в соотношении 50/50, разную чувствительность фотоприемников, отличие коэффициентов усиления усилителей. Для определения поправочного коэффициента был использован лазер с известной длиной волны. По значению длины волны излучения лазера, соотношению светопропускания светофильтров *К<sub>сф</sub>* на этой длине волны, определен искомый поправочный коэффициент как отношение выходных сигналов с операционных усилителей U<sub>1</sub> и U<sub>2</sub>:

$$K = \frac{U_2}{U_1} \cdot K_{c\phi} . \tag{3.11}$$

При необходимости имеется возможность определения координат цвета СИД и их изменения за необходимый промежуток времени по формулам, приведенным во 2-й главе диссертационной работы.

## 3.5 Инструментальная погрешность экспериментальной установки с оптоволоконной схемой деления оптического излучения

Процесс измерения параметров спектра СИД осуществляется косвенным методом с использованием двух измерительных каналов (ИК) с ФЭП. Учитывая, что измерительные каналы полностью идентичны по своей структуре, то погрешности измерительных каналов оценены идентичным образом. Методы оценки погрешности подробно изложены в [57, 82].

Погрешность отклонения параметров характеристик светофильтров от номинальных значений. Согласно паспортным данным на светофильтры отклонения максимумов спектральных характеристик от номинального значения не превышает величины 6 нм для светофильтра BPF 600\80-G и 7 нм для светофильтра BPF 660\80-G. Данная погрешность является систематической. Для ее уменьшения в алгоритм прибора заложены поправочные коэффициенты. Оставшуюся не исключенную часть систематической погрешности, в которую можно включить погрешности вызванные вибрациями, изменением угла падения оптического излучения в процессе эксплуатации экспериментальной установки будем рассматривать как случайную погрешность с нормальным законом распределения. Как правило, такая погрешность составляет 20-30 % от приведенной в паспорте светофильтров. Таким образом, погрешность отклонения параметров характеристик светофильтров от номинальных значений составляет 0,25% для светофильтра BPF 600\80-G и 0,27% для светофильтра BPF 660\80-G для отклонения длины волны соответствующей пиковым значениям и 13% для полосы пропускания для каждого светофильтра.

**Погрешность ФЭП**. В состав ФЭП входят: фотодиод, усилитель и АЦП. Как было описано выше, 12-разрядное АЦП работает в диапазоне от 0 до 3,3 В. В

связи с большим разбросом интенсивность излучения СИД входное напряжение на АЦП ограничено диапазоном от 2 до 3 В, путем подбора коэффициента усиления усилителей.

Абсолютная погрешность АЦП составила:

$$\Delta_{AUII} = \frac{U_{MAX - BX}}{A} = \frac{3.3 B}{2^{12}} = 0.8 MB , \qquad (3.12)$$

а ее приведенное значение к пределу измерений:

$$\delta_{AUII} = \frac{0.8 \, \text{MB}}{2 \, \text{B}} \cdot 100 \, \% = 0.04 \, \% \, . \tag{3.13}$$

Величина погрешности значительно меньше величин погрешности других узлов. Поэтому учитывать ее не имеет смысла.

Погрешность смещения нуля усилителя при колебании температуры. Используемый усилитель, согласно справочнику, является с малым смещением нуля, величина которого составляет не более 800 мкВ. Что приводит к погрешности не более 0,04%. Следовательно, учитывать ее не имеет смысла.

Погрешность, обусловленная шумами. Уровень шума на выходе усилителя составляет величину 1,5 мВ, что составляет не более трех дискретных значений. Уровень шума не зависит от величины входного сигнала, т.е. погрешность, вызванная шумами усилителя, является аддитивной случайной величиной и имеет нормальный закон распределения. Погрешность, вызванная шумами ФЭП, составила 0,12%.

Погрешность, вызванная изменением температуры окружающей среды. Наибольшему влиянию температуры подвержен ток фотодиода. По справочнику [151], величина температурного коэффициента тока составляет  $K_I=0,1\%/K$ . Эксплуатация установки предполагается при нормальных условиях окружающей среды в помещении. Изменение температуры окружающей среды имеет случайный характер с равномерным законом распределения. Диапазон колебания температуры не превышает 5°C. Ошибка, вызванная изменением температуры, составила не более 0,5%.

Погрешность оптической схемы. К погрешности оптической схемы отнесены две составляющие, вызванные неточностью разделения светового потока в соотношении 50/50 и выравнивания светового потока от светодиода. Первую составляющую погрешности достаточно просто компенсировать путем подстройки коэффициенту усиления усилителя, либо введением поправочного коэффициента. Рассчитать погрешность выравнивания светового потока в оптоволоконной схеме деления достаточно сложно, поэтому погрешность была оценена косвенным образом по измерениям лазерного оптического излучения с длинной волны 630,2 нм. Анализ показал, что погрешность является случайной величиной с законом распределения близким к нормальному. Погрешность не превышает величины 1%.

**Погрешность измерительного канала с ФЭП.** Суммарная погрешность измерительного канала с ФЭП для случайных погрешностей определена по формуле:

$$\delta_{\Sigma K} = \sqrt{\sum \delta_i^2}, \qquad (3.14)$$

где δ<sub>i</sub> –погрешность каждого узла измерительного канала. Суммарная погрешность ИК составила 1,12%.

Инструментальная погрешность измерения. При косвенных измерениях значение измеряемой величины находится на основании известной функциональной зависимости (2.15),2 которая приведена BO главе диссертационной работы. В этом случае относительная случайная погрешность прибора рассчитана по (2.18) и (2.20), где  $\delta U_1$  и  $\delta U_2$  относительные погрешности измерительных каналов. Таким образом, величина инструментальной погрешности составляет 0,23%.

Погрешность, вызванная неточностью оценки ширины спектра СИД. Значительные сложности возникают при измерениях СИД с определением параметра  $U_3$ , который необходим для оценки ширины спектра СИД (раздел 2.5 диссертационной работы). Анализ показал, что изменение ширины спектра вносит незначительный вклад в погрешность измерения центральной длины волны. Поэтому сделано допущение, что ширина спектра СИД в выборке одинаковая. Это приводит к появлению не исключенной систематической погрешности, которую можно рассматривать как случайную, т.к. разброс ширины спектра исследуемых СИД от образца к образцу будет иметь случайный характер. Из проведенного анализа выявлено, что максимальное отклонение ширины спектра СИД будет приводить к появлению дополнительной относительной погрешности для красных светодиодов с центральной длиной волны 635 нм не превышающей величину 0,01%, что меньше инструментальной погрешности прибора.

Погрешность аппроксимации спектра СИД. Реальная спектральная характеристика СИД отличается от гауссовой. Это приводит к появлению дополнительной методической погрешности, обусловленной отклонением реальной спектральной характеристики и ее математического описания. Для ее оценки были проанализированы спектральные характеристики 10 СИД красного свечения с длиной волны 635 нм. Анализ спектральных характеристик показал, что СКО центральной длины волны реальной спектральной характеристики СИД от центральной длины волны ее математического описания составляет 0,18%, а максимальное значение – 0,28%. Величина отклонения от образца к образцу меняется случайным образом и имеет закон распределения, близкий к нормальному.

Таким образом, суммарная погрешность измерения составила величину 0,36%. Значительный вклад в суммарную погрешность вносит ошибка аппроксимации спектральной характеристики СИД. Величина погрешности сопоставима с погрешностью серийных измерительных приборов, основанных на спектральном методе измерения параметров спектра оптического излучения.

#### 3.6 Быстродействие экспериментальной установки

Основными узлами, ограничивающими быстродействие экспериментальной установки, построенной на основе ДФЭП, схема которого представлена на рисунке 3.3, являются фотоприемник, усилитель сигнала, АЦП, интерфейс

передачи данных от АЦП до ПК и алгоритм обработки сигналов. Т.к. передача данных и вычисления параметров спектра оптического излучения в разработанной установке происходит после окончания процесса измерения, то на быстродействие исследуемой экспериментальной установки интерфейс передачи данных и алгоритм обработки сигналов не оказывают влияния. При разработке же устройств, работающих в условиях реального времени, требуется учитывать скорость передачи данных по выбранному интерфейсу, количество выполняемых операций и время выполнения одной операции на обработку сигналов.

Таким образом, быстродействие исследуемой экспериментальной установки зависит только от выбранной элементной базы. В соответствии со справочными данными [128] время нарастания импульса фотодиода составляет 100 нс, фронт спада импульса – 100 нс.

Быстродействие усилителя ограничивается скоростью нарастания выходного сигнала и постоянной времени цепи обратной связи. Для усилителя, примененного в экспериментальной установки, скорость нарастания выходного напряжения составила 3 В/мкс, постоянная времени цепи обратной связи – 2,4 мкс. Из приведенных данных видно, что быстродействие усилителя ограничено в первую очередь постоянной времени цепи обратной связи, величина которой зависит от емкости цепи обратной связи, предотвращающей возбуждение усилителя и необходимым коэффициентом преобразования тока в напряжение.

Время выполнения одного преобразования АЦП, рассчитанное по формуле (3.10) в п.п. 3.4 составило 1 мкс.

Таким образом, время на прохождение всех переходных процессов в измерительном канале составит около 3,5 мкс.

Учитывая, что измерительные каналы экспериментальной установки идентичны друг другу и работают параллельно, то быстродействие экспериментальной установки будет определяться быстродействием любого из измерительных каналов и составит величину около 0,3x10<sup>6</sup> измерений в секунду.

Заметим, что при разработке экспериментальной установки не ставилась максимального быстродействия, поэтому, задача получения при более рациональном выборе комплектующих, возможно увеличение быстродействия. Тем не менее, устройства для измерения параметров спектра оптического излучения, построенные на основе ДФЭП, имеют значительно более высокое быстродействие ПО сравнению с приборами, построенными на основе спектральных методов измерения.

#### Выводы

Разработанное устройство для определения центральной длины волны оптического излучения с оптической схемой на основе линз показало перспективность быстродействующих способов измерения параметров спектра оптического излучения с применением ДФЭП, но не позволило достичь желаемых метрологических характеристик по быстродействию и точности измерений.

Разработана экспериментальная установка для определения центральной длины волны узкополосного оптического излучения с оптоволоконной схемой деления оптического излучения.

Быстродействие экспериментальной установки с оптоволоконной схемой составило 0,3×10<sup>6</sup> измерений в секунду.

Произведены расчеты шумовых показателей измерительной установки с оптоволоконной схемой деления светового потока. Уровень шума на выходе усилителя составил 1,5 мВ или 0,12% от допустимого уровня сигнала.

Произведена оценка инструментальной погрешности экспериментальной установки с оптоволоконной схемой деления оптического излучения, величина которой составила не более 0,36%. Определяющий вклад в суммарную погрешность измерения вносит погрешность аппроксимации спектральной характеристики СИД гауссовой функцией 0,28%.
### Глава 4 Исследование метрологических характеристик экспериментальной установки с двухканальным фотоэлектрическим преобразователем и оптоволоконной схемой деления оптического излучения

### 4.1 Результаты сравнительных измерений параметров спектра излучения светодиодов

Для оценки метрологических характеристик разработанной экспериментальной установки с ДФЭП и оптоволоконной оптической схемой деления оптического излучения были проведены исследования красных светодиодов различных марок в установившемся и динамическом режимах. Результаты измерений параметров спектра сравнивались с измерениями на спектрометре фирмы OkeanOptic [109].

**Измерение центральной длины волны излучения СИД в** установившемся режиме. Для определения точности измерения центральной длины волны светодиода проведены измерения на 50 СИД типа L-52SRCDW красного свечения с центральной длиной волны 635 нм. Более подробно параметры СИД описаны в разделе 2.3.

Результаты измерений центральной длины волны, полученные на экспериментальной установке с оптоволоконной схемой деления оптического излучения, сравнены с измерениями центральной длины волны на спектрометре USB2000+VIS-NIR-ES фирмы Ocean Optics [152] со спектральным диапазоном 349 – 1028 нм и кремниевой линейной ПЗС на 2048 пикселей. Оптическое разрешение спектрофотометра составляет 1,5 нм.

При измерении параметров спектра спектрометром на СИД подавался питающий ток величиной 30 мА в течение 60 секунд для прогрева СИД, после чего проводилось измерение спектра излучения. В качестве источника питания СИД использовались химические источники с возможностью регулировки тока. Для контроля величины протекающего тока использовался мультиметр M830BZ. Погрешность измерения питающего тока не более 1,5%. Для уменьшения влияния

случайной погрешности, вызванной, в первую очередь, шумами, наблюдения проводились 20 раз. Результаты измерений приведены в приложении А.

