

На правах рукописи

Кострин Дмитрий Константинович

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОГО
ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА
ДЛЯ АНАЛИЗА СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ ДИОДОВ**

Специальность 05.11.07 –
Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2013

Работа выполнена на кафедре электронных приборов и устройств Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина).

Научный руководитель:

кандидат технических наук **Ухов Андрей Александрович**, доцент кафедры электронных приборов и устройств Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета

Официальные оппоненты:

доктор технических наук **Бузников Анатолий Алексеевич**, профессор кафедры квантовой электроники и оптико-электронных приборов Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета, Заслуженный деятель науки Российской Федерации, Заслуженный профессор СПбГЭТУ

кандидат технических наук **Савушкин Александр Васильевич**, начальник лаборатории прецизионной спектродетекции ОАО «Государственный оптический институт им. С. И. Вавилова»

Ведущая организация:

ОАО «ЦНИИ «Электрон», г. Санкт-Петербург

Защита диссертации состоится 20 ноября 2013 года в 15.00 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.238.08 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина).

Автореферат разослан октября 2013 года.

Ученый секретарь совета по защите
докторских и кандидатских диссертаций

Е. А. Смирнов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В последнее десятилетие технология производства светоизлучающих диодов (СИД) сделала огромный шаг вперед. В настоящее время СИД смогли вытеснить использовавшиеся ранее источники оптического излучения за счет своих исключительных характеристик – в особенности долговечности, надежности и низкого энергопотребления.

СИД используются в устройствах, обеспечивающих свет одного цвета – светофорах, аварийных огнях, сигнальных лампах на всех видах транспорта. Белые СИД уже сейчас широко применяются для освещения, дальнейшее улучшение их характеристик неизбежно приведет к постепенной замене ими иных источников освещения.

Расширение областей применения СИД приводит к существенному увеличению важности измерения их параметров. Параметры СИД разных производителей значительно различаются, что только повышает необходимость контроля их параметров. Важным является измерение их световых и цветовых характеристик, а также возможность визуального отображения спектров излучения исследуемых СИД.

Актуальность выполненной работы состоит в том, что существует очевидная необходимость в контроле параметров СИД как на этапе их производства, так и при их использовании в серийно производимых приборах.

Цель диссертационной работы – оптимизация метрологических параметров и разработка программно-аппаратного спектрометрического комплекса, позволяющего регистрировать спектры излучения светодиодов, а также с высокой точностью и воспроизводимостью производить вычисление их световых и цветовых характеристик.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **теоретические и практические** задачи:

- выработаны требования к характеристикам разрабатываемого комплекса;
- выбрана элементная база и схемотехнические решения, позволяющие добиться регистрации спектров излучения, их последующей обработки и передачи в ПК;
- разработан обладающий требуемыми характеристиками спектрометрический комплекс;
- разработано программное обеспечение (ПО), позволяющее отображать зарегистрированные спектры излучения на ПК, производить их обработку и расчет по ним параметров СИД;
- проведено исследование разработанного программно-аппаратного комплекса с целью повышения его основных метрологических характеристик.

Объект исследования – портативные спектрометрические комплексы на основе фотоприемников с зарядовой связью (ФПЗС).

Предмет исследования – эффекты и явления, возникающие при анализе СИД с применением спектрометрических комплексов на основе ФПЗС.

При решении поставленных задач применялись следующие **методы исследования**: анализ и обобщение литературных данных по спектрометрии и колориметрии; аналитические и статистические методы обработки сигналов; методы математического анализа и компьютерного моделирования; экспериментальные исследования с использованием разработанного спектрометрического комплекса.

Научная новизна работы заключается в следующих результатах:

- исследованы факторы, влияющие на неоднородность цветового восприятия источников освещения, состоящих из набора дискретных белых СИД;
- сформулированы рекомендации по выработке критериев подбора близких по цветовым характеристикам СИД для источников освещения;
- предложено ограничить рабочий диапазон ФПЗС TCD1304, т. к. его светосигнальная характеристика нарушается при малых временах накопления, сопоставимых со временем сдвига заряда, а также при больших уровнях сигнала, приводящих к появлению эффекта блюминга, имеющего в данном ФПЗС неоднородный вид;
- разработана методика подавления интерференции в поверхностном слое ФПЗС путем покрытия ее слоем оптически прозрачного компаунда с показателем преломления, близким к показателю преломления диоксида кремния.

Практическая значимость подтверждается тем, что в процессе работы:

- выработаны рекомендации по установке параметров работы ФПЗС, уровню сигнала и изгибу вводного оптоволокна спектрометра;
- создано оригинальное ПО, позволяющее визуализировать и оперативно производить обработку полученных оптических спектров на ПК;
- разработан компактный оптико-электронный программно-аппаратный комплекс с микропроцессорным управлением, построенный с применением вогнутой дифракционной решетки и ФПЗС, предназначенный для проведения спектрометрических и колориметрических исследований СИД;
- показано, что для сравнительной оценки параметров белых СИД, изготовленных в рамках одного технологического процесса, может быть применена простая быстродействующая схема на светодиодах, контролирующая интенсивность излучения на двух длинах волн, взамен дорогостоящего колориметрического оборудования.

В результате проведенных экспериментальных и теоретических исследований на защиту выносятся следующие **научные положения**:

1. Для однородного цветового восприятия источника света селекция белых светодиодов, изготовленных в рамках одного технологического процесса, может осуществляться по балансному методу сравнения на двух спектральных максимумах излучения вместо расчета цветовых координат, что позволит повысить скорость автоматической сортировки светодиодов не менее чем в 2 раза;
2. Нанесение на поверхность фотоприемника слоя оптически прозрачного компаунда толщиной не менее 200 мкм с показателем преломления, близким к аналогичному показателю диоксида кремния, обеспечивает эффективное подавление интерфе-

ренции в поверхностной диэлектрической пленке во всем рабочем диапазоне длин волн;

3. Термостатирование фотоприемника и применение специализированной методики обработки сигнала позволяет получить воспроизводимость измерения цветовых параметров в разработанном программно-аппаратном комплексе не хуже 0.1 %.

При непосредственном участии автора были **внедрены** в научно-исследовательские организации и производственные предприятия портативные спектрометрические комплексы для анализа параметров СИД. По результатам эксплуатации приборов получены акты внедрения. Разработанные комплексы были переданы на следующие предприятия в рамках договоров на разработку научной продукции:

– Научно-исследовательский институт командных приборов (ФГУП НИИКП), Санкт-Петербург, по договору № 6641/ЭПУ-251 (СПбГЭТУ «ЛЭТИ») от 15.07.2006 г.;

– ОАО НПП «Буревестник», Санкт-Петербург, по договору № 6682/ ЭПУ-255 (СПбГЭТУ «ЛЭТИ») от 15.03.2007 г.;

– Институт проблем машиноведения РАН (ИПМаш РАН), Санкт-Петербург, по договору № 6903/ЭПУ-266 (СПбГЭТУ «ЛЭТИ») от 02.11.2009 г.;

– ЗАО «Светлана-Оптоэлектроника», Санкт-Петербург, по договору № 77/2009 (ЗАО «Спектральная лаборатория») от 16.11.2009 г.;

– ООО «МЕГА-СМ», Зеленоград, по договору № 27/2010 (ЗАО «Спектральная лаборатория») от 10.04.2010 г.;

– ОАО НИИ точного машиностроения (ОАО НИИТМ), Зеленоград, по договору № 93/2010 (ЗАО «Спектральная лаборатория») от 10.11.2010 г.

