

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)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ульяновск – 2016

Работа выполнена на кафедре «Радиотехника» ФГБОУ ВО «Ульяновского государственного технического университета»

Научный руководитель – **Рогов Виктор Николаевич**
кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Радиотехника» ФГБОУ ВО «Ульяновского государственного технического университета»

Официальные оппоненты: **Безуглов Дмитрий Анатольевич**
доктор технических наук, исполняющий обязанности заместителя директора филиала по научной работе, профессор кафедры «Таможенных операций и таможенного контроля», Ростовского филиала государственного казенного образовательного учреждения высшего образования «Российской таможенной академии»

Матюнин Сергей Александрович
доктор технических наук, профессор кафедры «автоматических систем энергетических установок» ФГАОУ ВО «Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева»

Ведущая организация – **ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный университет», г. Ульяновск**

Защита состоится «**28**» декабря 2016 г. в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.227.01 при Ульяновском государственном техническом университете по адресу: 432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32 (ауд. 211, Главный корпус).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ульяновского государственного технического университета. Также диссертация и автореферат размещены в Internet на сайте УлГТУ – <http://www.ulstu.ru/>

Автореферат разослан «27» октября 2016 г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета,
доктор технических наук, профессор



Смирнов Виталий Иванович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Во многих современных технических системах необходим контроль параметров спектра оптического излучения в динамическом режиме. 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 и точности измерения параметров спектра постоянно возрастают. Низкое быстродействие приборов, построенных на основе спектрального метода, ограничивает возможности 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. Eске и др. Однако достигнутый уровень быстродействия таких средств с учетом времени считывания и обработки сигналов таких фотоприемников составляет в лучшем случае десятки микросекунд.

В последние годы в работах А.В. Крайского, Т.Т. Султанова, Т.В. Мироновой и других авторов активно разрабатываются быстродействующие методы и средства измерения параметров спектра излучения с использованием двух фотоприемников с различающимися спектральными характеристиками. Однако, в известных устройствах, основанных на этом принципе, реализуется алгоритм измерения только центральной длины волны излучения. 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 и потребность в них постоянно возрастает.

Таким образом, повышение точности быстродействующих двухканальных фотоэлектрических преобразователей для измерения параметров спектра оптического излучения в широком диапазоне длин волн 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 ДФЭП при различных способах аппроксимации спектральных характеристик фотоприемников.

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

4. Разработать экспериментальную установку на основе ДФЭП 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 ДФЭП 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 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.

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

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

Практическая ценность и реализация результатов работы.

Проведенные исследования позволили повысить точность измерения центральной длины волны и ширины спектра узкополосного оптического излучения

ДФЭП со спектральными характеристиками гауссовой формы. На основе проведенных исследований:

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

Полученные в диссертационной работе результаты могут быть использованы при разработке оптоэлектронных средств оперативного контроля параметров спектра узкополосного излучения (например, при контроле качества СИД).

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 ДФЭП с гауссовыми и линейными спектральными характеристиками фотоприемников.

3. Результаты математического моделирования влияния аддитивных и мультипликативных электрических шумов измерительных каналов ДФЭП со спектральными характеристиками фотоприемников гауссовой формы на точность измерения параметров спектра оптического излучения.

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

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

6. Способ измерения теплового импеданса СИД по амплитуде изменения центральной длины волны его излучения при широтно-импульсной модуляции рабочего тока.

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 научно-технической 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 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна результатов работы и положения, выносимые на защиту.

В первой главе диссертации рассмотрены известные методы и средства измерения параметров спектра оптических сигналов, таких как ширина спектра и центральная длина волны излучения; выявлены недостатки и определены направления развития указанных методов и средств измерения.

Оптические сигналы считаются узкополосными, если полоса $\Delta\lambda$ длин волн оптического сигнала много меньше его центральной длины волны λ_0 . Такие оптические сигналы характеризуется длиной волны в максимуме или центральной длиной волны и шириной спектра. Источниками узкополосных оптических сигналов являются полупроводниковые СИД и лазеры, суперлюминесцентные диоды, люминофоры, химические источники и др.

Существуют три группы методов измерения параметров спектра оптических сигналов: спектрофотометрический, интегральный и визуальный.

Спектрофотометрический метод заключается в измерении спектрального распределения светового потока и последующем расчете центральной длины волны, ширины спектра и координат цвета. Являясь наиболее точными приборами, спектрофотометры имеют и существенные недостатки, такие как высокая стоимость, сложность обслуживания, длительное время измерения спектрального распределения. Современные серийно выпускаемые спектрофотометры имеют низкое

быстродействие и не подходят для задач измерения параметров спектра в динамических режимах, а серийно выпускаемые измерители цветности интегрального типа, основанные на трехкомпонентной модели, имеют значительную погрешность измерений особенно в области красного и синего цвета.

Способ измерения центральной длины волны узкополосного оптического излучения двумя фотоприемниками с известными различающимися спектральными характеристиками, развитый в работах А.В. Крайского и др., позволяет получить значение центральной длины волны излучения с погрешностью порядка 1 нм. Этот способ, однако, не позволяет определить ширину спектра излучения. В указанных работах не приводится ни оценок погрешности измерения центральной длины волны излучения, обусловленной конечной шириной спектра, ни быстродействия средств измерения на основе предложенного способа.

Таким образом, была сформулирована задача разработки и исследования быстродействующих фотоэлектрических методов и средств одновременного измерения центральной длины волны и ширины спектра оптических сигналов.

Во второй главе описан алгоритм измерения параметров спектра узкополосного оптического излучения ДФЭП со спектральными характеристиками фотоприемников одинаковой формы, смещенными относительно друг друга по оси длин волн. Получены оценки методических погрешностей определения параметров спектра оптического излучения ДФЭП с гауссовыми и линейными спектральными характеристиками фотоприемников в приближении монохроматического излучения. Проведено компьютерное моделирование влияния аддитивной и мультипликативной составляющих шума фотоприемников и каналов преобразования сигналов на погрешность определения параметров спектра оптического излучения.

