На правах рукописи

УДК 535.8

ЖБАНОВА ВЕРА ЛЕОНИДОВНА

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ ЦВЕТОДЕЛЕНИЯ ДЛЯ МАТРИЧНЫХ ФОТОПРИЕМНИКОВ

Специальность 05.11.07 – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Москва – 2015

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский государственный университет геодезии и картографии» на кафедре проектирования оптических приборов.

Научный руководитель: **Парвулюсов Юрий Борисович**
кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой проектирования оптических приборов МИИГАиК

Официальные оппоненты: Доктор технических наук, доцент,
Губанова Людмила Александровна,
кафедра опто-информационных технологий и материалов ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики», профессор

Кандидат технических наук,
Вязовых Максим Вячеславович,
кафедра «Лазерные и оптико-электронные системы (РЛ-2)» ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана», доцент

Ведущая организация: Акционерное общество «НПО Орион»
Государственный научный центр РФ,
г. Москва

Защита диссертации состоится «_____» _____ 2016 г. в _____часов на заседании диссертационного совета Д 212.143.03 в Московском государственном университете геодезии и картографии (МИИГАиК) по адресу: 105064, г. Москва, Гороховский пер., 4 (Зал заседаний ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного университета геодезии и картографии, и на сайте: http://www.miigaik/ru/nauka/dissertacionyy_sovet/dissertatsii/20150928154354-5710.pdf

Автореферат разослан «____» _____ 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.143.03 О.В. Вшивкова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Ориентация современных информационных систем на представление информации в форме визуального контента обостряет ряд проблем, связанных, в первую очередь, с оцифровкой и обработкой изображений.

Замена фотопленок на полупроводниковые фотоприемники привела к ряду проблем, многие из которых не решены до сих пор. Большинство этих проблем связаны с адекватной передачей яркостной и цветовой информации. Разработчики систем регистрации цветного изображения, уделяя в основном внимание качественной передаче яркости, отказались от сложных систем цветоделения, таких как диспергирующие элементы (оптические призмы, дифракционные решетки) и оптические системы из дихроичных зеркал.

В основном, для цветоделения в фотоприемниках цифровых камер применяется поверхностный метод цветоделения, основанный на использовании светофильтров различных типов. Наибольшее распространение получила схема интерполяции цвета – «шаблон Байера». Схема основана на колориметрической системе *RGB*, которая является аппаратнозависимой. Доминирование байеровской системы цветоделения привело к тому, что качество изображений, полученных с ее помощью, несовершенно, и адекватное воспроизведение цвета, присущее экспонируемым фотопленкам, отсутствует. «Шаблон Байера» приемлемо воспроизводит цвет изображения для ограниченных условий съемки.

Производители фоточувствительных матриц и цифровых камер начали применять один из перспективных способов цветоделения – пространственный (многослойный), основанный на зависимости глубины проникновения излучения в вещество от длины волны. Попытки внедрения многослойных систем цветоделения связаны с трудностями, в первую очередь, с проблемами технологического плана. Среди этих проблем необходимо отметить принципиальную невозможность применения вертикального дренажа избыточных носителей заряда, что сужает динамический диапазон фотоприемников такого типа. Так же фотоприемники с пространственным цветоделением имеют

существенные проблемы с качеством оцифровки цветных изображений, хотя интерполяция цвета в них не применяется. Эти искажения связаны, в основном, с различием в размерах фоточувствительных слоев.

Вышесказанное позволяет отметить, что в настоящее время проблема качественной оцифровки цветных изображений не решена ни на аппаратном, ни на программном уровнях, и является весьма актуальной по сей день.

Степень разработанности темы исследования. Степень разработанности темы исследования в отечественной литературе недостаточная, так как данный вопрос имеет узкую специализацию и рассматривается в основном косвенно в рамках устройств захвата и оцифровки изображений. Поэтому информационной базой исследования являются зарубежные патентные источники, а также публикации в периодических изданиях в области цифровой техники.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования являются системы цветоделения для матричных фотоприемников. Предметом исследования диссертационной работы являются методы усовершенствования систем цветоделения на основе матричных фотоприемников для регистрации цвета.

Цели и задачи. Цель работы – разработка и исследование новых оптико-электронных систем цветоделения для матричных фотоприемников.

Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

1) выполнить аналитический обзор литературных и патентных источников известных систем цветоделения и средств регистрации цвета на основе матричных фотоприемников, провести их анализ, установить возможность их усовершенствования;

2) провести классификацию систем цветоделения для матричных фотоприемников по способу регистрации цвета;

3) разработать и исследовать усовершенствованные способы регистрации и представления цвета;

4) разработать новые цветовые пространства для усовершенствованных систем цветоделения;

5) практически реализовать разработанные способы и схемотехнические решения.

Направления исследования:

1. Поиск путей повышения качества цветопередачи с помощью оптико-электронных систем цветоделения для матричных фотоприемников.

2. Усовершенствование существующих систем цветоделения.

3. Разработка цветового пространства под усовершенствованные системы цветоделения.

4. Разработка экспериментальной установки для исследования усовершенствованных систем цветоделения для матричных фотоприемников.

5. Экспериментальное исследование усовершенствованных систем цветоделения.

Основные идеи диссертационной работы заключаются в следующем:

- в усовершенствовании существующих систем путем совмещения двух различных систем цветоделения: пространственной и многослойной, что позволит исключить или минимизировать недостатки обеих систем;

- в разработке новых цветовых пространств под определенную систему цветоделения, с целью исключения цветовых искажений при дальнейшей обработке изображения;

- в исследовании усовершенствованных систем на разработанной экспериментальной установке.

Научная новизна:

1. Разработана усовершенствованная система цветоделения на основе тонких пленок полупроводника, позволяющая получить адекватную цветопередачу. Предложено несколько шаблонов регистрации цвета по данному способу.

2. Разработана усовершенствованная система цветоделения на основе пленочных светофильтров, с характеристиками близкими колориметрической системе МКО *XYZ* 1931 г., впервые применяемой для цифровых камер. Предложено несколько шаблонов регистрации цвета по данному способу.

3. Разработаны новые цветовые пространства для каждой усовершенствованной системы, позволяющие увеличить тело цветового охвата и достичь адекватной цветопередачи изображения.

