

ФУНД
НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ
На правах рукописи

СОКОЛОВ Кирилл Сергеевич

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЦВЕТНЫХ ПРОЕКТОРОВ
С ПОВЫШЕННОЙ СВЕТОВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ
НА БАЗЕ МИКРОДИСПЛЕЕВ**

05.11.07 – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва 2006

Работа выполнена на кафедре «Лазерные и оптико-электронные системы» Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Рожков Олег Владимирович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Спиридонов Игорь Николаевич;
кандидат технических наук, с.н.с.
Тимашов Анатолий Петрович

Ведущая организация: **ГУП «Научно-исследовательский
кинофотоинститут», г. Москва**

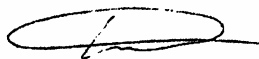
Защита состоится " 1 " марта 2006 г. в 12 часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.19 в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу:
105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Автореферат разослан " 1 " февраля 2006 г.

Ваш отзыв в одном экземпляре, заверенный печатью организации, просьба направлять по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, МГТУ им. Н.Э. Баумана, диссертационный совет Д 212.141.19.

Учёный секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук



Бурый Е.В.

Актуальность работы

С развитием высоких технологий и широким использованием компьютеров в современном обществе, а также с внедрением телевидения высокой четкости и электронного кинематографа становится необходимым применение высококачественных систем отображения информации (СОИ).

В последнее время проекционные СОИ на основе микродисплеев (МД) находят все большее распространение, поскольку обладают рядом преимуществ (главным образом – значительно меньшей стоимостью) по сравнению с альтернативными дисплеями, такими как плазменные панели или телевизоры с большой жидкокристаллической (ЖК) панелью.

В связи с постоянным повышением требований к размерам и качеству воспроизводимого изображения (разрешению, контрастности и, особенно, яркости) важным становится высокая световая эффективность проекционного дисплея (под которой понимается отношение выходного светового потока, формируемого проекционным дисплеем на экране, к полному световому потоку источника света).

Несмотря на то, что в мире было проведено большое количество исследований и разработок в области проекционных дисплеев на основе МД, задача повышения качества изображения наряду с повышением световой эффективностью по-прежнему стоит достаточно остро. В частности это связано с тем, что оптическая система проекционных дисплеев имеет целый ряд оптических элементов, точное моделирование и анализ которых весьма затруднены, и традиционные методы разработки к ним не вполне применимы.

Кроме этого в русскоязычной литературе особенности разработки проекционных СОИ на основе МД освещены явно недостаточно.

В представленной работе систематизируются существующие на настоящий момент знания, часть из которых принадлежит лично автору, в области мощных проекционных дисплеев, и разрабатывается достаточно общая методика оценки их световой эффективности. Это говорит об актуальности выполненной работы.

Цель работы

Целью диссертационной работы является исследование особенностей разработки цветного проекционного дисплея на основе МД (в частности на базе ЖК МД) и разработка методики оценки полной световой эффективности.

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1738120

Соколов К.С. Разработка и

Задачи исследования

- Исследовать ключевые элементы проекционных дисплеев, вносящие заметные световые потери.
- Провести сравнительный анализ различных оптических схем проекционных дисплеев на базе МД (одно-, двух- и трехпанельных) с целью выбора оптимального схемотехнического варианта.
- Разработать достаточно простую, но корректную методику определения полной световой эффективности проекционного дисплея.
- Исследовать возможные методы повышения световой эффективности и улучшения качества изображения проекционного дисплея на основе полученных результатов.
- Разработать достаточно простой, но точный метод моделирования дуги газоразрядной лампы.
- Разработать схемы осветителя и проекционного объектива с повышенными оптическими характеристиками.

Методы исследования

- Метод модифицированного обратного преобразования Абеля (ОПА) для моделирования дуги разрядной лампы.
- Методы лучевой геометрической оптики для расчета хода лучей через различные оптические элементы проекционного дисплея.
- Аналитический метод расчета колориметрических характеристик цветоформирующей системы.
- Математический аппарат и численные методы оптимизации.

Научная новизна работы

- Разработана сравнительно простая, но достаточно корректная методика оценки световой эффективности проекционного дисплея, апробированная на многочисленных примерах расчета отдельных компонентов и проекционного дисплея в целом.
- Предложена и защищена авторским свидетельством оригинальная схема высокоэффективного осветителя с использованием контротражателя.
- Разработана методика компьютерного моделирования проекционного дисплея на базе МД различных типов.

Практическая ценность работы

Методики, предложенные в работе, а также теоретические результаты могут быть использованы для ускоренной разработки и создания проекционного дисплея с высокими световой эффективностью и показателями

качества изображения. Кроме этого, методики и результаты моделирования отдельных элементов (таких, как разрядная дуга, световые интеграторы для создания равномерного освещения, системы преобразования поляризации) могут быть также применены для создания высокоэффективных осветительных систем, используемых в фотолитографии, спектроскопии и т.п.