Анализ полученных данных показал, что максимальное абсолютное отклонение центральной длины волны партии исследуемых СИД от значений, полученных на спектрометре, составило 2,7 нм, а относительное – 0,43%. Разброс значений абсолютного отклонения центральной длины волны не вышел за пределы интервала от –2,36 до 2,7 нм. Математическое ожидание разности показаний центральной длины волны экспериментальной установки и спектрометра составило 0,61 нм (что может свидетельствовать о наличии неисключенной систематической погрешности), а СКО – 1,18 нм. Гистограмма отклонений приведена на рисунке 4.1.



Рис. 4.1. Гистограмма распределения отклонений значений центральной длины волны излучения СИД, измеренных на спектрофотометре и экспериментальной установке

Предельное среднеквадратическое отклонение результатов полученных на экспериментальной установке от показания полученных на спектрометре равное  $\pm 3\sigma$  составило  $\pm 3,54$  нм или 0,6% при длине волны 635 нм.

Исследование параметров спектра СИД в динамическом режиме работы. Проведен сравнительный анализ результатов измерения центральной длины волны СИД в динамическом режиме работы на выборки из десяти СИД. В ходе эксперимента на СИД подавались импульсы тока величиной 30 мА с частотой следования 1 кГц. Скважность импульсов менялась от 20 до 1,1. Результаты измерений центральной длины волны выборки СИД на спектрометре  $\lambda_c$  и экспериментальной установке  $\lambda_x$  представлены в таблице 4.1.

		Длительность импульса $\tau_u$ , мкс					
N⁰	Значение центральной длины волны	50	100	300	500	700	900
СИД	СИД						
1	На экспериментальной установке $\lambda_x$ , нм	623,8	624	626,6	628,4	630,2	631,8
	На спектрометре $\lambda_c$ , нм	632	628,5	631,1	631,3	631,6	632,6
2	На экспериментальной установке $\lambda_x$ , нм	623,3	623,5	626	627,7	629,6	631
	На спектрометре $\lambda_c$ , нм	630,1	629,1	629,8	630,3	631,3	632,2
3	На экспериментальной установке $\lambda_x$ , нм	623,2	623,8	626,2	628	629,9	631,2
	На спектрометре $\lambda_c$ , нм	629,3	631,9	632,4	631,6	634,9	633,2
4	На экспериментальной установке $\lambda_x$ , нм	624,4	625,1	627,8	629,4	631,1	632,5
	На спектрометре $\lambda_c$ , нм	632,9	628,8	631	631,6	633,6	637,5
5	На экспериментальной установке $\lambda_x$ , нм	623,6	624,1	626,8	628,4	630,1	631,6
	На спектрометре $\lambda_c$ , нм	632,3	628,5	632,2	633,1	630,9	632,6
6	На экспериментальной установке $\lambda_x$ , нм	640	640	641,8	642,8	643,9	644,8
	На спектрометре $\lambda_c$ , нм	643	641,8	642,3	647,2	645,1	646,7
7	На экспериментальной установке $\lambda_x$ , нм	627,1	627,5	630,1	631,2	633,2	634,4
	На спектрометре $\lambda_c$ , нм	633,4	630	631,9	634,1	634	635
8	На экспериментальной установке $\lambda_x$ , нм	623,8	624,3	627,1	628,8	630,5	632
	На спектрометре $\lambda_c$ , нм	629,9	631,9	629,7	630,9	631,9	632,9
9	На экспериментальной установке λ <sub>x</sub> , нм	624,9	625,4	628,2	629,9	631,6	633,3
	На спектрометре $\lambda_c$ , нм	628,2	628,7	632,6	632,7	632,2	634,8
10	На экспериментальной установке $\lambda_x$ , нм	623,5	623,7	626,2	631,6	629,4	631,2
	На спектрометре $\lambda_c$ , нм	629	628,1	629,4	631,9	631,6	634,9

Таблица 4.1 – Результаты измерений партии СИД в динамическом режиме работы

При увеличении коэффициента заполнения у всех СИД наблюдается смещение спектра в ИК область, как на спектрометре, так и на экспериментальной установке. Смещение спектра связано с разогревом кристалла СИД.

Анализ полученных данных показал, что максимальное абсолютное отклонение центральной длины волны партии исследуемых СИД от значений, полученных на спектрофотометре, составило 8,7 нм, а относительное – 1,3%. Разброс значений абсолютного отклонения центральной длины волны не вышел за пределы интервала от -8,7 до 0,8 нм. Математическое ожидание разности показаний центральной длины волны экспериментальной установки и значений центральной длины волны, полученных на спектрометре, составило -3,1 нм, а СКО  $\sigma - 4,7$  нм. Гистограмма отклонений приведена на рисунке 4.2.



Рис. 4.2. Гистограмма распределения разности значений центральной длины волны излучения СИД, измеренных на спектрофотометре и экспериментальной установке

Из проведенного анализа видно, что в импульсном режиме работы наблюдаются большее отклонение в сравнении с результатами измерений в установившемся режиме.

На основании полученных данных можно сделать следующие выводы:

1. В установившемся режиме работы СИД спектрометр и экспериментальная установка показывают близкие результаты, что свидетельствует о высокой точности исследуемого способа;

2. В динамическом режиме работы СИД расхождение показаний спектрометра и экспериментальной установки увеличивается.

Исследование параметров спектра лазера [85]. Еще одним источником оптического излучения с узким спектром являются лазеры. В ходе исследования погрешности экспериментальной установки был проведен эксперимент определения центральной длины волны гелей-неонового лазера, центральная длина волны которого по данным измерений на монохроматоре МДР 3 составила 630,5 нм. Исследования проводились в установившемся режиме работы лазера. Результаты измерений приведены в таблице 4.2. Наблюдения повторялись 10 раз.

Анализ полученных данных показал, что максимальное абсолютное отклонение центральной длины волны исследуемых лазеров от значений, полученных на спектрометре, составило 1,9 нм, а относительное – 0,3%. Разброс

значений абсолютного отклонения центральной длины волны не вышел за пределы интервала от -1,9 до 0,1 нм. Математическое ожидание разности показаний экспериментальной установки и спектрометра составило -0,7 нм, а СКО – 0,5 нм (рисунок 4.3).

N⁰	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
эксперимента										
$\lambda_x$ , HM	630,3	629,3	630,6	630,5	630,3	630,5	629,1	628,6	630,1	629,1
Δλ, нм	-0,17	-1,20	0,10	0,05	-0,24	-0,03	-1,42	-1,94	-0,41	-1,40
Δλ	0,03	0,19	0,02	0,01	0,04	0,00	0,23	0,31	0,06	0,22

Таблица 4.2 – Результаты исследования параметров спектра лазера



Рис. 4.3. Гистограмма распределения разности показаний центральной длины волны лазерного излучения экспериментальной установки и спектрометра

Таким образом, данные значений центральной длины волны, полученные на экспериментальной установке, близки к данным, полученным на спектрометре. При уменьшении ширины спектра исследуемого излучения разность показаний спектрометра и экспериментальной установки уменьшается, что объясняется значительным уменьшением ошибки измерения вызванной асимметрией спектра.

#### 4.3 Погрешность аппроксимации спектра СИД функциями различного вида

При аппроксимации спектров математическими функциями минимизируют обычно относительную среднеквадратическую ошибку (СКО) на всем диапазоне изменения аргумента:

$$CKO = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N} \left[ \frac{S(\lambda_i) - f(\lambda_i)}{S(\lambda_i)} \right]^2}, \qquad (4.1)$$

где *S* ( $\lambda_i$ ) – экспериментальное значение интенсивности излучения СИД на длине волны  $\lambda_i$ ,  $f(\lambda_i)$  – значение аппроксимирующей функции на той же длине волны, N – число отсчетов.

Однако для целей измерения параметров спектра СИД представляет интерес не общее СКО, а погрешности определения по аппроксимирующим функциям основных параметров спектра: уровня  $S_{\text{max}}$  и длины волны  $\lambda_{\text{max}}$  в максимуме и его ширины  $\Delta\lambda$ .

Для анализа этих погрешностей на монохроматоре МДР-3 с абсолютной погрешностью, не превышающей 0,1 нм, были измерены спектры 10 СИД типа L-52SRCDW красного свечения. У каждого СИД измерялось не менее 40 точек вплоть до уровня 0,1 от максимального значения. Измерения показали, что спектры СИД имеют заметную асимметрию: коротковолновое крыло спектра является более вытянутым (рис. 4.4).



Рис. 4.4. – Аппроксимация спектра СИД одной гауссианой

Экспериментальные спектры СИД аппроксимировались с минимизацией СКО

одной гауссианой 
$$f_1(\lambda) = \frac{A}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\lambda_{\max} - \lambda)^2}{2\sigma^2}}$$
, параболой  $f_2(\lambda) = S_{\max}^{\Pi} \left[ 1 - \frac{(\lambda_{\max}^{\Pi} - \lambda)^2}{(\Delta \lambda)^2} \right]$   
и суммой двух гауссиан  $f_3(\lambda) = \frac{A_1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\lambda_{\max} - \lambda)^2}{2\sigma_1^2}} + \frac{A_2}{\sigma_2 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\lambda_{\max} - \lambda)^2}{2\sigma_2^2}}$ . Параметры измеренных спектров и аппроксимирующих функций приведены в приложении Б,

В введены обозначения: 
$$S_{\text{max}}^{1G} = \frac{A}{\sigma\sqrt{2\pi}}$$
,  $S_{\text{max1}}^{2G} = \frac{A_1}{\sigma_1\sqrt{2\pi}}$ ,  $S_{\text{max2}}^{2G} = \frac{A_1}{\sigma_2\sqrt{2\pi}}$ . Ширина

экспериментальных спектров и аппроксимирующих парабол определялась по уровню  $0,606 s_{max}$  для сравнения с удвоенным стандартным отклонением (2 $\sigma$ ) аппроксимирующей гауссовой функции. Заметим, что для аппроксимации спектров параболой с точностью, сравнимой с точностью аппроксимации одной гауссианой, пришлось ограничиться частью спектра выше уровня 0,3 S<sub>max</sub>; учет точек спектров ниже этого уровня резко увеличивает СКО (рисунок 2.9).



Рис. 4.5 Аппроксимация спектральной характеристики СИД параболой с учетом (a) без учета (б) низкоуровневых составляющих спектра

По представленным данным рассчитаны средние выборочные значения отклонений параметров экспериментальных спектров и аппроксимирующих функций (таблица 4.3). Для случая аппроксимации спектра двумя гауссианами параметры экспериментального спектра СИД сравнивались с параметрами первой гауссианы.

Из результатов расчета видно, что в смысле СКО аппроксимация спектров параболой и суммой двух гауссиан существенно лучше, чем аппроксимация одной гауссианой. Как и ожидалось, при аппроксимации гауссианой и параболой длина волны в максимуме аппроксимирующих функций имеет явное смещение  $\Delta\lambda$  в коротковолновую область, обусловленную асимметрией реального спектра. При аппроксимации спектров суммой двух гауссиан (рис. 4.6) такое смещение практически отсутствует: среднее выборочное смещение составило всего -0,05 нм. При аппроксимации спектра  $\delta\sigma = \Delta\lambda_{0.607} \cdot 2\sigma_1$ .

Параметр, характеризующий	Одна гауссиана	Парабола	Сумма двух	
точность аппроксимации			гауссиан	
СКО	0,458	0,092	0,110	
$\Delta\lambda_{\rm max}$ , HM	-1,2	-1,0	-0,05	
δσ, нм	2,9	3,0	0,94	
$(\delta\sigma/\Delta\lambda_{0,607})100\%$	16	16,5	5,2	

Таблица 4.3 – Средние выборочные значения отклонений параметров экспериментальных спектров и аппроксимирующих функций



Рис. 4.6. Спектральная характеристика СИД, представленная в виде суммы двух функций

Более точное описание спектра СИД двумя гауссианами можно интерпретировать наличием двух мод излучения, первая их которых (основная) соответствует межзонным переходам с шириной запрещенной зоны  $E_g \approx 2,0$  эВ, а вторая – переходам между уровнями максимальной заселенности состояний в зоне проводимости и валентной зоне.

Таким образом, аппроксимация спектра СИД суммой двух гауссиан позволяет примерно в 4 раза уменьшить общую ошибку аппроксимации и ошибку определения параметров спектра СИД по сравнению с аппроксимацией одной гауссианой. Аппроксимация параболой дает хорошее приближение к реальным характеристикам только при условии, что края спектра ниже уровня 0,3 отбрасываются.