4. Осуществлена практическая реализация усовершенствованной системы цветоделения и ее схемотехническое решение.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость проведенных исследований и разработок заключается в нахождении новых способов регистрации цвета на основе матричных фотоприемников. Практическая значимость состоит в реализации этих способов в устройствах, предназначенных для регистрации цветовых параметров. Результаты научно-технических разработок позволяют достичь адекватной цветопередачи изображений получаемых в светотехнике, космонавтике, аэрофотосъемке, измерительной технике, химии, медицине и т.п. Измерения возможны при исследовании прозрачных, полупрозрачных и непрозрачных объектов, в том числе алмазов и бриллиантов.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач были использованы основные положения колориметрии, колориметрические системы, их преобразования и способы создания цветовых пространств. Исследовано влияние предложенных шаблонов систем цветоделения на функции передачи модуляции интерполяции цвета. Для подтверждения теоретических раскладок усовершенствованных систем была разработана экспериментальная установка для исследования систем цветоделения на основе методов моделирования.

Реализация результатов работы. Научные результаты работы были реализованы при создании действующей оптико-электронной установки для исследования систем цветоделения. Колориметр на базе цифровой фотокамеры с разработанной системой цветоделения, используют в автоматизированном рабочем месте оценщика бриллиантов в ООО «Смоленский геммологический центр», позволяя добиться высокой степени автоматизации процесса определения цвета и цветности бриллиантов высокой насыщенности, в том числе и

фантазийных цветов. Результаты диссертационной работы были также реализованы в учебном процессе для разработки методических материалов при подготовке инженеров кафедры оптико-электронных систем филиала МЭИ г. Смоленска. Реализация результатов работы подтверждена актами.

Положения, выносимые на защиту:

1. Теоретически обоснована возможность усовершенствования систем цветоделения с тонкими плёнками полупроводника на основе разработанных вариантов комбинации светочувствительных слоёв матричных фотоприёмников с улучшенными характеристиками.

2. Теоретически обоснована и практически доказана возможность усовершенствования систем цветоделения с плёночными светофильтрами на основе разработанных вариантов комбинации светофильтров матричных фотоприёмников с улучшенными характеристиками.

3. Для достижения адекватной цветопередачи систем цветоделения с плёночными светофильтрами возможно использование теоретически обоснованных вариантов коррекции спектральных характеристик элементов матрицы.

4. Пути усовершенствования систем цветоделения, расширяющих тело цветового охвата с целью обеспечения адекватной цветопередачи, могут быть обоснованы при использовании разработанной методики математического моделирования новых цветовых пространств.

5. Результаты экспериментальных исследований усовершенствованной системы цветоделения на светофильтрах подтверждаются допустимой степенью достоверности выдвигаемых теоретических положений.

Вклад автора в работу. Личный вклад в работу автора в проведенные исследования заключается: в теоретическом обосновании и разработке усовершенствованных систем цветоделения, разработке методики математического моделирования, в постановке и проведении эксперимента. Автором разработаны уникальные цветовые пространства под каждую усовершенствованную систему.

Достоверность результатов. Достоверность и обоснованность результатов подтверждается корректностью разработанных математических моделей, их адекватностью по известным критериям оценки изучаемых процессов, использованием известных положений фундаментальных наук, сходимостью полученных теоретических результатов с данными эксперимента.

Апробация результатов работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на научно-технической конференции «Молодые светотехники России» (г. Москва, 2010, 2014), на I Международной научно-технической конференции «Энергетика, информатика, инновации – 2011» (г. Смоленск, 2011), на XVIII Международной конференции «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (г. Москва, 2012), на I Всероссийском конгрессе молодых ученых (г. С.-Петербург, 2012), на X Всероссийской молодежной Самарской конкурс-конференции научных работ по оптике и лазерной физике (г. Самара, 2012), на III Всероссийской научно-технической конференции «Инновационное развитие образования, науки и технологий» (г.Тула, 2012), на X Международной научно-технической конференции «Информационные технологии, энергетика и экономика» (г. Смоленск, 2013), на международной научно-технической конференции «Геодезия, картография, кадастр – современность и перспективы», посвященная 235-летию основания МИИГАиК (г. Москва, 2014), на научном семинаре кафедры «Оптико-электронные системы» филиала МЭИ в г. Смоленске (г. Смоленск, 2015).

Публикации по теме диссертации. Результаты проведенных исследований отражены в 12 научных статьях, из них 5 опубликованы в научных журналах, входящих в перечень ВАК.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 101 наименование, и двух приложений. Основная часть диссертации содержит 122 страницы (без приложений), 16 таблиц и 50 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение диссертационной работы посвящено обоснованию актуальности выбранной темы. Во введении формулируется цель и основные задачи исследования, охарактеризованы научная новизна, практическая и теоретическая значимость работы, приведены: методология и методы исследования, положения выносимые на защиту, степень достоверности и апробация результатов.

В первой главе приведены основные сведения о матричных фотоприемниках, системах цветоделения и цветовых моделях и пространствах.

По результатам анализа, можно сделать вывод: системы цветоделения на основе светофильтров и многослойной структуре полупроводника обладают недостатками, не устраненными ни в одной модификации. Поэтому необходима разработка усовершенствованных систем цветоделения для адекватной цветопередачи.

Во второй главе представлены разработки усовершенствованных систем цветоделения на многослойной структуре полупроводника и на основе пленочных светофильтров, определены их функции передачи модуляции интерполяции цвета и разработаны для них новые цветовые пространства.

Недостатки систем цветоделения на основе многослойной структуры полупроводника предлагается устранить путем разнесение селективных фоточувствительных слоев в пространстве (два вместо трех) и увеличения площадей светочувствительных слоев. Применение только двух слоев полупроводника решает проблему дренажа избыточных носителей в матричном фотоприемнике, а также уменьшает уровень шумов, за счет использования меньшего количества слоев. Предлагаемый способ может быть реализован на трех типах матричных фотоприемных устройств (МФПУ – матрица) (см. рисунок 1).