Результаты диссертации внедрены в курс лабораторных работ и часть лекционного материала по дисциплине «Датчики в электронных устройствах» читаемой автором работы в СПбГЭТУ «ЛЭТИ» магистрам, обучающимся по программе 210153.68 «Электронные приборы и устройства».

Апробация работы проводилась на следующих научно-технических конференциях:

– 63-ья, 65-ая, 66-ая, 67-ая и 68-ая Научно-технические конференции, посвященные Дню радио, 2008, 2010, 2011, 2012, 2013 гг., Санкт-Петербург;

– 60-ая, 61-ая, 62-ая, 63-ья, 65-ая, 66-ая Научно-технические конференции профессорско-преподавательского состава СПбГЭТУ, 2007, 2008, 2009, 2010, 2012, 2013 гг., Санкт-Петербург;

– Научно-техническая конференция молодых специалистов ЦНИИ «Электрон», 2013 г., Санкт-Петербург;

– 11-ая Международная конференция «Пленки и покрытия», 2013 г., Санкт-Петербург.

По теме диссертации опубликовано 20 научных работ, из них 11 статей в научно-технических журналах, в том числе 10 статей, опубликованных в рецензируе-

мых изданиях, входящих в список рекомендованных ВАК, материалы 9 докладов на российских и международных научно-технических конференциях.

По результатам работы получено 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ, выпущено учебное пособие и монография.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из 4 глав, введения и заключения. Она содержит 130 страниц машинописного текста, 83 рисунка и 7 таблиц. Список литературы насчитывает 85 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследования, сформулированы основные цели работы, показана ее научная новизна и практическая значимость полученных результатов, указаны методы исследования, приведены выносимые на защиту научные положения, даны сведения о структуре и содержании работы.

В первой главе представлен обзор литературы по теме диссертации. Рассмотрены спектрометрические методы исследования и вопросы цветовых измерений при исследовании СИД, проведен анализ основных характеристик спектрометрических приборов.

Основными требованиями, предъявляемыми к современному спектрометрическому оборудованию, являются широкий рабочий диапазон длин волн, высокая разрешающая способность и малое время регистрации.

Наиболее востребованными для анализа СИД являются малогабаритные спектрометры, построенные по схеме полихроматора с использованием вогнутой дифракционной решетки в качестве диспергирующего устройства и ФПЗС как приемника сигнала, с вводом излучения с помощью кварцевого оптического волокна.

Существенным недостатком приборов данного класса является невысокая воспроизводимость результатов измерений во времени, связанная с отсутствием стабилизации температуры фотоприемника, а также минимальный набор ПО, не позволяющий проводить обработку получаемых спектров излучения в режиме реального времени. Указанные недостатки отсутствуют в специализированных спектральных приборах, однако их стоимость выше как минимум на порядок.

Таким образом, при разработке спектрометрического комплекса для анализа СИД возникают задачи создания системы термостатирования ФПЗС и ПО для цифровой обработки полученных спектральных данных с возможностью расчета цветовых координат и определения доминирующей длины волны.

Во второй главе описаны результаты разработки аппаратной части спектрометрического комплекса, а также ее исследования с целью повышения основных метрологических характеристик прибора.

Выбор в качестве оптической схемы спектрометра схемы с постоянной линейной дисперсией позволяет сохранить высокое оптическое разрешение во всем диапазоне длин волн. Оптическая схема спектрометра представляет собой полихроматор с

применением вогнутой дифракционной решетки и ФПЗС (рис. 1). Крепление входной щели сделано неразборным вместе с входным оптическим разъемом. Такое решение делает более стабильной оптическую схему, т. к. исключаются микроперемещения торца оптоволокна относительно щели.

Для обеспечения работы ФПЗС разработана система импульсных управляющих сигналов, усилительных звеньев и аналого-цифрового преобразования, управляемая микроконтроллером и позволяющая передавать в цифровом виде в ПК сигналы, снимаемые с каждого из 3648 пикселей фотоприемника. На рис. 2 приведены трехмерные модели плат блока управления и усиления-буферизации ФПЗС спектрометра.

Важным требованием, предъявляемым к системе, является необходимость учета темнового тока в ФПЗС. Для этого необходимо получить темновой фрагмент за тот же период и при такой же температуре, с какой будет производиться съемка объекта. Темновой ток значительно меняется при изменении температуры, что приводит к необходимости стабилизации температуры ФПЗС. Охлаждение ФПЗС не является целесообразным, так как оно приводит к дополнительному нагреву элементов оптической схемы и повышенному энергопотреблению системы из-за работы охлаждающих элементов, к тому же значительное охлаждение способно привести к появлению конденсата, что не только ухудшит оптические свойства системы, но и может привести к выходу электроники из строя. Достаточным является поддержание температуры ФПЗС на уровне близком к температуре окружающей среды. Учитывая, что темновой ток уменьшается каждый раз вдвое, когда температура снижается на 6...9 °С, можно записать:

$$\frac{m_0 - m_1}{m_0} = 1 - 2 \left(\frac{T_0 - T_1}{\alpha} \right) < \delta_m, \quad (1)$$

где m_0 и m_1 – количество темновых электронов при температуре T_0 и температуре охлаждения T_1 , температурный коэффициент темнового тока $\alpha = 6...9$ °С, δ_m – точность поддержания числа m темновых электронов.