### 4.2 Исследование характеристик экспериментальной установки с оптоволоконной схемой деления оптического излучения

Важной характеристикой исследуемого способа является зависимость погрешности измерения от центральной длины волны оптического излучения. Для получения такой характеристики необходимо провести измерение на

исследуемой экспериментальную установку параметров спектра оптического излучения с перестраиваемой центральной длиной волны в рабочем диапазоне 600 – 660 нм, с одинаковой шириной спектральной характеристики и формой спектральной характеристики близкой к гауссовой кривой.

В связи с технической сложность проведения полного эксперимента по оценки зависимости погрешности измерения от центральной длины волны, было предложен упрощенный вариант эксперимента. Суть этого упрощенного эксперимента состоит в следующем.

На спектрометре были отобраны СИД с различной длиной волны разнесенной рабочему излучения, максимально по диапазону экспериментальной установки. Измерения центральной длины волны СИД проводилось при нормальных условиях окружающей среды, при токе питания СИД 30 мА и в установившемся режиме. В эксперименте использовалось два типа СИД: СИД L-52SRCDW с центральной длиной волны 635 нм и СИД TLCR5800 компании Vishay с центральной длиной волны 622 нм. Ширина спектральной характеристики СИД была принята одинаковой для всех и равной выборочному среднему значению ширины спектра, определяемому по выборке всех СИД. Результаты сравнительных измерений на спектрометре и на экспериментальной установке приведены в таблице 4.3.

Для выявления формы зависимости полученные данные были дополнительно обработаны в среде MathCAD: было проведено гауссово сглаживание данных встроенной функцией ksmooth по 10 точкам; далее сделана квадратичная интерполяция при помощи встроенной функции pspline в диапазоне 600 – 660 нм.

Упрощенный эксперимент не позволил получить точную зависимость погрешности измерения от центральной длины волны излучения из-за значительного влияния методической погрешности, особенно на краях рабочего диапазона, но выявил форму кривой в исследуемом диапазоне частот, график которой представлен на рисунке 4.7.

	Показания на	Показания на	Абсолютное	Относительное		
N⁰	спектрометре: $\lambda_{cM}$ ,	экспериментальной	отклонение $\Delta\lambda$ ,	οτκπομεμμε δλ. μΜ		
	нм установке: $\lambda_{3y}$ , нм		НМ	отклонение ол, нм		
1	648,7	646,8	1,9	0,29		
2	646,5	644,8	1,7	0,26		
3	643,2	639,1	4,1	0,64		
4	641,8	640,9	0,9	0,14		
5	640,5	640,9	0,4	0,06		
6	639,1	634,8	4,3	0,67		
7	638,8	635,3	3,5	0,55		
8	638,3	635,2	3,1	0,49		
9	637,6	638,2	0,6	0,09		
10	637,1	637,2	0,1	0,02		
11	636,5	636,4	0,1	0,02		
12	636,1	636,3	0,2	0,03		
13	635,6	634,8	0,8	0,13		
14	635,1	635,7	0,6	0,09		
15	634,7	635,4	0,7	0,11		
16	623,4	619,5	0,5	0,08		
17	622,7	619,7	1,4	0,22		
18	621,6	619	1,8	0,29		
19	621,2	618,5	1,7	0,27		
20	620,7	618,6	2,3	0,37		

Таблица 4.4 – Результаты измерения зависимости погрешности от длины волны излучения

Из рисунка 4.7 видно, что наименьшая величина абсолютного отклонения наблюдается в средней области исследуемого диапазона, т.е. в области пересечения склонов спектральных кривых фотопреоразователя. Величина абсолютного отклонения значительно возрастает при приближении длины волны оптического излучения к краям рабочего диапазона.

Зависимость погрешности измерения от длины волны оптического излучения, полученная экспериментальным методом, близка по форме к кривой, полученной теоретически (рис. 2.3).



Рис. 4.7. График зависимости погрешности измерения центральной длины волны оптического излучения для светофильтров BPF 600\80-G и BPF 660\80-G (Теоретическая кривая) и стандартных отклонений центральной длины волны оптического излучения, полученных на спектрометре USB2000+VIS-NIR-ES и экспериментальной установке

Учитывая, что СИД от образца к образцу имеют значительный разброс мощности излучения при одинаковом питающем токе, а также во время работы СИД мощность излучения может меняться в зависимости от различных факторов, как предусмотренных во время проектирования изделий на основе СИД, так и не учтенных, была проведена оценка погрешности измерения центральной длины волны СИД в зависимости от мощности его излучения. Для этого был проведен эксперимент, суть которого заключается в следующем. Была взята выборка из пяти СИД L-52SRCDW с центральной длиной волны 635 нм случайным образом. На СИД подавался питающей ток, начиная с 15 мА (меньшая величина тока приводит к значительному снижению интенсивности излучения, что приводит к снижению чистоты эксперимента из-за увеличивающегося влияния шумов на экспериментальной установке), выдерживалась пауза в течение 60 с для стабилизации центральной длины волны СИД и проводилось измерение спектральной характеристики СИД на описанном выше спектрометре. Измерения повторялись вплоть до 50 мА с шагом в 5 мА. Величина питающего тока контролировалась с помощью мультиметра M830BZ, погрешность которого не превышает величины 1,5%. Полученные данные приведены в таблице 4.5.

	СИД №1		СИД №2		СИД №3		СИД №4		СИД №5	
I <sub>СИД</sub> , мА	λ <sub>с</sub> , нм	$\lambda_x$ , HM	λ <sub>с</sub> , нм	$\lambda_x$ , HM	λ <sub>с</sub> , нм	$\lambda_x$ , HM	$\lambda_c$ , HM	$\lambda_x$ , HM	λ <sub>с</sub> , нм	$\lambda_x$ , HM
15	632,6	629,7	630,9	628,7	633,9	631,9	636,6	635,4	632,7	630,1
20	633,5	630,4	631,9	630,1	634,8	633,2	638,1	636,7	634,3	631,3
25	634,8	632,2	632,7	631,5	635,7	634,5	639,1	637,8	635,3	632,6
30	635,6	633,4	633,9	632,8	636,5	635,7	640,2	638,9	636,5	633,7
35	636,6	634,6	634,7	634	637,4	636,7	641,1	640	638,5	634,9
40	637,8	635,9	636,2	635,1	638,5	637,9	642,6	641	639,4	635,9
45	638,4	637	637,1	636,3	639,9	639	643,5	642	638,8	637
50	639,5	638,1	638,2	637,2	638,8	640	644,6	642,9	639,3	638

Таблица 4.5 – Результаты измерения центральной длины волны СИД от питающего тока

Анализ полученных данных показал, что максимальное абсолютное отклонение центральной длины волны исследуемых СИД от значений, полученных на спектрометре, составило 3,6 нм, а относительное – 0,56%. Разброс значений абсолютного отклонения центральной длины волны не вышел за пределы интервала от -3,6 до 1,2 нм. Гистограмма распределения отклонений приведена на рис. 4.8.



Рис. 4.8. Гистограмма распределения отклонений значений измеренных на спектрофотометре и на экспериментальной установке

Анализ показал, что отклонение показаний при меньшей интенсивности излучение, что соответствует меньшей величине питающего тока, расхождение показаний увеличивается. Такая закономерность связана с двумя видами погрешностей исследуемого метода: во-первых, при уменьшении интенсивности излучения СИД происходит уменьшение показателя отношения сигнал/шум, что

увеличивает влияние шумов на процесс измерения; во-вторых, при изменении питающего тока меняется ширина спектра СИД и форма спектральной характеристики, что приводит к увеличению систематической погрешности способа, т.к. при расчете центральной длины волны СИД ширина спектра излучения была принята одинаковой для всей выборки светодиодов.

Важной характеристикой любого измерительного прибора является чувствительность, которая линамический лиапазон И его ограничивает возможность работы прибора в нижней части динамического диапазон. Для динамического диапазона экспериментальной установки был определения проведен эксперимент, суть которого заключается в равномерном уменьшении освещенности двух фотодатчиков до уровня, при котором погрешность измерения начнет значительно возрастать.

Эксперимент проведен на одном и пяти СИД L-52SRCDW с центральной длиной волны 635 нм и близкой интенсивностью оптического излучения. Измерения проводились при нормальных условиях и постоянном токе питания СИД 30 мА в установившемся режиме, т.к. динамический режим может привести к появлению методической погрешности вызванной саморазогревом кристалла СИД при протекании через него электрического тока. Мощность оптического излучения при токе питания 30 мА составила 1,1 мВт для всех исследуемых образцов. Результаты эксперимента для светодиода с центральной длиной волны 642,3 нм приведены в таблице 4.6. Эксперимент повторялся 10 раз.

На рисунке 4.6 приведен график зависимости дисперсии значения центральной длины волны СИД от интенсивности оптического излучения. Из графика видно, что расхождение показаний между спектрометром и экспериментальной установкой начинает значительно возрастать при понижении интенсивности менее 40% от максимального значения. Также дисперсия начинает возрастать при превышении оптической мощности на входе экспериментальной установки величины 1 мВт (90%).

85

<u>№</u> эксперимента	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
эксперимента										
λ <sub>c</sub> , нм	642,3	642,3	642,3	642,3	642,3	642,3	642,3	642,3	642,3	642,3
I, %					λ <sub>x</sub> , н	[M				
100%	641,5	642,5	642,5	642,5	642,4	642,5	641,9	642,0	642,5	642,5
80%	641,5	641,6	641,8	641,8	641,6	641,8	641,7	641,8	641,6	641,9
60%	640,7	640,9	640,7	640,9	640,7	640,7	640,9	641,0	640,9	641,1
40%	640,2	640,3	640,2	640,1	640,3	640,0	640,3	639,9	640,0	640,2
20%	639,7	639,2	641,0	639,2	639,5	639,5	639,5	639,6	639,7	639,5
10%	640,1	641,4	639,9	639,6	638,9	640,3	639,0	638,9	638,8	639,1
5%	638,5	636,5	638,4	639,0	635,1	636,8	638,0	636,5	635,3	635,6

Таблица 4.6 – Результаты измерения динамического диапазона экспериментальной установки



Рис. 4.9. График зависимости дисперсии определения центральной длины волны от интенсивности оптического излучения

Таким образом, мощность оптического излучения на входе преобразователя рекомендуется поддерживать в диапазоне 0,44 – 1,1 мВт.

## 4.3 Исследование сдвига центральной длины волны излучения светодиода при изменении температуры кристалла в динамическом режиме работы

Изменение температуры кристалла сопровождается изменением центральной длины волны светодиода [33, 55, 94, 154]. Зависимость имеет вид:

$$\Delta \lambda_{t} = \Delta T \cdot v \,. \tag{4.2}$$

где  $\Delta\lambda_t$  – изменение длины волны излучения за исследуемый промежуток времени,  $\Delta T$  – разность температур кристалла СИД за исследуемый температурный коэффициент промежуток времени, ν сдвига электролюминесценции. Поэтому на основании изменения длины волны излучения можно судить о температуре кристалла СИД. Для подтверждения был проведен эксперимент, в ходе которого был определен температурный СИД коэффициент сдвига электролюминесценции выборки при ИХ саморазогреве рассеиваемой электрической мощностью.

Исследовались восемь СИД типа TLCR5800 фирмы Vishay красного цвета свечения с центральной длиной волны излучения 622 нм [151] и 10 СИД типа L-52SRCDW с центральной длиной волны 635 нм. Согласно справочнику температурный коэффициент сдвига СИД TLCR5800 составляет 0,05 нм/К при питающем токе 50 мА, предельное тепловое сопротивление перехода 300 К/Вт.

В ходе эксперимента было измерено тепловое сопротивление исследуемых СИД при токе питания 30 мА на частотах 0,01 Гц и 64 Гц на Измерителе теплового импеданса светодиодов, разработанном в Ульяновском филиале Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН [37]. Погрешность измерения теплового сопротивления составляет 2%. Изменение центральной длины волны СИД измерялось при токе 30 мА в промежутках времени от 0 до 2,5 мс и от 0 до 100 с.

Расчет параметра температурного коэффициента сдвига электролюминесценции был осуществлен по формуле:

$$v = \frac{\Delta\lambda}{(U_C I_C - P_w)R_{\mu\nu}}, \qquad (4.3)$$

где  $U_c$  – падение напряжения на СИД,  $I_c$  – ток протекающий через светодиод,  $P_u$  – мощность оптического излучения светодиода. Выражение в скобках в формуле (4.2) описывает тепловую мощность рассеиваемую кристаллом СИД. Данные результатов эксперимента сведены в таблицы 4.7 и 4.8.