По результатам исследования можно сделать вывод, что предложенные комбинации светочувствительных слоев имеют следующие достоинства:

- позволяют получить различные варианты комбинаций основных цветов пикселя, что расширяет диапазон применения данных матричных фотоприемников;

- расширяют палитру получаемого изображения;

- позволяют получить менее зашумленную информацию о зеленой области спектра, которая является важной при воспроизведении информации для человеческого глаза;

- упрощают математический аппарат (алгоритм) вычисления цветов;

- решают проблему дренажа избыточных носителей, поскольку при пространственном совмещении слоев *B* и *R*, для них можно использовать горизонтальный и вертикальный дренаж, соответственно, а для слоя *G* можно применить как вертикальный, так и горизонтальный дренаж;

- позволяют за счет увеличения площади компонентов *G* и *B* повысить светочувствительность матричного фотоприемника, а именно: увеличить краевой угол падения для *B* слоя на 0,2%, для *G* слоя – на 0,7%, а угол экранирования – для *B* слоя на 0,5%, для *G* слоя на 1,4%.

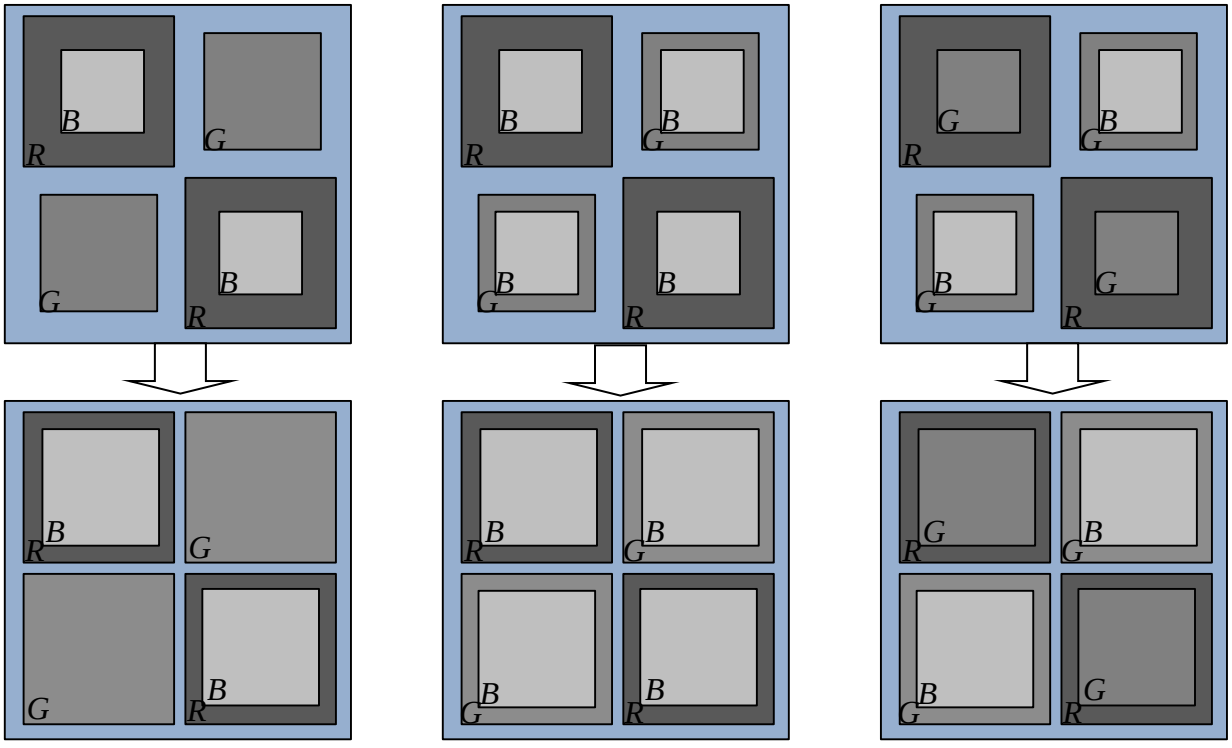


Рисунок 1 – Шаблоны усовершенствованных матриц с увеличением слоев, вид в плане: а) МФПУ-1; б) МФПУ-2; в) МФПУ-3

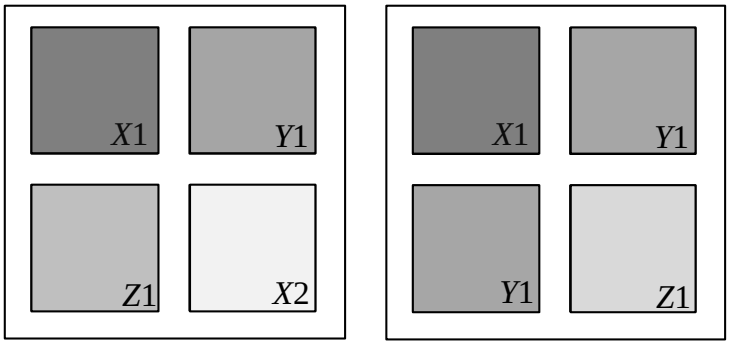
Были проведены исследования функций передачи модуляции (ФПМ) интерполяции цвета разработанных усовершенствованных матриц и сделан вывод о том, что в результате усовершенствования существенно упрощаются

вычисления при интерполяции цвета. Для их выполнения не требуются высокопроизводительные микропроцессоры и большие объёмы памяти, что значительно сокращает время на обработку изображения, а также себестоимость самой цифровой камеры.

Предложен путь решения проблемы корректного расчета цветовых характеристик изображений цифровой камеры с системой цветоделения на светофильтрах, заключающийся в применении международной колориметрической системы *XYZ* 1931 г., которая позволяет строго идентифицировать цвет посредством его координат и отойти от пространств *RGB*. Разработаны шаблоны *X*1*X*2*Y*1*Z*1 и *X*1*Y*1*Z*1*Y*1.

Для реализации шаблона с набором приемников *X*1*X*2*Y*1*Z*1 достаточно скоррегировать спектральную чувствительность фотоприемников под кривые сложения колориметрической системы $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ с помощью светофильтров под каналы *X*1, *X*2, *Y*1 и *Z*1. Подобный набор обусловлен тем фактором, что кривая $\bar{x}(\lambda)$ имеет два максимума. Поэтому можно использовать два соседних элемента матрицы, из которых приемник *X*2 корригируется под коротковолновую ветвь кривой (в области $\lambda \leq 505$ нм), приемник *X*1 – под длинноволновую ветвь ($\lambda \geq 505$ нм) (см. рисунке 2, а).