Суть алгоритма заключается в следующем. Имеется ДФЭП, содержащий два фотоприемника с идентичными по форме гауссовыми спектральными характеристиками, смещенными относительно друг друга:

$$\begin{aligned} S_1(\lambda) &= \frac{A_{10}}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} e^{-\frac{(\lambda-\lambda_1)^2}{2\sigma_1^2}}; \\ S_2(\lambda) &= \frac{A_{20}}{\sqrt{2\pi}\sigma_2} e^{-\frac{(\lambda-\lambda_2)^2}{2\sigma_2^2}}, \end{aligned} \quad (1)$$

где λ_1 и λ_2 – длины волн, соответствующие максимуму функций $S_1(\lambda)$ и $S_2(\lambda)$ соответственно, A_{10} и A_{20} – параметры, определяющие максимальную чувствительность фотоприемников, а σ_1 и σ_2 – параметры этих функций, характеризующие их ширину (рисунок 1). Характеристики вида (1) достаточно легко реализуются путем применения широкополосных фотоэлектрических приемников и полосовых фильтров с гауссовыми характеристиками пропускания. С помощью нейтральных фильтров интегральную чувствительность обоих фотоприемников можно сделать одинаковой и без ограничения общности дальнейшего рассмотрения можно положить $A_{10} = A_{20} = A_0$.

Спектр контролируемого излучения представим также гауссовой функцией:

$$Y_x(\lambda) = \frac{A_x}{\sqrt{2\pi}\sigma_x} e^{-\frac{(\lambda-\lambda_x)^2}{2\sigma_x^2}}, \quad (2)$$

где λ_x – длина волн, соответствующая максимуму функции спектрального распределения излучения $Y_x(\lambda)$, A_x – параметр, определяющий интенсивность излучения, σ_x – параметр, характеризующий ширину спектра.

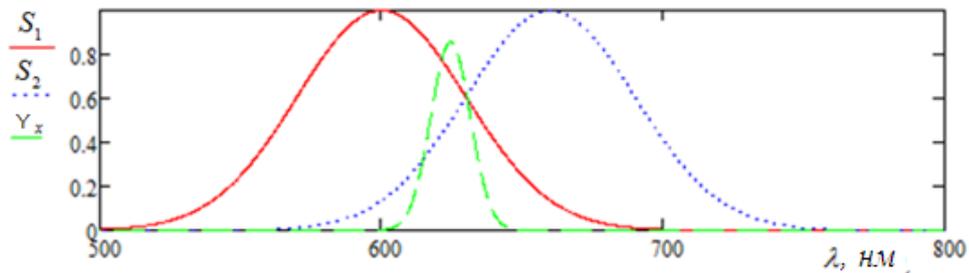


Рисунок 1. Спектральные характеристики ДФЭП и оптического излучения, представленные гауссовыми функциями

При попадании светового потока на фотоприемники, они вырабатывают электрические сигналы, значения которых определяется выражениями:

$$U_1 = \frac{A_0 A_x}{\sqrt{2\pi} \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_x^2}} e^{-\frac{(\lambda_x - \lambda_1)^2}{2(\sigma_1^2 + \sigma_x^2)}}; \quad (3)$$

$$U_2 = \frac{A_0 A_x}{\sqrt{2\pi} \sqrt{\sigma_2^2 + \sigma_x^2}} e^{-\frac{(\lambda_x - \lambda_2)^2}{2(\sigma_2^2 + \sigma_x^2)}}.$$

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

После введения безразмерных параметров: $\tilde{\lambda}_x = (\lambda_x - \lambda_{cp}) / \sigma_1$; $\tilde{\sigma}_x = \sigma_x / \sigma_1$, где $\lambda_{cp} = (\lambda_1 + \lambda_2) / 2$, $\tilde{U}_1 = \sqrt{2\pi} U_1 \sigma_1 / U_3 \Delta \lambda_k$, $\tilde{U}_2 = \sqrt{2\pi} U_2 \sigma_2 / U_3 \Delta \lambda_k$, $v = \sigma_1 / \sigma_2$, $\Delta \tilde{\lambda}_\phi = (\lambda_2 - \lambda_1) / \sigma_1$, из решения системы (3) получено выражение для $\tilde{\lambda}_x$:

$$\lambda_x = \lambda_{cp} + \frac{\sigma_1}{\tilde{\lambda}_\phi v^2} \ln \left[\frac{(\tilde{U}_2 \sqrt{1 + \tilde{\sigma}_x^2})^{1 + v^2 \tilde{\sigma}_x^2}}{(\tilde{U}_1 \sqrt{1 + v^2 \tilde{\sigma}_x^2})^{v^2 (1 + \tilde{\sigma}_x^2)}} \right]. \quad (4)$$

Для нахождения значения параметра излучения σ_x^2 , характеризующего ширину спектра излучения, необходимо полученное выражение (4) подставить в одно из выражений, описывающих величину сигнала фотоприемника (3). Полученное уравнение можно решить численным методом.

Полагая спектральные характеристики фотоприемников идентичными по форме ($\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma^2$), что вполне достижимо, например, путем подбора фильтров, получим параметр $v = 1$, и выражение (4) примет вид:

$$\lambda_x = \lambda_{cp} + \frac{\sigma^2(1 + \tilde{\sigma}_x^2)}{(\lambda_2 - \lambda_1)} \ln \left[\frac{\tilde{U}_2}{\tilde{U}_1} \right]. \quad (5)$$

Заметим, что при $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma$ в выражение для $\tilde{\lambda}_x$ входит только отношение приведенных сигналов фотоприемников, причем $(\tilde{U}_2/\tilde{U}_1) = (U_2/U_1)$, то есть их нормировка не требуется.

В выражение (5) для $\tilde{\lambda}_x$ входит второй неизвестный параметр оптического излучения $\tilde{\sigma}_x = \sigma_x/\sigma$, причем, во второй степени. В зависимости от значения $\tilde{\sigma}_x$ возможно несколько вариантов обработки сигналов. В самом простом случае для монохроматического излучения $\tilde{\sigma}_x \rightarrow 0$ для центральной длины волны излучения получаем простую формулу:

$$\lambda_x = \lambda_{cp} + c \ln \frac{U_2}{U_1}, \quad (6)$$

где $c = \sigma/\Delta\tilde{\lambda}_\phi$ – постоянная величина. Выражение (6) представляют собой монотонную линейную функцию отношения сигналов. Это означает, что для монохроматического источника длина волны будет определяться однозначно.

У лазеров и СИД относительный разброс длины волны излучения в максимуме спектра от образца к образцу оставляет 0,2...0,5%. Это значение разброса и определяет верхний предел допустимой погрешности средств измерения центральной длины волны узкополосного оптического излучения.