Внедрение результатов диссертационной работы

Разработанная в диссертационной работе методика проектирования высокоэффективной проекционной системы использована при создании прототипа проекционного телевизора в компании «Samsung Electronics Co.», а также используется в учебном процессе кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы» МГТУ им. Баумана; методика разработки проекционного объектива внедрена в ООО «АР Технологические исследования», г. Москва. Внедрение и использование результатов диссертационной работы подтверждаются соответствующими актами.

Апробация работы и публикации

Основные результаты работы докладывались на международной конференции SPIE «49th International Symposium on Optical Science and Technology» (2-6 August 2004, Denver, Colorado, USA).

По теме исследований, проведенных автором, опубликовано 3 статьи [1-3] и подано две заявки на изобретение [4,5].

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, двух приложений и списка литературы из 116 наименований, изложена на 285 страницах машинописного текста, содержит 175 рисунков, 14 таблиц.

Основные положения и результаты работы, выносимые на защиту

1. Метод оценки световой эффективности проекционного дисплея на основе концепции этандю и графика коллективной эффективности осветителя позволяет оценить величину полезного потока для определенной конфигурации проекционного дисплея с учетом типа МД и их количества.
2. Применение метода модифицированного обратного преобразования Абеля позволяет достаточно быстро и точно смоделировать светотехнические характеристики дуги газоразрядной лампы для дальнейшего использования в известных САПР ОС.
3. Оригинальная схема осветителя с использованием эллиптического отражателя и плоского контротражателя позволяет на практике повысить световую эффективность (~8%) проекционного дисплея на базе МД с

малыми размерами (диагональ $\sim 0.5''$), имеющего невысокое ($< 8 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{ср}$) значение этандю.

4. Методика анализа повторного прохождения света через разрядную дугу при использовании контротражателя с помощью трассировки лучей в стандартных САПР ОС позволяет оценить в первом приближении дополнительную нагрузку на лампу и оптимизировать конструкцию контротражателя.
5. Методика колориметрического анализа изображения проекционного дисплея, позволяющая оценить цветовую эффективность светоделительной системы и рассчитать оптимальные спектральные характеристики светоделительных элементов для обеспечения наилучшей цветопередачи при использовании металлогалогенной или ксеноновой ламп в качестве источника света.
6. Системный подход к разработке проекционного объектива (ПО) с большим задним фокальным отрезком, облегчающий его предварительную компоновку, расчет и последующую оптимизацию согласно заданным критериям качества, а также с учетом термооптических aberrаций и влияния паразитных отражений от оптических покрытий ПО.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование актуальности проблемы, сформулированы цель и задачи работы.

Проведен обзор современных проекционных дисплеев: рассмотрены текущее состояние и тенденции развития, определены основные требования к проекционным дисплеям в зависимости от сегмента рынка (домашний кинотеатр, электронный кинематограф, бизнес-презентации), рассмотрены основные типы МД и их ключевые характеристики, а также проведен сравнительный анализ световой эффективности проекционных дисплеев на основе МД отражательного типа с целью выбора оптимального варианта.

Выделены ключевые оптические элементы проекционного дисплея и дана общая функциональная схема, поясняющая принцип действия устройств данного класса. На рис. 1 показана функциональная схема типичного современного проекционного дисплея на базе трех МД, из которой можно выделить следующие ключевые компоненты (и, соответственно, их световые КПД), определяющие общую световую эффективность проекционного дисплея: осветительная система; цветоформирующая система; микродисплей; проекционный объектив и экран.

Рассмотрены основные факторы, влияющие на световую эффективность проекционных дисплеев, а также различные конфигурации схемотехники этих устройств в зависимости от количества МД и их типа.

В результате сравнительного анализа световой эффективности различных конфигураций проекционных дисплеев установлено, что по параметру “цена/световой поток” наилучшей коммерческой системой на основе ЖК МД отражательного типа является двухпанельная (2П) архитектура, которая по световой эффективности лишь немного уступает трехпанельной (3П), но заметно дешевле.