Рис. 1. Устройство оптического блока

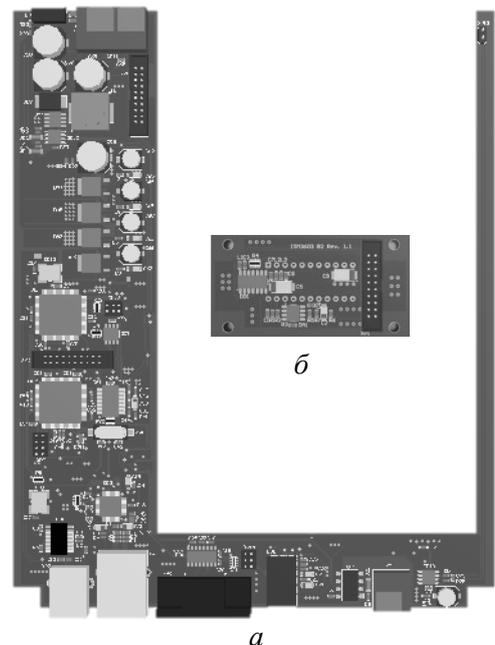


Рис. 2. Платы блока управления (а) и блока ФПЗС (б) спектрометра

Преобразовав выражение (1), можно получить:

$$\delta = \frac{T_{\text{раб}} - \Delta T}{T_{\text{раб}}} < \frac{\alpha \log_2(1 - \delta_m)}{T_{\text{раб}}},$$

где δ – точность, с какой должна поддерживаться температура для обеспечения получения числа темновых электронов с заданной точностью, $T_{\text{раб}}$ – рабочая температура кристалла, ΔT – максимально возможное отклонение температуры от номинального режима. Если принять $\alpha = 7 \text{ }^\circ\text{C}$, $\delta_m = 5 \%$, то при $T_{\text{раб}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ точность поддержания температуры должна быть не хуже $\pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$.

С целью охлаждения ФПЗС и жесткой фиксации положения фотоприемника в оптической схеме была разработана конструкция, состоящая из массивного медного основания, термовыравнивающей пластины, датчика температуры и двух элементов Пельтье.

Выбор ФПЗС в качестве основы для построения спектрометра обусловлен не только его высокой чувствительностью, данный фотоприемник имеет ряд других достоинств. Как известно, заряд, возникающий в каждом элементе секции накопления, пропорционален площади элемента, интенсивности падающего излучения и интервалу времени, в пределах которого сток заряда в потенциальную яму перекрыт с помощью затвора переноса. Таким образом, эффект взаимозаменяемости интенсивности и времени накопления позволяет снимать сигнал от источников с интенсивностями излучения, отличающимися на несколько порядков.

Значительный интерес представляет определение диапазона времен накопления заряда, в котором сохраняется линейность светосигнальной характеристики прибора. Время накопления заряда в разработанном спектрометре может программно устанавливаться в интервале 0.02...5000 мс.

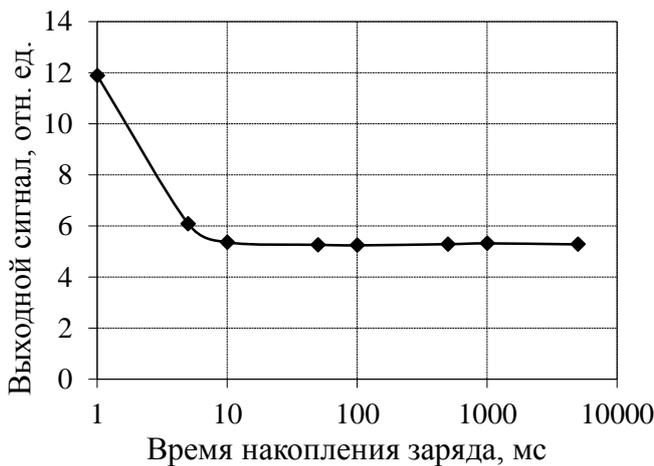


Рис. 3. Проверка эффекта взаимозаменяемости времени накопления и интенсивности

Нижний предел обусловлен необходимым минимальным временем накопления заряда, а верхний – увеличением темнового тока до уровня максимального сигнала. На рис. 3 представлен результат проверки соблюдения для ФПЗС TCD1304 закона взаимозаменяемости интенсивности облучения и длительности накопления заряда.

Наблюдается многократное объединение диапазонов измерения в области накопления 10...5000 мс. Однако в области высоких интенсивностей облучения и соответственно малых значений времени накопления закон взаимозаменяемости интенсивности и времени накопления нарушается. Данный факт обусловлен как особенностями ФПЗС, так и влиянием схемы управления спектрометром, т. к. в данном случае время накопления заряда становится сопоставимым со временем переноса.

ФПЗС практически не имеют порога детектирования – оптическое излучение, обладающее слабой интенсивностью, все равно будет создавать электроны в ячейках секции накопления, хотя и в небольшом количестве. Однако емкость каждого пикселя для генерируемых зарядов не безгранична. Если количество фотонов, воздействующих на ячейку в период накопления заряда, достаточно велико, то число созданных зарядов может оказаться больше емкости пикселя. В этом случае сигнал достигает насыщения, а избыточный заряд начинает перетекать в соседние ячейки (блюминг). На рис. 4 показано влияние увеличения времени накопления заряда на форму спектральной зависимости излучения красного СИД.

До определенного момента увеличение времени накопления заряда приводит к линейному возрастанию интенсивности сигнала, а в дальнейшем (рис. 4, *з*) проявляется эффект блюминга. Воздействие блюминга предполагает равномерное расширение спектральной характеристики СИД. Однако проявляется существенное искажение формы сигнала в области больших длин волн. Данный эффект не описан производителем ФПЗС и связан с особенностью переноса зарядовых пакетов. Немного меньшая емкость ячеек секции переноса по сравнению с емкостью пикселей приводит к тому, что не помещившийся в ячейки секции переноса заряд в момент переноса начинает «перетекать» в ближайшие по ходу движения ячейки.

Искаженный спектр невозможно полностью восстановить методами математической обработки исходных данных, что приводит к существенным ошибкам в определении параметров СИД. Данную проблему можно преодолеть суммированием спектров полученных при малом времени накопления, что с одной стороны дает возможность рассмотреть сигнал слабой интенсивности, а с другой – избавиться от эффекта блюминга и не потерять информацию о высокоинтенсивных участках спектра.

Самыми популярными и наиболее дешевыми являются ФПЗС, выполненные по «классической» технологии, в них оптическое излучение вводится с лицевой стороны кристалла кремния. Внутренняя структура одного из вариантов ФПЗС представлена на рис. 5. Для защиты структуры прибора от внешних воздействий при производстве на поверхность фото-

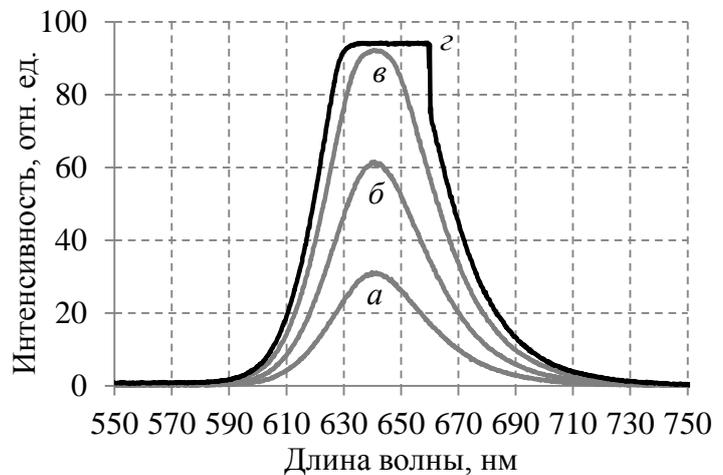


Рис. 4. Спектры излучения красного СИД при времени накопления заряда: а – 100 мс, б – 200 мс, в – 300 мс, з – 400 мс