Для реальных источников относительная погрешность определения величины $\tilde{\lambda}_x$ согласно (5) равна $\tilde{\sigma}_x^2$. Заметим, что величину $\tilde{\sigma}_x$ можно уменьшать путем увеличения ширины функции спектральной чувствительности фотоприемников. В общем случае значение $\tilde{\sigma}_x^2$ может быть найдено из решения системы уравнений (3) после подстановки (4). Это решение может быть получено численными методами при компьютерной обработке результатов измерений. При $\tilde{\sigma}_x^2 \ll 1$, что выполняется практически для всех типов источников узкополосного оптического излучения, получено аналитическое решение (3):

$$\tilde{\sigma}_x^2 = - \frac{b + a^2 + (\Delta\tilde{\lambda}_\phi^2/4)}{b + 2a^2 + 1}, \quad (7)$$

$$\text{где } a^2 = \left[\frac{\sigma \ln(U_2/\tilde{U}_1)}{2(\lambda_2 - \lambda_1)} \right], \text{ а } b = \ln(\tilde{U}_1 \cdot \tilde{U}_2).$$

При известных значениях \tilde{U}_1 , \tilde{U}_2 и $\Delta\tilde{\lambda}_\phi$ значение $\tilde{\sigma}_x^2$ легко и быстро вычисляется по формуле (7) микроконтроллером или компьютером.

Для реализации предложенного способа могут быть использованы фотоприемники с линейными спектральными характеристиками вида:

$$\begin{aligned} S_1(\lambda) &= K_1(\lambda_{MAX} - \lambda); \\ S_2(\lambda) &= K_2(\lambda - \lambda_{MIN}), \end{aligned} \quad (8)$$

где λ_{MIN} и λ_{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.

Характеристики вида (8) можно реализовать путем применения соответствующих оптических фильтров; спектр излучения представим, как и в предыдущем случае, гауссовой функцией (рисунок 2). При условии, что спектр излучения не выходит за границы рабочего диапазона $\lambda_{MIN} \leq \lambda_x \leq \lambda_{MAX}$, а ширина диапазона много больше ширины спектра излучения $\lambda_{MAX} - \lambda_{MIN} \gg \sigma_x$, выражения для сигналов фотоприемников примут вид:

$$U_1 = A_x K_1 [\lambda_{MAX} - \lambda_x], \quad (9a)$$

$$U_2 = A_x K_2 [\lambda_x - \lambda_{MIN}]. \quad (9b)$$

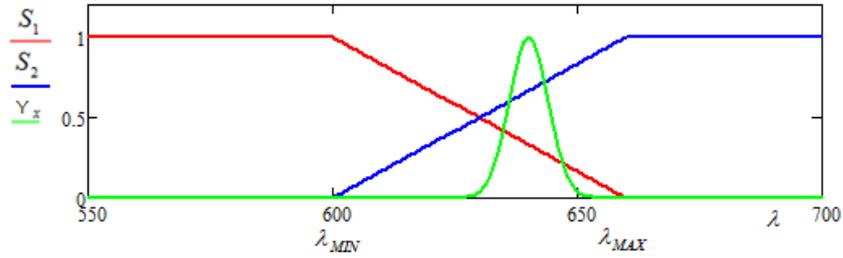


Рисунок 2. Спектральные характеристики фотоприемников ДФЭП, представленные линейными функциями

Методом исключения переменных из (9) получены выражения для A_x и λ_x :

$$A_x = \frac{U_1/K_1 + U_2/K_2}{(\lambda_{MAX} - \lambda_{MIN})}, \quad (10)$$

$$\lambda_x = \frac{U_1 \lambda_{MIN} K_2 + U_2 \lambda_{MAX} K_1}{U_1 K_2 + U_2 K_1}. \quad (11)$$

Для определения ширины спектра излучения может быть использован сигнал третьего фотоприемника со спектральной характеристикой, например, гауссова вида:

$$U_3 = \frac{A_3 A_x}{\sqrt{2\pi} \sqrt{\sigma_3^2 + \sigma_x^2}} e^{-\frac{(\lambda_x - \lambda_3)^2}{2(\sigma_3^2 + \sigma_x^2)}}, \quad (12)$$

откуда значение $\tilde{\sigma}_x^2$ может быть найдено численным способом.

Оценка относительной случайной погрешности $\hat{\delta}_\lambda^r$ измерения длины волны излучения, обусловленной случайным изменением параметров фотоприемников ДФЭП с гауссовыми спектральными характеристиками, была получена в приближении монохроматического источника. В этом приближении указанная составляющая погрешности согласно (6) описывается выражением

$$\hat{\delta}_\lambda^r = \frac{1}{[\ln(U_1/U_2) + (\lambda_2^2 - \lambda_1^2)/2\sigma^2]} \sqrt{\delta \hat{U}_1^2 + \delta \hat{U}_2^2}. \quad (13)$$

Если изменение положения максимума и ширины спектральных характеристик фотоприемников являются случайными и независимыми, то выражение (13) принимает вид:

$$\hat{\delta}_\lambda^r = B \sqrt{\left(\frac{\lambda_1 \Lambda_1}{\sigma^2} \hat{\delta} \lambda_1\right)^2 + \left(\left(\frac{\Lambda_1^2}{2\sigma^2} - 1\right) \cdot \hat{\delta} \sigma_1\right)^2 + \left(\frac{\lambda_2 \Lambda_2}{\sigma^2} \hat{\delta} \lambda_2\right)^2 + \left(\left(\frac{\Lambda_2^2}{2\sigma^2} - 1\right) \cdot \hat{\delta} \sigma_2\right)^2}, \quad (14)$$

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

График зависимости (14) представлен на рисунке 3.

Аналогично из (11) получена оценка случайной погрешности измерения центральной длины волны излучения, обусловленной разбросом параметров фотоприемников ДФЭП с линейными спектральными характеристиками:

$$\hat{\delta}_\lambda^J = D \sqrt{\left(\tilde{U}_2 \left(1 - \frac{\lambda_{MAX}}{\lambda_{MIN}}\right) \hat{\delta}\lambda_{MAX}\right)^2 + \left(\tilde{U}_2 \left(1 - \frac{\lambda_{MAX}}{\lambda_{MIN}}\right) \left(\frac{\lambda_x}{\lambda_{MAX}} - 1\right) \cdot \hat{\delta}K_1\right)^2 + \left(\tilde{U}_1 \left(1 - \frac{\lambda_{MIN}}{\lambda_{MAX}}\right) \hat{\delta}\lambda_{MIN}\right)^2 + \left(\tilde{U}_1 \left(1 - \frac{\lambda_{MIN}}{\lambda_{MAX}}\right) \left(\frac{\lambda_x}{\lambda_{MIN}} - 1\right) \cdot \hat{\delta}K_2\right)^2}, \quad (15)$$

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

График функции $\hat{\delta}_\lambda^J(\lambda_x)$ представлен на рисунке 3.