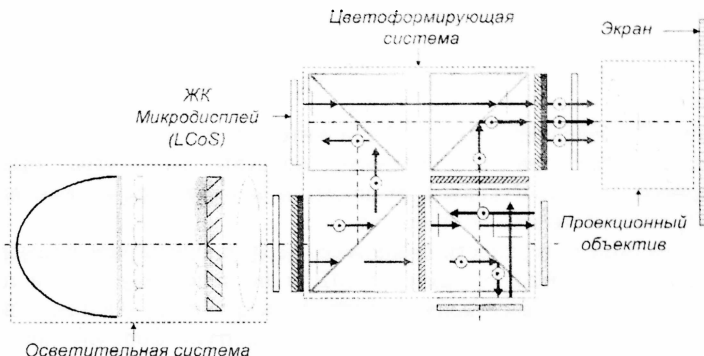


Рис. 1. Функциональная схема оптической системы проекционного дисплея на базе трех ЖК МД отражательного типа (LCoS)

Первая глава посвящена исследованию методов повышения световой эффективности осветительного блока проекционного дисплея.

Осветительный блок проекционного дисплея во многом предопределяет тот световой поток, который необходимо получить на экране с заданными размерами для комфортного восприятия изображения на экране в тех или иных условиях. Поэтому осветительный блок без преувеличения можно назвать ключевым. Как правило, он включает в себя такие оптические компоненты как осветитель с лампой, интегратор, формирующую оптику, а часто и систему преобразования поляризации.

Рассмотрены особенности оптического моделирования разрядной дуги лампы как ключевого фактора при оценке световой эффективности проекционной системы.

Показана фундаментальная роль этандю как основного параметра, влияющего на эффективность использования светового потока от источника света в проекционных дисплеях, и предложен метод предварительной оценки

световой эффективности проекционного дисплея на основе концепции этандю и графика коллективной (от англ. «collect» – собирать) эффективности. График коллективной эффективности представляет собой зависимость полезного светового потока от этандю, который строится по результатам измерения интегрального светового потока в зависимости от площади формируемого осветителем светового пятна.

Этандю («оптический инвариант» или «геометрический фактор») – это оптический параметр, связанный с угловой расходимостью и площадью поперечного сечения пучка (и не связанный с абсолютными энергетическими величинами, например, – интенсивностью), который в общем случае описывается следующей формулой:

$$E_{\Omega} = \iint_{\Omega A} \cos(\theta) dA d\Omega, \quad (1)$$

где этандю E вычисляется как двойной интеграл по площади A в пределах пространственного угла Ω (светового конуса); θ – угол отклонения элементарного светового конуса от нормали к поверхности. Как видно из формулы, размерность этандю $\text{м}^2 \cdot \text{стерад}$.

Для плоской поверхности (например, МД), проинтегрировав выражение (1) по площади в пределах размеров МД и по телесному углу в пределах воспринимаемого светового конуса с углом раскрытия $\theta_{1/2}$, а также допуская нормальное падение света, получим общепринятую формулу для оценки этандю:

$$E_{\Omega} = \pi A \sin^2(\theta_{1/2}) \sim \frac{\pi A}{4} \left(\frac{D}{f'} \right)^2, \quad (2)$$

где A – площадь оптической поверхности (в данном случае – площадь МД); $\theta_{1/2}$ – угол раскрытия светового конуса; (D/f') – относительное отверстие.

Сохранение этандю в проекционной системе является главным критерием ее высокой световой эффективности. Так, если в системе N оптических компонентов и минимальное этандю у МД ($E_{\text{МД}}$), то для обеспечения высокой эффективности проекционной системы должно выполняться условие: $E_{\text{SRC}} \leq E_1 \leq E_2 \leq \dots \leq E_N \leq E_{\text{МД}}$, где E_{SRC} – этандю источника света.

Самые жесткие требования относительно этандю накладываются на осветитель (источник света с отражателем), в качестве которого в современных проекционных системах обычно используются электродные газоразрядные металлогалоидные (МГ) или ксеноновые (КС) лампы с параболическим или эллиптическим отражателем (ПО или ЭО).

С помощью аналитически полученной формулы показано, что этандю лампы с отражателем определяется главным образом размером разрядной дуги (или межэлектродным расстоянием, МЭР) лампы.

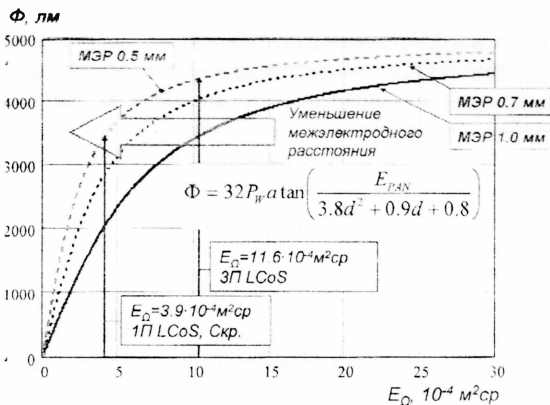


Рис. 2. Типичный график коллективной эффективности для оценки полезного светового потока Φ в зависимости от этандю E_Q на примере МГ лампы UHP фирмы Philips

На рис. 2 показан график коллективной эффективности, отражающий зависимость светового потока от величины этандю на примере МГ лампы фирмы Philips. По этому графику можно легко найти величину светового потока для определенного значения этандю, определяемого характеристиками МД (его площадью и углом раскрытия воспринимаемого светового конуса).