Приемник *Y*1 коррегируется под кривую $\bar{y}(\lambda)$. Спектральная характеристика $\bar{y}(\lambda)$ с достаточным приближением повторяет кривую относительной спектральной световой эффективности, определяющую восприятие яркости изображения, что сведет к минимуму яркостные искажения. Приемник *Z*1 коррегируется под кривую $\bar{z}(\lambda)$.



а) б)

Рисунок 2 – Шаблоны усовершенствованных систем цветоделения на основе светофильтров: а) *X*1*X*2*Y*1*Z*1; б) *X*1*Y*1*Z*1*Y*1

В дальнейшем информацию с приемника *X*2 можно будет использовать не только как дополнение к *X*1, но и как приложение к приемнику *Z*1 по синему участку спектра, в качестве элемента низкой чувствительности, аналогично технологии *Super CCD* (*Fujifilm Dual Capture Technology*). Такой подход позволит максимально расширить цветовой охват в области синих оттенков, что для человеческого восприятия является важным.

Предлагается также второй способ размещения приемников *X*1*Y*1*Z*1*Y*1. Первый максимум кривой $x(\lambda)$, также совпадает с длиной волны максимума кривой $z(\lambda)$, при этом последняя содержит больше полезной информации для коротковолнового излучения, чем вторая. Поэтому предлагается оптимизировать кривые удельных координат $x(\lambda)$, $y(\lambda)$, $z(\lambda)$, чтобы избавиться от первого максимума кривой $x(\lambda)$. После оптимизации кривых получим систему по шаблону *X*1*Y*1*Z*1*Y*1, представленными на рисунке 2, б.

Для усовершенствованных систем цветоделения были разработаны новые цветовые пространства. Основные цвета предлагаемых пространств (красный, зеленый и синий) подбирались таким образом, чтобы расширить тело цветового охвата и полученные кривые были максимально близки к кривым системы *XYZ*. При этом устраняются недостатки этой системы связанные с наличием большого количества нереальных цветов в цветовом треугольнике и двух максимумов у кривой сложения $\bar{x}(\lambda)$. Цветовые треугольники пространств *M*1*N*1*P*1 и *M*2*N*2*P*2 представлены на рисунке 3.

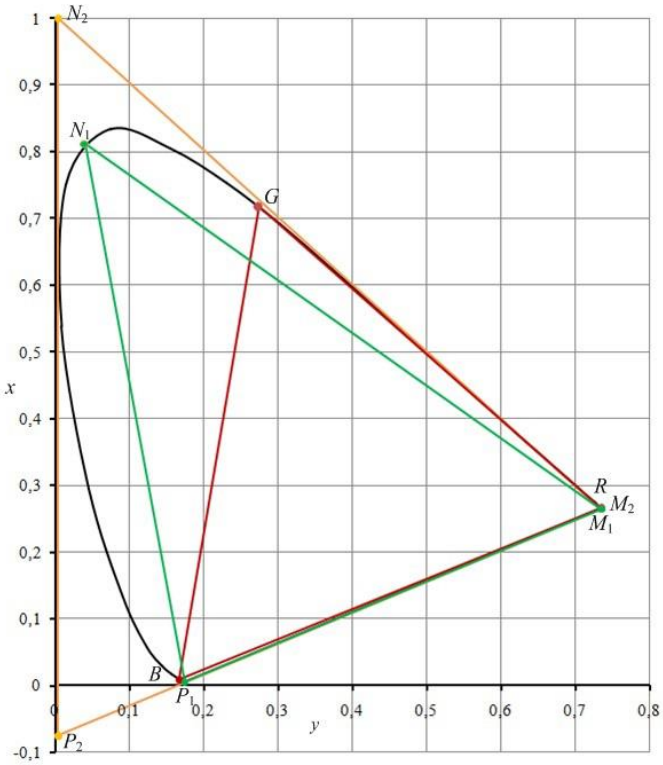
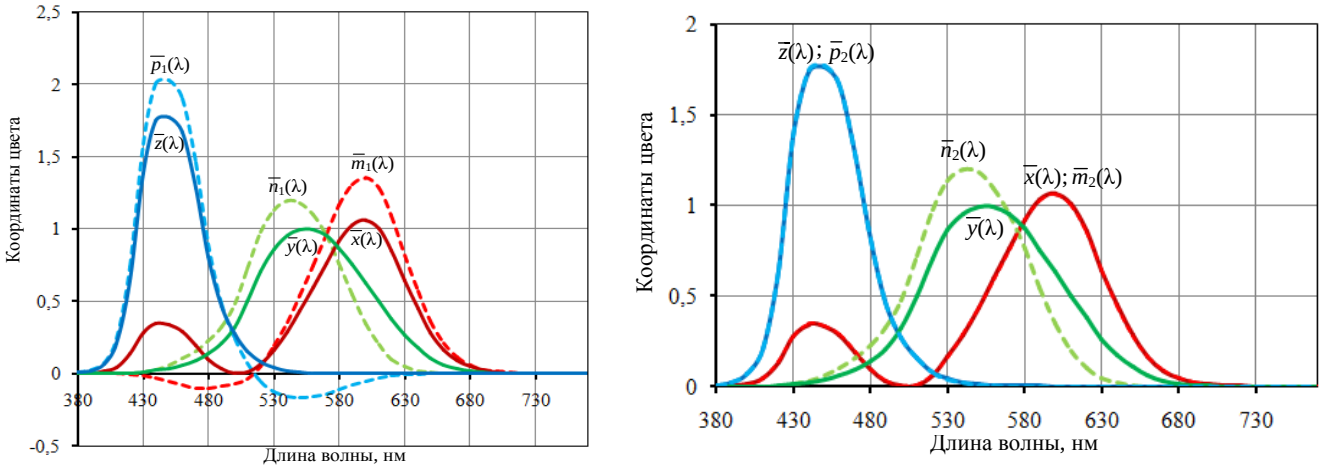


Рисунок 3 – Цветовые треугольники *RGB*, *M1N1P1* и *M2N2P2* на графике цветности МКО 1931 г.