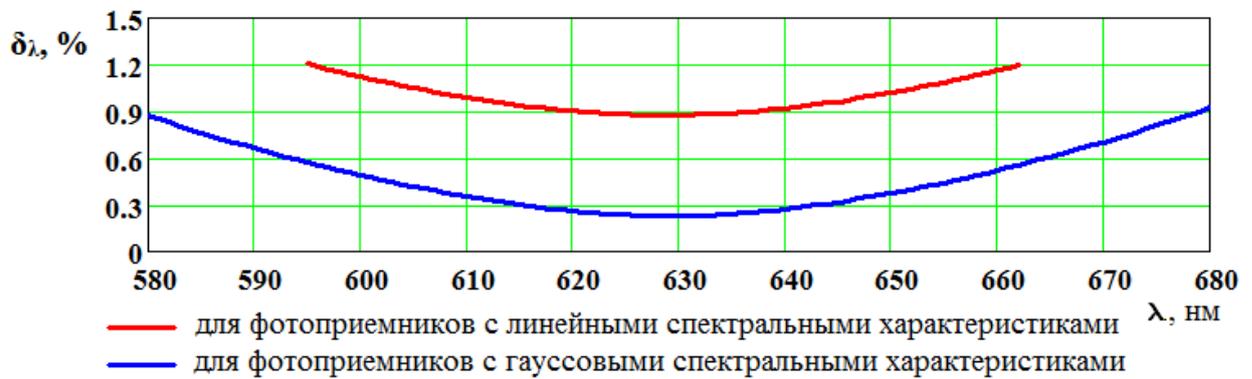


Рисунок 3. Функции относительной погрешности измерения центральной длины волны для фотоприемников с гауссовыми и линейными спектральными характеристиками при $\lambda_j=594,9$ нм и $\lambda_2=662,5$ нм, $\sigma=30$ нм, $K_1 = K_2 = 0,015$, $\delta_{\lambda_1} = \delta_{\lambda_2} = 0,25\%$, $\delta_{\sigma_1} = \delta_{\sigma_2} = 0,13$, $\delta_{K_1} = \delta_{K_2} = 0,13$

Из рисунка видно, что при одинаковых погрешностях параметров фотоприемников погрешность измерения будет минимальной для длины волны излучения, равной среднему значению $\lambda_x = \lambda_{cp} = (\lambda_{MIN} + \lambda_{MAX})/2 = 630$ нм, и составляет для ДФЭП с гауссовыми спектральными характеристиками 0,3%. Для ДФЭП с линейными спектральными характеристиками минимальная погрешность измерения центральной длины волны составляет 0,9%. Таким образом, использование ДФЭП с гауссовыми спектральными характеристиками, с точки зрения снижения случайной погрешности измерения центральной длины волны оптического излучения, обусловленной случайными погрешностями параметров фотоприемников, является предпочтительным.

На рисунке 4 показаны графики зависимости относительной случайной погрешности измерения центральной длины волны от разноса максимумов спектральной чувствительности фотоприемников при различных значениях полосы пропускания ДФЭП с гауссовыми спектральными характеристиками. Из графиков на рисунке 4 видно, что минимум относительной случайной погрешности измерения центральной длины волны ДФЭП с гауссовыми спектральными характеристиками фотоприемников наблюдается при выполнении следующего соотношения $\Delta\lambda \approx 1,4\sigma$. Это соотношение позволяет выбрать оптимальные параметры ДФЭП, исходя из задач измерения.

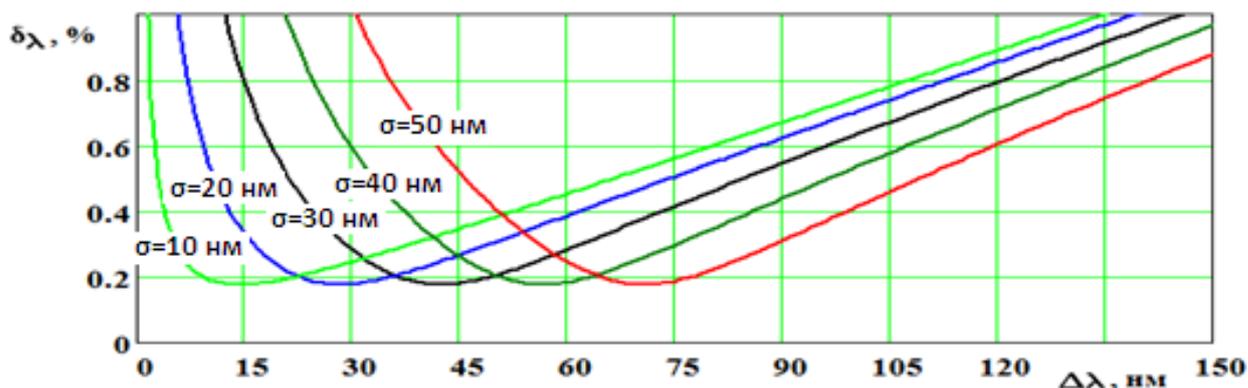


Рисунок 4. Зависимости относительной погрешности измерения центральной длины волны от разности максимумов гауссовых спектральных характеристик фотоприемников ДФЭП при различных значениях полосы пропускания светофильтров

Для оценки влияния шума фотоприемников и каналов преобразования сигналов на погрешность определения центральной длины волны и ширины спектра узкополосного оптического излучения шум представлялся в виде аддитивной и мультипликативной составляющих. Компьютерное моделирование выполнялось в среде MathCAD для случая ДФЭП с гауссовыми спектральными характеристиками фотоприемников в соответствии с выражениями для аддитивной составляющей:

$$U_n = \int_0^{1000} S_n Y_x d\lambda + U_{ш} K_{ш}, \quad (16)$$

и мультипликативной составляющей:

$$U_n = (1 + K_{ш}) \int_0^{1000} S_n Y_x d\lambda, \quad (17)$$

где $K_{ш} = \text{norm}(N, M, D)$ – вектор случайных чисел с нормальным законом распределения, $N=100$ – количество случайных чисел, $M=0$ – математическое ожидание случайной величины, D – дисперсия случайной величины, $U_{ш}$ – параметр, определяющий уровень шумового сигнала, n – номер фотоприемника.

Анализ численного 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 5 – 12 показана зависимость СКО ширины спектра δ_σ и центральной длины волны δ_λ излучения в зависимости от отношения сигнала к шуму SNR . Графики зависимостей построены при следующих параметрах фотоприемников $\lambda_1=594,9$ нм $\lambda_2=662,5$ нм $\sigma_1=\sigma_2=30$ нм $A_1=A_2=75$.

Из рисунков 6–12 видно, что наименьшее влияние шума на точность измерения центральной длины волны наблюдается в области пересечения спектральных характеристик фотоприемников, как для аддитивной, так и для мультипликативной составляющих шума. Отношение сигнал/шум при измерении центральной длины волны оптического излучения не должно превышать 40 дБ, ширины спектра – 60 дБ.