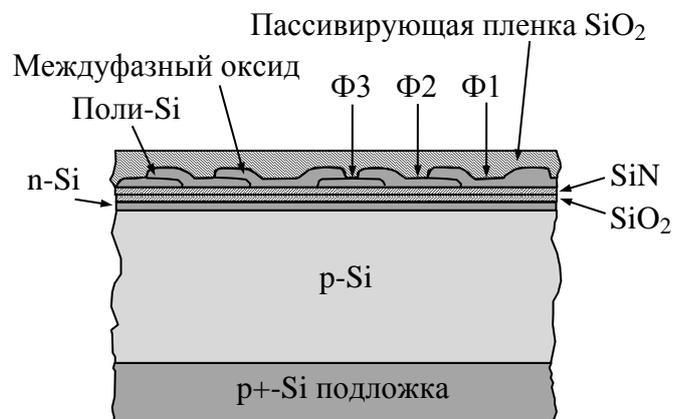


Рис. 5. Диэлектрические пленки в структуре ФПЗС

приемника наносится пассивирующее покрытие в виде тонкой пленки SiO_2 . Пассивирующее покрытие оптически прозрачно и имеет достаточно малую толщину для предотвращения заметного ослабления сигнала.

При регистрации немонахроматических оптических сигналов пассивирующая пленка не представляет проблемы, однако при использовании ФПЗС в спектрометрах каждый пиксель облучается практически монохромным излучением, что приводит к возникновению интерференции в результате многократных переотражений на границе раздела двух сред с разными показателями преломления. В каждом отдельном пикселе интерференция будет различной, поскольку она зависит от длины волны излучения, попадающего на данный пиксель, а она непрерывно меняется по всей длине ФПЗС. Интерференция влияет на распределение амплитуды сигнала по длине фотоприемника и регистрируемый сигнал при этом значительно искажается (рис. 6, а).

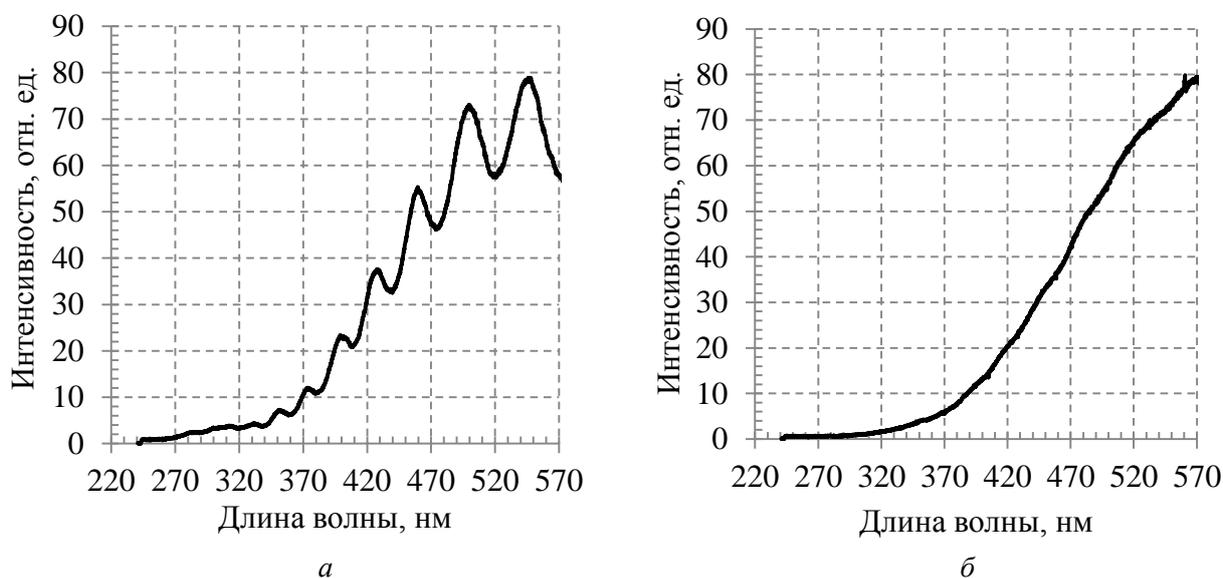


Рис. 6. Фрагменты спектров излучения галогенной лампы до (а) и после (б) модификации ФПЗС

Расположение максимумов и минимумов осцилляции сигнала будет зависеть от толщины и показателя преломления пассивирующей пленки на поверхности ФПЗС, а также от регистрируемого спектрального диапазона. Условия возникновения интерференционных максимумов и минимумов можно описать следующими выражениями:

$$nd = k \lambda_{\max} / 2; \quad nd = (k + 0.5) \lambda_{\min} / 2, \quad (2)$$

где n – показатель преломления, d – толщина пассивирующей пленки, k – порядок интерференции, λ_{\max} – длина волны, на которой регистрируется максимум интерференции, λ_{\min} – длина волны, на которой регистрируется минимум интерференции.

Убрать пассивирующую пленку невозможно, поскольку без нее ФПЗС перестанет нормально функционировать. Однако увеличение толщины пленки в фотоприемнике по сравнению с исходной толщиной увеличит количество экстремумов и полностью их нивелирует, если толщина пленки будет такова, что расстояние между экстремумами станет меньше спектрального разрешения прибора (рис. 6, б). Очевидно, что изменение толщины уже сформированной пленки после изготовления фотоприемника невозможно. Возможно только добавление пленки на поверхность ФПЗС, чтобы суммарная толщина двух пленок имела требуемую величину. Чтобы суммарная

пленка не имела дополнительной внутренней интерференции, показатель преломления материала дополнительной пленки должен быть равен либо максимально близок к показателю преломления пассивирующей пленки.

Интерференция исчезает при расстоянии между экстремумами ($\lambda_{\max} - \lambda_{\min}$) меньше чем спектральное разрешение прибора, тогда можно найти значение порядка интерференции, при котором интерференция будет нивелирована:

$$k = \lambda_{\text{ИК}} / (2\Delta\lambda), \quad (3)$$

где $\lambda_{\text{ИК}}$ – инфракрасная граница чувствительности фотоприемника, $\Delta\lambda$ – спектральное разрешение прибора.

Из выражений (2) и (3) можно получить формулу для расчета толщины дополнительной пленки:

$$d = \lambda_{\text{ИК}}^2 / (4n\Delta\lambda). \quad (4)$$

Принимая во внимание, что инфракрасная граница для кремниевых фотоприемников составляет 1100 нм, а спектральное разрешение спектрофотометра с одиночным ФПЗС обычно составляет величину порядка 1 нм можно получить по выражению (4) значение минимальной толщины дополнительной пленки $d = 200$ нм.