Цветовое пространство *M*1*N*1*P*1 разработано для набора светофильтров *X*1*Y*1*Z*1*Y*1, чтобы избавиться от влияния второго максимума кривой $\bar{x}(\lambda)$ (см. рисунок 4, а). Координаты на графике *xy*: *M*1 (0,735; 0,265), *N*1 (0,039; 0,812), *P*1 (0,174; 0,005). Разработанное цветовое пространство *M*2*N*2*P*2 полностью охватывает график цветности *xy* и имеет минимальное количество нереальных цветов, по сравнению с цветовым треугольником самой системы *XYZ* (см. рисунок 4, б). Координаты на графике *xy*: M_2 (0,735; 0,265), N_2 (0,004; 1,00), P_2 (0,004; -0,075).



а) б)

Рисунок 4 – Удельные координаты цвета системы *XYZ* ($\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$) и а) *M*1*N*1*P*1 ($\bar{m}_1(\lambda)$, $\bar{n}_1(\lambda)$, $\bar{p}_1(\lambda)$); б) *M*2*N*2*P*2 ($\bar{m}_2(\lambda)$, $\bar{n}_2(\lambda)$, $\bar{p}_2(\lambda)$)

Для каждого пространства были найдены коэффициенты пересчета из *M*1*N*1*P*1 в *XYZ* (из *M*2*N*2*P*2 в *XYZ*) и обратно из *XYZ* в *M*1*N*1*P*1 (из *XYZ* в *M*2*N*2*P*2) для дальнейших расчетов.

Третья глава посвящена разработке и анализу схем цифрового колориметра с усовершенствованными системами цветоделения и его метрологического обеспечения. Структурная схема, предлагаемого цифрового колориметра, приведена на рисунке 5 и включает: 1 – объектив, 2 – многоэлементное матричное фотоприемное устройство (МФПУ – матрица), 3 – 16-разрядный аналого-цифровой преобразователь (АЦП), 4 – микропроцессор (МП), 5 – ЭВМ/дисплей. К базовой схеме могут быть добавлены такие

комплектующие как *flash*-память, *USB*-порт и другие необходимые оператору элементы.

Основой устройства является оптико-электронная часть. Объектив 1 формирует изображение объекта на оригинальном МФПУ 2, выполненном по шаблону *X*1*X*2*Y*1*Z*1 или *X*1*Y*1*Z*1*Y*1. Предпочтительный вариант конструкции предложенных МФПУ основан на схеме переноса заряда в полнокадровой матрице, при которой можно добиться максимального размера светочувствительного элемента. Для создания видеоколориметра на базе видеокамеры потребуется схема с буферизацией столбцов. По суммарному накопленному заряду по каждому из каналов определяют интенсивность светового потока, по которой рассчитывают координаты цвета (цветности).

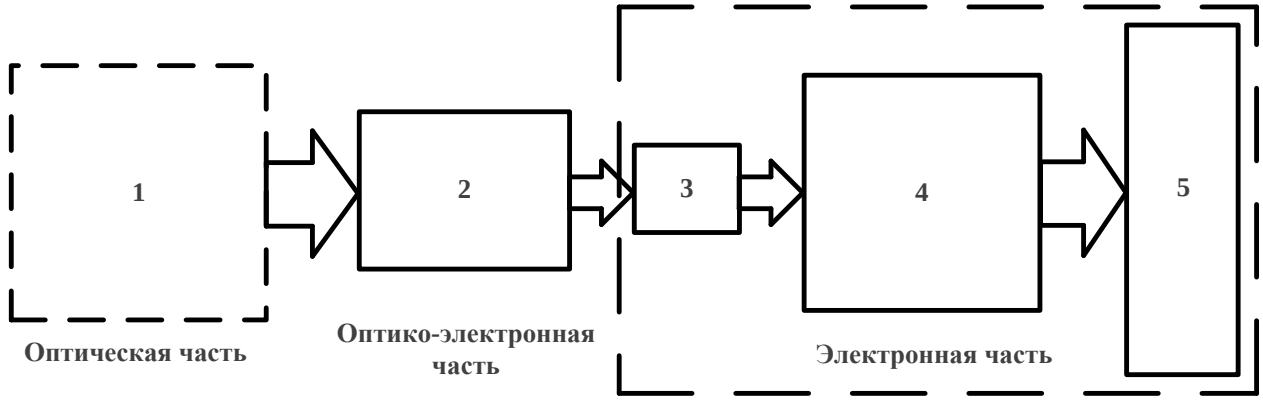


Рисунок 5 – Структурная схема цифрового колориметра

Ввиду дороговизны и трудоемкости производства усовершенствованных МФПУ на пленочных светофильтрах было решено проводить экспериментальные исследования с помощью стандартизированных светофильтров из оптического стекла по ГОСТ 9411-91 и черно-белой камеры. Структурная схема экспериментальной установки для исследования разработанных систем цветоделения представлена на рисунке 6. Схема состоит из трех основных структурных блоков: системы освещения образца (СО), видеокамеры (ВК) и устройства захвата и обработки изображения (УЗОИ).

Также в схему входит: стабилизированный источник питания (СИП), источник излучения (ИИ), диффузно-рассеивающий экран (Э), образец (О), сменный набор коррегирующих светофильтров (НКСФ) под приемники *X*1, *Y*1 и

$Z1$, многоэлементное матричное фотоприемное устройство (МФПУ), электронно-вычислительная машина (ЭВМ). Система юстировки (СЮ) позволяет осуществлять настройку и юстировку измерительного комплекса, а также его отдельных компонентов (экран, видеокамера).