Детально изучены особенности профиля

газоразрядной дуги и ее пространственно-углового распределения излучения, установлено, что:

- пространственно-угловое распределение дуги обладает ярко выраженной неравномерностью;
- отсутствие симметрии вращения затрудняет выбор опорного профиля при корректном моделировании;
- профили дуги сильно меняются от производителя к производителю;
- профили дуги заметно различаются для основных RGB цветов;
- профиль дуги меняется со временем из-за деградации («выгорания» электродов) – размер дуги увеличивается.

Показано, что в процессе разработки проекционного дисплея моделирование источника света имеет первостепенное значение, так как это необходимо для правильной оценки его ключевых характеристик – световой эффективности, равномерности освещенности, цветопередачи и др. (особенно в случае недоступности данных от производителя).

Поскольку универсального способа моделирования разрядной дуги до сих пор нет, принимаются определенные допущения и приближения при создании модели дуги в зависимости от поставленных задач.

Рассмотрены и проанализированы основные методы моделирования, которые используются на сегодняшний день в САПР ОС, а именно:

1. аппроксимация дуги множеством поверхностных излучателей;
2. аппроксимация дуги множеством объемных излучателей;
3. восстановление пространственно-углового распределения излучения дуги по двумерному распределению освещенности на ПЗС-матрице с помощью обратного преобразования Абеля;
4. «лучевая модель» из каталога ProSource™, полученная путем измерения на специализированном гониометре компании Radiant Imaging.

В соответствии с первым методом поверхностный излучатель представляет собой поверхность цилиндрической, сферической, кубической или эллипсоидальной формы, состоящего из множества изотропных точечных источников света.

Во втором случае объемный излучатель представляет собой множество изотропных точечных источников, ограниченных объемом примитивной формы (сфероид, эллипсоид, куб, стержень и т.п.).

Первые два метода моделирования разрядной дуги слишком трудоемки и недостаточно точны.

«Лучевая модель» источника света является самой точной на сегодняшний день, так как построена по экспериментально полученным данным; причем она учитывает все детали механической структуры конкретного источника света: колбы, электродов и т.п. Такая модель источника представляет собой файл данных, содержащий его изображения (полученные с помощью ПЗС-камеры) с различных ракурсов, а также данные о его пространственно-угловом распределении яркости. Для получения изображения источника с различных ракурсов в пределах всей окружающей его сферы используется гониометр особой конструкции. Изображения источника света со всех ракурсов объединяются и обрабатываются с целью получения данных о пространственно-угловом распределении яркости в виде набора лучей, которые описываются семью параметрами: тремя координатами xyz , тремя направляющими косинусами и относительным весовым коэффициентом интенсивности.

Поскольку, как указывалось выше, «лучевая модель» не всегда доступна для оптика-разработчика, то для моделирования разрядной дуги был выбран метод восстановления пространственно-углового распределения излучения дуги по двумерному распределению освещенности на ПЗС-матрице с помощью обратного преобразования Абеля.

Рассмотрены основные особенности алгоритма восстановления асимметричного пространственно-углового распределения яркости дуги методом модифицированного ОПА, который применяется, например, в САПР ОС ASAP™ и LightTools™.

ОПА обычно используется для вычисления плотности потока спроецированного изображения. Набор двумерных распределений освещенности преобразуется в объемный излучатель. Поскольку ОПА применимо только для объектов, имеющих симметрию вращения, то для асимметричных объектов, к которым относится разрядная дуга, было применено модифицированное ОПА с разбиением на конечное множество подобластей с допущением их симметрии вращения.

В рамках САПР ОС ASAPTTM проведен сравнительный анализ точности моделирования разрядной дуги методом модифицированного ОПА и методом построения «лучевой модели», полученной с помощью вышеуказанного специализированного гониометра.

Для конечной проверки результатов моделирования использовался график коллективной эффективности, который строился по результатам экспериментального измерения интегрального светового потока в зависимости от диаметра апертурной диафрагмы.