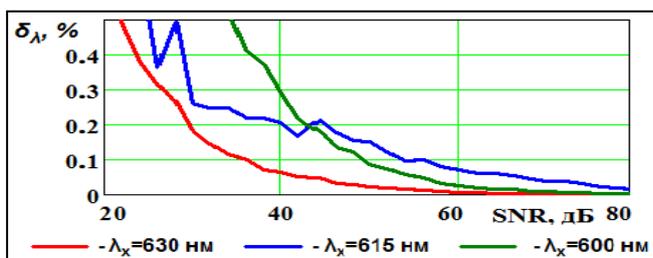


Рисунок 5. Зависимость погрешности измерения центральной длины волны от отношения сигнал/шум при $\sigma_x=10$ нм для аддитивной составляющей

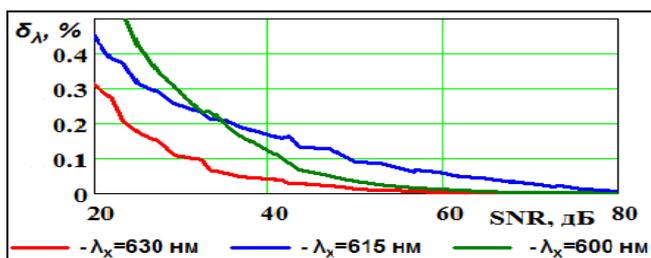


Рисунок 6. Зависимость погрешности измерения центральной длины волны от отношения сигнал/шум при $\sigma_x=10$ нм для мультипликативной составляющей

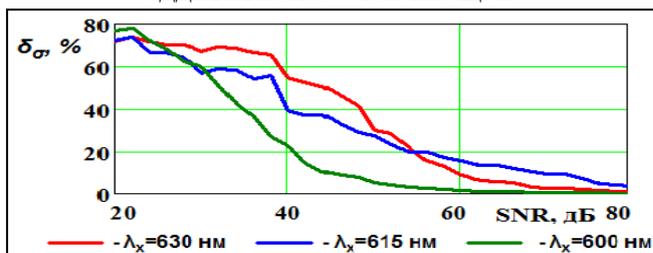


Рисунок 7. Зависимость погрешности измерения центральной длины волны от отношения сигнал/шум при $\sigma_x=10$ нм для аддитивной составляющей

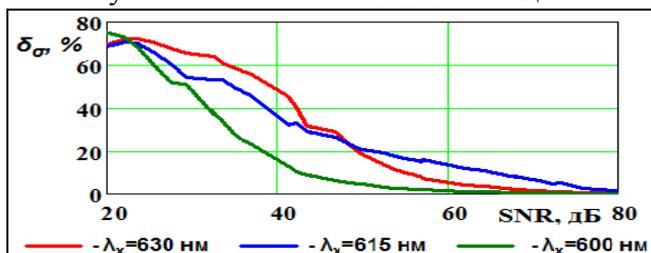


Рисунок 8. Зависимость погрешности измерения центральной длины волны от отношения сигнал/шум при $\sigma_x=10$ нм для мультипликативной составляющей

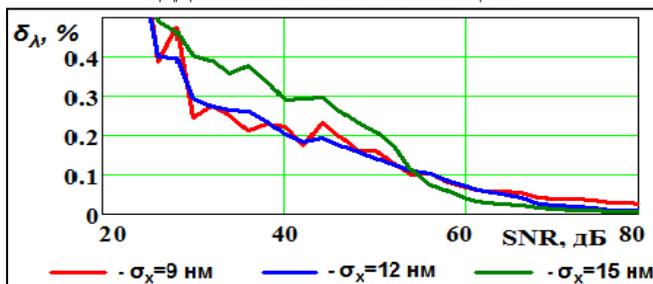


Рисунок 9. Зависимость погрешности измерения центральной длины волны от отношения сигнал/шум при $\lambda_x=615$ нм для аддитивной составляющей

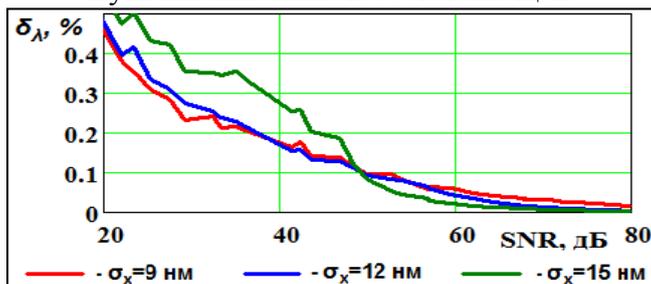


Рисунок 10. Зависимость погрешности измерения центральной длины волны от отношения сигнал/шум при $\lambda_x=615$ нм для мультипликативной составляющей

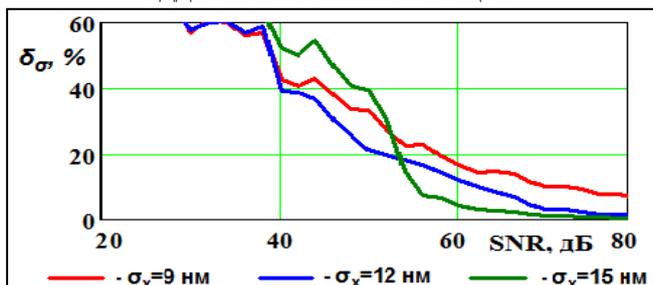


Рисунок 11. Зависимость погрешности измерения центральной длины волны от отношения сигнал/шум при $\lambda_x=615$ нм для аддитивной составляющей

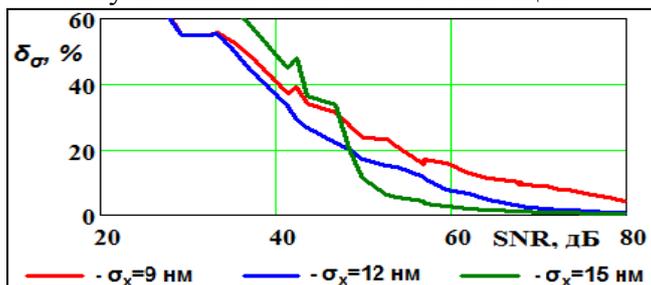


Рисунок 12. Зависимость погрешности измерения центральной длины волны от отношения сигнал/шум при $\lambda_x=615$ нм для мультипликативной составляющей

В третьей главе представлена схема и описан принцип действия экспериментальной установки для измерения параметров спектра оптического излучения, приведены оценки инструментальной погрешности и быстродействия экспериментальной установки.