Уменьшение толщины дополнительной пленки приведет к недостаточному устранению интерференции. Значительное увеличение толщины пленки сверх минимально необходимой приведет к дополнительным потерям энергии и, как следствие, к снижению чувствительности спектрометра.

На поверхность ФПЗС после удаления защитного стекла был нанесен оптически прозрачный компаунд с показателем преломления, близким к аналогичному показателю диоксида кремния. Применение корректирующей пленки практически не повлияло на чувствительность фотоприемника во всем наблюдаемом диапазоне, а также не оказало вредного воздействия на разрешающую способность спектрометра. На рис. 7 приведены спектры излучения белого СИД до (а) и после (б) модификации ФПЗС.

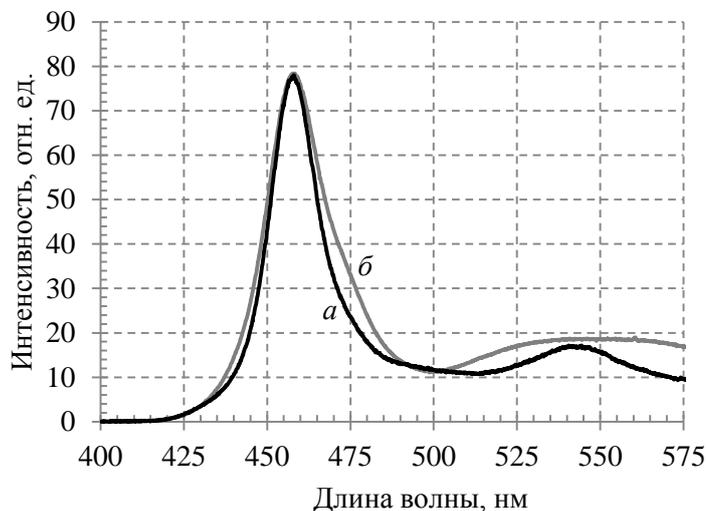


Рис. 7. Фрагменты спектров излучения белого СИД до (а) и после (б) модификации ФПЗС

Наличие интерференции значительно повлияло на спектр, что в свою очередь приводит к заметным ошибкам в определении параметров СИД – доминирующей длины волны и цветовых координат. В частности для этих двух графиков получились следующие результаты: для графика (а) – $\lambda_{\text{дом}} = 482.4$ нм, $x = 0.188$, $y = 0.234$; для графика (б) – $\lambda_{\text{дом}} = 481.7$ нм, $x = 0.178$, $y = 0.221$. Таким образом, разница измерения цветовых координат составила около 6 %.

В третьей главе представлены результаты разработки программной части спектрометрического комплекса и методики обработки спектрального сигнала.

Как известно, сигнал ФПЗС имеет некоторый уровень шума, состоящего из нескольких компонентов. На рис. 8, а показан фрагмент спектра, полученный с помощью разработанного программно-аппаратного комплекса и не подвергшийся дополнительной обработке.

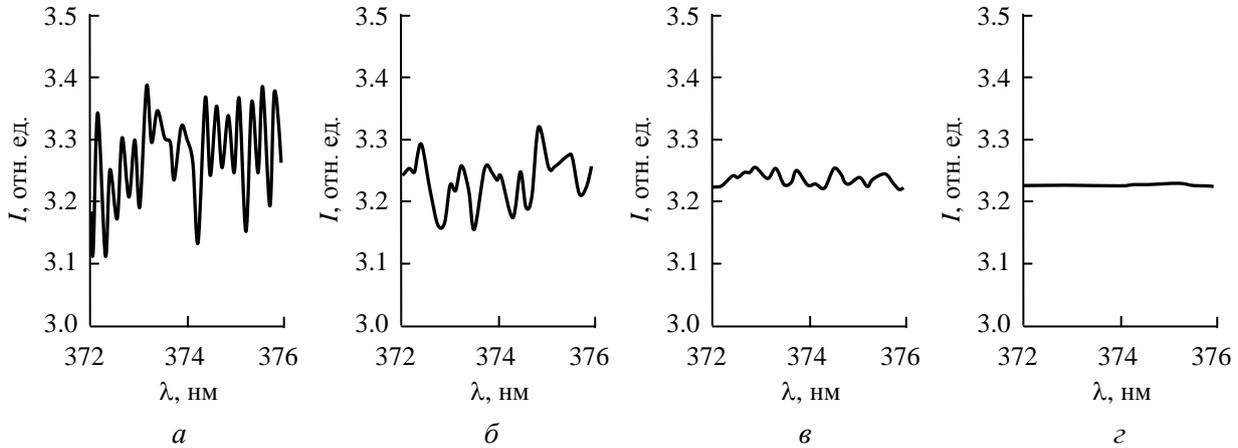


Рис. 8. Фрагменты обработанного спектра

Первый компонент это «геометрический» шум, обусловленный топологией фотоприемника. Для упрощения вывода сигнала в данном типе ФПЗС используются транспортные регистры по обе стороны фотоприемника. Таким образом, четные и нечетные пиксели имеют несколько различные параметры. В рассматриваемом в данной работе спектрометре на 1 нм спектрального диапазона приходится примерно 5 пикселей и при спектральном разрешении 1 нм возможно усреднение между четными и нечетными пикселями без потери разрешения. В режиме удаления геометрического шума производится линейная интерполяция четных и нечетных пикселей (рис. 8, б).

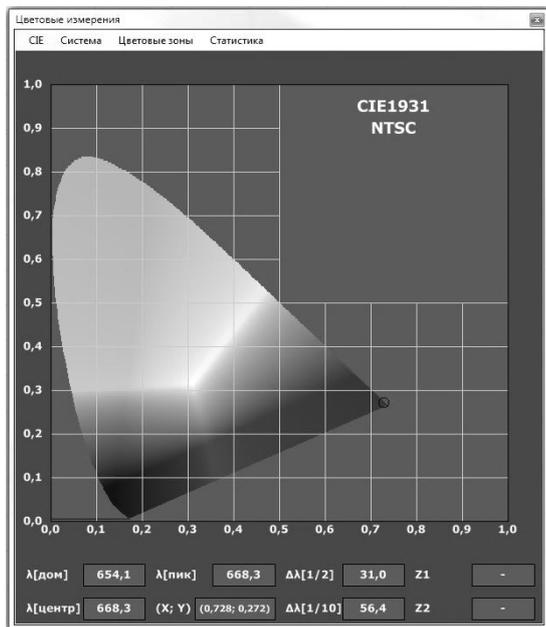


Рис. 9. Колориметрические измерения

Для спектров без узкополосных линий, в частности спектров излучения СИД достаточно эффективным является обработка полученных данных спектрального распределения излучения сплайновым цифровым фильтром (рис. 8, г).

Для спектров без узкополосных линий, в частности спектров излучения СИД достаточно эффективным является обработка полученных данных спектрального распределения излучения сплайновым цифровым фильтром (рис. 8, г).