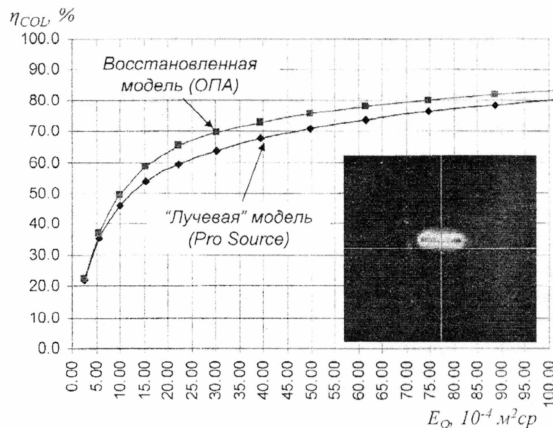


Рис. 3. Коллективная эффективность для разрядной дуги, смоделированной методом модифицированного ОПА

в среднем не превышает 5%) и может быть успешно применен на практике при разработке проекционного дисплея и анализа его ключевых характеристик (световой эффективности, равномерности освещенности, цветопередачи и др.).

Рассмотрены основные типы отражателей, используемых в проекционных дисплеях. Особенное внимание уделено применению контротражателей с базовыми типами отражателей как эффективному средству повышения световой

Построенные графики коллективной эффективности $\eta_{\text{кол}}$ от этандю E_d для двух рассматриваемых методов моделирования разрядной дуги (см. рис. 3) свидетельствуют о том, что выбранный метод восстановления пространственно-углового распределения излучения дуги по двумерному распределению освещенности на ПЗС-матрице с помощью ОПА достаточно точен (разность результатов носит систематический характер и в

эффективности осветителей. Показано, что контротражатель позволяет повысить коллективную эффективность осветителя за счет уменьшения этандю.

Разработана [3] и запатентована оригинальная схема осветителя с использованием эллиптического отражателя (ЭО) и плоского контротражателя (ПКО).

Создана методика для анализа повторного прохождения света через разрядную дугу (на примере САПР ОС ASAP™). С ее помощью проведено исследование двух различных схем использования ЭО (как основного) с двумя различными контротражателями: сферическим и плоским (СКО и ПКО). При моделировании и анализе результатов использованы упрощающие допущения.

В качестве основных показателей эффективности двух разных осветителей выбраны эффективность прохождения светового потока через апертуру переменного диаметра (коллективная эффективность η_{COL}) и дополнительная нагрузка на лампу из-за использования контротражателя в относительных единицах светового потока. Построены графики зависимости коллективной эффективности η_{COL} от этандю E_Q , а также графики относительного повышения эффективности и дополнительной нагрузки на лампу из-за наличия контротражателя. Результаты исследования показаны на рис. 4, из которого видно, что при учете реального коэффициента пропускания плазмы ($\tau_{плазмы}=0.7$) ЭО с СКО более эффективен для малых величин этандю ($<8 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \text{ ср}$), а ЭО с ПКО более эффективен для больших величин этандю ($>8 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \text{ ср}$).

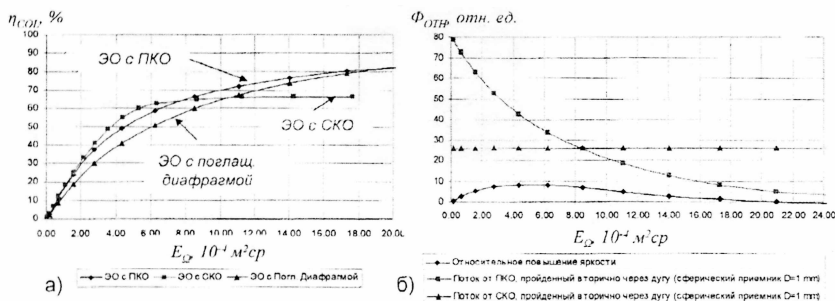


Рис. 4. Результаты анализа световой эффективности осветителя с контротражателями; ЭО с ПКО и СКО при $\tau_{плазмы}=0.7$: а) зависимость коллективной эффективности η_{COL} от этандю E_Q ; б) оценка дополнительной нагрузки на лампу

Рассмотрены особенности применения световых интеграторов, обеспечивающих квазиравномерное освещение на экране (неравномерность $<10\%$): многолинзового (МЛИ) и стержнеобразного (СИ) [1, 2].

Проведен анализ равномерности освещенности с использованием вышеупомянутых интеграторов с помощью САПР оптических систем Code V™. Равномерность освещенности оценивалась по девяти зонам, что является стандартной процедурой для проекционных устройств. Для каждой зоны рассчитано процентное отношение суммарной освещенности в данной зоне к освещенности в центральной зоне.