N⁰	$\lambda_c$ , нм	R <sub>t0,01</sub> ,K/BT	Δλ <sub>0,01</sub> , нм	ν <sub>0,01</sub> , нм/К	R <sub>t64</sub> ,К/Вт	$\Delta\lambda_{64},$ нм	v <sub>64</sub> , нм/К
1	620,7	167,7	1,0	0,15	37,16	0,7	0,44
2	621,6	162,0	0,9	0,14	41,81	0,7	0,4
3	621,2	157,3	0,8	0,12	43,06	0,6	0,37
4	622,7	174,1	1,1	0,15	41,09	0,7	0,42
5	623,4	191,8	1,1	0,14	43,2	0,7	0,37
6	622,1	167,7	1,2	0,17	43,18	0,7	0,39
7	621,0	181,1	1,0	0,14	38,7	0,6	0,4
8	621,4	192,6	1,4	0,17	38,36	0,7	0,41

Таблица 4.7 – Результаты эксперимента на СИД TLCR5800

Таблица 4.8 – Результаты эксперимента на СИД L-52SRCDW

N⁰	$\lambda_c$ , hm	R <sub>t0,01</sub> ,K/BT	Δλ <sub>0,01</sub> , нм	v <sub>0,01</sub> , нм/К	R <sub>t64</sub> ,K/BT	Δλ <sub>64</sub> , нм	ν <sub>64</sub> , нм/К
1	635,13	432,0	5,0	0,22	246,1	2,7	0,20
2	635,13	427,7	5,2	0,22	245,3	2,5	0,19
3	634,44	458,0	4,7	0,19	254,3	2,6	0,19
4	635,13	487,9	5,0	0,19	280,2	2,6	0,17
5	634,09	409,0	4,9	0,22	219,9	2,5	0,21
6	645,9	354,4	3,0	0,16	207,6	1,5	0,14
7	638,26	365,2	4,3	0,22	210,0	2,4	0,21
8	635,48	453,7	5,0	0,21	249,5	2,8	0,21
9	635,13	476,1	5,2	0,2	243,0	2,8	0,22
10	634,44	438,1	5,0	0,21	247,8	2,7	0,20

На рисунке 4.10 представлены графики зависимости центральной длины волны излучения СИД от времени работы СИД при подаче на него ступеньки импульса тока величиной 30 мА.

На графиках рисунка 4.10 видно, что в интервале времени от 0 до 1 мс наблюдаются резкое смещение спектра СИД в ИК область, далее смещение спектра происходит заметно медленнее. Также значительное смещение спектра происходит на интервале времени до 10 с в сторону ИК области и за 40 – 50 с сдвиг центральной длины волны СИД прекращается.



Рис. 4.10. Зависимости смещения центральной длины волны СИД от времени его работы при подаче на СИД ступеньки импульса тока величиной 30мА. Параметры функции на основе теоретических данных:  $\Delta T_1 = 78$ ,  $\Delta T_2 = 2,004$ ,  $t_1 = 2,511 \times 10^{-4}$ , и  $t_2 = 4,242$ , v = 0,1 нм/К

В [55] показано, что форма кривой смещения спектра при подаче на него ступеньки импульса тока может быть описана суммой функций вида  $1-\exp(-t/\tau)$ :

$$\Delta T(t) = \Delta T_{1} \left( 1 - e^{-\frac{t}{t_{1}}} \right) + \Delta T_{2} \left( 1 - e^{-\frac{t}{t_{2}}} \right),$$
(4.4)

где  $\Delta T_1$  и  $\Delta T_2$  – соответственно разность эффективных температур кристалла и корпуса светодиода, разность эффективных температур кристалла и окружающей среды,  $t_1$  и  $t_2$  – подгоночные параметры, характеризующие, соответственно, скорость нагрева кристалла и корпуса СИД. График зависимости (4.20) представлен на рисунке 4.10.

На начальном интервале до 2 мс изменение температуры и величина смещения спектра СИД определяется тепловым сопротивлением переход – корпус, а далее до 100 секунд – тепловым сопротивлением переход – окружающая среда. При этом величина смещения спектра излучения СИД в значительной степени зависит от применяемых теплопроводящих материалов, степени их деградации и качества сборки готового изделия.

Учитывая сильное влияние температуры кристалла полупроводниковых источника узкополосного оптического излучения и величины протекающего через него тока на параметры спектра излучения, на основе разработанного способа измерения параметров спектра излучения возможно создание быстродействующих прецизионных перестраиваемых или источников оптического Схема устройства, узкополосного излучения. позволяющего контролировать и перестраивать параметры СИД, показана на рисунке 4.11. Контроль параметров СИД осуществляется арифметическим устройством на основании данных с фотоприемников 1 и 2. На основе полученных данных с арифметического устройства возможно подстройка или перестройка параметров спектра СИД за счет изменения температуры СИД и/или питающего тока. Для стабилизации оптической мощности излучения СИД предполагается использовать электрооптический модулятор совместно с фотоприемником 3.



Рис. 4.11. Функциональная схема устройства управления параметрами спектра СИД

Таким образом, рассмотренный подход может найти применение для бесконтактного измерения температуры кристалла твердотельных источников оптического излучения, для контроля их качества и созданию прецизионных и перестраиваемых источников узкополосного оптического излучения и др.

#### 4.4 Способ измерения теплового импеданса светодиодов

Параметром, характеризующим тепловые свойства и качество монтажа СИД является тепловой импеданс [55, 63,117]. Известен способ измерения теплового импеданса СИД, реализованный в упоминавшемся уже Измерителе теплового импеданса светодиодов [37] и состоящий в том, что через СИД пропускают

последовательность импульсов греющего тока  $I_{rp}$ , широтно-импульсно модулированную (ШИМ) по гармоническому закону с глубиной модуляции *a*; в промежутках между импульсами греющего тока через СИД пропускают малый постоянный начальный ток, по результатам измерения напряжения на диоде во время действия импульсов греющего тока и в промежутках между ними определяют амплитуду первой гармоники мощности  $P_{m1}(\Omega)$ , потребляемой СИД, и амплитуду первой гармоники температурочувствительного параметра (ТЧП)  $\tilde{U}_{m1}^{T\Pi}(\Omega)$  с известным отрицательным температурным коэффициентом  $K_{TU}$  – прямого напряжения на СИД при протекании через него малого постоянного начального тока, и сдвиг фазы между ними  $\varphi(\Omega)$  на частоте модуляции греющей мощности, дополнительно измеряют среднюю мощность  $\overline{W}_{onm}$  оптического излучения СИД и модуль теплового импеданса находят по формуле

$$\left|Z_{T}\left(\Omega\right)\right| = \frac{\widetilde{U}_{m1}^{\text{TI}}\left(\Omega\right)}{K_{TU}\left(P_{m1}\left(\Omega\right) - a\overline{W}_{onm}\right)},$$
(4.5)

а фаза  $\varphi_{T}(\Omega)$  теплового импеданса СИД будет равна сдвинутой на 180° разности фаз между первой гармоникой ТЧП и первой гармоникой мощности.

Недостатком известного способа является большая погрешность измерения ТЧП из-за переходных процессов при переключении СИД из режима нагрева рабочим током в режим измерения. По этой причине верхняя частота частотного диапазона измерения теплового импеданса СИД известным способом ограничен длительностью этих переходных процессов и не превышает 1 кГц.

Технический результат – повышение точности измерения теплового импеданса и повышение верхней частоты диапазона измерения – достигается тем, что через СИД пропускают последовательность импульсов греющего тока  $I_{rp}$ , ШИМ модулированную по гармоническому закону с частотой модуляции  $\Omega$  и глубиной модуляции *a*; во время действия импульсов греющего тока измеряют напряжение на светодиоде и центральную длину волны излучения СИД с известным температурным коэффициентом  $K_{T\lambda}$ , по результатам измерения определяют амплитуду первой

гармоники мощности  $P_{m1}(\Omega)$ , потребляемой СИД и амплитуду первой гармоники центральной длины волны излучения СИД  $\tilde{\lambda}_{m1}(\Omega)$ , а также сдвиг фазы между ними  $\varphi(\Omega)$  на частоте модуляции греющей мощности, измеряют среднюю за период модуляции мощность  $\overline{W}_{onm}$  оптического излучения СИД и модуль теплового импеданса находят по формуле

$$\left|Z_{T}(\Omega)\right| = \frac{\tilde{\lambda}_{m1}(\Omega)}{K_{T\lambda}\left(P_{m1}(\Omega) - a\overline{W_{onm}}\right)},\tag{4.6}$$

а фазу  $\varphi_{T}(\Omega)$  теплового импеданса СИД определяют как разность фаз между первой гармоникой центральной длины волны излучения СИД и первой гармоникой мощности.

Повышение точности измерения модуля теплового импеданса СИД достигается за счет того, что в качестве ТЧП используется центральная длина волны излучения СИД, которая, как известно [117] линейно возрастает с увеличением температуры с постоянным температурным коэффициентом. Температурный коэффициент К<sub>Т</sub> обусловлен фундаментальными свойствами полупроводникового материала гетероструктуры и слабо зависит от параметров режима работы СИД. При этом на изменение этого параметра переходные электрические процессы никакого влияния не оказывают. ШИМ модуляция тока через светодиод по гармоническому закону с заданной глубиной модуляции обеспечивает изменение мощности, потребляемой светодиодом, по закону близкому к гармоническому  $P(t) = \overline{P} + P_{m1} \sin \Omega t$ , где  $\overline{P} = U_{R} I_{ep} / (1 + a)$  — постоянная составляющая (среднее значение) греющей мощности, U<sub>д</sub> – напряжение на СИД при протекании через него греющего тока заданной амплитуды,  $P_{m1} = I_{m1}U_{\pi}$  – первая гармоника греющей мощности,  $I_{m1} = aI_{pp}$ - первая гармоника греющего тока. Через некоторое время, превышающее три постоянных времени переход-корпус СИД, в СИД установится регулярный режим и температура *p-n* перехода светодиода будет пульсировать относительно некоторого квазистационарного значения  $\tilde{T}_n(t) = \overline{T}_n + \Delta \tilde{T}_n(t)$ , где  $\overline{T}_n$  – установившееся среднее

значение температуры перехода,  $\Delta \tilde{T}_n(t)$  – переменная составляющая температуры перехода СИД, изменяющаяся по закону близкому к гармоническому:  $\Delta \tilde{T}_{n}(t) = T_{m1} \sin \left(\Omega t - \varphi_{T}\right), \varphi_{T}$  – сдвиг фаз между изменением греющей мощности и изменением температуры. Центральная длина волны излучения будет «отслеживать» измерение температуры активной области (гетероперехода) СИД и будет изменяться также по закону, близкому К гармоническому:  $\lambda(t) = \overline{\lambda} + K_{T\lambda} \Delta \widetilde{T}_{n}(t) \approx \overline{\lambda} + \widetilde{\lambda}_{m1} \sin \left(\Omega t - \varphi_{T}\right),$ где  $\overline{\lambda}$  – центральная длина излучения при средней температуре перехода  $\overline{T_n}$ ,  $\tilde{\lambda}_{m1} = K_{T\lambda}T_{m1}$  – первая гармоника переменной составляющей изменения центральной длины волны излучения.

Разработанные нами средства измерения центральной длины излучения узкополосных оптических сигналов имеют быстродействие порядка 3–5 мкс [110]. При этом случайная погрешность, обусловленная шумами фотоприемников, уменьшается в результате фильтрации полезного сигнала при определении первой гармоники. Следует отметить также, что измерение центральной длины производится в те же моменты времени, в которые производится измерение напряжения на светодиоде, что позволяет упростить реализацию способа в конкретных устройствах.

Предлагаемый способ может быть реализован с помощью устройства, структурная схема которого показана на рис. 4.12.

Эпюры напряжений и сигналов, поясняющие сущность способа и алгоритм работы устройства, приведены на рис. 4.13.

Устройство содержит контакты 1 для подключения контролируемого светодиода, генератор греющих импульсов тока 2, устройство управления 3, управляемый аналого-цифровой преобразователь (АЦП) 4, делитель светового потока 5, управляемый измеритель 6 центральной длины волны излучения с цифровым выходом, измеритель оптической мощности 7 с цифровым выходом и вычислитель 8 с индикатором.