При измерении параметров СИД можно дополнительно убрать влияние фонового сигнала вблизи уровня нуля. При этом при проведении цветных измерений зна-

Следующий компонент это собственный шум ФПЗС. Для его снижения можно произвести усреднение по нескольким снятым спектрам (рис. 8, в). При значениях чувствительности прибора (времени накопления заряда ФПЗС) порядка 10 мс можно увеличить число усреднений до 50...100 (общее время измерения 0.5...1 с).

Следующий компонент это собственный шум ФПЗС. Для его снижения можно произвести усреднение по нескольким снятым спектрам (рис. 8, в). При значениях чувствительности прибора (времени накопления заряда ФПЗС) порядка 10 мс можно увеличить число усреднений до 50...100 (общее время измерения 0.5...1 с).

чение сигнала менее выбранного будет обнуляться. На рис. 9 приведено окно «Цветовые измерения» программы Aspect использующейся при контроле параметров СИД.

В табл. 1 приведены максимальные, минимальные и средние значения цветовых координат x и y , а также среднеквадратичное отклонение определения координат δ для красного СИД по мере добавления цифровых фильтров, полученные при проведении 100 измерений.

Таблица 1.

Влияние фильтрации на колориметрические измерения СИД

Добавляемый фильтр	x_{\min}	x_{\max}	$x_{\text{ср}}$	y_{\min}	y_{\max}	$y_{\text{ср}}$	δ
Без дополнительной фильтрации	0.69846	0.69923	0.69882	0.29634	0.29704	0.29663	0.00026
Удаление геометрического шума	0.69849	0.69937	0.69894	0.29618	0.29696	0.29666	0.00025
Усреднение по 10 измерениям	0.69952	0.69994	0.69973	0.29665	0.29681	0.29673	0.00013
Отсечка порогового значения на уровне 0.5	0.70533	0.70558	0.70545	0.29434	0.29458	0.29446	0.00007
Сплайн фильтрация с весом 1	0.70540	0.70552	0.70549	0.29440	0.29452	0.29443	0.00003

Очевидно, что применение разработанной методики фильтрации шумов позволяет повысить воспроизводимость цветовых измерений СИД в 8 раз.

В четвертой главе приводятся результаты анализ параметров СИД спектральным методом с применением разработанного программно-аппаратного комплекса.

Перед определением параметров СИД следует провести коррекцию сигнала, которая даст лучший результат при использовании модифицированного описанным способом ФПЗС за счет лучшего соотношения сигнал/шум во всем рабочем диапазоне длин волн.

Спектральная чувствительность прибора в целом представляет собой комбинацию спектральных характеристик отдельных элементов оптической схемы. Для осуществления спектральной коррекции необходимо с помощью корректируемого прибора снять спектр эталона A с вычитанием темнового спектра. Далее рассчитывается поправочная функция, на которую автоматически домножаются все получаемые спектры (рис. 10).

Для того чтобы оптимально использовать преимущества СИД и минимизировать их недостатки необходимо учитывать особенности восприятия цвета человеческим глазом. Для светильников на основе СИД характерна низкая воспроизводимость цветовых характеристик из-за существенных различий между отдельными СИД. Таким образом, воспринима-

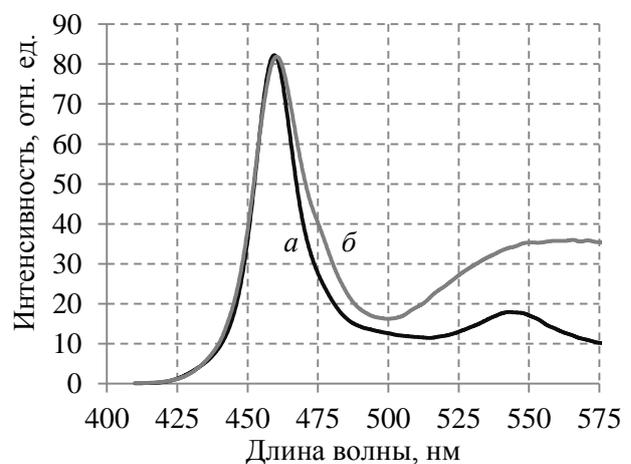


Рис. 10. Фрагменты спектров излучения белого СИД: a – до коррекции; b – после коррекции

емый человеком цвет двух СИД светильника может оказаться различным и ожидаемый однородный свет оказаться неоднородным.

Для создания однородных по цветовому восприятию источников освещения необходимо использовать знание о психофизиологическом восприятии цвета человеком. Для того чтобы определить допустимые отклонения цветовых характеристик отдельных СИД рассмотрим потолочный светильник, состоящий из 42 СИД и представляющий собой матрицу 6x7 с расстоянием между элементами 8 см. По результатам спектрометрического определения цветовых координат СИД можно сказать, что все они попадают в заявленную производителем группу цветности В2 (рис. 11, границы группы В2 показаны сплошной линией). Однако визуально цвет отдельных СИД лампы воспринимается неодинаково.

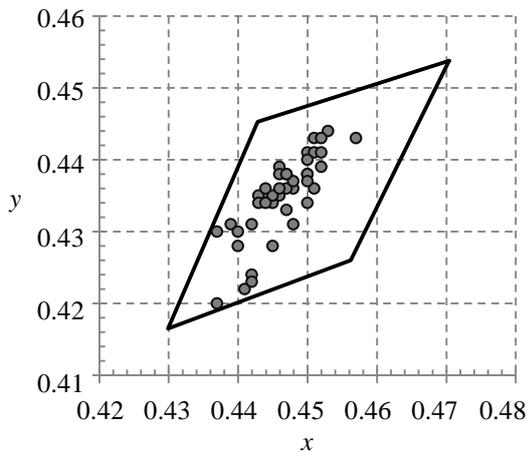


Рис. 11. Цветовые координаты белых СИД потолочного светильника

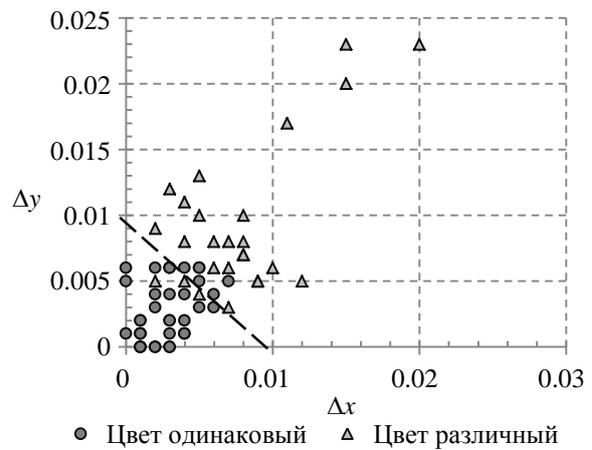


Рис. 12. Разница в цветовых координатах пар СИД

Как было сказано выше, данный светильник состоит из 42 СИД, соответственно имеются 73 пары СИД для сравнения. Все пары были разбиты на две группы – с визуально одинаковым цветом и с различным цветом. Различие по цветам определялось путем опроса контрольной группы наблюдателей из 20 человек с последующей статистической обработкой. Для некоторых пар определение схожести цвета оказалось затруднительным, и они были исключены из рассмотрения. На рис. 12 приведены точки соответствующие разности цветовых координат для каждой из рассмотренных пар.