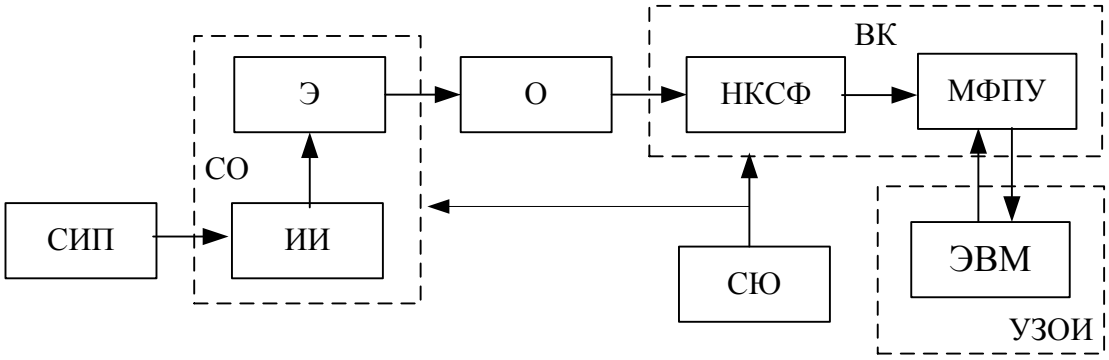


Рисунок 6 – Структурная схема измерительной установки для исследования систем цветоделения

Анализ схемы позволяет сделать вывод о том, что на экспериментальной установке возможно проведение исследований любых систем цветоделения, применяя различный набор СФ. Тогда открывается возможность создания на базе предложенного способа универсального цифрового колориметра для измерения цветовых параметров любых цветных объектов, в том числе и непрозрачных. Также можно улучшить предлагаемый способ исследования нахождением цветовых различий в таких колориметрических системах как *CIELUV* и *CIELAB.*

На основе структурной схемы разработана установка для объективного метода измерения цветности полупрозрачных объектов с помощью усовершенствованных систем цветоделения $X1X2Y1Z1$ или $X1Y1X1Z1$, функциональная схема которой представлена на рисунке 7.

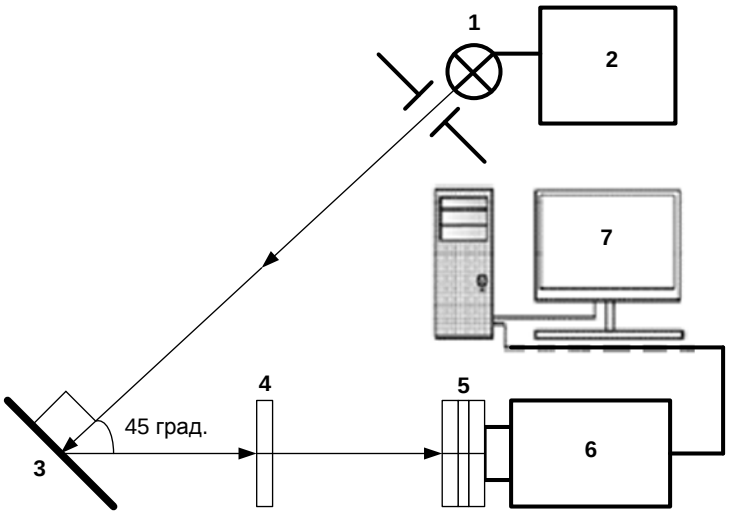


Рисунок 7 – Функциональная схема установки для исследования усовершенствованных систем цветоделения

Основой установки являются: 1 – источник света типа А – лампа А12-50, 2 – стабилизированный источник питания ТЕС-42, 3 – экран-отражатель $BaSO_4$,

4 – исследуемый образец, 5 – набор коррегирующих светофильтров, 6 – камера и 7 – ПЭВМ (ноутбук). Для нахождения цветности одного исследуемого образца (светофильтра – СФ) необходимо получить значения яркости для каналов *X*1, *Y*1 и *Z*1. Каждому каналу соответствует своя характеристика, которую воспроизводят коррегированием характеристики ПЗС-матрицы соответствующим набором СФ 5.

По рекомендации МКО для измерения цветности образцов была принята схема освещения/наблюдения 0/45. Таким образом, пластина освещается пучком, ось которого составляет с нормалью к образцу угол не более 10°. Образец наблюдается под углом 45±5° относительно нормали. Угол между осью освещающего пучка и любым его лучом не должен превышать 5°. Эти же ограничения накладываются и на параметры наблюдаемого пучка. Приемником является видеокамера *PL-B*959, с монохромной ПЗС-матрицей *Sony ICX*274. С помощью программы «*PixeLINK Capture OEM*» фиксируется изображение в формате *RAW*, что позволяет получить 16-битное изображение. По каждому каналу *X*1, *Y*1 и *Z*1 происходит захват изображения 5 раз, для устранения погрешностей связанных с шумами матрицы. Затем с помощью программы *MathLAB* рассчитывается среднее значение яркости для *X*1, *Y*1 и *Z*1.

Данный способ позволяет находить цветность различных прозрачных и полупрозрачных образцов в пространстве любой колориметрической системы. Для исследования объектов работающих на отражение (непрозрачных), вместо отражателя $BaSO_4$ размещается сам образец.

Для коррегирования ПЗС-матрицы светофильтрами была экспериментально найдена кривая спектральной чувствительности матрицы *Sony ICX*274. Измерения производились на монохроматоре УМ-2 на основе лампы типа А. Определение коэффициента пропускания СФ производилось при помощи спектрофотометра *SPECOL* 210 с шагом 10 нм. Характеристики соответствуют ГОСТ 9411-91.

Кривые подбирались таким образом, чтобы форма и пики максимально совпадали с характеристиками $\overline{m_1}(\lambda)$, $\overline{n_1}(\lambda)$ и $\overline{p_1}(\lambda)$. Также учитывалось влияние отражателя $BaSO_4$. Полученные характеристики представлены на рисунке 8.

Для каждого вида приемника был подобран набор коррегирующих СФ: для *X*1: СЗС23, ОС5, ОС17; для *Y*1: ЗС10, ЖЗС6, СЗС7; для *Z*1: ЖС3, СС15.