Установлено, что:

- пять линз в столбце (5x5 в массиве) уже обеспечивают довольно высокую равномерность освещения (лучше 90%);
- пирамидальные СИ обеспечивают более высокую равномерность освещения по сравнению с обычным СИ той же длины;
- СИ с прямоугольным и шестиугольным поперечным сечением обеспечивают хорошую равномерность освещения при необходимой длине;
- СИ с круглым поперечным сечением не обеспечивает равномерного освещения в выходной плоскости независимо от длины интегратора, апертуры и размеров источника света;
- выявлено, что все формы, которые сохраняют «мозаичность», т.е. объединение нескольких СИ с одной и той же формой поперечного сечения по периметру одного из них (грань к грани без зазоров), обеспечивают хорошую равномерность.

Вторая глава работы посвящена исследованию методов повышения световой эффективности светоделительных элементов, входящих в состав цветоформирующей системы (ЦФС) проекционного дисплея (см. рис. 1).

Системы цветоразделения и цветорекомбинации не только существенно влияют на световую эффективность проекционной системы и ее контраст, но и определяют качество формируемого цветного изображения, которое оценивается цветовой равномерностью, цветовым охватом и формируемой цветовой температурой $T_{цв}$, а также цветовыми координатами так называемой «белой точки» (x_w, y_w).

Учитывая, что на сегодняшний день практически все источники света, применяемые в коммерчески доступных проекционных дисплеях, излучают естественно поляризованный свет, необходимо преобразовать этот естественно поляризованный свет, например, в линейно поляризованный свет; иначе изображение на экране будет недостаточно четким. Поэтому во всех высокоэффективных проекционных системах на основе МД, чувствительных к состоянию поляризации, применяется система преобразования поляризации (СПП).

Рассмотрены различные типы СПП и их принципы действия.

Проанализированы основные причины ухудшения контраста изображения в проекционных дисплеях на базе ЖК МД: падение контраста из-за различных наклонных оптических покрытий (таких как поляризационные, дихроичные, просветляющие), а также из-за термических и механических нагрузок.

Под контрастом обычно понимается отношение интенсивности света, отраженного от ЖК МД в так называемом «темном» (или «черном», от англ. “black” state) режиме, когда нет модуляции по состоянию поляризации, к интенсивности промодулированного света, т.е. света, отраженного от ЖК МД в так называемом «светлом» режиме I_{bright} .

В проекционных системах на основе ЖК МД отражательного типа для разделения светового потока осветительной системы и промодулированного светового потока изображающей системы используется поляризационный светоделитель (ПСД) типа призмы МакНила; его диагональная грань (под 45°) с поляризационным покрытием отражает s-поляризованный свет и пропускает p-поляризованный свет.

Поскольку призма МакНила используется как поляризатор и анализатор одновременно, то ее поляризационные свойства сильно влияют на контраст системы, а также равномерность освещения и цветовую равномерность. Так, для наклонных пучков лучей эффект деполяризации становится очень заметным и значительно снижает контраст (для $D/f=1/2.5$ контраст падает до 90:1).

Исследованы наиболее эффективные методы повышения контраста.

Разработана подробная классификация типов цветоформирующих систем (ЦФС), применяемых в современных проекционных дисплеях с одним, двумя и тремя МД. Исследованы особенности построения полной колориметрической модели проекционной системы и проведена оценка цветовой эффективности (ЦЭФ) η_{COLOR} с учетом цветовой коррекции.

ЦЭФ является одной из составляющих общей световой эффективности проекционного дисплея и учитывает все спектральные преобразования (начиная от лампы и заканчивая проекционным экраном), происходящие в каждом из основных цветовых каналов (RGB): синем, зеленом и красном. Отмечено, что конечным приемником излучения и анализатором цвета является человеческий глаз, спектральные характеристики которого также учитываются при расчете. ЦЭФ η_{COLOR} определяется двумя компонентами: эффективностью цветоразделения (ЭЦР) η_s и эффективностью цветовой коррекции (ЭЦК) η_{cc} .

ЭЦР η_s описывает эффективность, с которой световой поток разделяется на три потока, соответствующих красному, зеленому и синему цветам.

ЭЦК η_{cc} учитывает потери, связанные с получением выходного потока, который соответствует требуемой «белой точке» на цветовой диаграмме (локусе цветов) с необходимыми цветовыми координатами.

На практике всегда требуется «урезать» определенную часть света в одном из трех цветовых каналов, что неизбежно ведет к уменьшению суммарного светового потока. Поэтому при выборе координат «белой точки» важно найти оптимум между световой эффективностью проекционного дисплея и его цветопередачей.

Цветовая коррекция рассматривалась только для аддитивного способа получения цветов. Проведен колориметрический расчет для обоснованного выбора длин волн среза (ДВС) каждого дихроичного светоделителя (ДС). Проведен колориметрический анализ проекционной системы для двух основных типов ламп: металлогалоидной (МГ) и ксеноновой (КС). Исследовано влияние выбора цветовых координат «белой точки» на ЭЦК, а также даны сравнительные характеристики цветового охвата и ЭЦК, обеспечиваемые этими двумя наиболее эффективными источниками света. В соответствии с методикой колориметрического расчета получены координаты нескорректированной «белой точки» для МГ и КС ламп, а также значения ЦЭФ, включающей ЭЦК и ЭЦР, для различных цветовых температур. Рассчитанные данные сведены в таблицы, по которым построены соответствующие графики (см. рис. 5а,б).