Можно сказать, что для однородного цветового восприятия источника света сумма цветовых координат отдельных входящих в него СИД не должна отличаться более чем на 0.01, т. е. $\Delta x + \Delta y \leq 0.01$. Однако следует отметить, что для каждого типа светильника необходимо вычислить свой критерий подбора СИД, т. к. его параметры (размер, расположение элементов) оказывают значительное влияние на однородность восприятия цвета. Следует отметить, что широко применяемая сортировка с использованием эллипсов МакАдама или биннинга по группам цветности является очень грубой и приводит к неоднородности цвета светильника.

Рассмотрим причины существенных различий в цветовых характеристиках СИД. Исследуемые в данной работе белые СИД получены нанесением слоя желтого люминофора на синий СИД. Учитывая постоянство спектра свечения люминофора, факторами, приводящими к неоднородности характеристик, могут являться разброс

параметров исходного синего СИД и особенности технологического процесса нанесения слоя люминофора. На рис. 13, а приведены нормированные по чувствительности человеческого глаза спектры излучения двух белых СИД из рассмотренного в данной работе светильника. Графики почти идеально повторяют друг друга за исключением области 440...500 нм, в которой наблюдается существенное расхождение. На рис. 13, б данный фрагмент спектров приведен в большем масштабе.

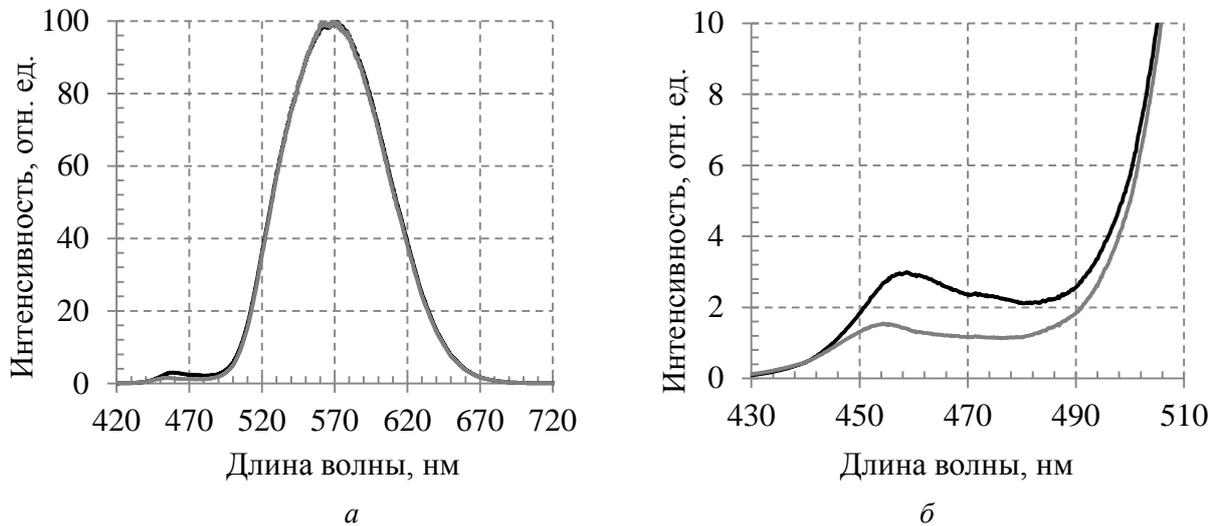


Рис. 13. Спектры излучения белых СИД

Приведенные на рис. 13 спектры позволяют предложить для подбора однородных по цветовому восприятию СИД использование балансного метода сравнения. Суть данного метода заключается в сравнении интенсивности излучения тестируемого белого СИД на двух характерных длинах волн (максимум спектра синего СИД и максимум спектра люминесценции желтого люминофора) с некоторым эталонным СИД.

По результатам исследования СИД рассматриваемого в данной работе светильника, установлено, что разброс значения интенсивности (при контроле на двух упомянутых выше длинах волн) не должен превышать 16 %. Таким образом, если взять в качестве эталонного СИД со средними по выборке параметрами, получим следующий критерий для оценки:

$$0.92 \leq \frac{U_{1Э}}{U_{1Т}} \cdot \frac{U_{2Т}}{U_{2Э}} \leq 1.08,$$

где $U_{1Э}, U_{2Э}$ – напряжения с выходов усилителей фотодиодов для эталонного СИД, соответствующие интенсивностям излучения на длинах волн 463 и 570 нм; $U_{1Т}, U_{2Т}$ – аналогичные напряжения для тестируемого СИД. Влияние температуры окружающей среды и саморазогрева СИД в данном случае можно не принимать во внимание при условии обеспечения одинаковых условий тестирования каждого из образцов.

Данный способ тестирования прост в реализации и вполне подходит для оценки параметров СИД, изготовленных в рамках одного технологического процесса и не слишком сильно различающихся по характеристикам. Основным достоинством предложенного метода является переход от использования достаточно дорогостоящего и относительно медленного спектрометрического оборудования к дешевой и быстродействующей схеме на фотодиодах.

В заключении подведены итоги работы и сформулированы ее основные результаты.

Основным итогом диссертационной работы явилось решение актуальной научно-практической задачи разработки спектрометрического комплекса и программного обеспечения к нему, позволяющих регистрировать спектры излучения источников оптического излучения, а также производить вычисление их основных параметров.

Применение термостатирования ФПЗС, модификация поверхности фотоприемника и система программной фильтрации шумов позволяют получить спектрометрический комплекс по метрологическим характеристикам не уступающий, а по некоторым параметрам и значительно превосходящий аналогичные импортные приборы при меньшей в полтора-два раза стоимости.

Решения, предложенные в данной работе, были использованы при разработке спектрометрических комплексов, поставленных на следующие предприятия: ФГУП НИИКП, ОАО НПП «Буревестник», ИПМаш РАН, ЗАО «Светлана-Оптоэлектроника», ООО «МЕГА-СМ», ОАО НИИТМ и др. Разработанные спектрометрические комплексы используются в учебном процессе на кафедре электронных приборов и устройств СПбГЭТУ «ЛЭТИ» в рамках курсов подготовки магистров «Датчики в электронных устройства» и «Электронные приборы и устройства в науке и технике».