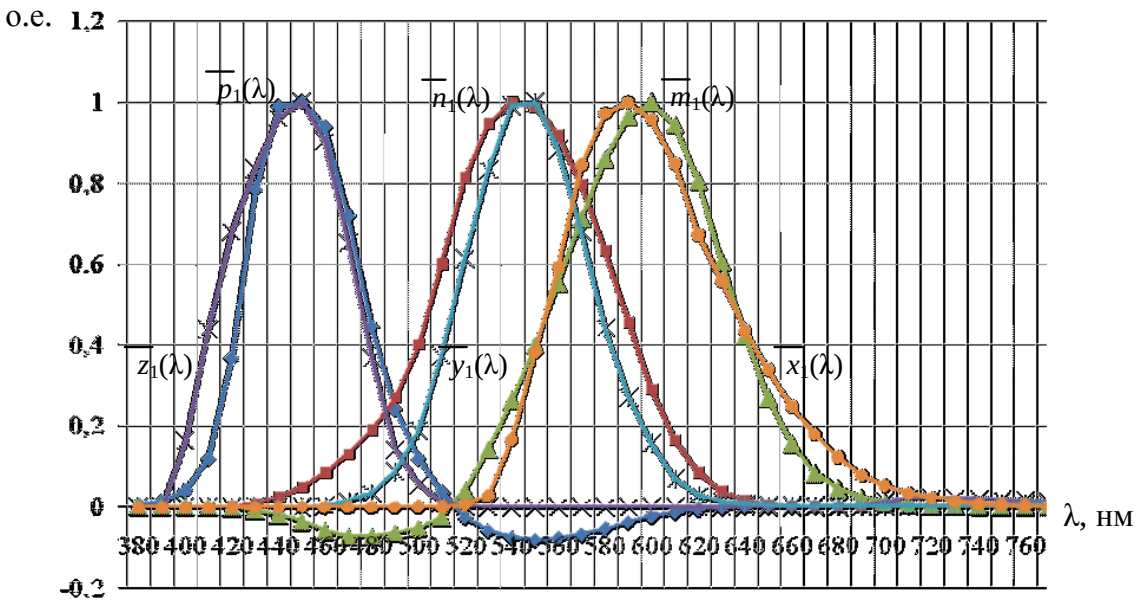


Рисунок 8 – Характеристики приемников *X*1, *Y*1 и *Z*1 ($\overline{x}_1(\lambda)$, $\overline{y}_1(\lambda)$, $\overline{z}_1(\lambda)$ относительно кривых системы *M*1*N*1*P*1 ($\overline{m}_1(\lambda)$, $\overline{n}_1(\lambda)$, $\overline{p}_1(\lambda)$

Метрологическое обеспечение экспериментальных исследований разрабатывалось с учетом следующих факторов:

- определены координаты цветности светофильтров в колориметрической системе *XYZ* относительно выбранного осветителя;

- найдены отклонения реальных координат цветности светофильтров от приведенных в ГОСТ;

- осуществлен учет погрешностей вносимых коррегированием ПИ набором СФ;

- учтено влияние «темнового кадра»;

- определены основные предустановки программы «*PixeLINK Capture OEM*»

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований усовершенствованной системы цветоделения на светофильтрах. Основной целью исследований являлось практическое подтверждение предложенного метода измерений цветовых параметров прозрачных и полупрозрачных образцов с помощью усовершенствованных систем цветоделения.

Экспериментальные исследования проводились в несколько этапов. На первом этапе определялись марки светофильтров из оптического стекла пригодных для исследований. Для исключения инструментальной погрешности и обеспечения достоверности результатов измерений, необходимо, чтобы координаты цвета исследуемых светофильтров попадали в треугольник цветового охвата разработанной системы. Так как заявленная система расширяет тело цветового охвата в области зеленых оттенков, то были выбраны светофильтры из ряда СЗС (сине-зеленые), ЗС (зеленые) и ЖЗС (жёлто-зеленые), координаты цвета которых находятся внутри или ближе к цветовому треугольнику пространства *M*1*N*1*P*1. На основе анализа было выбрано 12 образцов светофильтров: СЗС20, СЗС9, СЗС22,ЗС3, ЗС8, ЗС11, ЗС7, ЗС1, ЗС10, ЖЗС9, ЖЗС12 и ЖЗС18.

Основным условием проведения исследований является отсутствие посторонней засветки. Поэтому для устранения внешних цветовых и световых помех измерения проводились в черной комнате предназначенной для фотометрических измерений. Погрешность измерений оценивалась согласно известной методике. На установке (см. рисунок 9) были сделаны снимки изображений по трем каналам *X*1, *Y*1 и *Z*1 для каждого светофильтра на основе программы *PixeLINK Capture OEM* с выбранными предустановками.

Среднее значение яркости по каждому каналу является координатой цвета в системе *M*1*N*1*P*1, которая переводится в систему *XYZ* с помощью коэффициентов перехода, рассчитанных в главе 2.

Рисунок 9 – Экспериментальная установка для исследования усовершенствованных систем цветоделения

Далее были определены координаты цветности *xy*:

$$\begin{cases} x = \dfrac{X}{X+Y+Z}; \\ y = \dfrac{Y}{X+Y+Z}. \end{cases} \quad (1)$$

Изменение цветности было найдено в равноконтрастной системе *uv* 1960 г. Соотношение координат цветности международной системы *xy* с координатами в системе *uv* определяются следующими уравнениями:

$$\begin{cases} u = \dfrac{4x}{-2x + 12y + 3}; \\ v = \dfrac{6y}{-2x + 12y + 3}. \end{cases} \qquad (2)$$

Цветовое различие двух образцов рассчитывалось по формуле:

$$\Delta e = \sqrt{(\Delta u)^2 + (\Delta v)^2}\ , \qquad (3)$$

где Δu, Δv – разность характеристик цветности в равноконтрастной системе экспериментальных координат светофильтров и рассчитанных для практической системы *M*1*N*1*P*1.