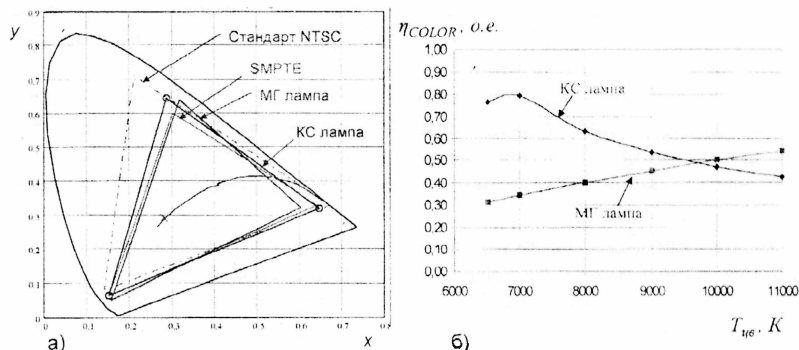


Рис. 5. Результат колориметрического расчета для МГ и КС ламп:

а) оптимальный цветовой охват с учетом цветовой коррекции ($T_{цв.кор}=10000K$); б) зависимость цветовой эффективности (ЦЭФ) η_{COLOR} от

Выявлено, что для МГ лампы красный цвет недостаточно насыщен, независимо от выбора ДС и их спектрального пропускания. Для КС лампы, напротив, обеспечивается полноценная цветопередача («красный» достаточно насыщен) и, более того, можно также получить более насыщенные (чем требуется стандартом SMPTE) зеленые и синие цвета путем выбора ДВС соответствующих ДС.

Третья глава посвящена особенностям расчета и исследованию методов повышения качества, а также световой эффективности проекционного объектива (ПО).

Выделены основные этапы разработки ПО, включающие: 1) постановку технического задания и спецификаций, а также выбор критерия качества изображения; 2) выбор типа; 3) предварительный дизайн (выбор объектива со сходными параметрами из патентной базы или расчет идеальной системы с определением оптической силы каждой группы); 4) задание оптимизационной функции; 5) оптимизацию; 6) анализ результатов и 7) принятие решения о новом оптимизационном цикле с коррекцией параметров оптимизационной функции или завершение расчета.

В процессе расчета и оптимизации ПО основными критериями качества обычно принято считать модуляционную передаточную функцию (МПФ) для требуемого разрешения и дисторсию. Для быстрого анализа качества изображения проекционного объектива в САПР OC Zemax™, например, удобно использовать спот-диаграмму, график дисторсии (или дисторсионную сетку), а также график полихроматической МПФ.

Рассмотрены особенности расчета ПО с большим ($>2f$) задним фокальным отрезком, необходимым для размещения светоделительных элементов, например, ПСД МакНилла.

Проанализированы основные методы компенсации аберраций, вносимых светоделительными плоскопараллельными пластинками в сходящемся пучке лучей, а также методы компенсации дисторсии и трапецеидальных искажений при внеосевом дизайне ПО, обеспечивающем предельное уменьшение глубины корпуса проекционного телевизора.

Развита методика проектирования ПО данного класса, учитывающая особенности схемотехники, габаритного расчета и аберрационной коррекции.

В рамках этой методики разработан оригинальный 9-ти линзовый объектив для проекционного телевизора с размером диагонали экрана 60", обеспечивающий разрешение на экране 1280x720 пикселей, с высокой ЧКХ (минимальное значение полихроматической МПФ при пространственной частоте 0.5 лин/мм на экране достигает 50%); при этом величина дисторсии $<0.2\%$. Объектив адаптирован для диапазона рабочих температур от 0° до 60°C. Разработанный ПО позволяет уменьшить глубину проекционного телевизора до 415 мм (что примерно в 3.6 раза меньше диагонали экрана, 1500 мм).

Проведен термооптический анализ разработанного объектива, а также дана количественная оценка дифференциального влияния «призраков» на качество изображения разработанного проекционного объектива. Результаты приведены на рис. 6.