Структурная схема установки, реализующей предложенный алгоритм определения параметров спектра оптического излучения, представлена на рис. 13. В качестве источника излучения на схеме показан СИД, в качестве фотоприемников использованы быстродействующие широкополосные *p-i-n* фотодиоды BPW34 с интерференционными светофильтрами BPF 600\80-G и BPF 660\80-G, спектральные характеристики которых описываются гауссовой кривой.

Измерения параметров спектра осуществляется с использованием двух измерительных каналов (Д1 и Д2). 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 интервал времени между измерениями (шаг измерения). После инициализации ядра и периферии на МК оператором или автоматически подается команда запуска измерения. МК подает сигнал на коммутирующий каскад (КК), который включает СИД. Световой поток от СИД через оптическое волокно, попадает на оптический коллектор, где происходит деление светового потока на два равных пучка света. Детекторы параметров спектра (Д1 и Д2), состоящие из светофильтра, фотоприемника и усилителя преобразователя ток-напряжение, формируются электрический сигнал, величина которого зависит от интенсивности излучения, центральной длины волны и ширины спектра излучения. Усиленный электрический сигнал преобразуется АЦП.

Через время, равное шагу измерения, МК запускает оба АЦП одновременно. После преобразования сигналы датчиков в цифровой форме сохраняются в памяти МК. Далее процесс повторяется через заданные интервалы времени. После окончания цикла измерения МК выключает СИД и передает данные на ПК, где происходит процесс обработки полученных данных по разработанному алгоритму.

Для связи датчиков и ПК использован МК типа STM32F107 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 составляет 72 МГц. Время одного преобразования АЦП может составлять менее 1 мкс.

При оценке инструментальной погрешности учитывались следующие погрешности: случайная погрешность положения светофильтров; погрешность квантования АЦП; погрешность питающих и опорных напряжений АЦП; погрешность смещения нуля усилителя при колебании температуры;

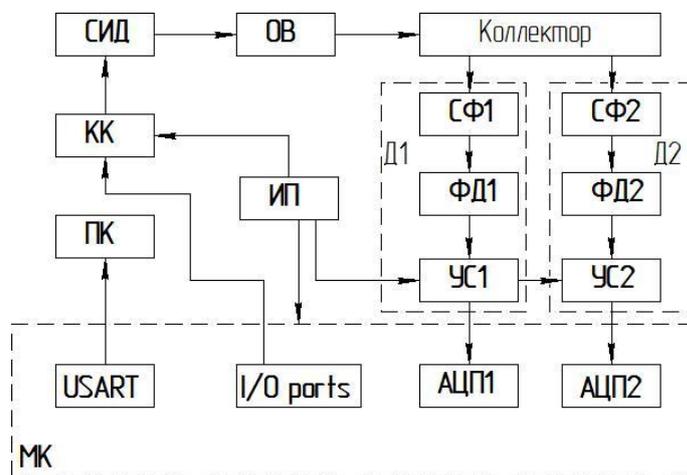


Рисунок 13. Структурная схема экспериментальной установки для измерения параметров спектра оптических сигналов

погрешность, обусловленная шумами измерительных каналов; погрешность, вызванная изменением температуры окружающей среды.

Оценочное значение инструментальной погрешности экспериментальной установки составило 0,23% при измерении узкополосного оптического излучения в диапазоне длин волн 610 – 650 нм. Оценка инструментальной погрешности приведена для следующих условий: в экспериментальной установке используется 12-разрядное АЦП встроенное в микроконтроллер STM32F107; светофильтры BPF 600\80-G и BPF 660\80-G (случайное отклонение центральной длины волны не более 0,27% от пикового значения, случайное изменение полосы пропускания не более 13%); погрешность смещения нуля усилителя не более 0,04%; отношение сигнала к шуму не менее 65 дБ и при нормальных условиях.

Основными узлами, ограничивающими быстродействие экспериментальной установки, являются: фотоприемник; усилитель сигнала; АЦП; интерфейс передачи данных от АЦП до ПК. Так как передача данных и вычисление параметров спектра оптического излучения происходят после окончания процесса измерения, то на быстродействие самой экспериментальной установки интерфейс передачи данных и алгоритм обработки сигналов не оказывают влияния. При разработке устройств, работающих в условиях реального времени, необходимо учитывать скорость передачи данных, количество выполняемых операций и время выполнения одной операции на обработку сигналов. Время на прохождение всех переходных процессов в ИК составляет около 3,5 мкс. Учитывая, что ИК установки идентичны и работают параллельно, то ее быстродействие будет определяться быстродействием любого ИК. Таким образом, быстродействие экспериментальной установки составляет около $0,3 \times 10^6$ измерений в секунду.

Заметим, что при разработке экспериментальной установки не ставилась задача достижения максимального быстродействия, поэтому при более рациональном выборе комплектующих быстродействие можно повысить.

В четвертой главе проведена оценка метрологических характеристик экспериментальной установки для измерения параметров спектра оптических сигналов. С этой целью выполнены сравнительные измерения параметров спектра СИД нескольких типов на разработанной экспериментальной установке с оптоволоконной оптической схемой и с помощью серийных спектрометров в установившемся и динамическом режимах работы СИД. Показана возможность регистрации на разработанной установке температурного сдвига спектра СИД при подаче ступеньки импульса греющего тока в результате саморазогрева СИД. Приведены возможные варианты использования исследуемого метода.

Исследования характеристик разработанной экспериментальной установки проводились на выборке из 50 красных светодиодов марки L-52SRCDW с центральной длиной волны 635 нм. Результаты измерений центральной длины волны, полученные на экспериментальной установке с оптоволоконной схемой деления оптического сигнала, сравнивались с результатами измерений на спектрофотометре USB2000+VIS-NIR-ES фирмы Ocean Optics с оптическим разрешением 1,5 нм.

В качестве источника питания СИД использовались химические источники с возможностью регулировки тока. Для контроля величины протекающего тока использовался мультиметр M830BZ. Для уменьшения влияния случайной по-

грешности, вызванной в первую очередь шумами экспериментальной установки, наблюдения проводились 20 раз, и рассчитывалось среднее арифметическое значение результатов наблюдений.

Для оценки погрешности измерения центральной длины волны излучения в динамических режимах через СИД пропускались импульсы тока амплитудой 30 мА с частотой следования 1 кГц. Скважность импульсов менялась от 20 до 1,1. Результаты анализа полученных данных приведены в таблице 1.