4.12. Структурная схема устройства для измерения теплового импеданса светодиодов

Устройство работает следующим образом. После установки СИД в контактную колодку 1 напротив входного отверстия делителя светового потока 5, после подачи команды «Запуск» на устройство управления 3 по сигналам этого устройства генератор импульсов 2 начинает вырабатывать последовательность греющих импульсов тока заданной амплитуды I<sub>m</sub> и постоянной частоты f<sub>сл</sub>, которые подаются в контролируемый СИД. Моменты времени  $t_k = kT_{cn}$  начала k длительность  $\tau_{uk} = \tau_{u0} (1 + a \sin \Omega t_k)$  определяются го импульса И его управляющими импульсами U<sub>V1</sub> (рис. 4.13, а) и U<sub>V2</sub> (рис. 4.13, б) устройства управления; в результате СИД будет разогреваться последовательностью импульсов греющего тока I<sub>гр</sub>, ШИМ модулированной по гармоническому закону с частотой модуляции  $\Omega$  и глубиной модуляции *a* (рис. 4.13, в). Через некоторое время, превышающее три постоянных времени переход-корпус СИД, в СИД установится регулярный режим и температура *р-п* перехода СИД будет пульсировать относительно некоторого квазистационарного значения  $\tilde{T}_{n}(t)$  ( рис. 4.13, г), изменяющегося по гармоническому закону. Напряжение на СИД во время протекания импульсов греющего тока (рис. 4.13, д) по сигналам U уз устройства управления 3 в моменты времени  $t_k^{\text{orl}} = t_k + \Delta t_{\text{orl}}$ , где  $\Delta t_{\text{orl}}$  некоторое фиксированное время задержки (рис. 4.13, е), управляемым АЦП 6 преобразуется в цифровой код. Цифровые отсчеты напряжения светодиода  $U_x(k)$  передаются в оперативную память вычислителя 8, где формируется массив значений прямого напряжения СИД { $U_x(k)$ }. В эти же моменты времени измеритель 6 центральной длины волны излучения преобразует в цифровой код ТЧП – центральную длину волны излучения СИД (рис. 4.13, ж). Цифровые отсчеты  $\lambda(k)$  передаются в оперативную память вычислителя 8, где формируется массив значений ТЧП - { $\lambda(k)$ }. Значение  $\overline{w}_{onm}$  средней оптической мощности (рис. 4.13, з) с выхода измерителя оптической мощности 7 по сигналу устройства управления передается в вычислитель 8 за несколько тактов до окончания измерения.



Рис. 4.13. Эпюры, поясняющие способ измерения теплового импеданса СИД

Вычислитель 8 вычисляет значения импульсной мощности для каждого k-го греющего импульса тока, путем умножения  $U_{n}(t)$  на значение амплитуды греющих импульсов тока  $I_{m}$ :  $P_{m}(k) = I_{m} \cdot U_{n}(k)$  и формирует массив значений импульсной мощности  $\{P_{m}(k)\}$ . По массивам данных  $\{P_{m}(k)\}$  и  $\{\lambda(k)\}$  методом дискретного преобразования Фурье вычислитель 8 определяет амплитуду и фазу гармоник греющей мощности  $(P_{m1} \ u \ \varphi_{p})$  и ТЧП  $(\tilde{\lambda}_{m1} \ u \ \varphi_{T})$  соответственно, и далее вычисляет модуль теплового импеданса СИД по формуле (4.6), а фазу по формуле

$$\varphi = \varphi_T - \varphi_P \tag{4.7}$$

и высвечивает результат вычисления на индикаторе.

Для повышения точности преобразование измеряемых величин осуществляют в течение нескольких  $(3 \div 5)$  периодов модуляции греющей мощности и получают  $N = (3 \div 5) T_M / T_{cn}$  цифровых отсчетов измеряемых величин.

# 4.5 Применение измерителей параметров узкополосного оптического излучения с двухканальным фотоэлектрическим преобразователем

Исследуемый подход может найти широкое применение, в частности: в лабораторном измерительном комплексе светотехнических параметров СИД, в передающих устройствах оптической связи для контроля длины волны излучения, в качестве бесконтактного измерителя температуры кристалла твердотельного источника оптического излучения и др.

**Лабораторный измерительный комплекс.** При построении лабораторного измерительного комплекса для измерения параметров СИД и др. узкополосных источников оптического излучения в зависимости от решаемых задач можно использовать схемы на основе двух- или трехканальных фотоэлектрических преобразователях, построенных как по оптоволоконной оптической схеме, так и на основе линзовой схемы. В качестве примера на рисунке 4.14 приведена схема возможного построения измерительного комплекса.



Рисунок 4.14 - Структурная схема измерительного комплекса

Предложенный комплекс состоит из персонального компьютера (ПК), устройства (УУ), фотоэлектрического управления трехканального преобразователя (ФЭП), стабилизированного источника тока (СИТ), аналоговоцифрового преобразователя (АЦП) и термоэлектрического элемента (ТЭЭ). Два канала фотопреобразователя в данном случае используются для измерения центральной длины волны и ширину спектра СИД, а третий канал – для измерения интенсивности оптического излучения. Термоэлектрический элемент датчиком температуры позволяет co встроенным него регулировать В температурный режим работы СИД. АЦП, подключенный непосредственно к светодиоду, контролирует падение напряжения на светодиоде. Устройство управления служит для связи, подключенной к нему периферии с ПК. Все ПК. арифметические вычисления удобнее Программное проводить на обеспечение измерительного комплекса позволит получать параметры спектра и координаты цвета в различных цветовых пространствах, а также строить зависимости параметров спектра СИД от исследуемых воздействий на светодиод.

Бесконтактный измеритель температуры [84]. Принцип бесконтактного изменения температуры твердотельных источников оптического излучения основан на зависимости ширины запрещенной зоны от температуры p-n-перехода. При разогреве кристалла ширина запрещенной зоны значительно уменьшается, что приводит к смещению спектра излучения в ИК область. Смещение спектра

излучения характеризуется температурным коэффициентом сдвига электролюминесценции, зависящим от материала, из которого изготовлен СИД. Таким образом, зная коэффициент температурного сдвига электролюминесценции и начальные параметры длины волны излучения и температуры окружающей среды, можно рассчитать температуру кристалла СИД по смещению спектра излучения:

$$T = \frac{\lambda - \lambda_0}{\nu} + T_0 \tag{4.3}$$

Предложенные варианты средств измерения параметров спектра оптического излучения могут получить обширное применение при лабораторных исследованиях параметров СИД, контроле качества СИД, в оптических датчиках, в системах оптической связи и др. областях.

#### Выводы

Приведены данные сравнительного анализ результатов измерения параметров спектра излучения нескольких выборок коммерческих СИД и лазера с помощью спектрометра и разработанной экспериментальной установки с оптоволоконной оптической схемой. Показано, что СКО разности значений центральной длины волны, измеренных спектрометром и разработанной установкой, составил 1,2 нм для установившегося режима работы СИД, 4,7 нм для динамического режима работы СИД и 0,5 нм для оптического излучения лазера.

Показано, что зависимость погрешности измерений центральной длины излучения СИД от длины волны излучения в рабочем диапазоне установки близка к теоретической зависимости, полученной во 2-й главе диссертационной работы.

Показано, что спектральная характеристика реальных СИД точнее всего аппроксимируется суммой двух гауссиан.

На экспериментальной установке путем измерения смещения центральной длины волны излучения от времени работы СИД при подаче на СИД ступеньки греющего тока получена переходная тепловая характеристика СИД. Показано, что переходная тепловая характеристика СИД имеет два ярко выраженных участка быстрого изменения для интервалов времени от 0 до 2 мс и от 0 до 1 с, которые связаны с проходящими тепловыми процессами в конструкции СИД.

Показана возможность определения и контроля температуры СИД по изменению центральной длины волны оптического излучения при известном коэффициенте температурного сдвига длины волны электролюминесценции.

Предложен новый оригинальный способ измерения теплового импеданса СИД по амплитуде изменения центральной длины волны излучения СИД при его питании импульсным током.

Рассмотрены варианты использования разработанных быстродействующих средств измерения параметров спектра оптического излучения с ДФЭП.

#### Заключение

1. Впервые предложены и исследованы оригинальные алгоритмы измерения в едином измерительном цикле центральной длины волны и ширины спектра оптического излучения по сигналам двух фотоприемников с различающимися гауссовыми и линейными спектральными характеристиками.

2. Проведена оценка методической погрешности измерения длины волны монохроматического оптического излучения двухканальным фотоэлектрическим преобразователем с гауссовыми и линейными спектральными характеристиками фотоприемников.

3. Разработана экспериментальная установка, реализующая предложенные алгоритмы, и путем сравнительных измерений на нескольких выборках СИД и лазера исследованы ее метрологические характеристики.

4. Проведен анализ точности аппроксимации спектральных характеристик реальных оптических фильтров различными функциями. Показано, что, СКО аппроксимации спектральных характеристик реальных светофильтров сплайнами третьего порядка в 2,2 раза меньше по сравнению с СКО аппроксимации гауссовой функцией.

5. Методами компьютерного моделирования исследовано влияние мультипликативных и аддитивных электрических шумов фотоприемников и измерительных каналов ДФЭП на погрешность измерения центральной длины волны и ширины спектра. Установлено, что погрешность измерения параметров спектра излучения, обусловленная аддитивными шумами, минимальна при центральной длине волны излучения, лежащей в середине между максимумами спектральных характеристик фотоприемников.

6. Показано, что спектр излучения СИД более точно описывается суперпозицией двух гауссовых функций; такая аппроксимация позволяет уменьшить погрешность измерения параметров спектра СИД с помощью ДФЭП в 3 раза по сравнению с аппроксимацией спектра СИД одной гауссианой.

7. Предложен способ измерения теплового импеданса СИД по сдвигу спектра излучения при импульсной модуляции рабочего тока СИД.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акопов Р. Цветовые схемы / Р. Акопов [Электронный ресурс] // RSDN Magazine. – №1. – 2004. URL: http://www.rsdn.ru/article/multimedia/colorschemes.xml (Дата обращения 15.10.2010).

2. Аксененко М.Д. Приемники оптического излучения. Справочник / М.Д. Аксененко, М.Л. Бараночников. – М.: Радио и связь, 1987. – 296 с.

3. Андреев И.А. Быстродействующие p-i-n-фотодиоды для спектрального диапазона 0,9 – 2,4 μm / И.А. Андреев и др. // Письма в ЖТФ. – №9, Т. 36. – 2010. – С. 43-49.

4. Аникин П.П. Методы определения силы и потока излучения светодиодов и продукции на их основе / П.П. Аникин и др. // Измерительная техника. – №2. – 2007. – С. 41-43.

5. Анго А. Математика для электро- и радиоинженеров / А. Анго; Пер. с французского под ред. К.С. Шифрина. – М.: Наука, 1964. – 772 с.

6. Атаев А.Е. О координатах цветности основных цветов физиологической системы / А.Е. Атаев и др. // Вестник московского энергетического института. – №2. – 2012. – С. 166-170.

7. Афанасьев А.Л. Определение скорости ветра из турбулентных флуктуаций оптического излучения в атмосфере: автореф. дис. ... канд. тех. наук: 01.04.05 / Афанасьев Алексей Леонидович. – Томск, 2012. – 19 с.

8. Беннет Д. Когерентные технологии для DWDM сетей дальней связи. Переходя границу в 10G / Д. Беннет // Т-СОММ: Телекоммуникации и транспорт. – № Метрол. – 2012. – С. 35-36.

9. Берг А. Светодиоды / А. Берг, П. Дин; Перевод с английского А.Э. Юновича; под ред. А.Э.Юновича. – М.: Мир, 1979. – 677 с.

10. Буквецкий Б.В. Кристаллическая структура и триболюминесценция центросимметричного комплекса [Eu(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>(ГМФА)<sub>3</sub>] / Б.В. Буквецкий и др. // Журнал структурной химии. – №6. – Т. 51. – 2010. – С. 1200-1205.

11. Букингем М. Шумы в электронных приборах и системах / М. Букингем; Пер. с англ. под ред. В.Н. Губанкова. – М.: Мир, 1986. – 399 с.

12. Ван дер Зил А. Шум (источник, описание, измерение) / А. Ван дер Зил; Пер. с англ. под ред. А.К. Нарышкина. – М.: Сов. радио, 1973. – 228 с.

13. Ван дер Зил А. Шумы при измерениях / А. Ван дер Зил; Пер. с англ. под ред. А.К. Нарышкина. – М.: Мир, 1979. – 293 с.

14. Веселовский А.Б. Тенденции развития, разработка и исследование физиотерапевтической аппаратуры для фотохромотерапии / А.Б. Веселовский и др. // Оптические и лазерные технологии: сборник статей / под ред. В.Н. Васильева – СПб.: СПбГИТМО, 2001. – С. 149-164.

15. Вилисов А.А. Светоизлучающие диоды / А.А. Вилисов // Вестник Томского Государственного университета. – №285. – 2005. – С. 148-154.