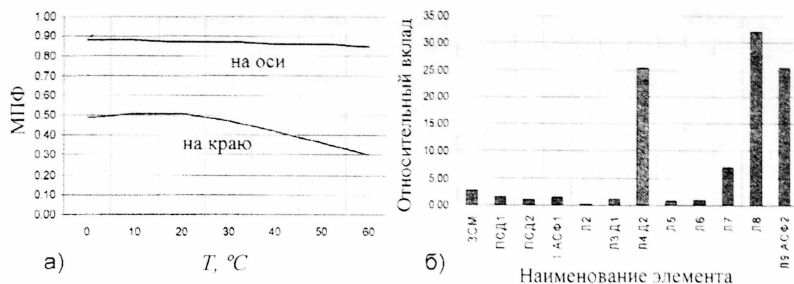


Рис. 6. Температурная зависимость МПФ разработанного ПО для частоты 0.5 лин/мм на экране (а) и покомпонентный вклад «призраков» в проецируемое изображение (б)

В заключении дается краткая характеристика предложенных методов оценки эффективности проекционного дисплея и подведены итоги по диссертации в целом.

1. Исследованы возможные методы и пути повышения световой эффективности и улучшения качества изображения проекционного дисплея на основе МД. Разработана методика проектирования высококачественного проекционного дисплея с повышенной световой эффективностью (в частности – на базе ЖК МД отражательного типа).
2. Детально рассмотрены основные компоненты проекционных дисплеев, вносящие заметные световые потери, что позволяет адекватно оценить световую эффективность проекционного дисплея и выбрать соответствующий источник излучения, исходя из требуемого светового потока на экране.
3. Предложен метод предварительной оценки световой эффективности проекционного дисплея на основе концепции «этан্দю» и графика коллективной эффективности осветителя, позволяющий оценить величину полезного потока для конкретной оптической системы.
4. Проведен сравнительный анализ моделирования разрядной дуги в САПР ОС ASAP™ методом модифицированного ОПА и методом построения «лучевой модели». Показано, что метод модифицированного ОПА позволяет довольно точно смоделировать дугу газоразрядной лампы для дальнейшего использования в известных САПР ОС: расхождение результатов составляет менее 5%).
5. Предложена и запатентована оригинальная схема осветителя с использованием ЭО и плоского контротражателя, позволяющего на практике повысить световую эффективность (~8%) проекционного дисплея

на базе МД с малыми размерами (диагональ $<0.5''$), имеющего сравнительно невысокое (от $8 \cdot 10^{-4}$ м·ср и выше) значение этандю.

6. Разработана методика анализа повторного прохождения света через разрядную дугу при использовании контротражателя (на примере САПР ОС ASAP™), позволяющая с помощью трассировки лучей оценить дополнительную нагрузку на газоразрядную лампу.
7. Рассмотрены особенности применения МЛИ и СИ, обеспечивающих равномерное освещение на экране. Показано, что в зависимости от конфигурации проекционного дисплея использование таких интеграторов позволяет получить очень высокую равномерность освещения на экране (неравномерность $<10\%$) с минимальными затратами технических средств.
8. Проведен колориметрический анализ проекционной системы для МГ и КС лампы; исследовано влияние выбора цветовых координат «белой точки» на эффективность цветовой коррекции. Показано, что выбор длины волны среза (ДВС) для трех основных ДС (синего, зеленого и красного) существенно влияет на цветопередачу проекционной системы.
9. Разработан оригинальный термостабильный 9-ти линзовый проекционный объектив для проекционного телевизора с размером диагонали экрана $60''$ ($2\omega=86^\circ$, $D/f=1/2.5$), обеспечивающий разрешение на экране 1280×720 пикселей, с высокой контрастной характеристикой; оценено поэлементное влияние «призраков» на качество воспроизводимого изображения

Список публикаций по теме диссертационной работы

1. Рожков О. В., Соколов К. С. Особенности использования линзовых растров в качестве световых интеграторов в высокоэффективных проекционных системах // Вестник МГТУ. Приборостроение. - 2003. - №4 (54). - С. 36-53.
2. Рожков О. В., Соколов К. С. Особенности использования стержнеобразных интеграторов в высокоэффективных компактных проекционных системах с высокой световой эффективностью // Вестник МГТУ. Приборостроение. - 2004. - №1 (54). - С. 113-123.
3. Kim D.S., Sokolov K., Cho K.H., No J.H. Etendue efficient illuminator with a retro-reflecting aperture // Proc. of SPIE. - 2004. - Vol. 5529. - P. 27-34.
4. Patent application #20030090632 (USA). Illumination system and projection system adopting the same / Kim Sung-Ha, Sokolov Kirill. - 2003.
5. Patent application #20040057019 (USA). Color switching projection apparatus with two liquid crystal panels / Sokolov Kirill. - 2004.

Подписано к печати 01.02.2006 г. Зак. 48 Объем 1.0 п.л. Тир. 100 экз.
Типография МГТУ им. Н. Э. Баумана.