Таблица 1 – результаты измерения центральной длины волны СИД в динамическом и установившемся режимах работы

Значение параметра	В установившемся режиме	В динамическом режиме
Ток питания СИД, мА	30	30
Максимальное абсолютное отклонение центральной длины волны, нм	2,7	8,7
Диапазон отклонений центральной длины волны, нм	от -2,4 до 2,7	от -8,7 до 0,8
Математическое ожидание разности показаний центральной длины волны, нм	0,6	-3,1
СКО показаний центральной длины волны, нм	1,2	4,7
Коэффициент корреляции	0,95	0,92

В качестве оценки максимального отклонения результатов, полученных на экспериментальной установке, от показаний, полученных на спектрофотометре, принималось значение $\pm 3S$ (где S – выборочное СКО), которое составило $\pm 3,54$ нм или 0,6% при длине волны 635 нм.

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

Из проведенного анализа видно, что в импульсном режиме работы наблюдаются большее различие в показаниях установки и серийного спектрофотометра в сравнении с результатами при измерении в установившемся режиме.

С помощью экспериментальной установки была измерена длина волны излучения гелей-неонового лазера в установившемся режиме работы, центральная длина волны которого по данным измерений на монохроматоре МДРЗ составила 630,5 нм. Оценка СКО результатов измерения центральной длины волны лазерного излучения, полученных на экспериментальной установке и спектрофотометре МДРЗ, составила 0,5 нм, что меньше оценки СКО результатов измерения центральной длины волны оптического излучения СИД (1,2 нм для установившегося режима работы СИД).

При разработке алгоритмов оценки параметров спектра СИД по сигналам многоэлементных фотоприемников используются различные аппроксимирующие функции. Чаще всего для аппроксимации спектров СИД используют симметричные функции – параболу и гауссову функцию. Реальная спектральная характеристика СИД отличается от гауссовой функции. Как правило, коротковолновое крыло спектра является более вытянутым. Это приводит к появлению дополнительной методической погрешности, при оценке параметров по нескольким отсчетам,

обусловленной различием реальной спектральной характеристики и ее математического описания. Для оценки погрешности аппроксимации спектра СИД различными функциями были измерены спектры 10 СИД типа L-52SRCDW с центральной длиной волны излучения 635 нм. Спектры измерялись монохроматором МДР-3 по точкам с абсолютной погрешностью не более 0,1 нм. У каждого спектра измерялось не менее 40 точек вплоть до уровня $0,1 Y_{\max}$.

Таблица 2 – результаты аппроксимации реальной спектральной характеристики

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

Анализ спектральных характеристик (таблица 2) показал, что СКО аппроксимации спектральных характеристик СИД гауссианой составила 0,515, параболой – 0,101. При этом аппроксимация параболой возможна при условии, когда спектральные составляющие, уровень которых менее 0,3 от максимального значения, отбрасываются.

Для уменьшения погрешности аппроксимации спектральных характеристик СИД, его спектр излучения был представлен в виде суммы двух излучений с идеальными спектральными характеристиками гауссова вида $Y_1(\lambda)$ и $Y_2(\lambda)$:

$$Y_x(\lambda) = Y_1(\lambda) + Y_2(\lambda) = \frac{A_1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} e^{-\frac{(\lambda-\lambda_1)^2}{2\sigma_1^2}} + \frac{A_2}{\sqrt{2\pi}\sigma_2} e^{-\frac{(\lambda-\lambda_2)^2}{2\sigma_2^2}}. \quad (18)$$

Предложенный способ описания спектра излучения СИД был проверен на выборке из 10 СИД красного цвета свечения с длиной волны 635 нм. Анализ показал, что СКО аппроксимации спектральных характеристик СИД выражением (18) составила 0,137, что примерно в 3,5 раза меньше по сравнению с ошибкой аппроксимации одной гауссианой. Аппроксимация параболой дает хорошее приближение к реальным характеристикам, только при условии, что низкоуровневые составляющие спектра отбрасываются.

Для оценки зависимости погрешности измерения от центральной длины волны проведен следующий эксперимент. По результатам измерения на спектрометре были отобраны СИД с различными значениями центральной длины волны излучения, распределенными по рабочему диапазону экспериментальной установки. Измерения проводилось при нормальных условиях, токе питания СИД 30 мА 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.

Сглаженная путем сплайнирования экспериментальных данных зависимость разности показаний экспериментальной установки и спектрометра от длины волны излучения приведена на рисунке 14.

Наименьшая величина абсолютного отклонения наблюдается в средней области исследуемого диапазона, т.е. в области пересечения склонов спектральных кривых фотодатчиков. Величина 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 аналитически.

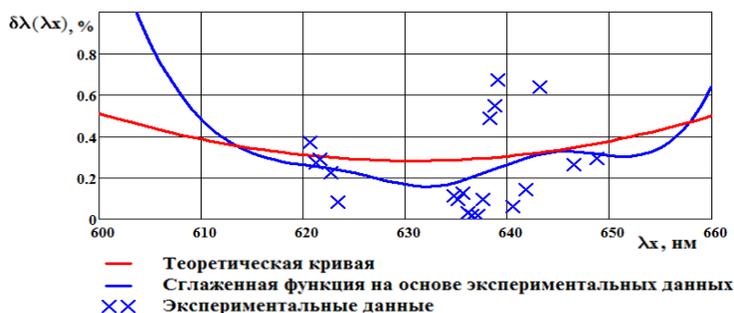


Рисунок 14. Зависимость разности показаний экспериментальной установки и показаний спектрометра от длины волны излучения

Как отмечалось, изменение ΔT температуры гетероперехода СИД приводит к прямо пропорциональному сдвигу $\Delta\lambda$ центральной длины волны излучения:

$$\Delta\lambda = \Delta T \cdot K_{T\lambda} \quad (19)$$

где $K_{T\lambda}$ – известный температурный коэффициент сдвига спектра излучения СИД.

По изменению длины волны излучения, таким образом можно судить о температуре кристалла СИД. На рисунке 15 представлены графики зависимости центральной длины волны излучения красного СИД от времени при подаче на СИД ступеньки рабочего тока.