16. Владимиров Ю.А. Люминесценция в биологических системах / Ю.А. Владимиров. [Электронный ресурс] / http://medbiophysics.professorjournal.ru/: [сайт]. URL: http://medbiophysics.professorjournal.ru/c/document\_library/ get\_file?uuid=12070f20-4db5-4200-9cb0-0d6b2fce7af4&groupId=456458 (Дата обращения 26.02.2014).

17. Волков А.С. Новый тип колориметра для измерения цветовых характеристик источников света / А.С. Волков, В.Н. Кузьмин // Светотехника. – №2. – 2012. – С. 49.

18. Волков В.Г. Беспроводные оптические системы связи / В.Г. Волков // Спецтехника и связь. – №3. – 2012. – С. 2-9.

19. Гаврилов Г.А. Предельная чувствительность фотоприемного устройства на основе фотодиодов А<sup>3</sup>В<sup>5</sup> среднего ИК-диапазона спектра / Г.А. Гаврилов, Б.А. Матвеев, Г.Ю. Сотникова // Письма в ЖТФ. Т. 37. Выпуск 18. – 2011.

20. Гальчина Н.А. Зеленый светодиод на основе люминофора, возбуждаемого фиолетовым излучением p-n-гетероструктуры InGaAlN / Н.А. Гальчина, Л.М. Коган, Ю.А. Портнягин, Н.П. Сощин // Светотехника. – №1. – 2010. – С. 13-15.

21. ГОСТ 9736-91 Приборы электрические прямого преобразования для измерения неэлектрических величин. Общие технические требования и методы испытаний. – М.: Стандартинформ, 2007. – 14 с.

22. ГОСТ 13088-67 Колориметрия. Термины, буквенные обозначения. – М.: Издательство стандартов, 1967. – 15 с.

23. ГОСТ 17772-88 Приемники излучения полупроводниковые фотоэлектрические и фотоприемные устройства. Методы измерения фотоэлектрических параметров и определения характеристик. – М.: Издательство стандартов, 1988. – 64 с.

24. ГОСТ 24286-88 Фотометрия импульсная. Термины и определения. – М.: Издательство стандартов, 1988. – 15 с.

25. ГОСТ Р 52662-2006 Материалы лакокрасочные. Колориметрия. Часть 2. Измерение цвета. – М.: Стандартинформ, 2007. – 10 с.

26. ГОСТ Р ИСО 5725-1-2002 Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 1. Основные положения и определения. – М.: Стандартинформ, 2002. – 24 с.

27. ГОСТ Р ИСО 5725-4-2002 Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 4. Основные методы определения правильности стандартного метода измерений. – М.: Стандартинформ, 2002. – 24 с.

28. ГОСТ Р ИСО 5725-6-2002 Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 6. Использование значений точности на практике. – М.: Стандартинформ, 2002. – 43 с.

29. Гуревич М.М. Фотометрия (теория, методы и приборы) / М.М. Гуревич. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 272 с.

30. Гуторов М.М. Основы светотехники и источники света: учебное пособие для вузов / М.М. Гуторов. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 384 с.

31. Дамасев М.В., Цвет. Управление цветом. Цветовые расчеты и измерения / М.В. Дамасев, С.П. Гнотюк. – СПБ.: Питер, 2009. – 224 с.

32. Джадд Д. Цвет в науке и технике / Д. Джадд, Г. Вышецки. – М.: Мир, 1978. – 592 с.

33. Ежов В. Стандартизация и расчет тепловых характеристик мощных светодиодов / Виктор Ежов // Электронные компоненты. – №6. – 2009. – С. 42-48.

34. Заргарьянц Г.С. Интегральный дистанционный колориметр на основе колориметрической системы КЗФ / Г.С. Заргарьянц, О.М. Михайлов. // Светотехника. – №3. – 2008. – С. 19-25.

35. Иванов А.Б. Волоконная оптика: компоненты, системы передачи, измерения / А.Б. Иванов. – М.: Компания САЙРУС СИСТЕМС, 1999. – 664 с.

36. Игнатов А.Н. Оптоэлектронные приборы и устройства: учебное пособие / А.Н. Игнатов. – М.: Эко-Трендз, 2006. – 272 с.

37. Измеритель теплового импеданса светодиодов [Электронный ресурс] // Ульяновский филиал института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова [сайт]. URL: http://ubire.narod.ru/win/semicond/ITI.html (Дата обращения 21.06.2013).

38. Ильичев В.П. Спектральное уплотнение DWDM / В.П. Ильичев, Л.А. Марыкова, И.И. Корнилов // Инфокоммуникационные технологии. – Т.4. – №7. – 2009. – С. 40-46.

39. Казачков В.С. Электрические измерения и способы обработки результатов наблюдения: Учеб. пособие / В.С. Казачков и др. – Омск: ОмГУПС, 2002. – 130 с.

40. Кириллов Е.А. Цветоведение: учебное пособие / Е.А. Кириллов. – М.: Легпромбытиздат, 1987. – 128 с.

41. Коган Л.М. Полупроводниковые светоизлучающие диоды / Л.М. Коган. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 208 с.

42. Красильникова Е. Светодиоды в архитектуре. Опыт внедрения светодиодных технологий в архитектурном освещении / Е. Красильникова, А. Воронин, С. Кукс // Полупроводниковая светотехника. – №3. – 2010. – С. 42.

43. Колориметр «ТКА-ИЦТ»: Руководство по эксплуатации. – СПб.: Научнотехническое предприятие «ТКА», 2004 [Электронный ресурс] // URL: http://www.tkaspb.ru/produkt/new\_ruk/ruk\_ict.pdf (Дата обращения 18.01.2012).

44. Кострин Д.К. Аппартно-программный спектрометрический комплекс для исследования параметров светоизлучающих диодов / Д.К. Кострин, А.А. Ухов // Биотехносфера. – №3. – 2013. – С. 21-25.

45. Крайский А.В. Измерение поверхностного распределения длины волны узкополосного излучения колориметрическим методом / А.В. Крайский, Т.В. Миронова, Т.Т. Султанова // Квантовая электроника. – №7. – Т. 40. – 2010. – С. 652-658.

46. Крайский А.В. Измерение длины волны узкополосного излучения при обработке цифровых фотографий в raw-формате / А.В. Крайский, Т.В. Миронова, Т.Т. Султанова // Квантовая электроника. – №12. – Т. 42. – 2012. – С. 1137-1139.

47. Круглов О.В. Измерение светового потока светодиодов / О.В. Круглов, В.Н. Кузьмин, К.А. Томский // Светотехника. – №3. – 2009. – С. 34.

48. Круглов О.В. Разработка и исследование приборов для измерения оптических параметров и характеристик светодиодов: автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.11.07 / Круглов Олег Владимирович. – СПб., 2011. – 22 с.

49. Круглов О.В. Разработка и исследование приборов для измерения оптических параметров и характеристик светодиодов: дис. ... канд. тех. наук: 05.11.07 / Круглов Олег Владимирович. – СПб., 2011. – 152 с.

50. Ксенофонтов М. Устройство измерения концентрации кислорода / М. Ксенофонтов, А. Поляков // Фотоника. – №4. – 2010. – С. 44-48.

51. Кузьмин В.Н. Разработка и исследование приборов для измерения параметров и характеристик источников оптического излучения: дис. ... канд. тех. наук: 05.11.07 / Кузьмин Владимир Николаевич. – СПб., 2007. – 209 с.

52. Купко А.Д. Светотехнические измерения на железнодорожном транспорте / А.Д. Купко, С.Г. Чуб // Украинский метрологический журнал. – №1. – 2010. – С. 31-36.

53. Кустарев А.К. Цветовые измерения / А.К. Кустарев [электронный ресурс] // http://www.realcolor.ru: [сайт]. URL: http://www.realcolor.ru/lib/ color\_measure.htm (Дата обращения 19.08.2009).

54. Кхан Т.К. Системы для измерения радиометрических и фотометрических характеристик СИД / Т.К. Кхан, З. Озвер-Крохманн, С. Хилтавский // Светотехника. – №5. – 2004. – С. 44-48.

55. Луценко Е. Температура перегрева активной области коммерческих светодиодов с прямым жидкостным охлаждением чипа / Е. Луценко // Полупроводниковая светотехника. – №2. – 2011. – С. 26.

56. Мальцев А. Контроль качества и надежности светодиодов по тепловому сопротивлению p-n-переход – корпус / А. Мальцев, И. Мальцев // Полупроводниковая светотехника. – №2. – 2010. – С. 40.

57. Мейзда Ф. Электронные измерительные приборы и методы измерений / Φ. Мейзда; Пер. с англ. В.Д. Новвков. – М.: Мир, 1990. – 535 с.

58. Мешков В.В. Основы светотехники: учебное пособие для вузов: в 2-х ч. Ч. 2. Физиологическая оптика и колориметрия / В.В. Мешков, А.Б. Матвеев. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 432 с.

59. Миннарт М. Свет и цвет в природе. / М. Миннарт. М.: Наука, 1969. – 351 с.

60. Мироновский Л.А. Алгоритмы оценивания результата трех измерений / Л.А. Мироновский, В.А. Слаев. – СПб.: Профессионал, 2010. – 192 с.

61. Мухитдинов М. Светоизлучающие диоды и их применение / М. Мухитдинов, Э.С. Мусаев. – М.: Радио и связь, 1988. – 80 с.

62. Никифоров С. Измерительная лаборатория для комплексного исследования характеристик светодиодов, применяемых в системах отображения информации / С. Никифоров // Компоненты и технологии. – №7. – 2007. – С. 170-175.

63. Никифоров С. Температура в жизни и работе светодиодов. Часть 1 / С. Никифоров // Компоненты и технологии. – №53. – 2005. – С. 48-54.

64. Никифоров С. Температура в жизни и работе светодиодов. Часть 2 / С. Никифоров // Компоненты и технологии. – №54. – 2006. – С. 42-47.

65. Никифоров С. Почему светодиоды не всегда работаю так, как хотят их производители? / С. Никифоров // Компоненты и технологии. – №7. – 2005. – С. 178-186.

66. Никифоров С. Трудная задача измерения параметров света от светодиодов / С. Никифоров // Полупроводниковая светотехника. – №1. – 2010. – С. 36.

67. Новицкий П.В. Оценка погрешностей результатов измерений / П.В. Новицкий, И.А. Зограф. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 248 с.

68. Общие характеристики кристаллов G-Nor [Электронный ресурс] / Политекс: [сайт]. URL: http://www.radiodetali.com/td/led/aboutgnor.htm (Дата обращения 15.10.2013).

69. Основы оптической радиометрии / В.С. Иванов и др.; Ред. А.Ф. Котюк. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 544 с.

70. Панфилов В.А. Электрические измерения: Учебник / В.А. Панфилов. – М.: Академия, 2006. – 228 с.

71. Патент №2390738 РФ G01J 9/00 Способ измерения средней длины волны узкополосного светового излучения // А.В. Крайский, Т.В.Миронова, Т.Т.Султанов, В.А.Постников, В.А. Сергиенко, В.Е.Тихонов – 2008119917/28, заявл. 21.05.2008 Физический институт П.Н. Лебедева Российской академии наук, опубл. 27.05.2010, бюл №15

72. Патент № 2366907 РФ, МКИ G01J 3/46. Способ цифровой фотоэлектрической колориметрии / О.В. Голосной. – №2008101787/28; заявл. 23.01.2008; опубл. 10.09.2009.

73. Патент № 6798517 В2 США, МКИ G01J 3/50. Handheld, portable color measuring device with display / G. Wagner, G. Emerson. – №09/854344; заявл. 11.05.2001; опубл. 28.03.2002. – 9 с.

74. Патент № 7688447 В2 США, МКИ G01J 3/46. Color sensor / Т.Т. Shakespeare, J.F. Shakespeare. – №11/362582; заявл. 24.02.2006; опубл. 30.03.2010. – 17 с.

75. Патент № 2005/0243318 A1 США, МКИ G01J 3/50. Color measurement system / D.V. Baker, M.A. Cargill, B.J. Berg. – №11/119952; заявл. 02.05.2005; опубл. 03.11.2005. – 21 с.

76. Патент № 2007/0013978 A1 США, МКИ Н04N 1/46. Color information measurement device, print object information measurement device, printing device and electrroning equipment / N. Watanabe, T. Taminaga, H. Wada. – №11/482748; заявл. 10.07.2006; опубл. 18.01.2007. – 43 с.

77. Патент № 2011/0075146 A1 США, МКИ G01J 3/46. Color measurement device / N. Moroney. – №12/569226; заявл. 29.09.2009; опубл. 31.03.2011. – 12 с.