Анализ результатов экспериментальных исследований позволяет сделать следующие выводы:

- абсолютная погрешность координат цветности не превосходит 0,01;

- точность измерений является приемлемой. Максимальная разница между экспериментально определенным $\Delta e_{\text{эксп.}}$ и расчитанным $\Delta e_{\text{расч.}}$ цветовыми различиями для светофильтров не превышает 0,006, среднее арифметическое составило 0,004;

- для снижения погрешности измерения цветовых параметров указанных образцов при фиксированном наборе необходимо подбирать матрицу с минимальным суммарным шумом, либо, как это делается в большинстве современных матриц, использовать программу шумоподавления;

- лучшие результаты получены для сине-зеленых и зеленых светофильтров, что и было целью разработки;

- цифровые колориметры лучше настраивать по насыщенности исследуемых светофильтров. Для светофильтров малой насыщенности следует использовать ослабляющие светофильтры, а для насыщенных – усилители сигнала. Это позволит получить более достоверный результат измерений без перенасыщения ячеек и ослабления сигнала, соответственно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные итоги диссертационного исследования, обобщающие выводы и результаты заключаются в следующем:

1. Цель диссертации достигнута – разработаны и исследованы новые оптико-электронные системы цветоделения на основе пленочных светофильтров и многослойной структуры полупроводника для матричных фотоприемников.

2. Выполнен аналитический обзор литературных и патентных источников систем цветоделения и средств регистрации цвета на основе матричных фотоприемников, в результате которого установлены перспективные направления их усовершенствования за счет использования различных комбинаций пленочных светофильтров и тонких пленок полупроводника.

3. Впервые проведена классификация систем цветоделения для регистрации цвета на матричных фотоприемниках.

4. Разработаны различные шаблоны усовершенствованной системы цветоделения на основе тонких пленок полупроводника, позволяющие улучшить цветопередачу в области зеленых и сине-зеленых оттенков, расширить дренажную систему матрицы и упростить оптическую функцию передачи модуляции интерполяции цвета.

5. Разработаны различные шаблоны усовершенствованной системы цветоделения на основе пленочных светофильтров, которые улучшают не только яркостную, но и цветовую составляющую изображения (цветность) за счет применения характеристик колориметрической системы МКО *XYZ* 1931 г., ранее не применявшийся для цифровых камер.

6. Разработаны новые цветовые пространства *M1N1P1* и *M2N2P2* для усовершенствованных систем цветоделения, позволяющие увеличить тело цветового охвата и достичь адекватной цветопередачи изображения, главным образом за счет соответствия характеристики светофильтров характеристикам цветового пространства.

7. Изготовлена и испытана экспериментальная установка для исследования усовершенствованных систем цветоделения. Оптимизированы основные

параметры настройки установки. Полученные результаты экспериментальных исследований подтверждают теоретическое обоснование метода измерений.

8. Осуществлена практическая реализация усовершенствованных систем, обеспечено их внедрение на производстве в ООО «Смоленский геммологический центр». Результаты диссертационной работы были также реализованы в учебном процессе при разработке методических материалов для обучения студентов по специальности «Оптико-электронные приборы и системы».

9. По результатам исследований подана заявка на патент 2014129599/28, РФ H01L27/148 и G01J3/46 (принята к рассмотрению 18.07.2014) «Способ измерения цвета и устройство его реализующее».

10. Результаты научно-технических разработок могут быть рекомендованы для получения адекватной цветопередачи изображений с большим телом цветового охвата получаемых в светотехнике, космонавтике, аэрофотосъемке, измерительной технике, химии, медицине и т.п. В перспективе, открывается возможность создания на базе усовершенствованных систем универсального цифрового колориметра для измерения цветовых параметров любых цветных объектов, в том числе и непрозрачных, в любой колориметрической системе.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях из перечня ВАК

1. Жбанова В.Л., Мартыненко Г.В. Функции передачи модуляции интерполяции цвета модифицированных матричных фотоприемников // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 2. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. – С. 105-110.

2. Жбанова В.Л., Парвулюсов Ю.Б., Мартыненко Г.В. Системы цветоделения на основе светофильтров со спектральными характеристиками *XYZ* // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2014 – №1– С. 127-131.

3. Жбанова В.Л. Цифровая фотокамера для компактного фотоэлектрического колориметра // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2014 – №3– С.114-118.

4. Жбанова В.Л., Нюбин В.В. Метод улучшения цветопередачи цифровых фото- и видеокамер // Светотехника. – 2014 – №4 – С. 73-74.

5. Жбанова В.Л., Парвулюсов Ю.Б. Моделирование хода лучей в матричном фотоприемнике с многослойной структурой // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2014 – №4– С.108-113.

Прочие статьи, доклады и тезисы докладов на конференциях

6. Жбанова В.Л., Мартыненко Г.В. Модернизация системы цветоделения ПЗС-матрицы с многослойной структурой // Молодые светотехники России. Сб. тезисов докладов международной научн.-техн. конференции. – М.: ВИГМА, 2010. – С. 17-19.

7. Жбанова В.Л., Мартыненко Г.В. Анализ интерполяции цвета модифицированной многослойной ПЗС-матрицы // Энергетика, информатика, инновации – 2011 (ЭИИ-2011). Сб. трудов Междунар. Науч.-техн. конф. В 2 т. Секции 1,2,6. – Смоленск: РИО филиала ГОУВПО МЭИ (ТУ) в г. Смоленске, 2011. – Т. 1.– С. 189-193.

8. Жбанова В.Л., Мартыненко Г.В. Новые колориметрические системы для матриц цифровых фотокамер // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых, Выпуск 2. – СПб: НИУ ИТМО, 2012. – С.89-90.

9. Жбанова В.Л. Описание функций передачи модуляции модифицированных многослойных матриц // X Всероссийский молодежный Самарский конкурс-конференция научных работ по оптике и лазерной физике, посвященный 90-летию со дня рождения Н.Г. Басова. – Самара, 2012. – С. 51-57.

10. Жбанова В.Л., Мартыненко Г.В. Показатели шумовой характеристики матриц цифровых фотокамер // Инновационное развитие образования, науки и технологий: Тезисы докладов 3-й Всероссийск. науч.-технич. конференции. В 2 ч. Ч. I. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. – С. 172-175.

11. Жбанова В.Л. Методика определения шумов матричных фотоприемников цифровых фотокамер // Информационные технологии, энергетика и экономика. Сб. трудов 10-ой Международной научн.-техн. конф. студентов и аспирантов. В 3 т.– Смоленск: Универсум, 2013 – Т.2. – С. 18-23.

12. Жбанова В.Л. Измерение цветности на основе цифровой камеры // Молодые светотехники России. Сб. тезисов докладов научн.-техн. конференции. – М.: ВИГМА, 2014. – С. 57-58.