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Разработан компактный оптический спектрометр с микропроцессорным управлением, построенный с применением вогнутой дифракционной решетки и ФПЗС, предназначенный для проведения спектрометрических и колориметрических исследований СИД.

Выработаны рекомендации по установке параметров работы ФПЗС, уровню сигнала и изгибу вводного оптоволокну спектрометра.

Разработана и практически подтверждена методика подавления интерференции в поверхностном слое ФПЗС путем покрытия ее слоем оптически прозрачного компаунда с показателем преломления, близким к показателю преломления диоксида кремния.

Создано оригинальное ПО, позволяющее визуализировать и оперативно производить обработку полученных оптических спектров на ПК.

Исследованы факторы, влияющие на неоднородность цветового восприятия источников освещения, состоящих из набора дискретных белых СИД.

Сформулированы рекомендации по выработке критериев подбора близких по цветовым характеристикам СИД для источников освещения.

Показано, что для сравнительной оценки параметров белых СИД, изготовленных в рамках одного технологического процесса, может быть применена простая быстродействующая схема на фотодиодах, контролирующая интенсивность излучения на двух длинах волн, взамен дорогостоящего колориметрического оборудования.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в журналах, рекомендованных ВАК

1. **Кострин Д. К.**, Ухов А. А. Влияние изгибов оптоволоконного спектрометра на результаты колориметрических измерений // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013. № 1, С. 9–12.
2. Юдин Р. В., **Кострин Д. К.**, Шишов Д. И., Ухов А. А. Повышение точности и воспроизводимости результатов колориметрических измерений светоизлучающих диодов // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013. № 3, С. 8–13.
3. Ухов А. А., **Кострин Д. К.** Оптимизация системы регистрации многоканального оптического спектрометра // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013. № 4, С. 8–12.
4. **Кострин Д. К.**, Ухов А. А. Светосигнальная характеристика ПЗС-фотоприемника в области больших световых потоков // Контроль. Диагностика, 2013. № 5, С. 40–42.
5. **Кострин Д. К.**, Ухов А. А. Интерференция в поверхностном слое и метрологические параметры спектрометров с ПЗС-фотоприемниками // Датчики и системы, 2013. № 5, С. 13–15.
6. **Кострин Д. К.**, Ухов А. А. Обнаружение и компенсация ложных спектральных линий в спектрометре с вогнутой дифракционной решеткой // Контроль. Диагностика, 2013. № 6, С. 26–28.
7. **Кострин Д. К.**, Ухов А. А. Метод подбора близких по цветовым характеристикам белых светодиодов для систем освещения // Контроль. Диагностика, 2013. № 7, С. 47–50.
8. **Кострин Д. К.** Исследование возможности экспресс-контроля состава воды оптическим спектрометром при использовании разряда в жидкости // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013. № 7, С. 15–19.
9. Воронин А. А., Герасимов В. А., **Кострин Д. К.**, Смирнов П. Е., Турубаров А. В., Ухов А. А. Модернизация приборов и методики спектральной идентификации пород древесины // Биотехносфера, 2013. № 3, С. 16–20.
10. **Кострин Д. К.**, Ухов А. А. Аппаратно-программный спектрометрический комплекс для исследования параметров светоизлучающих диодов // Биотехносфера, 2013. № 3, С. 21–25.

Публикации в других изданиях

11. **Кострин Д. К.** Исследование линейности свет-сигнальной характеристики ПЗС фотоприемника для различных спектральных составляющих излучения // 63-я научно-техническая конференция, посвященная Дню радио. Материалы конференции, 2008. С. 257–258.
12. **Кострин Д. К.** Исследование линейности светосигнальной характеристики ПЗС фотоприемника // Петербургский журнал электроники, 2008. № 2–3, С. 86–91.
13. **Кострин Д. К.** Разрядные системы с жидкими электродами для стехиометрического анализа // 65-я научно-техническая конференция, посвященная Дню радио. Материалы конференции, 2010. С. 258–259.

14. **Кострин Д. К.** Влияние изгиба вводного оптоволокна спектрометра на результаты колориметрических измерений // 66-я научно-техническая конференция, посвященная Дню радио. Материалы конференции, 2011. С. 337–338.

15. **Кострин Д. К.** Обнаружение и компенсация искажений спектральных линий в спектрометре с вогнутой дифракционной решеткой // 67-я научно-техническая конференция, посвященная Дню радио. Материалы конференции, 2012. С. 268–269.

16. **Кострин Д. К.** Спектрометрический комплекс для исследования параметров светоизлучающих диодов // 66-ая научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Сборник докладов студентов, аспирантов и молодых ученых, 2013. С. 43–47.

17. Герасимов В. А., **Кострин Д. К.**, Ухов А. А. Повышение точности измерения параметров тонких пленок спектральными методами // 11-ая международная конференция «Пленки и покрытия – 2013». Труды конференции, 2013. С. 218–219.

18. Герасимов В. А., **Кострин Д. К.**, Ухов А. А. Применение малогабаритного спектрометра для автоматизации технологических процессов // 68-я научно-техническая конференция, посвященная Дню радио. Материалы конференции, 2013. С. 305–306.

19. **Кострин Д. К.**, Ухов А. А., Шишов Д. И. Фильтрация сигналов с многоэлементного линейного фотоприемника при проведении колориметрических измерений // 68-я научно-техническая конференция, посвященная Дню радио. Материалы конференции, 2013. С. 306–307.

20. **Кострин Д. К.**, Матюшова Ю. С., Ухов А. А. Коррекция спектральной характеристики оптического спектрометра // 68-я научно-техническая конференция, посвященная Дню радио. Материалы конференции, 2013. С. 307–309.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

21. Свид. об офиц. рег. прог. для ЭВМ. 2012661366 РФ. Программа для микроконтроллера в составе малогабаритного спектрометра ISM3600, предназначенная для регистрации спектральных данных и передачи их в ПЭВМ (ISM3600) / **Кострин Д. К.**, Ухов А. А.; № 2012619286; заявл. 29.10.12; зарег. 13.12.12.

22. Свид. об офиц. рег. прог. для ЭВМ. 2012661367 РФ. Программа для управления малогабаритным спектрометром ISM3600 и анализа оптических спектров (ASPECT2010) / **Кострин Д. К.**, Ухов А. А.; № 2012619287; заявл. 29.10.12; зарег. 13.12.12.

23. Свид. об офиц. рег. прог. для ЭВМ. 2013614667 РФ. Программа для технологического управления и настройки малогабаритного спектрометра ISM3600 (ISM3600_Test) / **Кострин Д. К.**, Ухов А. А.; № 2013612650; заявл. 03.04.13; зарег. 20.05.13.

Учебное пособие и монография

24. Колгин Е. А., **Кострин Д. К.**, Ухов А. А. Электронные средства контроля в современных технологиях: Учебное пособие. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011. 136 с.

25. **Кострин Д. К.**, Ухов А. А. Датчики в электронных устройствах. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013. 240 с.