78. Петренко А.И. Методы и устройства распознавания цвета объектов / А.И. Петренко, В.А. Фесечко. – М.: Энергия, 1972. – 93 с.

79. Полищук А. Обеспечение теплового режима мощных светодиодных ламп при разработке светотехнических устройств / А. Полищук // Современная электроника. – №3. – 2006. – С. 52-56.

 80. Попело А.В. Исследование материалов с помощью люминесцентного спектрометра PERKIN ELMER LS-55 / А.В. Попело, А.А. Елисеев. [Электронный pecypc] / Нанометр: [сайт]. URL: http://www.nanometer.ru/2009/11/29/12595231471231/PROP\_FILE\_files\_3/%CF\_1.1.5\_%CB%FE%EC%E8%ED% E5%F1%F6%E5%ED%F2\_%F1%EF%E5%EA%F2%F0%EE%F1%EA%EE%EF%E8%F

 F.pdf (Дата обращения 26.02.2014).

81. Прикладная физическая оптика / И.М. Нагибина, В.А. Москалев, Н.А. Полушкина и др.; под ред. В.А. Москалева. – М.: Высш. Шк., 2002. – 565 с.

82. Рабинович С.Г. Погрешности измерений / С.Г. Рабинович. – Л.: Энергия, 1978. – 262 с.

83. Рогов В.Н. Анализ погрешности измерения цветности светодиодов методом двух фотоприемников / В.Н. Рогов, А.В. Ульянов // Радиоэлектронная техника: межвуз. Сб. науч. Тр. – Ульяновск: УлГТУ, 2013 – С. 98-103.

84. Рогов В.Н. Бесконтактный метод измерения температуры кристалла светодиода / А.В. Ульянов, В.Н. Рогов // Актуальные проблемы физической и функциональной электроники: материалы 16-й регион. Науч. Школы-семинара, 4-6 дек. – Ульяновск: УлГТУ, 2013 – С. 41.

85. Рогов В.Н. Исследование цветности лазера / А.В. Ульянов, В.Н. Рогов // Актуальные проблемы физической и функциональной электроники: материалы 16-й регион. Науч. Школы-семинара, 4-6 дек. – Ульяновск: УлГТУ, 2013 – С. 78-79.

86. Рогов В.Н. Методы измерения цвета светодиодов / В.Н. Рогов, А.В. Ульянов // Радиоэлектронная техника: межвуз. сб. науч. тр. – Ульяновск: УлГТУ, 2010. – С. 100-105.

87. Рогов В.Н. Методы измерения цветности / В.Н. Рогов, А.В. Ульянов // Актуальные проблемы физической и функциональной электроники: материалы 13-й регион. науч. школы-семинара, 1-3 дек. – Ульяновск: УлГТУ, 2010. – С. 28-29.

88. Рогов В.Н. Оперативное определение цветности светодиодов / В.Н. Рогов, А.В. Ульянов // Актуальные проблемы физической и функциональной электроники: материалы 13-й регион. науч. школы-семинара, 1-3 дек. – Ульяновск: УлГТУ, 2010. – С. 30-31.

89. Рогов В.Н. Устройство измерения цветности светодиодов / В.Н. Рогов, А.В. Ульянов // Радиоэлектронная техника: межвуз. сб. науч. тр. – Ульяновск: УлГТУ, 2011. – С. 92-95.

90. Рогов В.Н. Фотоприемные устройства для исследования цветности излучения светодиодов / В.Н. Рогов, А.В. Ульянов // Современные проблемы создания и эксплуатации радиотехнических систем: тр. седьмой всерос. науч.-практ. конф. (с участием стран СНГ), 22-23 сент. – Ульяновск: УлГТУ, 2011. – С. 203-205.

91. Рыжков М.В. О деградации и отказах белых светодиодов / М.В. Рыжков // Светотехника. – №3. – 2010. – С. 25-28.

92. Сергеев В.А. Методические погрешности определения параметров спектра светодиодов двумя фотоприемниками / В.А. Сергеев, В.Н. Рогов, А.В. Ульянов // Измерительная техника. – №4. – 2013. – С. 42-45.

93. Сергеев В.А. Нелинейная тепловая модель гетеропереходного светодиода / В.А. Сергеев, А.М. Ходаков // Физика и техника полупроводников. Том 46. Выпуск 5. – 2012. – С. 691.

94. Сергеев В.А. / Определение локальных температур красных AlInGaP/GaAs светодиодов в импульсном режиме / В.А. Сергеев, А.А. Широков // Письма в ЖТФ. Том 35. Выпуск 9. – 2009. – С. 1.

95. Сергеев В.А. Сравнительный анализ аппроксимирующих функций для спектральных характеристик серийных светофильтров / В.А. Сергеев, В.Н. Рогов, А.В. Ульянов // Измерительная техника. – №10. – 2013. – С. 27-29.

96. Сергеев, В. А. Сравнительный анализ погрешности аппроксимации спектров излучения светодиодов различными функциями / В.А. Сергеев, А.В. Ульянов // Известия высших учебных заведений. Электроника. – 2015. – № 3. – С. 317-320.

97. Сергеев В.А. Устройство для определения цветности светодиодов / В.А. Сергеев, В.Н. Рогов, А.В. Ульянов // Современные проблемы создания и эксплуатации радиотехнических систем: тр. седьмой всерос. науч. - практ. конф. (с участием стран СНГ), 22-23 сент. – Ульяновск: УлГТУ, 2011. – С. 208-210.

98. Светодиод [Электронный ресурс] // Словари и энциклопедии на Академике: [сайт]. URL: http://dic.academic.ru/dic.nsf/enc\_physics/ 2699/СВЕТОДИОД.htm (Дата обращения 17.10.2013).

99. Слепов Н. Оптические мультиплексоры ввода-вывода / Н. Слепов // Электроника: наука, технология, бизнес. – №1. – 2001. – С. 40-43.

100. Соболев С.А. Исследование возможности применения светодиодов средней инфракрасной области спектра для определения содержания воды в нефти / С.А. Соболев, Р.Б. Фаттахов // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – №6. – 2012. – С. 38-40.

101. Справочная книга по светотехнике / Под ред. Ю.Б. Айзенберга. – М.: Знак, 2006. – 972 с.

102. Стороженко А.И. Оценка погрешностей визуальных и фотоэлектрических методов измерения координат цвета: дис. ... канд. тех. наук: 05.11.07 / А.И. Стороженко. – СПб., 2007. – 115 с.

103. Сушков В. Метод контроля потенциальной степени деградации характеристик светодиодов на основе твердотельных растворов AlGaInN / В. Сушков, С. Никифоров // Полупроводниковая светотехника. – №3. – 2011. – С. 10.

104. Тартаковский Д.Ф. Метрология, стандартизация и технические средства измерений: Учеб. для вузов / Д.Ф.Тартаковский, А.С. Ястребов. – М.: Высшая школа, 2001. – 205 с.

105. Тюрин Ю.И. / Физика. Квантовая физика: учебник // Ю.И. Тюрин, И.П. Чернов, Ю.Ю. Крючков. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 320 с.
106. Ульянов А.В. Анализ влияния мультипликативных шумов на процесс измерения цветности светоизлучающих диодов / А.В. Ульянов, В.А. Сергеев, В.Н. Рогов // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения: Материалы Международной научно-технической конференции «INTERMATIC – 2013» 2 – 6 декабря 2013г., Москва. – М.: Энергоатомиздат, 2013, часть 3. – С. 174-177.

107. Ульянов А.В. Оперативное определение цветности светодиодов / А.В. Ульянов, В.Н. Рогов // Молодежный инновационный форум Приволжского федерального округа, 12-14 мая: сб. аннотаций проектов. – Ульяновск: УлГТУ, 2010. – С. 125-127.

108. Ульянов А.В. Расчет координат цвета светодиодов / А.В. Ульянов // Актуальные проблемы физической и функциональной электроники: материалы 16-й регион. Науч. Школы-семинара, 4-6 дек. – Ульяновск: УлГТУ, 2013 – С. 13.

109. Ульянов А.В. Сравнительный анализ методов измерения цветности светодиодов / А.В. Ульянов // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения: Материалы Международной научно-технической конференции «INTERMATIC – 2013» 2 – 6 декабря 2013г., Москва. – М.: Энергоатомиздат, 2013, часть 3. – С. 170-173.

110. Ульянов, А. В. Методы и средства оперативного контроля параметров спектра узкополосного оптического излучения / А. В. Ульянов, В. А. Сергеев, В. Н. Рогов // Автоматизация процессов управления. – 2015. - №4.- С. 75-80.

111. Филин Н. Измерение цвета / Н. Филин, В. Филин. – 2005 [Электронныйpecypc]//RuPrint.Ru:[сайт].URL:http://www.printer-publisher.ruprint.ru/stories/24/251\_1.php (Дата обращения 02.02.2010).

112. Хоббс Ф. Усилители для фотодиодов на операционных усилителях. Ч. 1 / Филипп С.Д. Хоббс; Пер. с англ. Д. Иоффе // Компоненты и технологии. – №2. – 2009.
– С. 46-50.

113. Хоббс Ф. Усилители для фотодиодов на операционных усилителях. Ч. 2 / Филипп С.Д. Хоббс; Пер. с англ. Д. Иоффе // Компоненты и технологии. – №3. – 2009.
– С. 46-50.

114. Шайбонов Б.А. Применение технологии DWDM при построении систем передачи на базе ВОЛС / Б.А. Шайбонов, И.Д. Тютьманов // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтипродуктов. – №2. – 2013. – С. 91-95.

115. Шевцов Э.А. Фотоприемные устройства волоконно-оптических систем передачи / Э.А. Шевцов, М.Е. Белкин. – М.: Радио и связь, 1992. – 224 с.

116. Шредер Г. Техническая оптика / Г. Шредер, Х. Трайбер; Пер с немецкого Р.Е. Ильинского. – М.: Техносфера, 2006. – 424 с.

117. Шуберт Ф.Е. / Светодиоды. 2-е изд. / Ф.Е. Шуберт; Пер. с англ. под ред. А.Э. Юновича. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 495 с.

118. Щербаков В.И. Электронные схемы на операционных усилителях: Справочник / В.И. Щербаков, Г.И. Грездов. – Киев: Техника, 1983. – 213 с.

119. Юнович А.Э. Свет из гетеропереходов / А.Э. Юнович // Природа. – №6. – 2001. – С. 38-46.

120. Юнович А.Э. Светодиоды как основа освещения будущего / А.Э. Юнович // Светотехника. – №3. – 2003. – С. 2-6.

121. Яркомер-колориметр CS-200 [Электронный ресурс] // Группа компаний NDT-TD: [сайт]. URL: http://www.ndt-td.ru/download/yarkomer-kolorimetr-cs-200.pdf (Дата обращения 23.09.2012).

122. AD820: Data Sheet [Электронный ресурс] // Analog Devices: [сайт]. URL: http://www.analog.com/static/imported-files/data\_sheets/ AD820.pdf (Дата обращения 25.06.2013).

123. ADC08D1000: Data Sheet [Электронный ресурс] // Texas Instruments: [сайт]. URL: http://www.ti.com/lit/ds/symlink/adc08d1000.pdf (Дата обращения 30.06.2014).

124. Andersson M. The substrate influence on color measurement / Mattians Andersson, Ole Norberg, Bjorn Kruse // NIP & digital Fabrication Conference. -2003. - P. 565-569.

125. Antognazza M.R. Spectrally selected photodiodes for colorimetric application / M.R. Antognazza and other // Organic electronics. – Vol.  $11. - N_{2}3. - 2010. - P. 357-362.$ 

126. Bielecki Z. Analysis of operation conditions of avalanche photodiode on signal to noise ratio / Z. Bielecki // Opto-electronics Review. – №4. – 1997. – P. 249-256.

127. BPW21R: Datasheet [Электронный ресурс] // Vishay Semiconductors: [сайт]. URL: http://www.vishay.com/docs/81519/bpw21r.pdf (Дата обращения 02.02.2010).

128. BPW34: Datasheet [Электронный ресурс] // Vishay Semiconductors: [сайт]. URL: http://www.vishay.com/docs/81521/bpw34.pdf (Дата обращения 13.12.2011).

129. Brown S.W. Development of a tunable LED-based colorimetric source / S.W. Brown, C. Santana, G.P. Eppeldauer / Journal of research of the National Institute of Standards and Technology. – Vol. 107. –  $N_{24}$ . – 2002. – P. 363-371.

130. Estrada-Hernőndez A. New paradigms in LED photometry and colorimetry / A. Estrada-Hernőndez, L.P. Gonzőlez-Galvőn, E. Rosas. Seventh symposium optics in industry, 2009 Guadalajara, Jalisco, Mexico. P. 74990L-6.