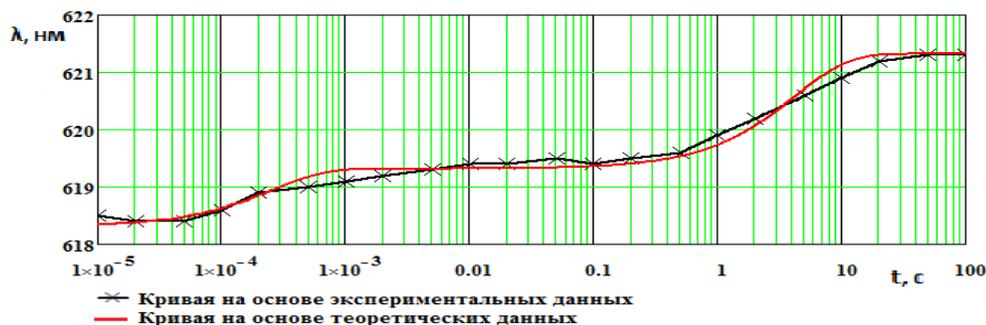


Рисунок 15 – Графики смещения центральной длины волны излучения светодиода Vishay TLCR5800 от времени при подаче ступеньки тока 30 мА: × × × – экспериментальные данные, сплошная линия – аппроксимирующая функция

Изменение температуры перехода СИД при подаче на него ступеньки импульса тока, рассчитанное по сдвигу центральной длины волны излучения, хорошо описывается функцией вида:

$$\Delta T_n(t) = \frac{\Delta\lambda(t)}{K_{T\lambda}} = \Delta T_1 \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_{T1}}\right) \right) + \Delta T_2 \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_{T2}}\right) \right), \quad (20)$$

где ΔT_1 и ΔT_2 – соответственно приращения температуры перехода относительно корпуса СИД и окружающей среды в стационарном режиме ($t \rightarrow \infty$), τ_{T1} и τ_{T2} – тепловые постоянные времени, характеризующие, соответственно, темп нагрева кристалла и корпуса СИД.

На интервале 0–2 мс изменение температуры перехода и величина смещения спектра СИД определяются тепловым сопротивлением переход-корпус, а на интервале времени 0–100 с – тепловым сопротивлением переход-среда СИД.

Известно, что значения тепловых параметров СИД можно более точно определить по частотной зависимости теплового импеданса $Z_T(\omega)$, определяемого как отношение амплитуды первой гармоники переменной составляющей температуры перехода к амплитуде первой гармоники греющей мощности при саморазогреве синусоидальной мощностью $P(t) = P_0 + P_{1m} \sin \omega t$: $Z_T(\omega) = \Delta T_{n1}(\omega) / P_{1m}$. В известном способе измерения теплового импеданса через СИД пропускают греющий ток заданной амплитуды, широтно-импульсно модулированный по гармоническому закону. По результатам измерения напряжения на СИД во время действия импульсов греющего тока и в паузах между ними при малом прямом токе определяют амплитуду первой гармоники мощности $P_{m1}(\Omega)$, потребляемой СИД, и амплитуду первой гармоники температуры, по значениям которых определяют тепловой импеданс. Недостатком известного способа является большая погрешность измерения напряжения на СИД при малом прямом токе из-за переходных процессов при переключении СИД из режима нагрева в режим измерения. По этой причине верхняя частота измерения теплового импеданса СИД известным способом не превышает 1 кГц.

С целью повышения точности измерения теплового импеданса СИД было предложено в качестве температурочувствительного параметра использовать центральную длину волны излучения. На изменение этого параметра переходные электрические процессы никакого влияния не оказывают. Разработанные средства позволяют измерить изменения центральной длины излучения СИД за 3–5 мкс. При этом погрешность, обусловленная шумами фотоприемников, уменьшается в результате фильтрации полезного сигнала при определении первой гармоники. В работе описана структурная схема и алгоритм работы устройства, реализующего предложенный способ. На предложенный способ подана заявка на изобретение.

В заключении представлены основные результаты работы.

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 ДФЭП 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

Статьи в журналах из перечня ВАК

1. 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.

2. 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.

3. Сергеев В.А. Сравнительный анализ погрешности аппроксимации спектров излучения светодиодов различными функциями / В.А. Сергеев, А.В. Ульянов // Известия вузов. Электроника. – №3. – Т.20. – 2015. – С. 317-320.

4. Ульянов А.В. Методы и средства оперативного контроля параметров спектра узкополосного оптического излучения / В.А. Сергеев, В.Н. Рогов, А.В. Ульянов // Автоматизация процессов управления. – №4. – Т.42. – 2015. С. 115-120.

5. Sergeev V.A. Systematic errors when determining the parameters of the spectrum of light-emission diodes using two photoreceivers / V.A. Sergeev, V.N. Rogov, A.V. Ulyanov // Measurement Techniques. – №4. – Т.56. – 2013. С. 415-420.

6. Sergeev V. A. Comparative analysis of approximation functions for spectral characteristics of serial light filters / V.A. Sergeev, V.N. Rogov, A.V. Ulyanov // Measurement Techniques. - 2014. - №1. - P. 415–420.

Публикации в других изданиях

7. 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.

8. 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.

9. 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.

10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. Рогов В.Н. Определение чувствительности метода 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. 31-32.
14. 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.
15. 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.
16. 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.
17. 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.
18. Ульянов А.В. Измерение цветности светодиода в динамическом режиме / А.В. Ульянов, В.А. Сергеев, В.Н. Рогов // Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика: Тезисы докладов VII всероссийской конференции молодых ученых. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2012. – С. 161-162.
19. 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.
20. 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.
21. Ульянов А.В. Способ оперативного контроля параметров спектра узкополосного оптического излучения с помощью двух фотоприемников / А.В. Ульянов, В.Н. Рогов, В.А. Сергеев // Актуальные проблемы физической и функциональной электроники: материалы 18-й регион. науч. шк. - семинара, 1-3 декабря – Ульяновск: УлГТУ, 2015. – С. 225-226.

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

23. Ульянов А.В. Устройство для определения цветовых параметров светоизлучающих диодов / А.В. Ульянов, В.Н. Рогов // *Актуальные проблемы физической и функциональной электроники: материалы 14-й регион. науч. шк. - семинара, 7-9 дек.* – Ульяновск: УлГТУ, 2011. – С. 24-25.

24. Ульянов А.В. Система управления параметрами спектра светоизлучающих диодов / А.В. Ульянов, В.Н. Рогов // *Современные проблемы создания и эксплуатации радиотехнических систем: тр. седьмой всерос. науч. - практ. конф. (с участием стран СНГ), 1-2 октября 2015 г.* – Ульяновск: УлГТУ, 2015. – С. 187-190.

25. Ульянов А.В. Способ измерения параметров узкополосного оптического излучения на основе двух фотоприемников / А.В. Ульянов, В.А. Сергеев // *Актуальные проблемы физической и функциональной электроники: материалы 17-й Всерос. молодежной науч. школы-семинара, 2-4 дек.* - Ульяновск: УлГТУ, 2014. - С. 209-210.

26. Ульянов А.В. Сравнительный анализ способов измерения параметров узкополосного оптического излучения на основе двух фотоприемников / А.В. Ульянов, В.А. Сергеев // *Актуальные проблемы физической и функциональной электроники: материалы 17-й Всерос. молодежной науч. школы-семинара, 2-4 дек.* - Ульяновск: УлГТУ, 2014. - С. 211-212.