131. Goodman Tm. Measurement and specification of lighting: a look at the future / Tm. Goodman // Lighting research and technology. – Vol.  $41. - N_{2}3. - 2009. - P. 229-243.$ 

132. Graeme J.G. Photodiode amplifiers: op amp solution / J.G. Graeme. – New York: McGraw-Hill, 1996. – 252 p.

133. Gressmann Th. High-efficiency AlGaInP light-emitting diodes for solid-state lighting applications / Th. Gressmann, E.F. Schubert // Journal of applied physics. –  $N_{2}5. - 2004. - P. 2203-6.$ 

134. HP8000 LED Optical Spectral & Electrical Test System [Электронный ресурс] / Hopu Optics Technology Co: [сайт]. URL: http://www.led-analyzer.com/products/led-testmeasurement/hp8000.html (Дата обращения 15.10.2012).

135. Jin P. Superior application of LED to street lighting / P. Jin and other // Optics and precision engineering. – Vol. 19. –  $N_{21}$ . – 2011. – P. 51-55.

136. Keppens A. Modeling high power light-emitting diode spectra and their variation with junction temperature / A. Keppens and other // Journal of applied physics. – Vol. 108. –  $N_{24}$ . – 2010. – P. 43104-43107.

137. Kosztyan Z.T. Matrix-based color measurement corrections of tristimulus colorimeters / Z.T. Kosztyan, G.P. Eppeldauer, J.D. Schanda // Applied optics. – Vol. 49. – N12. – 2010. – P. 2288-2301.

138. Luminance colorimeter XYL-VI [Электронный ресурс] / Lisun Group: [сайт]. URL: http://www.lisungroup.com/product-id-303.html (Дата обращения 15.10.2013).

139. Mahlkov A. Thermisches management für SMD-Hochleistungs-leuchtdioden / A. Mahlkov // Licht. –  $N_{26}$ . – 2006. – P. 624-632.

140. Ng B.K. Multiplication and excess noise characteristics of thin 4H-SiC UV avalanche photodiodes / B.K. Ng and other // IEEE photonics technology letters. – No 9. – 2002. - P. 1342-1344.

141. Ohno Y. CIE Fundamentals for Color Measurements / Yoshi Ohno // IS&T NIP16 Conference. – Vancouver. – 2000. – P. 540-545.

142. PIC16F876A: Data Sheet [Электронный ресурс] // Microchip: [сайт]. URL: http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/39582b.pdf (Дата обращения 13.01.2010).

143. Prasad K.M.M.K. Basic aspects and applications of tristimulus colorimetry / K.M.M.K. Prasad and other // Talanta. – Vol. 43. –  $N_{2}8.$  – 1996. – P. 1187-1206.

144. RadOMA Lite LED Spectrometer [Электронный ресурс] / Gamma-ScientificRadOMAlite:[сайт].URL:http://www.gamma-sci.com/wp-content/uploads/2011/12/RadOMA-Lite-Spectrometer-Data-Sheet-PDF.pdf (Дата обращения15.10.2012).

145. Schanda J. LED colorimetry / J. Schanda, K. Muray, B. Kranicz // Proc. AIC Conference. – Rochester: Proc. SPIE, 2001. – Vol. 4421. – P. 781-784.

146. Schanda J. LED photometry and colorimetry / J. Schanda [Электронный pecypc] // ssl.xmu.edu.cn : [сайт]. URL: http://ssl.xmu.edu.cn/download%5Ccolorimetric% 5CLED%20photomery%20and%20colorimetry.pdf (Дата обращения 12.03.2011).

147. Simonot L. Goniocolorimetry: from measurement to representation in the CIELAB color space / L. Simonolt, M. Hebert, D. Dupraz // Color research and application. – Vol.  $36. - N_{2}3. - 2011. - P. 169-178.$ 

148. STM32F105xx, STM32F107xx: Data Sheet [Электронный ресурс] //STMicroelectronics:[сайт].URL:http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/datasheet/CD00220364.pdf (Дата обращения 27.04.2012).

149. Svilainis L. LED brightness control for video display application / L. Svilainis // Displays. – Vol. 29. –  $N_{25}$ . – 2008. – P. 506-511.

150. Thomas A. LED metrology keeps pace with application demands / A. Thomas // Photon. Spectra. – Vol. 39. –  $N_{25}$ . – 2005. – P. 54-56.

151. TLCR5800: Data Sheet [Электронный ресурс] // Vishay Semiconductors: [сайт]. URL: http://www.vishay.com/docs/83178/ tlcr5800.pdf (Дата обращения 25.06.2013).

152. USB2000+ Spectrometer. Data Sheet [Электронный ресурс] // Ocean Optics [сайт]. URL: http://www.oceanoptics.com/technical/ engineering/OEM%20Data%20Sheet% 20--%20USB2000+.pdf (Дата обращения 16.03.2013).

153. Yam F.K. Innovative advances in LED technology / F.K. Yam, Z. Hassan // Microelectronics journal. – No36. – 2005. – P. 129-137.

154. Zong Y. Practical method for measurement of AC-driven LEDs at a given junction temperature by using active heat sinks / Y. Zong and other // Ninth international conference on solid state lighting. – San Diego: The International Society for Optical Engineering, 2009. – P. 742208-7.

### Приложение А

#### № СИД Значение длины Ширина Абсолютное Значение длины Относительное волны на спектра отклонение отклонение $\delta \lambda_x$ , волны на спектрометре $\lambda_c$ , СИД экспериментальной $\Delta \lambda_x$ , HM % установке $\lambda_x$ , нм HM $\Delta\lambda_{0,5}$ , HM 5 1 2 3 4 6 634,79 0,55 0,14 1 25,16 635,69 2 636,18 24,42 635.87 0,02 0,05 3 636,87 25,9 638,24 0,62 0,22 4 642,43 22,2 641,21 1,27 0,19 5 25,9 636,53 636,95 0.42 0.07 25,16 0,55 6 634,44 635,69 0,14 7 634,09 20,72 635,87 0.02 0,05 8 641,04 20,72 638,24 0.62 0,22 1.27 0.19 9 635,13 23,68 641,21 10 641,39 22,2 636,95 0,42 0,07 11 635,13 23,68 635,69 0,55 0,14 12 635,13 24,42 635,87 0.02 0.05 13 634,44 23,68 638,24 0,62 0,22 14 635,13 20,72 641,21 1,27 0,19 15 634,09 23,68 636.95 0,42 0.07 25,9 0,55 0,14 16 645,9 635.69 17 638,26 23,68 635,87 0,02 0,05 18 635.48 638.24 0.22 23.68 0.62 19 635,13 24,42 641,21 1,27 0,19 20634,44 25,16 636,95 0,42 0,07 21 635,48 25,16 635,69 0,55 0,14 22 25,9 0,02 0,05 634,44 635,87 23 0,22 632,7 24,42 638,24 0,62 24 638,96 25,9 641,21 1,27 0,19 25 28,12 638,96 636.95 0,42 0.07 26 26,64 0.55 641,04 635.69 0.14 27 635,87 0.05 645,9 21,46 0.02 28 638,96 26,64 638,24 0,62 0.22 29 636,18 24,42 641.21 1,27 0.19 30 634,44 23,68 636,95 0,42 0,07 31 634,09 19,98 635,69 0,55 0.14 32 635,87 634,09 24,42 0,02 0,05 33 638,96 25,16 638,24 0,62 0,22 34 638,26 25.16 641.21 1.27 0.19 0,42 35 634,44 24,42 636,95 0,07 36 635,69 0,55 635,13 25,16 0,14 37 25,9 0,02 0,05 634,09 635,87 638,24 0,22 38 640,7 21,46 0,62 25,9 39 641.21 1.27 645,21 0,19

### Результаты измерений партии светоизлучающих диодов L-52SRCDW в установившемся

режиме работы

40	635,13	19,98	636,95	0,42	0,07
41	634,09	19,24	635,69	0,55	0,14
42	634,09	27,38	635,87	0,02	0,05
43	633,74	24,42	638,24	0,62	0,22
44	633,05	19,98	641,21	1,27	0,19
45	635,13	30,34	636,95	0,42	0,07
46	638,96	24,42	635,69	0,55	0,14
47	638,96	25,16	635,87	0,02	0,05
48	635,48	25,16	638,24	0,62	0,22
49	634,44	28,86	641,21	1,27	0,19
50	634,44	25,9	636,95	0,42	0,07

## Приложение Б

Параметры спектра СИЛ и		Номер исследуемого образца СИД									
аппроксимирующих функций		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Экспери- мент	S <sub>max</sub> , отн. ед.	0,93	0,99	0,92	0,86	0,87	0,90	1,00	0,92	0,85	0,68
	λ <sub>max</sub> , нм	631,5	631,8	632,2	633,0	631,1	645,4	632,9	631,8	632,8	632,2
	Δλ <sub>0,607</sub> , нм	17,8	19,4	18,8	14,8	18,0	19,0	20,6	16,4	18,6	17,0
Одна гауссиана	<i>S</i> <sup>1G</sup> <sub>пах</sub> , отн. ед.	0,91	0,98	0,89	0,78	0,85	0,87	0,99	0,89	0,81	0,65
	$\lambda_{_{MBX}}$ , HM	630,3	630,5	631,0	632,3	630,6	643,6	632,5	630,5	631,3	630,7
	$\Delta \lambda_{\max}^{1G}$ , HM	- 1,2	- 1,3	- 1,2	- 0,7	- 0,5	- 1,8	- 0,5	- 1,3	- 1,5	- 1,5
	2σ, нм	19,8	21,2	21,2	20,0	20,8	22	22,2	20,6	21,4	20,2
	$\delta \sigma^{1\Gamma}$ , нм	+2,0	1,8	2,4	5,2	2,8	3,0	1,6	4,2	2,8	3,2
	СКО1Г	0,465	0,411	0,418	0,487	0,438	0,595	0,424	0,452	0,426	0,459
Парабола	S <sub>maa</sub> <sup>п</sup> , отн. ед.	0,93	0,99	0,92	0,86	0,89	0,90	1,00	0,92	0,85	0,68
	$\lambda_{max}^{\Pi}$ , HM	630,3	630,5	631,1	632,5	630,7	643,6	632,6	630,5	631,8	630,9
	$\Delta\lambda_{max}^{\Pi}$ , HM	- 1,2	- 1,3	- 1,1	- 0,5	- 0,4	- 1,8	- 0,3	- 1,3	- 1,0	- 1,3
	Δλ <sub>0,607</sub> , нм	20,3	22	21,6	19,5	20,9	22,2	23,0	20,6	21,6	18,5
	$\delta \sigma^{\Pi}$ , нм	2,5	2,6	2,8	4,7	2,9	3,2	2,4	4,2	3,0	1,5
	СКОП	0,105	0,094	0,083	0,105	0,091	0,108	0,1	0,102	0,078	0,054
Сумма двух гауссиан	S <sup>2G</sup> <sub>max1</sub> , отн. ед.	0,66	0,78	0,70	0,52	0,63	0,77	0,82	0,66	0,62	0,46
	$\lambda_{max 1}$ , HM	631,8	631,5	631,9	632,7	631,7	645,1	633,7	631,8	632,6	631,7
	$\Delta\lambda_{max}^{2G}$ , HM	+0,3	- 0,3	- 0,3	- 0,3	+0,4	- 0,4	+0,8	0	- 0,2	- 0,5
	$2\sigma_{_1}$ , HM	15	17,6	17,4	15,6	16	18,8	18,8	15,6	17,2	15,0
	$\delta\sigma^{2\Gamma}$ , нм	-2,8	-1,8	-1,4	+0,8	+2,0	-0,2	-1,8	-0,8	-1,4	-2,0
	<i>s</i> <sup>2G</sup> <sub>max2</sub> , отн. ед.	0,31	0,24	0,24	0,31	0,27	0,19	0,22	0,29	0,22	0,22
	$\lambda_{max\ 2}$ , HM	625,5	625,2	626,7	631,1	626,6	632,2	625,0	625,7	627,5	627,5
	$2\sigma_2$ , HM	28,8	32,4	33,2	31,2	32	32,8	34,2	31,4	34	31
	$\lambda_{\max 1} - \lambda_{\max 2}$ , HM	6,3	6,3	5,2	1,6	5,1	12,9	8,7	6,1	5,1	5,2
	СКО <sub>2Г</sub>	0,126	0,064	0,049	0,212	0,092	0,204	0,07	0,106	0,068	0,109

# Параметры спектра десяти светоизлучающих светодиодов L-52SRCDW и аппроксимирующих

функций